

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE

**PRZEMYSŁAW ŁOPATO**

**Detekcja i identyfikacja defektów  
struktur dielektrycznych i kompozytowych  
z wykorzystaniem fal elektromagnetycznych  
w zakresie terahercowym**

Szczecin 2018

Recenzenci

BOGUSŁAW BUTRYŁO

KRZYSZTOF POLAKOWSKI

Opracowanie redakcyjne

ALICJA BERNER

Wydano za zgodą

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

Badania częściowo sfinansowane przez:

Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu nr N510 538039 pt. „Badania nieniszczące materiałów kompozytowych falami elektromagnetycznymi w paśmie częstotliwości terahercowych”

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach grantu nr N R01 0037 06/2000 pt. „Inteligentny system analizy radiogramów”

oraz

Komisję Europejską w ramach 7 programu ramowego – projekt nr PIRSES-GA-2010-269202 pt. „HEMOW – Health Monitoring of Offshore Wind Farms”

ISBN 978-83-7663-249-0

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

al. Piastów 48, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 47 60, e-mail: [wydawnictwo@zut.edu.pl](mailto:wydawnictwo@zut.edu.pl)

Druk PPH „Zapół” Sobczyk Sp.j., al. Piastów 42, 70-310 Szczecin

## Spis treści

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń .....                                                                                | 5  |
| Podziękowania .....                                                                                              | 7  |
| 1. Wstęp .....                                                                                                   | 9  |
| 2. Badania nieniszczące materiałów dielektrycznych i kompozytowych .....                                         | 13 |
| 2.1. Materiały kompozytowe i ich defekty .....                                                                   | 13 |
| 2.2. Metody badań nieniszczących stosowane do badania materiałów dielektrycznych i kompozytów polimerowych ..... | 15 |
| 3. Badania nieniszczące metodą terahercową .....                                                                 | 19 |
| 3.1. Metoda terahercowa .....                                                                                    | 19 |
| 3.2. System pomiarowy wykorzystywany w badaniach .....                                                           | 29 |
| 3.3. Sygnały występujące w badaniach TDS .....                                                                   | 32 |
| 3.4. Modelowanie numeryczne terahercowych układów pomiarowych .....                                              | 33 |
| 3.4.1. Matematyczny opis problemu .....                                                                          | 33 |
| 3.4.2. Modelowanie metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu .....                                            | 34 |
| 3.4.3. Model FDTD układu inspekcji terahercowej pracującego w konfiguracji odbiciowej .....                      | 37 |
| 4. Detekcja defektów w materiałach dielektrycznych i kompozytowych .....                                         | 41 |
| 4.1. Algorytmy przetwarzania sygnałów i detekcji defektów .....                                                  | 41 |
| 4.2. Wykorzystanie transformacji czasowo-częstotliwościowych .....                                               | 43 |
| 4.2.1. Reprezentacja czasowo-częstotliwościowa .....                                                             | 43 |
| 4.2.2. Inspekcja kompozytów przekładkowych z wykorzystaniem transformacji czasowo-częstotliwościowych .....      | 45 |
| 4.2.3. Badanie struktur przewodzących fale z wykorzystaniem transformacji czasowo-częstotliwościowych .....      | 48 |
| 4.3. Wykorzystanie syntetycznej apertury skupiającej .....                                                       | 53 |
| 4.3.1. Podstawowy algorytm SAFT .....                                                                            | 53 |
| 4.3.2. Metoda wykorzystująca przekształcenia czasowo-częstotliwościowe TFD-SAFT .....                            | 60 |
| 4.4. Algorytm <i>time reversal</i> .....                                                                         | 62 |
| 5. Identyfikacja stanu struktury materiałów kompozytowych .....                                                  | 69 |
| 5.1. Automatyczne rozpoznawanie defektów .....                                                                   | 69 |
| 5.2. Identyfikacja defektów w kompozycie bazaltowym za pomocą nadzorowanych sieci neuronowych .....              | 70 |
| 5.2.1. Przetwarzanie wstępne .....                                                                               | 70 |
| 5.2.2. Wyznaczanie zestawu cech .....                                                                            | 72 |
| 5.2.2.1. Cechy w dziedzinie czasu .....                                                                          | 72 |
| 5.2.2.2. Cechy w dziedzinie częstotliwości .....                                                                 | 74 |
| 5.2.2.3. Cechy wynikające z reprezentacji czasowo-częstotliwościowych .....                                      | 78 |
| 5.2.3. Określenie zbioru cech .....                                                                              | 81 |
| 5.2.4. Klasyfikacja .....                                                                                        | 83 |
| 5.2.5. Weryfikacja procesu klasyfikacji .....                                                                    | 88 |
| 5.3 Identyfikacja niejednorodności za pomocą neuronowych struktur samoorganizujących się SOM .....               | 90 |
| 5.3.1. Struktury samoorganizujące się .....                                                                      | 90 |
| 5.3.2. Identyfikacja defektów w kompozycie bazaltowym .....                                                      | 93 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. Wybrane problemy inspekcji materiałów dielektrycznych .....                  | 97  |
| 6.1. Badanie połączeń klejonych .....                                           | 97  |
| 6.2. Badanie desorpcji wilgoci .....                                            | 105 |
| 7. Tomografia terahercowa .....                                                 | 111 |
| 7.1. Podstawowe informacje .....                                                | 111 |
| 7.2. System do komputerowej tomografii terahercowej THz CT .....                | 114 |
| 7.3. Badanie materiałów dielektrycznych metodą tomografii terahercowej CT ..... | 120 |
| 7.3.1. Wiązka terahercowa .....                                                 | 120 |
| 7.3.2. Algorytm rekonstrukcji wieloparametrycznej .....                         | 126 |
| 7.3.3. Wyniki rekonstrukcji .....                                               | 134 |
| 8. Podsumowanie i wnioski .....                                                 | 139 |
| Literatura .....                                                                | 141 |
| Summary .....                                                                   | 151 |

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

|                                             |                                                                                             |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>D</b>                                    | – wektor indukcji elektrycznej                                                              |
| <b>B</b>                                    | – wektor indukcji magnetycznej                                                              |
| <b>E</b>                                    | – wektor natężenia pola elektrycznego                                                       |
| $E_x, E_y, E_z$                             | – składowe wektora natężenia pola elektrycznego w układzie współrzędnych kartezjańskich     |
| <b>H</b>                                    | – wektor natężenia pola magnetycznego                                                       |
| $H_x, H_y, H_z$                             | – składowe wektora natężenia pola magnetycznego w układzie współrzędnych kartezjańskich     |
| <b>J</b>                                    | – gęstość prądu przewodzenia                                                                |
| $\mu = \mu_0 \mu_r$                         | – przenikalność magnetyczna                                                                 |
| $\mu_0$                                     | – przenikalność magnetyczna próżni                                                          |
| $\mu_r$                                     | – przenikalność magnetyczna względna                                                        |
| $\mu_{rmax}$                                | – maksymalna występująca w modelu/problemie przenikalność magnetyczna względna              |
| $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ | – przenikalność elektryczna                                                                 |
| $\varepsilon_0$                             | – przenikalność elektryczna próżni                                                          |
| $\varepsilon_r$                             | – przenikalność elektryczna względna                                                        |
| $\varepsilon_{rmax}$                        | – maksymalna występująca w modelu/problemie przenikalność elektryczna względna              |
| $\sigma$                                    | – konduktywność                                                                             |
| $T$                                         | – współczynnik transmisji                                                                   |
| $\Gamma$                                    | – współczynnik odbicia                                                                      |
| $x, y, z$                                   | – położenie w przestrzeni                                                                   |
| $i, j, k$                                   | – położenie w siatce przestrzennej (układ kartezjański) odpowiednio dla kierunków $x, y, z$ |
| $n$                                         | – numer kroku czasowego                                                                     |
| $m$                                         | – numer częstotliwości                                                                      |
| $c_0$                                       | – prędkość propagacji fali EM w próżni                                                      |
| $\Delta x, \Delta y$                        | – długość kroku (rozmiar pojedynczej komórki obliczeniowej) w kierunku $x$ i $y$            |
| $f_{EXCmax}$                                | – maksymalna częstotliwość występująca we wzbudzeniu                                        |
| $dim$                                       | – wymiar przestrzeni                                                                        |
| $\omega$                                    | – pulsacja                                                                                  |
| $s_1(n)$                                    | – spróbkowany sygnał odniesienia                                                            |
| $s_2(n)$                                    | – spróbkowany sygnał po przejściu impulsu przez materiał badany                             |
| <b>x</b>                                    | – wektor cech                                                                               |
| <b>y</b>                                    | – wektor klas                                                                               |
| $t_D$                                       | – opóźnienie czasowe                                                                        |

W pracy przyjęto konwencję oznaczania liczb zespolonych, zgodnie z którą liczba zespolona  $z$  nie jest w żaden szczególny sposób wyróżniona, natomiast jej moduł opatrzony jest znakiem bezwzględnej wartości  $|z|$ , czyli  $z = |z| e^{j\varphi}$  [9]. Symbolem gwiazdki oznaczono wartości sprzężone ( $z^*$ ).

**Skrótowce**

|       |                                                                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AE    | – metoda emisji akustycznej (ang. Acoustic Emission)                                                       |
| ADR   | – automatyczne rozpoznawanie defektów (ang. Automated Defects Recognition)                                 |
| a.u.  | – jednostka umowna (ang. <i>arbitrary unit</i> )                                                           |
| BFRP  | – materiał kompozytowy ze wzmocnieniem w postaci włókna bazaltowego (ang. Basalt Fiber Reinforced Polymer) |
| BMU   | – zwycięski (najlepiej dopasowany) neuron przy uczeniu konkurencyjnym (ang. Best Matching Unit)            |
| BSR   | – odbicie od tylnej powierzchni materiału badanego (ang. Back Surface Reflection)                          |
| BVID  | – słabo widoczne defekty będące efektem uderzenia (ang. Barely Visible Impact Damage)                      |
| CMC   | – materiał kompozytowy z matrycą ceramiczną (ang. Ceramic Matrix Composite)                                |
| CW    | – układ z falą ciągłą (ang. Continuous Wave)                                                               |
| CWT   | – ciągła transformacja falkowa (ang. Continuous Wavelet Transform)                                         |
| DR    | – radiografia cyfrowa (ang. Digital Radiography)                                                           |
| EC    | – metoda prądów wirowych (ang. Eddy Current Testing)                                                       |
| ECT   | – elektryczna tomografia pojemnościowa (ang. Electrical Capacitance Tomography)                            |
| FD    | – dziedzina częstotliwości (ang. Frequency Domain)                                                         |
| FDTD  | – metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. Finite Differences Time Domain)                       |
| FSR   | – odbicie od przedniej powierzchni materiału badanego (ang. Front Surface Reflection)                      |
| GFRP  | – materiał kompozytowy ze wzmocnieniem w postaci włókna szklanego (ang. Glass Fiber Reinforced Polymer)    |
| IIR   | – odbicie od wewnętrznej struktury materiału badanego (ang. Internal Interface Reflection)                 |
| MFL   | – metoda magnetycznego strumienia rozproszenia (ang. Magnetic Flux Leakage)                                |
| MLANN | – wielowarstwowe sztuczne sieci neuronowe (ang. Multi Layered Artificial Neural Networks)                  |
| MMC   | – materiał kompozytowy z matrycą metalową (ang. Metallic Matrix Composite)                                 |
| NDT   | – badania nieniszczące (ang. Nondestructive Testing)                                                       |
| ONDT  | – metody optyczne badań nieniszczących (ang. Optical Non-destructive Testing)                              |
| OUT   | – badany obiekt (ang. Object Under Test)                                                                   |
| PCA   | – antena fotonoprowadząca (ang. Photo-Conductive Antenna)                                                  |
| PCA   | – analiza składników głównych (ang. Principal Component Analysis)                                          |
| PMC   | – materiał kompozytowy z matrycą polimerową (ang. Polymer Matrix Composite)                                |
| ROI   | – obszar zainteresowania (ang. Region of Interest)                                                         |
| RT    | – metoda radiograficzna (ang. Radiographic Testing)                                                        |
| SAFT  | – metoda syntetycznej apertury skupiającej (ang. Synthetic Aperture Focusing Technique)                    |
| SO    | – obiekt rozpraszający (ang. Scattering Object)                                                            |
| SOM   | – struktury samoorganizujące się (ang. Self-Organizing Maps)                                               |
| SVD   | – rozkład według wartości osobliwych (ang. Singular Value Decomposition)                                   |
| EEG   | – elektroencefalografia (ang. Electroencephalography)                                                      |
| TD    | – dziedzina czasu (ang. Time Domain)                                                                       |
| TDS   | – spektroskopia w dziedzinie czasu (ang. Time Domain Spectroscopy)                                         |
| TFD   | – rozkład czasowo-częstotliwościowy (ang. Time-Frequency Distribution)                                     |
| TRM   | – zwierciadło odwracające zależności czasowe (ang. Time Reversal Mirror)                                   |
| UT    | – technika ultradźwiękowa (ang. Ultrasonic Testing)                                                        |
| VNA   | – wektorowy analizator sieci (ang. Vector Network Analyser)                                                |
| VS    | – wirtualne źródło (ang. Virtual Source)                                                                   |

## Podziękowania

Autor pragnie serdecznie podziękować dr. hab. inż. Tomaszowi Chademu, prof. ZUT, oraz prof. zw. dr. inż. Ryszardowi Sikorze za zainteresowanie go tematyką badań nieniszczących, ze szczególnym uwzględnieniem metody terahercowej, za możliwość rozwoju i pracy badawczej w tym kierunku w ramach kierowanych przez nich grantów oraz za dyskusje naukowe i udzieloną pomoc. Podziękowania należą się również współpracownikom z Katedry Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki ZUT w Szczecinie: prof. dr. hab. inż. Stanisławowi Gratkowskiemu, dr. inż. Grzegorzowi Psujowi oraz dr. Barbarze Grochowalskiej za wsparcie w przygotowaniu niniejszej monografii oraz dr. inż. Krzysztofowi Gorącemu i dr. inż. Ryszardowi Pilawce z Instytutu Polimerów ZUT w Szczecinie za opracowanie i wytworzenie próbek badanych materiałów kompozytowych. Autor pragnie również podziękować prof. Krishnan Balasubramanian, prof. Prabhu Rajagopalowi, prof. Haitao Wangowi oraz prof. Ping Wang za opiekę, liczne wskazówki i dyskusje naukowe w trakcie odbytych staży zagranicznych. Szczególne podziękowania należą się również Recenzentom niniejszej monografii za bardzo wnikliwe recenzje oraz cenne i konstruktywne uwagi, które w dużym stopniu wpłynęły na jej ostateczną wersję.



# 1. Wstęp

W ostatnim stuleciu na całym świecie obserwowany jest dynamiczny rozwój wielu gałęzi przemysłu, co prowadzi do poprawy jakości życia współczesnego społeczeństwa, ale może być również źródłem poważnych zagrożeń. Awarie powstające w strukturach lotniczych lub instalacjach energetycznych są bardzo niekorzystne z ekonomicznego punktu widzenia oraz bardzo niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzkiego, przy czym narażone mogą być duże skupiska ludzkie. Z tych powodów niezbędne jest przeprowadzanie okresowych badań nieniszczących różnych konstrukcji.

Nowoczesne materiały kompozytowe, ze względu na swoje właściwości mechaniczne oraz odporność na korozję, są coraz częściej wykorzystywane w konstrukcjach przemysłu lotniczego, stoczniowego, samochodowego oraz w energetyce. Przykładem może być nowoczesny samolot pasażerski Boeing 787 Dreamliner, którego 50% masy stanowią kompozyty polimerowe. W przypadku wcześniejszej konstrukcji – Boeing 777 – procentowa zawartość materiałów kompozytowych nie przekraczała 12% masy. Doświadczenia koncernu Boeing z eksploatacji samolotów pasażerskich z dużą zawartością struktur kompozytowych wskazują na to, że – w porównaniu z tradycyjnymi (metalowymi strukturami) – wymagają one przynajmniej o 30% mniej zaplanowanych prac konserwacyjnych [13, 39], co wynika głównie z większej odporności na korozję. Podobna sytuacja występuje również w energetyce – łopaty turbin elektrowni wiatrowych wykonywane są z kompozytów przekładkowych. Wzrost zapotrzebowania na struktury kompozytowe oraz potrzeba ich niezawodnej pracy w coraz bardziej odpowiedzialnych zastosowaniach wymagają opracowania nowych lub rozszerzenia istniejących już metod nieniszczącego badania materiałów zarówno w fazie produkcji, jak i eksploatacji.

Do tradycyjnych i najszerzej stosowanych technik badań nieniszczących (ang. Nondestructive Testing, NDT) zaliczyć można metody: radiograficzną (ang. Radiographic Testing, RT lub ang. Digital Radiography, DR), ultradźwiękową (ang. Ultrasonic Testing, UT), wiroprawdową (ang. Eddy Current testing, EC), strumienia rozproszenia (ang. Magnetic Flux Leakage, MFL), termograficzną i emisji akustycznej. Część z nich (EC i FLM) stosowana może być tylko do badania materiałów przewodzących lub magnetycznych [18]. Pozostałe w mniejszym lub większym stopniu znajdują zastosowanie w inspekcji materiałów dielektrycznych, w tym kompozytów polimerowych ze wzmocnieniem nieprzewodzącym. Właściwości wyżej wymienionych technik (czułość, rozdzielczość, koszt, bezpieczeństwo użytkowania, obszar zastosowań) są zróżnicowane. Nie ma metody uniwersalnej, umożliwiającej rozwiązanie wszystkich problemów i uzyskanie najlepszych wyników. Dlatego też na całym świecie prowadzone są prace nad nowymi metodami badań nieniszczących oraz nad rozszerzeniem możliwości już istniejących technik.

W pracy skoncentrowano się na metodzie wykorzystującej fale elektromagnetyczne z zakresu terahercowego. W Polsce do nieniszczących badań materiałów kompozytowych wprowadził ją dr hab. inż. Tomasz Chady z Katedry Elektrotechniki Teoretycznej i Informa-

tyki, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Do jej zalet należą:

- możliwość penetracji materiałów dielektrycznych;
- stosunkowo krótka fala (rzędu 0,3 mm dla częstotliwości 1 THz) pozwalająca na wykrycie większości niebezpiecznych defektów występujących w kompozytach polimerowych;
- możliwość uzyskania informacji przestrzennej o wykrywanej niejednorodności (położenie w głąb materiału – metoda objętościowa);
- możliwość wykrycia defektów o różnym charakterze, w tym rozwarstwień, pęknięć, wnikania wilgoci czy wtrąceń innych materiałów;
- możliwość budowy automatycznych i inteligentnych systemów pomiarowych.

Technika terahercowa jest obecnie jeszcze we wstępnym etapie rozwoju, w porównaniu z technologiami, z którymi graniczy w ramach widma częstotliwościowego. Zarówno technika mikrofalowa, jak i technika optyczna działająca w zakresie podczerwieni pozwalają na uzyskanie większych mocy generatorów i detektorów o większej czułości. W związku z tym jest to jeszcze bardzo kosztowna technologia, ale wskutek dynamicznego rozwoju elektroniki półprzewodnikowej bardzo wysokich częstotliwości zaryzykować można stwierdzenie, że w najbliższej przyszłości dostępność obrazowania terahercowego wyraźnie wzrośnie.

Tematem pracy są badania nieniszczące metodą terahercową ze wzbudzeniem impulsowym. Jej celem jest opracowanie nowych praktycznych metod detekcji i identyfikacji defektów struktur dielektrycznych i kompozytowych, ze szczególnym uwzględnieniem przekształceń czasowo-częstotliwościowych, algorytmu syntetycznej apertury skupiającej, analizy wieloparametrycznej oraz sztucznych sieci neuronowych.

Na początku niniejszej monografii (w rozdziale 2) krótko przedstawiono tematykę materiałów kompozytowych i powstających w nich defektów, a także metody wykrywania tych wad. Następnie, w rozdziale trzecim, omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące metody terahercowej. Opisano system pomiarowy znajdujący się w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Przedstawiono i opracowano również model numeryczny powyższego systemu, zaimplementowany przez autora przy użyciu metody różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. Finite Differences Time Domain, FDTD). Rozdział czwarty poświęcony jest wykrywaniu defektów występujących w materiałach dielektrycznych i kompozytowych. Opracowane i rozwijane są algorytmy detekcji wykorzystujące transformacje czasowo-częstotliwościowe (ang. Time-Frequency Distributions, TFD), algorytm syntetycznej apertury skupiającej (ang. Synthetic Aperture Focusing Technique, SAFT) oraz technikę TRM (ang. Time Reversal Mirror). Tematem rozdziału piątego jest identyfikacja defektów wykrytych w materiałach kompozytowych. Wpisuje się to w ogólnoswiatową tendencję w badaniach nieniszczących, dotyczącą tworzenia systemów automatycznego rozpoznawania defektów (ang. Automated Defects Recognition, ADR). Zaproponowano optymalny zestaw cech umożliwiający identyfikację niejednorodności struktury za pomocą sztucznych sieci neuronowych trenowanych z nauczycielem (ang. *supervised learning artificial neural networks*) oraz struktur samoorganizujących się (ang. Self-Organizing Maps, SOM). W rozdziale szóstym omówiono wybrane problemy dotyczące inspekcji terahercowej różnorodnych materiałów kompozytowych – badanie połą-

czeń klejonych oraz wnikania wilgoci. W rozdziale siódmym przedstawiono również zbudowany przez autora system czasowej tomografii terahercowej i wyniki inspekcji fantomów dielektrycznych.

Prace nad większością materiału przedstawionego w niniejszej monografii wykonane zostały w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie w ramach:

- grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N510 538039 pt. „Badania nieniszczące materiałów kompozytowych falami elektromagnetycznymi w paśmie częstotliwości terahercowych” (dyscyplina: elektrotechnika), kierowanego przez dr. hab. inż. Tomasza Chadego, prof. ZUT;
- grantu Komisji Europejskiej (7 program ramowy) nr PIRSES-GA-2010-269202 pt. „HEMOW – Health Monitoring of Offshore Wind Farms”, kierowanego przez dr. hab. inż. Tomasza Chadego, prof. ZUT;
- grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr N R01 0037 06/2000 pt. „Inteligentny system analizy radiogramów”, kierowanego przez prof. zw. dr. inż. Ryszarda Sikorę.

Część badań zaprezentowanych w pracy (szczególnie w rozdziale czwartym i piątym) przeprowadzono podczas pobytu autora na stażach naukowych w:

- Centre for Non Destructive Evaluation, Indian Institute of Technology, Madras / Chennai (Indie) w 2012 i 2015 roku;
- Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nankin (Chiny) w 2014 roku.



## **2. Badania nieniszczące materiałów dielektrycznych i kompozytowych**

### **2.1. Materiały kompozytowe i ich defekty**

Kompozyt jest utworzony z co najmniej dwóch składników (osnowy i wzmocnienia) w taki sposób, że właściwości uzyskanego z nich materiału są lepsze od właściwości poszczególnych komponentów. Jako osnowa (matryca) w kompozytach wykorzystywane są [6, 56, 139]:

- metale (stopy magnezu, niklu, aluminium i tytanu) – MMC (ang. Metal Matrix Composite);
- materiały ceramiczne (tlenek aluminium, węgiel krzemu) – CMC (ang. Ceramic Matrix Composite);
- polimery (żywice poliestrowe, epoksydowe i poliamidowe) – PMC (ang. Polymer Matrix Composite);
- inne.

Niniejsza praca dotyczy kompozytów z matrycą polimerową. Jako wzmocnienie w tego typu kompozytach wykorzystywane są włókna: węglowe, szklane, aramidowe i bazaltowe.

Wzmocnienie może występować w postaci:

- włókien ciągłych lub ciętych (na długości rzędu od pojedynczych milimetrów do kilkunastu centymetrów);
- mat z włókien ciągłych lub ciętych;
- tkanin tkanych w dwóch kierunkach z włókien ciągłych.

Właściwości mechaniczne (ważne ze względu na zastosowania przemysłowe) i elektryczne (ważne np. ze względu na możliwość wykorzystania elektromagnetycznych metod badań nieniszczących) materiału kompozytowego zdefiniowane są przez jego strukturę wewnętrzną, czyli pośrednio przez rodzaj, kształt, rozmieszczenie i udział poszczególnych komponentów.

Obecność defektów w istotny sposób wpływa na sztywność struktury kompozytowej oraz może wpływać na jej zdolność przenoszenia obciążeń, co w znacznym stopniu zmniejsza bezpieczeństwo użytkowania oraz skraca czas bezawaryjnej pracy. Do defektów kompozytów polimerowych powstających w fazie produkcji (technologicznych) zaliczyć można [6, 56, 66, 139]:

- pęcherze (najczęściej powietrzne);
- pustki (obszary pomiędzy włóknami niewypełnione przez osnowę);
- nierównomierne lub niedostateczne utwardzenie żywicy;
- niepełne zwilżenie włókien przez żywicę (powodujące zmniejszenie ich wzajemnej przyczepności);
- nierównomierny rozkład wzmocnienia lub jego lokalny brak;
- zagięcia i zafalowania włókien;
- uszkodzone lub zerwane włókna;
- wtrącenia zewnętrzne.

Źródłem niejednorodności struktury w czasie wytwarzania materiału jest nieodpowiednie przygotowanie procesu produkcyjnego oraz zbyt mała staranność jego przeprowadzenia. Defekty technologiczne powstawać mogą wskutek różnych współczynników rozszerzalności cieplnej komponentów oraz w efekcie skurczów towarzyszących procesom wytwórczym materiałów kompozytowych.

Do defektów kompozytów polimerowych powstających podczas eksploatacji zaliczyć można [6, 56, 66, 139]:

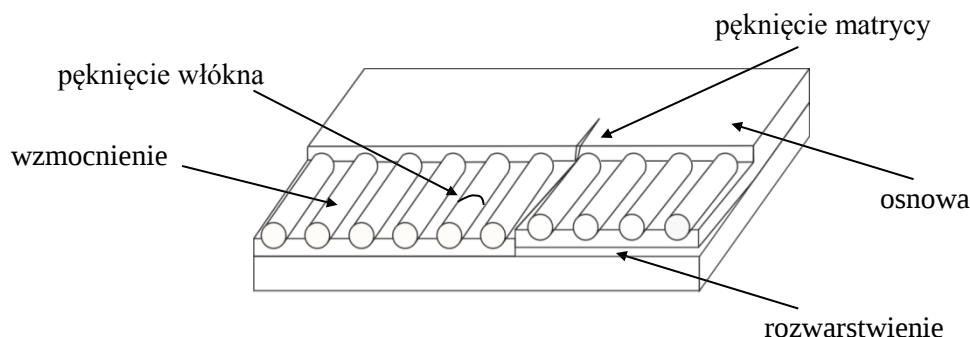
- pęknięcia osnowy,
- rozwarstwienia,
- uszkodzone lub zerwane włókna,
- uszkodzenia wywołane warunkami środowiskowymi,
- zmiany właściwości oraz struktury na skutek penetracji wilgoci.

Defekty eksploatacyjne powstają najczęściej w wyniku działania statycznych lub dynamicznych wymuszeń mechanicznych (w tym również o charakterze uderowym). W kompozytach z matrycą polimerową inspekcja wizualna obszaru poddanego uderzeniu może nie wykazać w dostateczny sposób powstałego zniszczenia materiału. W rzeczywistości większość uszkodzeń będących efektem uderzenia może znajdować się wewnątrz i na przeciwnej ścianie badanego materiału [56]. Tego typu słabo widoczne defekty nazwano z języka angielskiego BVID (ang. Barely Visible Impact Damage) [153].

W efekcie najczęściej występującego w praktyce obciążenia zmęczeniowego w pierwszej fazie występuje pękanie matrycy. Następnie pęknięcia te łączą się, powstają rozdzielania międzywarstwowe i delaminacje. Ostatnim etapem (przed całkowitym zniszczeniem) jest pękanie włókien.

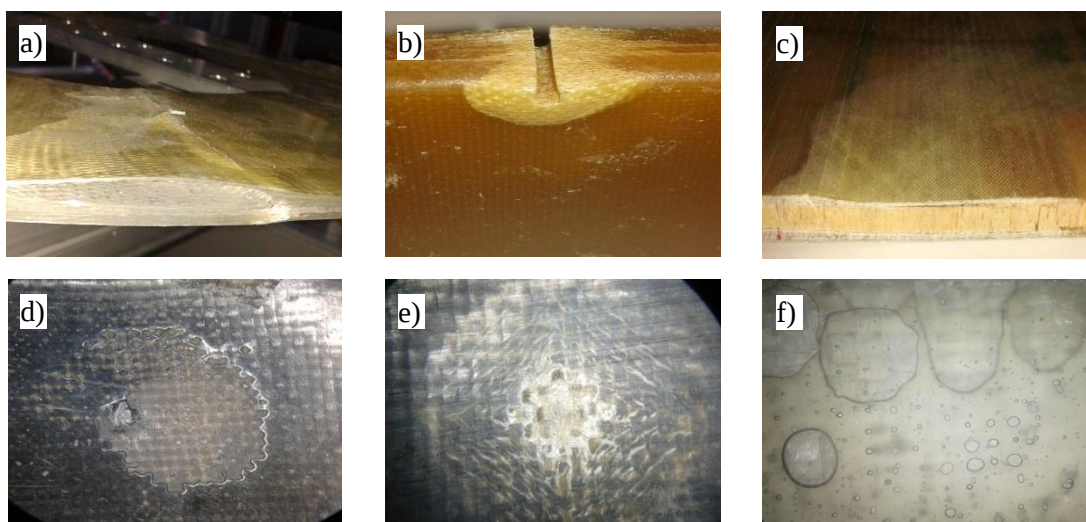
Duży wpływ na stan struktury materiału kompozytowego mają warunki środowiskowe, tj. narażenie na wysoką temperaturę, promieniowanie elektromagnetyczne (ze szczególnym uwzględnieniem zakresu ultrafioletowego), czynniki chemiczne oraz penetracja wilgoci.

Schematycznie wybrane defekty występujące w kompozytach polimerowych pokazano na ryc. 2.1, natomiast zdjęcia przykładowych uszkodzeń przedstawiono na ryc. 2.2.



Ryc. 2.1. Wybrane rodzaje defektów występujących w materiałach kompozytowych

Źródło: opracowano na podstawie [139].



Ryc. 2.2. Zdjęcia wybranych defektów kompozytów polimerowych: a) rozwarstwienie pierścienia (z kompozytu szklanego) przenoszącego moment obrotowy w skrzyni biegów elektrowni wiatrowej, b) delaminacja w wielowarstwowym laminacie epoksydowo-szklanym wywołana błędną techniką cięcia, c) rozwarstwienie pomiędzy rdzeniem a laminatem zewnętrznym oraz pęknięcie rdzenia w kompozycie przekładkowym (fragment łopaty turbiny elektrowni wiatrowej), d) obszar w kompozycie bazaltowym niewypełniony przez żywicę, e) uszkodzenie kompozytu bazaltowego w wyniku uderzenia o energię 4J, f) pęcherze powietrzne w laminacie szklanym

Rozwarstwienia są szczególnie groźne w przypadku kompozytów przekładkowych (ang. *sandwich composites*). Wykrycie rozwarstwień (ryc. 2.2.a, b, c, e) jest bardzo istotne, gdyż ten rodzaj defektu drastycznie redukuje wytrzymałość mechaniczną rozważanej struktury, co może prowadzić do jej poważnych uszkodzeń, a w konsekwencji nawet do katastrofy.

## 2.2. Metody badań nieniszczących stosowane do badania materiałów dielektrycznych i kompozytów polimerowych

Badanie nieniszczące to proces diagnozowania stanu struktury lub wymiarów obiektu bez zmiany jego właściwości. Wykonywane jest podczas procesu produkcji lub w trakcie eksploatacji wyrobu. Ze względu na rodzaj wykorzystywanego zjawiska fizycznego oraz sposób detekcji sygnału metody badań nieniszczących materiałów kompozytowych dzielą się na [18, 24, 36, 48]:

- metody analizy wibracyjnej,
- metody emisji akustycznej i ultradźwiękowe,
- metody elektromagnetyczne niskiej częstotliwości,
- metody mikrofalowe,
- metody termograficzne,
- metody wizualne i optyczne,
- metody radiograficzne.

Metoda analizy wibracyjnej odnosi się do procesu monitorowania sygnatury drgań mechanicznych specyficznych dla badanego obiektu i analizowania tych informacji w celu ustalenia

stanu jego struktury. Dlatego stosowane są czujniki przemieszczenia, czujniki prędkości, akcelerometry oraz wibrometry laserowe [136, 137]; określane są parametry, takie jak częstotliwość drgań, tryby wibracji i tłumienie.

W przypadku metody emisji akustycznej (ang. Acoustic Emission, AE) wykorzystywane jest zjawisko generowania fal elastycznych wywołane obecnością naprężeń i defektów struktury (np. pęknięć). Jest to metoda pasywna, która może być wykorzystywana do monitorowania konstrukcji w warunkach eksploatacji. Stosowane są przetworniki rezonansowe lub szerokopasmowe o paśmie częstotliwości od 20 Hz do 1000 kHz [107, 121], przy czym emisje o wyższych częstotliwościach występują w konstrukcjach metalowych. W przypadku materiałów kompozytowych wykrywa się tą metodą mikropęknięcia, lokalne rozwarstwienia i pęknięcia włókien [54].

W przeciwieństwie do AE metoda ultradźwiękowa (ang. Ultrasonic Testing, UT) jest aktywna. Fale ultradźwiękowe (z zakresu od 50 kHz do kilku GHz) generowane są przez zewnętrzne źródło, a odbierane przez czujnik lub matrycę czujników wykorzystujących zjawisko piezoelektryczne [121]. Jest to powszechnie stosowana metoda, szczególnie do badania grubych materiałów kompozytowych (grubość rzędu kilku milimetrów lub większa). Ze względu na dużą tłumienność ultradźwięków w powietrzu wymaga ona kontaktu sondy pomiarowej z obiektem badanym oraz medium pośredniczącego, np. w postaci żelu. W ostatnich latach coraz większe znaczenie zaczyna odgrywać metoda ultradźwiękowa ze sprzężeniem powietrznym (ang. Air-coupled Ultrasonic Technique, AcUT), która dzięki odpowiedniej konstrukcji przetworników pomiarowych oraz stosunkowo dużej mocy generowanych fal umożliwia inspekcję bezkontaktową [120].

Pozostałe wymienione powyżej metody sklasyfikować możemy jako metody elektromagnetyczne (EM). Do metod EM niskiej częstotliwości zaliczyć można m.in. elektryczną tomografię pojemnościową (ang. Electrical Capacitance Tomography, ECT). W technice tej zadaniem prostym jest pomiar pojemności pomiędzy poszczególnymi elektrodami przyłożonymi do obiektu badanego. Rozkład przenikalności dielektrycznej (a więc i wykrycie ewentualnego defektu) otrzymywany jest w wyniku rozwiązania zadania odwrotnego. (Więcej szczegółów na temat tej techniki można znaleźć w pracy [115].)

Metody EM wysokich częstotliwości wykorzystują fale elektromagnetyczne o bardzo zróżnicowanych częstotliwościach – od zakresu mikrofalowego do promieniowania gamma.

Metoda mikrofalowa polega na wykorzystaniu energii fal elektromagnetycznych z zakresu od 300 MHz do 300 GHz, które przy przejściu pomiędzy dwoma ośrodkami (np. powietrze–materiał lub materiał–defekt), wskutek zmiany impedancji charakterystycznej, podlegają częściowemu odbiciu i transmisji [121]. Stosowana jest w tym wypadku inspekcja w dziedzinie czasu (impulsowa) oraz w dziedzinie częstotliwości, co oznacza, że przeprowadza się pomiar współczynników transmisji i odbicia w funkcji częstotliwości, z wykorzystaniem wektorowych analizatorów sieci (ang. Vector Network Analyser, VNA) [147]. Jako elementy promieniujące i detektory podczas inspekcji w strefie dalekiej stosowane są anteny typu dipol linowy i dipol pętlowy oraz anteny tubowe. Fala może być skupiona na obszarze porównywalnym z długością fali za pomocą soczewek dielektrycznych lub odpowiednio ukształtowanych re-

flektorów. W strefie bliskiej używane są otwarte zakończenia falowodów oraz szczeliny i pętle wykonane w technice mikropaskowej [5].

Nową koncepcją w mikrofalowych badaniach nieniszczących jest wykorzystanie metamateriałów – sztucznie wytworzonych materiałów zaprojektowanych tak, że zarówno ich przenikalność elektryczna, jak i przenikalność magnetyczna mogą przyjmować wartości inne niż w materiałach naturalnych [35, 145]. Materiały takie mogą być użyte w mikrofalowych badaniach nieniszczących kompozytów do realizacji soczewek skupiających. Do defektów materiałów kompozytowych, możliwych do wykrycia metodą mikrofalową, zaliczyć można [5, 121]: rozwarstwienia, pustki, wtrącenia, porowatość i zawartość wilgoci. Czułość metody zależy od tego jak bardzo parametry elektryczne defektu (przenikalność elektryczna i konduktywność) odstają od parametrów materiału występujących w stanie normalnym, natomiast rozdzielczość zależy głównie od długości fali elektromagnetycznej zastosowanej podczas inspekcji i rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości [113].

W metodzie termograficznej kamera działająca w zakresie podczerwieni poprzez odpowiedni układ optyczny dokonuje rejestracji emisji fal elektromagnetycznych związanej z rozkładem temperatury obiektu badanego [80]. Obecność defektu (o innych właściwościach temperaturowych niż otaczająca go struktura) może zmienić ten rozkład, co powoduje jego wykrycie. Wyróżnia się termografię pasywną (bez wzbudzenia zewnętrznego) i termografię aktywną ze wzbudzeniem w formie źródła akustycznego, promiennika podczerwieni, generatora mikrofalowego lub źródła ciepłej wody, lub gorącego powietrza. W związku ze stosunkowo małą przewodnością cieplną materiałów kompozytowych (w porównaniu z konstrukcjami metalowymi) czas akwizycji jest dłuższy, w związku z czym wykrycie głębokich defektów jest trudne [17, 80].

Metody optyczne (ang. Optical Non-destructive Testing, ONDT) wykorzystują światło widzialne i bliską podczerwień. Najczęściej źródłem jest laser półprzewodnikowy, natomiast detektor stanowi matryca CCD (ang. Charge Coupled Device). Rejestrowane jest światło rozproszone bądź przechodzące przez materiał. Technikami pokrewnymi są holografia i szero grafia laserowa (ang. *laser shearography*). Szczegółowy przegląd technik optycznych stosowanych w badaniach nieniszczących przedstawiono w pracach [46, 47, 121]. W przypadku materiałów kompozytowych za pomocą metod optycznych można wykryć wtrącenia i rozwarstwienia występujące zarówno na powierzchni, jak i pod nią. W porównaniu z innymi technikami inspekcja jest szybka, przy czym możliwe jest badanie dużych powierzchni [46].

W przypadku metod wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie X i gamma  $\gamma$  źródło emituje fale, które po przejściu przez materiał padają na detektor [121]. Obecnie w radiografii cyfrowej stosuje się detektory cyfrowe. We wcześniejszych rozwiązaniach wykorzystywana była klisza, która zaczerniała się pod wpływem promieniowania. Defekt objawiający się w strukturze w inny sposób (najczęściej słabiej) pochłania promieniowanie X, co umożliwia jego wykrycie w całej objętości badanego obiektu. Szczególnie nieciągłości struktury w kierunku zgodnym z padającym promieniowaniem są łatwe do detekcji. Występujące w materiałach kompozytowych rozwarstwienia są trudne do wykrycia ze względu na brak ubytków materiałów (w których pochłaniane jest promieniowanie); widoczne są jedynie dodatkowe szczeliny powietrzne pomiędzy istniejącymi warstwami. Metoda umożliwia automa-

tyzację procesu testowania [122]. Ze względu na szkodliwość wykorzystywanego podczas badania promieniowania jonizującego wymagane są dodatkowe zabezpieczenia operatora.

Użyteczność poszczególnych metod badań nieniszczących w odniesieniu do materiałów kompozytowych przedstawiono w tab. 2.1. Analiza danych zaprezentowanych w tabeli prowadzi do wniosku, że brakuje metody umożliwiającej przeprowadzenie pełnej diagnostyki wszystkich rodzajów kompozytów.

Tabela 2.1. Zestawienie różnych technik nieniszczącego badania kompozytów polimerowych

| Technika badań               | Defekty wykrywane w laminacie polimerowym                                                                                      | Defekty wykrywane w kompozycie przekładkowym (przekładka o strukturze plastra miodu)                                                               | Defekty wykrywane w kompozycie przekładkowym (przekładka w postaci pianki)                                                                         |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Metoda wibracyjna            | rozwarstwienia (wykrycie w grubych strukturach – grubość > 1 cm)                                                               | rozwarstwienia (wykrycie w grubych strukturach)                                                                                                    | rozwarstwienia (wykrycie w grubych strukturach)                                                                                                    |
| Metoda ultradźwiękowa UT     | rozwarstwienia, pustki, porowatość i objętościowa zawartość włókien (wykrycie i identyfikacja w grubych strukturach)           | rozwarstwienie (wykrycie i identyfikacja w cienkich strukturach), zgniecenia rdzenia i uszkodzenia cieplne (wykrycie w cienkich strukturach)       | pęknięcia, pustki i porowatość (wykrycie i częściowa identyfikacja w grubych strukturach)                                                          |
| Metoda emisji akustycznej AE | rozwarstwienia, pęknięcia i uszkodzenia włókien (wykrycie w grubych strukturach)                                               | uszkodzenie węzłów (wykrycie w grubych strukturach)                                                                                                | pęknięcia (wykrycie w grubych strukturach)                                                                                                         |
| Metoda mikrofalowa           | wtrącenia, pustki, zawartość wilgoci (wykrycie i częściowa identyfikacja w grubych strukturach)                                | pustki, rozwarstwienia (wykrycie i częściowa identyfikacja w grubych strukturach), zawartość wody (wykrycie w grubych strukturach)                 | wtrącenia, pustki, zawartość wilgoci (wykrycie i częściowa identyfikacja w grubych strukturach)                                                    |
| Metoda termograficzna        | rozwarstwienia i pustki (wykrycie i identyfikacja w cienkich strukturach), zawartość wilgoci (wykrycie w cienkich strukturach) | rozwarstwienia, zgniecenia rdzenia i pustki (wykrycie i identyfikacja w cienkich strukturach), zawartość wilgoci (wykrycie w cienkich strukturach) | rozwarstwienia, zgniecenia rdzenia i pustki (wykrycie i identyfikacja w cienkich strukturach), zawartość wilgoci (wykrycie w cienkich strukturach) |
| Metoda optyczna              | rozwarstwienia i wtrącenia (wykrycie w cienkich strukturach)                                                                   | rozwarstwienia, wtrącenia i zgniecenia rdzenia (wykrycie w cienkich strukturach)                                                                   | rozwarstwienia, wtrącenia i zgniecenia rdzenia (wykrycie w cienkich strukturach)                                                                   |
| Metoda radiograficzna        | wtrącenia i pustki (częściowe wykrycie w cienkich strukturach)                                                                 | uszkodzenie węzłów (wykrycie i identyfikacja w grubych strukturach), zgniecenia rdzenia i zawartość wody (wykrycie w grubych strukturach)          | wtrącenia, pęknięcia rdzenia i pustki (wykrycie w grubych strukturach)                                                                             |

Źródło: na podstawie [24, 48, 121].

### 3. Badania nieniszczące metodą terahercową

#### 3.1. Metoda terahercowa

Fale elektromagnetyczne z zakresu radiowego/mikrofalowego (od kilku MHz do kilkadziesiąt GHz) oraz optycznego (promieniowanie podczerwone, widzialne i ultrafioletowe) są powszechnie wykorzystywane w badaniach nieniszczących. W ostatnim dziesięcioleciu na skutek dynamicznego rozwoju techniki terahercowej (0,3–10,0 THz) [67], a w szczególności w wyniku powstania efektywnych metod generacji i detekcji promieniowania we wspomnianym zakresie (np. anten fotoprzewodzących PCA, ang. Photo Conductive Antenna), również metoda terahercowa znalazła szerokie zastosowanie w nieniszczącym testowaniu materiałów półprzewodnikowych i dielektrycznych [156], w tym często wykorzystywanych w przemyśle kompozytów polimerowych [95], których badanie jest przedmiotem niniejszej monografii. Techniki generowania promieniowania elektromagnetycznego o częstotliwościach terahercowych przedstawiono w tab. 3.1.

Tabela 3.1. Techniki generowania fal elektromagnetycznych w zakresie terahercowym

| Parametr                  | Technika generowania                     |                                        |                                        |                                  |                          |
|---------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
|                           | spektroskopia w dziedzinie czasu TDS/PCA | lasery terahercowe pompowane optycznie | <i>backward wave oscillators</i> (BWO) | <i>direct multiplied sources</i> | mieszanie częstotliwości |
| Tryb pracy (CW/impulsowy) | impulsowy                                | impulsowy lub CW                       | CW                                     | CW                               | CW                       |
| Średnia moc               | ~ $\mu\text{W}$                          | > 100 mW                               | 10 mW                                  | $\mu\text{W}$ – mW               | dziesiątki nW            |
| Zakres częstotliwości     | 0,1–5,0 THz                              | 0,3–10 THz                             | 0,1–1,5 THz                            | 0,1–1 THz                        | 0,3–10 THz               |
| Możliwość przestrajania   | –                                        | dyskretnie linie                       | 200 GHz                                | ~15% częstotliwości środkowej    | ciągła                   |

Źródło: na podstawie [67, 110, 113, 151].

Fale elektromagnetyczne z zakresu terahercowego (o częstotliwości od 0,3 THz do 10 THz) znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [67, 83, 90, 99, 147, 151], m.in. w:

- spektroskopii,
- biotechnologii,
- medycynie,
- przemyśle farmaceutycznym,
- telekomunikacji,

- bezpieczeństwie publicznym,
- badaniach nieniszczących.

Zakres terahercowy, znajdujący się na styku techniki mikrofalowej i podczerwieni (ang. InfraRed, IR), umożliwia uzyskanie wyższej rozdzielczości przestrzennej niż w przypadku techniki mikrofalowej i większej przenikliwości dla nieprzewodzących materiałów niż badania IR. W związku z trudnościami technologicznymi w generowaniu i detekcji promieniowania terahercowego (zbyt wysokie częstotliwości dla techniki mikrofalowej i zbyt niskie dla tradycyjnych urządzeń optycznych) ten zakres częstotliwości nazywany był przerwą terahercową (ang. *terahertz gap*). Jest to stosunkowo nowa technologia, która podlega dynamicznemu rozwojowi, a obszar jej zastosowań ulega ciągłemu rozszerzaniu.

Wzbudzenie w terahercowym systemie badań nieniszczących może występować w dwóch formach [52]:

- z falą ciągłą (ang. Continuous Wave, CW), o ustalonej lub zmiennej częstotliwości;
- w postaci impulsowej.

W zależności od zastosowanej techniki wzbudzenia i detekcji fal terahercowych stosowane są różne konfiguracje układów pomiarowych; przedstawiono je na ryc. 3.1.

W badaniach nieniszczących technologia terahercowa używana jest do oceny stanu różnych struktur nieprzewodzących, m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok i materiałów piankowych. W przypadku materiałów przewodzących ograniczeniem jest bardzo silne tłumienie fali wnikałej w głąb przewodnika. Standardowa głębokość wnikania  $\delta_w$  zdefiniowana jest w następujący sposób [34, 85, 125]:

$$\delta_w = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.1)$$

gdzie:  $\omega$  – pulsacja,  $\sigma$  – przewodność elektryczna,  $\mu$  – przenikalność magnetyczna.

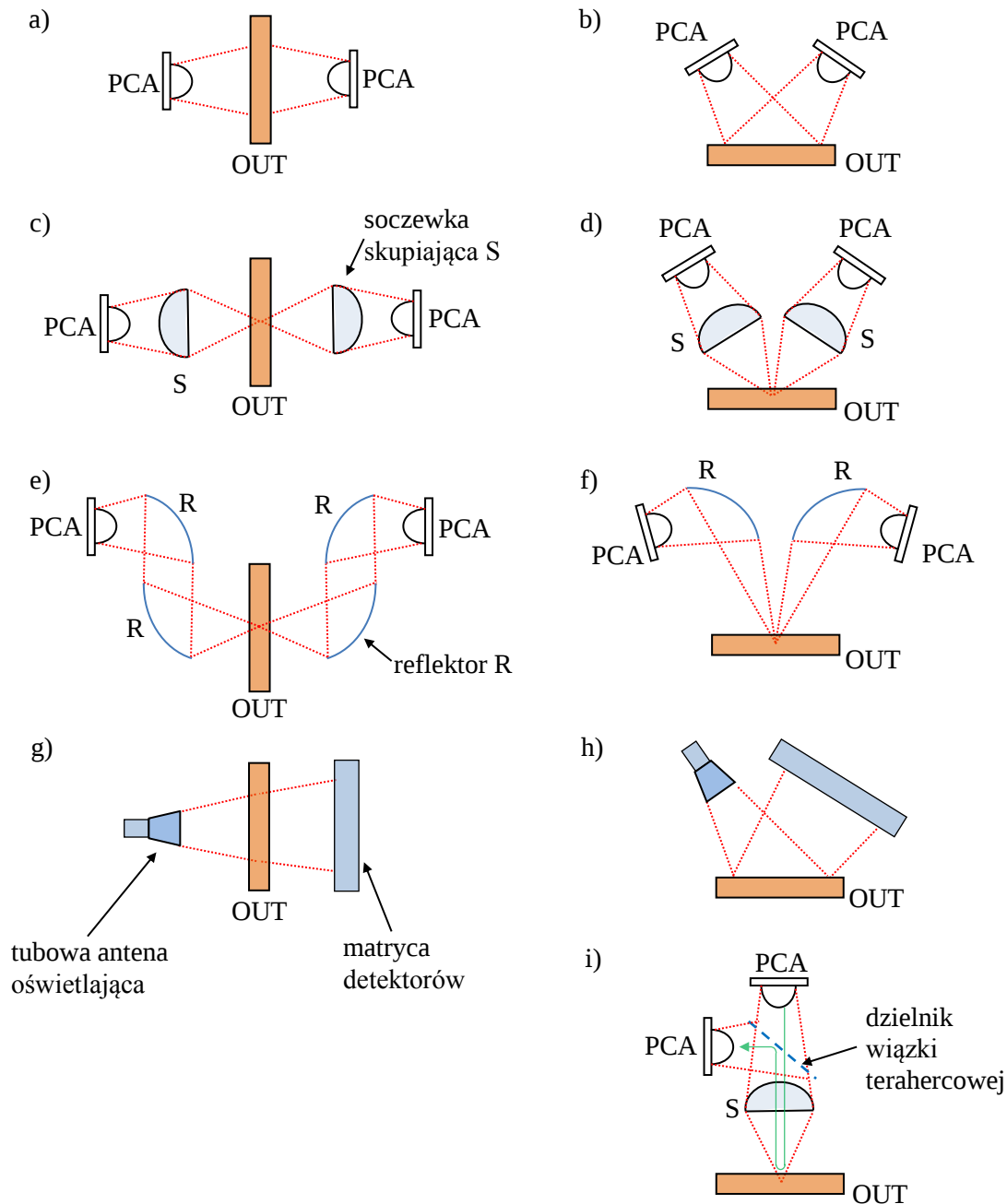
Dla częstotliwości  $f = 1$  THz głębokość wnikania w przewodniku jest na tyle mała, że nawet bardzo cienka warstwa przewodząca całkowicie zatrzymuje falę elektromagnetyczną. Do inspekcji materiałów przewodzących z dużym powodzeniem mogą być stosowane inne, znacznie tańsze, techniki, np. metoda wiropładowa EC lub metoda strumienia rozproszenia MFL [18].

Propagacja fali elektromagnetycznej w rzeczywistym materiale dielektrycznym zależy od przestrzennego rozkładu przewodności elektrycznej  $\sigma$ , przenikalności dielektrycznej  $\varepsilon$  i przenikalności magnetycznej  $\mu$ . W technice terahercowej, będącej na styku zakresu radiowego i optycznego, często zamiast  $\varepsilon$  rozważa się współczynnik refrakcji:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (3.2)$$

Rozważając tylko materiały dielektryczne, które w zdecydowanej większości są niemagnetyczne, słuszne jest założenie  $\mu_r = 1$ ; mamy więc:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3.3)$$



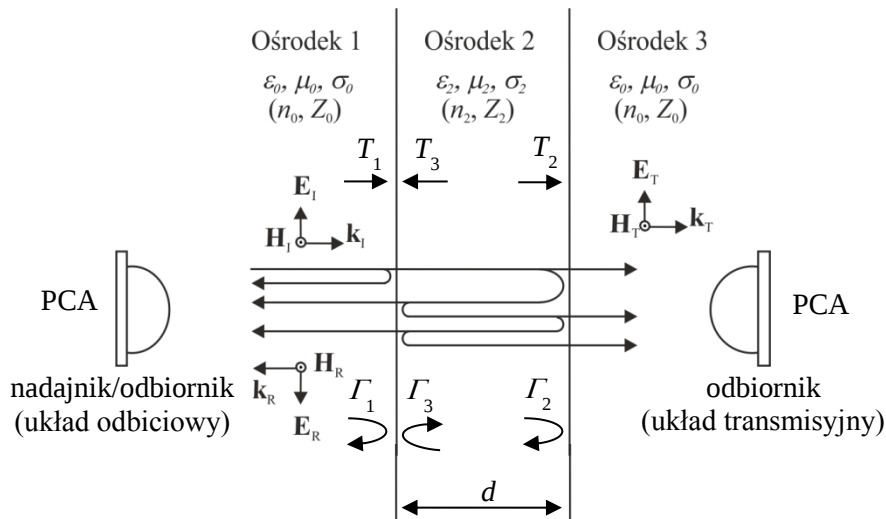
Ryc. 3.1. Geometrie stosowane w układach pomiarowych w technice terahercowej: a) układ transmisyjny wykorzystujący tylko anteny PCA, b) układ odbiciowy wykorzystujący tylko anteny PCA, c) układ transmisyjny z soczewkami skupiającymi, d) układ odbiciowy z soczewkami skupiającymi, e) układ transmisyjny z profilowanymi reflektorami, f) układ odbiciowy z profilowanymi reflektorami, g) układ transmisyjny ze źródłem oświetlającym i z matrycą odbiorczą, h) układ odbiciowy ze źródłem oświetlającym i z matrycą odbiorczą, i) układ odbiciowy z rozdzielaczem wiązki i soczewką skupiającą; OUT – badany obiekt (ang. Object Under Test), S – soczewka skupiająca

W ogólnym przypadku, w zakresie wyższych częstotliwości, współczynnik refrakcji jest zespolony i zależy od częstotliwości. Dzięki wspomnianej wyżej zależności defekty, których istnienie zaburza rozkład współczynnika refrakcji, możliwe są do wykrycia. Za pomocą techniki terahercowej mogą być wykrywane następujące kategorie wad: rozwarstwienia, puste

przestrzenie, zmiany struktury wywołane czynnikiem cieplnym, korozja występująca pod farbą lub powłoką ochronną, lokalny brak kleju w połączeniach klejonych. Zawartość włókien, ich orientacja i falistość, jak również grubość warstw kompozytów polimerowych mogą być również określane za pomocą impulsowego wzbudzenia i detekcji fal o częstotliwościach terahercowych.

W przypadku inspekcji materiału dielektrycznego na skutek zmiany współczynnika refrakcji następują częściowa transmisja i częściowe odbicie fali elektromagnetycznej (ryc. 3.2). Zjawisko to występuje na:

- granicy powietrze–materiał badany (powierzchnia obiektu od strony źródła fali – ang. Front Surface – FS);
- granicy materiał badany–powietrze (powierzchnia obiektu od strony przeciwnej do źródła fali – ang. Back Surface – BS);
- powierzchniach pomiędzy poszczególnymi warstwami (w przypadku materiałów wielowarstwowych);
- granicach (początkowych i końcowych) defektów.



Ryc. 3.2. Zasada działania metody terahercowej / mikrofalowej w układzie transmisyjnym i odbiciowym;  $T$  – współczynnik transmisji,  $\Gamma$  – współczynnik odbicia,  $\mathbf{H}_i$ ,  $\mathbf{E}_i$  – wektory pola magnetycznego i pola elektrycznego padającego na ośrodek 2 (obiekt badany),  $\mathbf{H}_r$ ,  $\mathbf{E}_r$  – wektory pola magnetycznego i pola elektrycznego odbitego od ośrodka 2,  $\mathbf{H}_t$ ,  $\mathbf{E}_t$  – wektory pola magnetycznego i pola elektrycznego przechodzącego przez ośrodek 2

Zasada działania metody terahercowej przedstawiona jest graficznie na ryc. 3.2. Amplituda sygnału wywołanego obecnością defektu zależy od współczynnika odbicia [34, 85]:

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z_2(\omega) - Z_1(\omega)}{Z_2(\omega) + Z_1(\omega)} = \frac{n_1(\omega) - n_2(\omega)}{n_1(\omega) + n_2(\omega)} \quad (3.4)$$

oraz od współczynnika transmisji [34, 85]:

$$T(\omega) = \frac{2Z_2(\omega)}{Z_2(\omega) + Z_1(\omega)} = \frac{2n_1(\omega)}{n_1(\omega) + n_2(\omega)} \quad (3.5)$$

przy czym (dla dielektryka bezstratnego) impedancja charakterystyczna ośrodka o indeksie  $m$  zdefiniowana jest następująco [132]:

$$Z_m = \sqrt{\frac{\mu_m}{\varepsilon_m}} \quad (3.6)$$

natomiast dla dielektryka stratnego [132]:

$$Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu_m}{\sigma + j\omega\varepsilon_m}} \quad (3.7)$$

gdzie:  $\mu_m$ ,  $\varepsilon_m$  – przenikalności bezwzględne ośrodka o indeksie  $m$ .

Zależność (3.4) obowiązuje dla przypadku fali padającej pod kątem prostym na granicę dwóch ośrodków. W przypadku badań terahercowych w trybie odbiciowym, zarówno w konfiguracji typu V, jak i przy wykorzystaniu rozdzielacza wiązki, fala lub jej część pada na granicę materiału z kierunku innego niż normalny (szczególnie przy stosowaniu soczewek skupiających o małej ogniskowej). W przypadku zatem ukośnego padania fali na granicę ośrodków (ryc. 3.3) współczynniki odbicia i transmisji mają następującą postać [40, 67, 98]:

- dla polaryzacji równoległej (wektor pola elektrycznego zawiera się w płaszczyźnie padania)

$$\Gamma_{\parallel}(\omega) = \frac{n_2(\omega)\cos(\Theta_1) - n_1(\omega)\cos(\Theta_2)}{n_2(\omega)\cos(\Theta_1) + n_1(\omega)\cos(\Theta_2)} \quad (3.8)$$

$$T_{\parallel}(\omega) = \frac{2n_1(\omega)\cos(\Theta_1)}{n_2(\omega)\cos(\Theta_1) + n_1(\omega)\cos(\Theta_2)} \quad (3.9)$$

- dla polaryzacji prostopadłej (wektor pola elektrycznego jest prostopadły do płaszczyzny padania)

$$\Gamma_{\perp}(\omega) = \frac{n_1(\omega)\cos(\Theta_1) - n_2(\omega)\cos(\Theta_2)}{n_1(\omega)\cos(\Theta_1) + n_2(\omega)\cos(\Theta_2)} \quad (3.10)$$

$$T_{\perp}(\omega) = \frac{2n_1(\omega)\cos(\Theta_1)}{n_1(\omega)\cos(\Theta_1) + n_2(\omega)\cos(\Theta_2)} \quad (3.11)$$

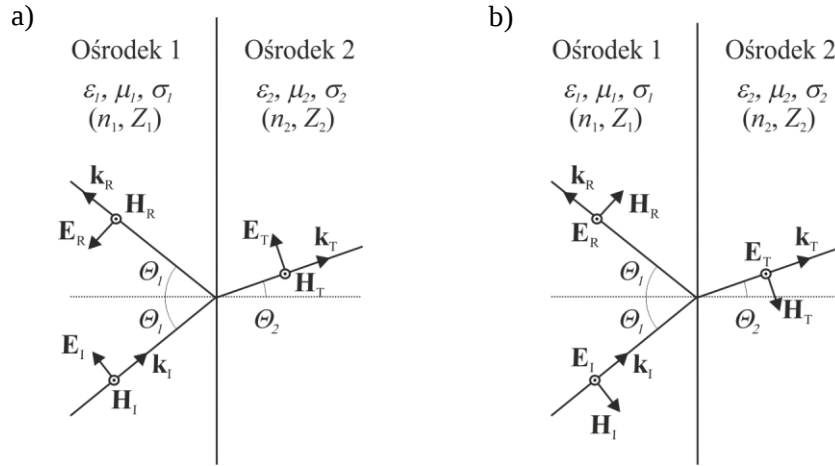
Dla przypadku fali padającej pod kątem prostym natężenie pola elektrycznego  $E_T$  po przejściu przez jednorodny materiał dielektryczny ma następującą postać [67]:

$$\begin{aligned} E_T &= E_1 T_1 T_2 e^{j\phi} + E_1 T_1 T_2 \Gamma_2 \Gamma_3 e^{j3\phi} + E_1 T_1 T_2 (\Gamma_2 \Gamma_3)^2 e^{j5\phi} + \dots = \\ &= E_1 T_1 T_2 e^{j\phi} \sum_{p=0}^{\infty} (\Gamma_2 \Gamma_3 e^{j2\phi})^p \end{aligned} \quad (3.12)$$

jeśli przesunięcie fazowe  $\phi$ , wynikające z propagacji fali elektromagnetycznej przez materiał o grubości  $d$  i współczynnika refrakcji  $n_2(\omega)$ , określone jest następującą zależnością:

$$\phi = kd = n_2(\omega) \frac{\omega}{c_0} d \quad (3.13)$$

gdzie:  $E_T$  – natężenie pola elektrycznego po przejściu przez badany materiał,  $E_I$  – natężenie pola elektrycznego padającego na badany materiał,  $T_1, T_2$  – współczynniki transmisji,  $\Gamma_2, \Gamma_3$  – współczynniki odbicia (zaznaczone na ryc. 3.2),  $k$  – liczba falowa,  $d$  – grubość dielektrycznego obiektu badanego,  $c_0$  – prędkość światła w próżni,  $p$  – numer echa wewnętrznego odbicia fali w badanym obiekcie.



Ryc. 3.3. Fala padająca ukośnie na granicę ośrodków: a) polaryzacja równoległa, b) polaryzacja prostopadła

Źródło: na podstawie [132].

Pierwszy człon odpowiada za falę przechodzącą bezpośrednio przez dielektryk (ryc. 3.2), natomiast pozostałe człony związane są z wielokrotnymi odbiciami fali od granic ośrodków (efekt Fabry-Perot). Stosując rozwinięcie wzoru na sumę nieskończonego szeregu geometrycznego [67]:

$$\sum_{p=0}^{\infty} (x)^p = \frac{1}{1-x} \quad (3.14)$$

z zależności (3.12) otrzymujemy:

$$E_T = E_I \frac{T_1 T_2 e^{j\phi}}{1 - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{j2\phi}} \quad (3.15)$$

Po podstawieniu zależności na współczynniki transmisji i odbicia mamy [67]:

$$E_T = E_I \frac{4n_2(\omega) e^{j\phi}}{(n_2(\omega) + 1)^2 - (n_2(\omega) - 1)^2 e^{j2\phi}} \quad (3.16)$$

W trakcie pomiarów spektroskopowych mierzona jest transmitancja dla fali przechodzącej:

$$T_C(\omega) = \frac{E_T(\omega)}{E_I(\omega)} = \frac{4n_2(\omega) e^{j\phi}}{(n_2(\omega) + 1)^2 - (n_2(\omega) - 1)^2 e^{j2\phi}} \quad (3.17)$$

Dla przypadku fali padającej pod kątem prostym natężenie pola elektrycznego po odbiciu od jednorodnego materiału dielektrycznego ma następującą postać:

$$\begin{aligned}
E_R &= E_I \Gamma_1 + E_I T_1 T_3 \Gamma_2 e^{j2\phi} + E_I T_1 T_3 \Gamma_3 \Gamma_2^2 e^{j4\phi} + E_I T_1 T_3 \Gamma_3^2 \Gamma_2^3 e^{j6\phi} + \dots = \\
&= E_I \Gamma_1 + E_I T_1 T_3 \Gamma_2 e^{j2\phi} \sum_{p=0}^{\infty} (\Gamma_2 \Gamma_3 e^{j2\phi})^p
\end{aligned} \tag{3.18}$$

gdzie:  $E_R$  – natężenie pola elektrycznego odbitego od badanego materiału.

Podobnie jak wyżej zastosować można rozwinięcie (3.14), co umożliwi uzyskanie zależności na falę odbitą w następującej postaci:

$$E_R = E_I \left[ \Gamma_1 + \frac{T_1 T_3 \Gamma_2 e^{j2\phi}}{1 - \Gamma_2 \Gamma_3 e^{j2\phi}} \right] \tag{3.19}$$

Po podstawieniu zależności na współczynniki transmisji i odbicia mamy:

$$E_R = E_I \frac{n_2(\omega) - 1}{n_2(\omega) + 1} \left[ \frac{4n_2(\omega) e^{j2\phi}}{(n_2(\omega) + 1)^2 - (n_2(\omega) - 1)^2 e^{j2\phi}} - 1 \right] \tag{3.20}$$

W trakcie pomiarów spektroskopowych mierzona jest transmitancja dla fali odbitej:

$$\Gamma_C(\omega) = \frac{E_R(\omega)}{E_I(\omega)} = \frac{n_2(\omega) - 1}{n_2(\omega) + 1} \left[ \frac{4n_2(\omega) e^{j2\phi}}{(n_2(\omega) + 1)^2 - (n_2(\omega) - 1)^2 e^{j2\phi}} - 1 \right] \tag{3.21}$$

Określenie współczynnika refrakcji  $n(\omega)$  czy przenikalności dielektrycznej  $\epsilon(\omega)$  możliwe jest dzięki minimalizacji jednej z poniższych funkcji:

$$f_\Gamma = \Gamma_M(\omega) - \Gamma_C(\omega) \tag{3.22}$$

$$f_T = T_M(\omega) - T_C(\omega) \tag{3.23}$$

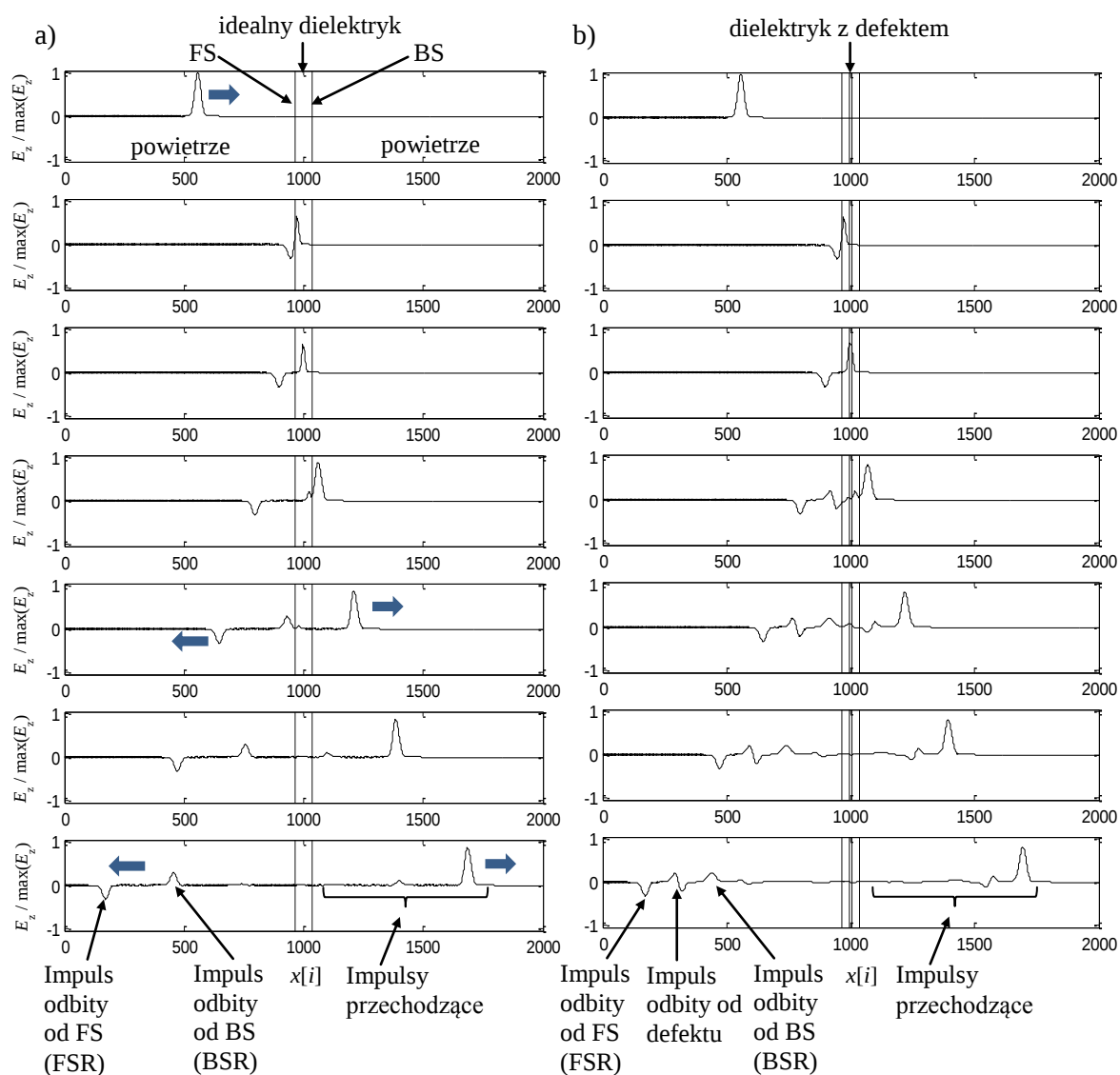
gdzie:  $T_M$ ,  $\Gamma_M$  – współczynniki uzyskane na drodze pomiarów,  $T_C$ ,  $\Gamma_C$  – współczynniki teoretyczne z zależności (3.17) i (3.21).

Zagadnienie ukośnego padania fali na materiał wielowarstwowy przedstawione zostało w pracy [23], natomiast metody wyznaczania współczynników refrakcji badanych materiałów w artykułach [41, 42, 53].

W przypadku wymuszenia o charakterze impulsowym pomiędzy impulsami odbitymi od początku i końca materiału dodatkowo pojawia się impuls odbity od defektu. Interakcję wymuszenia w postaci impulsu (o kształcie funkcji Gaussa) z jednorodnym materiałem przedstawiono na ryc. 3.4a. Zaobserwować można, że impuls odbity od granicy FS (powietrze–materiał) zmienia swój znak w stosunku do fali padającej. Wynika to z przejścia z ośrodka o większej impedancji do ośrodka o mniejszej impedancji charakterystycznej. Z zależności (3.4) wynika w tym wypadku ujemna wartość współczynnika odbicia  $\Gamma$ . Przy odbiciu od granicy BS (materiał–powietrze) współczynnik odbicia  $\Gamma$  jest dodatni, a więc znak impulsu odbitego pozostaje bez zmian.

Na ryc. 3.4b przedstawiono odbicie i transmisję impulsu o gaussowskim rozkładzie amplitudy przez materiał jednorodny z defektem w postaci wtrącenia powietrznego. W przypadku dużych defektów (rozmiar defektu w kierunku propagacji fali jest większy lub porównywalny z przestrzennym rozkładem impulsu w defekcie) powstają dwa odbicia pochodzące od granic

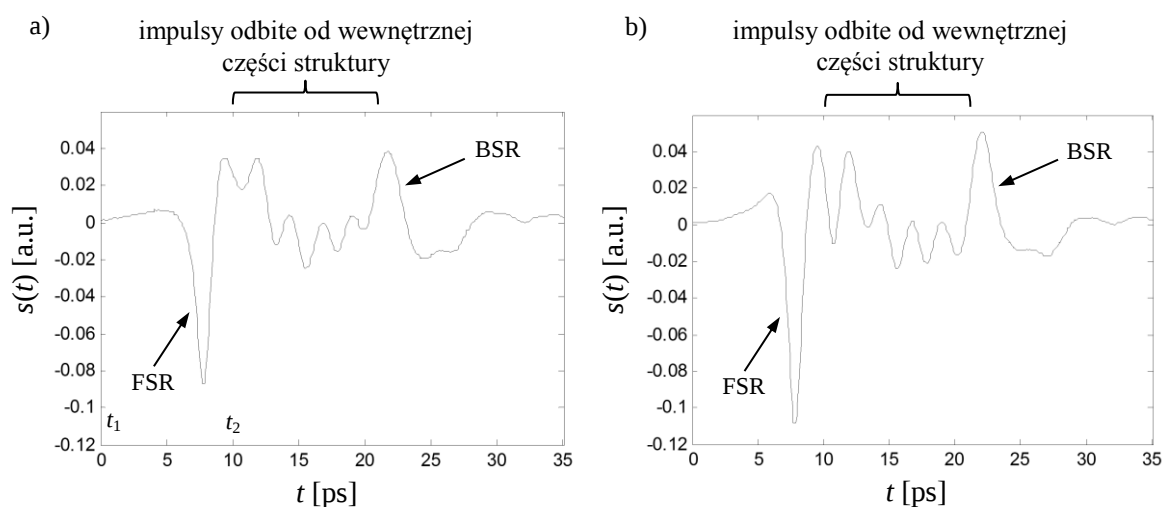
ośrodków materiał–defekt i defekt–materiał. Im większa jest różnica pomiędzy ich impedancjami charakterystycznymi lub współczynnikami refrakcji, tym większe jest prawdopodobieństwo wykrycia defektu. W przypadku węższych defektów odpowiedzi od obu granic nakładają się na siebie, w wyniku czego powstaje jeden impuls będący superpozycją dwóch przeciwnie skierowanych impulsów.



Ryc. 3.4. Fala przechodząca i fala odbita od materiału dielektrycznego przy wzbudzeniu impulsowym: a) dla materiału jednorodnego bez defektu, b) dla materiału jednorodnego z defektem powietrznym. Wyniki otrzymano, stosując metodę FDTD

W przypadku materiałów kompozytowych struktura wewnętrzna (z punktu widzenia właściwości elektromagnetycznych) może znacznie się różnić od materiału jednorodnego; mogą wystąpić warstwy różnych materiałów o różnej grubości. Materiał sam w sobie stanowi mieszaninę matrycy polimerowej i wzmocnienia. Wskutek tego odpowiedź materiału badanego w dziedzinie czasu na wymuszenie impulsowe może mieć o wiele bardziej skomplikowany

charakter. Przykładową odpowiedź materiału wielowarstwowego przedstawiono na ryc. 3.5. Wyróżnić na niej można dwa impulsy odbite od granic FS i BS, ale poza nimi występują również komponenty wynikające ze struktury wewnętrznej materiału. Wszystko to oraz stosunkowo niska moc możliwych do wygenerowania impulsów terahercowych powodują, że wykrycie i identyfikacja defektów jest trudne. W rozdziałach 4 i 5 przedstawiono algorytmy i układy pomiarowe zaproponowane lub zmodyfikowane przez autora, umożliwiające poprawne wykrycie i identyfikację defektów występujących w nieprzewodzących polimerowych materiałach kompozytowych.



Ryc. 3.5. Sygnał w dziedzinie czasu  $s(t)$  zmierzony w trybie odbiciowym podczas inspekcji wielowarstwowego kompozytu bazaltowego: a) przy obecności defektu – rozwarstwienia wynikającego z uderu mechanicznego, b) bez defektu

Do najważniejszych zalet czasowej spektroskopii terahercowej w odniesieniu do innych technik, stosowanych w nieniszczących badaniach materiałów jednorodnych dielektrycznych i kompozytowych, zaliczyć można:

- bezpieczeństwo – w przeciwieństwie do metody radiograficznej inspekcja terahercowa, wykorzystująca niejonizujące promieniowanie elektromagnetyczne małej mocy, jest bezpieczna dla operatora i jego środowiska;
- badanie bezkontaktowe – w przeciwieństwie do metody ultradźwiękowej pomiędzy elementem badanym a głowicą pomiarową nie musi być kontaktu mechanicznego ani żadnego medium pośredniczącego; właściwość ta jest pożądana w pomiarach elementów mających wysoką temperaturę lub poruszających się;
- możliwość otrzymania informacji o strukturze w całym przekroju materiału za pomocą jednego pomiaru (w jednym punkcie pomiarowym otrzymujemy odpowiedź czasową, taką jak np. na ryc. 3.5) – podobnie jak w technice ultradźwiękowej i w przeciwieństwie do radiografii, gdzie dla jednego punktu pomiarowego otrzymujemy pojedynczą wartość intensywności piksela wynikającą ze stopnia pochłaniania promienia rentgenowskiego na jego drodze;

- możliwość pomiarów spektroskopowych – impuls elektromagnetyczny zawiera szerokie pasmo częstotliwości (od kilkudziesięciu GHz do kilku THz), a więc zastosowanie transformacji Fouriera pozwala na uzyskanie odpowiedzi częstotliwościowej umożliwiającej określenie występowania różnych substancji w badanej próbce.

Do najważniejszych wad impulsowej metody terahercowej, ograniczających jej powszechne zastosowanie, zaliczyć można:

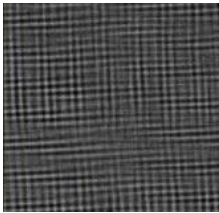
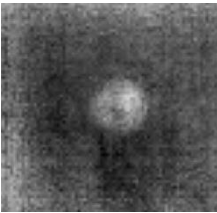
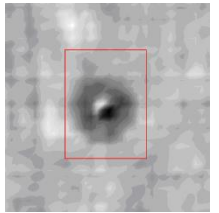
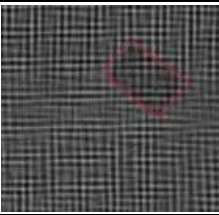
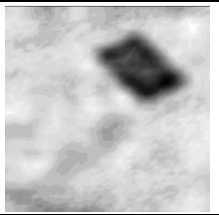
- możliwość stosowania jej tylko do badania materiałów nieprzewodzących – wynika to z zastosowania fal elektromagnetycznych wysokich częstotliwości i zjawiska naskórkowości; w przypadku materiałów przewodzących możliwa do inspekcji jest tylko powierzchnia lub pierwsza warstwa materiałów kompozytowych ze wzmocnieniem przewodzącym;
- potrzebę rastrowego skanowania – powoduje ona znaczne wydłużenie czasu inspekcji, w porównaniu z metodami wykorzystującymi detektory matrycowe, np. termografia lub radiografia cyfrowa, lub metoda subterahercowa z falą ciągłą (CW) i detektorem w postaci matrycy bolometrów;
- stosunkowo małą moc impulsów terahercowych, co ogranicza grubość materiałów kompozytowych, które mogą być poddane inspekcji. Problem ten wynika z faktu, że technologia terahercowa jest jeszcze w początkowym stadium rozwoju; w związku z tym nie jest jeszcze możliwe uzyskanie generatorów dużych mocy, tak jak w przypadku zbliżonej widmowo metody mikrofalowej lub metody wykorzystującej fale podczerwone;
- duży koszt systemów obrazowania terahercowego, co ogranicza jej wykorzystanie; jednakże wraz z bardzo szybkim rozwojem technologii optoelektronicznych i materiałowych oraz wraz z ciągle powiększającym się rynkiem technologii terahercowych czynnik ten będzie miał coraz mniejsze znaczenie.

Aby lepiej zobrazować zalety metody terahercowej, zaprezentowano niżej wyniki prostego eksperymentu. W tabeli 3.2 przedstawiono wyniki inspekcji terahercowej wraz z innymi elektromagnetycznymi metodami stosowanymi do badania materiałów kompozytowych. Przedmiotem testu był sześciowarstwowy kompozyt polimerowy ze wzmocnieniem w postaci tkaniny bazaltowej. Materiał był wykonany metodą laminowania ręcznego; jego grubość wynosiła 2 mm. Do porównania wybrano dwa rodzaje defektów:

- uszkodzenie powierzchni i rozwarstwienie wywołane uderzeniem (energia uderzenia wynosiła 4 J), które jest typowym przykładem defektów eksploatacyjnych;
- sztuczne wtrącenie (w postaci cienkiej folii mikowej) stanowiące defekt fazy produkcyjnej.

Jak można zauważyć, rozwarstwienie zostało wykryte za pomocą aktywnej termografii podczerwonej oraz metody terahercowej. W przypadku metody radiograficznej powstanie szczeliny pomiędzy wybranymi warstwami nie zmienia ilości pochłanianej energii (na drodze promieni), co powoduje trudności z wykryciem tego typu defektów. W próbce z wtrąceniem metoda radiograficzna (na skutek dostatecznej zmiany współczynnika pochłaniania) umożliwia wykrycie defektu, podobnie jak metoda terahercowa. Aktywna termografia, w wyniku podobieństwa parametrów cieplnych materiału badanego i materiału wtrącenia, uniemożliwiła jednoznaczne wykrycie defektu tego typu. Użycie metody terahercowej pozwoliło jednoznacznie określić głębokość defektu (na podstawie sygnału typu B – ryc. 3.10).

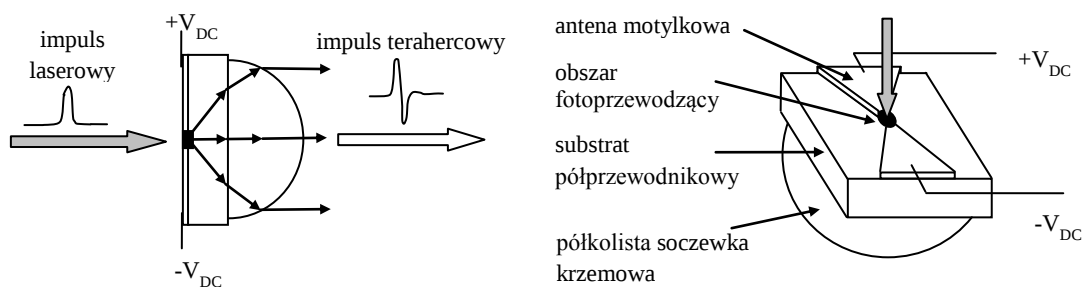
Tabela 3.2. Porównanie wyników obrazowania kompozytu bazaltowego za pomocą różnych metod badań nieniszczących

| Rodzaj defektu                                               | Wyniki inspekcji radiograficznej                                                  | Wyniki aktywnej termografii podczerwonej                                           | Wyniki inspekcji terahercowej                                                       |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Uszkodzenie powierzchni i rozwarstwienie wywołane uderzeniem |  |  |  |
| Sztuczne wtrącenie                                           |  |  |  |

Źródło: na podstawie [16]. Inspekcję metodą radiografii cyfrowej przeprowadził i wyniki udostępnił prof. Tomasz Chady (ZUT w Szczecinie), natomiast inspekcję metodą termograficzną przeprowadziła i jej wyniki udostępniła dr Barbara Grochowalska (ZUT w Szczecinie).

### 3.2. System pomiarowy wykorzystywany w badaniach

W wykorzystywanym w niniejszej pracy systemie pomiarowym zarówno do generacji, jak i do detekcji promieniowania terahercowego stosowane są anteny fotoprzewodzące (ang. Photoconductive Antenna, PCA). Schematycznie strukturę takiej anteny przedstawiono na ryc. 3.6.



Ryc. 3.6. Antena fotoprzewodząca – źródło/detektor sygnału w zakresie terahercowym

PCA składa się z metalicznej anteny motylkowej (ang. *bowtie antenna*) nałożonej na substrat półprzewodnikowy z arsenku galu (GaAs) [114, 134, 135, 150]. Antena zasilona jest z zewnątrz napięciem stałym ( $\pm V_{DC}$ ). W przerwie pomiędzy ramionami (rzędu kilku mikrometrów) znajduje się obszar fotoprzewodzący zbudowany z arsenku galu wzrastającego w niskiej temperaturze LTG-GaAs (ang. Low Temperature Grown GaAs). Charakteryzuje się on relatywnie dobrą mobilnością nośników  $\mu_c$  i czasem ich życia  $\tau_e$  rzędu kilku pikosekund oraz

dużą rezystywnością [150]. W stanie spoczynku (bez zewnętrznego wzbudzenia) napięcie zasilające nie wywołuje przepływu prądu. Pobudzenie układu przez naświetlenie femtosekundowym impulsem laserowym powoduje dostarczenie wolnych nośników, które przyspieszane są przez zewnętrzne stałe pole elektryczne [25]. W odpowiedzi na ultrakrótki impuls laserowy generowany jest impulsowy przepływ prądu po ramionach anteny. Zgodnie z zależnościami podanymi przez Maxwella towarzyszy temu impuls pola elektromagnetycznego. Jego czas trwania (w przypadku wykorzystywanego systemu) wynosi kilka pikosekund, co w dziedzinie częstotliwości pozwala na uzyskanie pasma od 20 GHz do 3 THz. Powstałe w ten sposób pole elektromagnetyczne jest kolimowane przez półsferyczną soczewkę krzemową, a następnie wypromieniowywane w kierunku materiału badanego lub, częściej, przez aperturę soczewki skupiającej. Prąd płynący przez nadawczą antenę fotoprzewodzącą określony jest następującą zależnością [111]:

$$i_{\text{nad}}(t) \propto \int_{-\infty}^t P_0 e^{-\left(\frac{t-t'}{\Delta t_0}\right)^2} e^{-\frac{t'}{\tau_e}} \mu_c E_{\text{DC}} dt' \quad (3.24)$$

gdzie:  $E_{\text{DC}}$  – zewnętrzne stałe pole elektryczne,  $P_0$  – moc padającego impulsu optycznego,  $\Delta t_0$  – czas trwania impulsu optycznego.

Natężenie pola elektrycznego generowanego przez PCA jest proporcjonalne do pochodnej prądu fotoprzewodnictwa [37, 111, 134]:

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{di(t)}{dt} \quad (3.25)$$

Po stronie odbiorczej mierzony jest prąd [37, 135]:

$$i_{\text{odb}}(t) \propto \int_{-\infty}^t \sigma_c(t-t') E_{\text{RxTHz}}(t') dt' \quad (3.26)$$

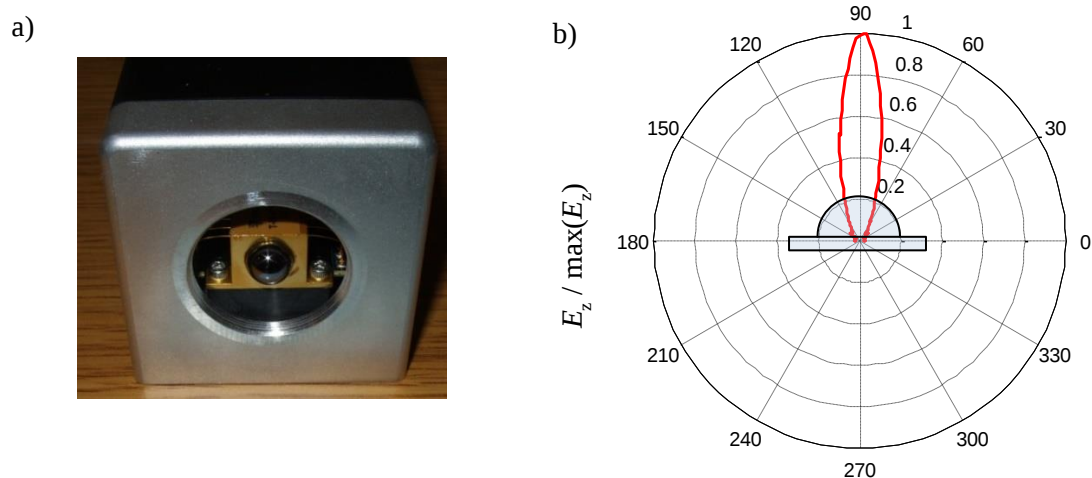
gdzie:  $\sigma_c(t)$  – fotokonduktywność,  $E_{\text{RxTHz}}(t)$  – impuls promieniowania terahercowego padającego na antenę odbiorczą PCA.

Prąd ten jest rzędu od kilku pikoamperów do nanoamperów, w związku z czym w systemach THz-TDS wykorzystywane są układy homodynowe (wzmacniacze fazoczułe typu *lock-in*). Bardziej szczegółowa analiza zjawisk zachodzących w strukturach PCA przedstawiona została w pracach [37, 111, 134, 135].

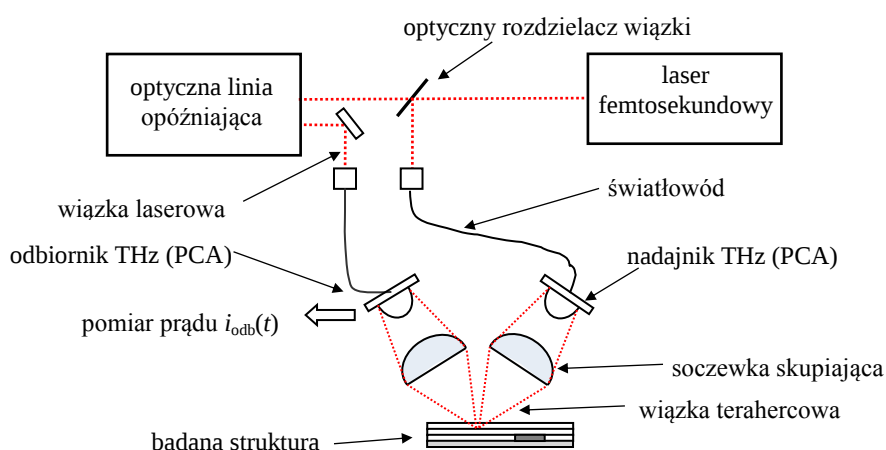
Na ryc. 3.7 przedstawiono zdjęcie zamocowanej w głowicy pomiarowej anteny fotoprzewodzącej stosowanej w eksperymentach oraz jej zmierzoną charakterystykę promieniowania.

Uproszczony schemat terahercowego systemu pomiarowego przedstawiono na ryc. 3.8. Głównymi składnikami systemu są: ultraszybki laser (generujący impulsy o czasie trwania rzędu kilku femtosekund), optyczna linia opóźniająca oraz para przetworników (nadajnik i odbiornik) sprzężonych z laserem poprzez światłowody. Impulsy terahercowe są generowane przez znajdującą się w głowicy nadawczej antenę fotoprzewodzącą. Następnie są skupiane na powierzchni mierzonego materiału przez soczewkę wykonaną z polietylenu dużej gęstości HDPE (ang. High-Density Polyethylene). Po interakcji z badaną strukturą odbite impulsy, przecho-

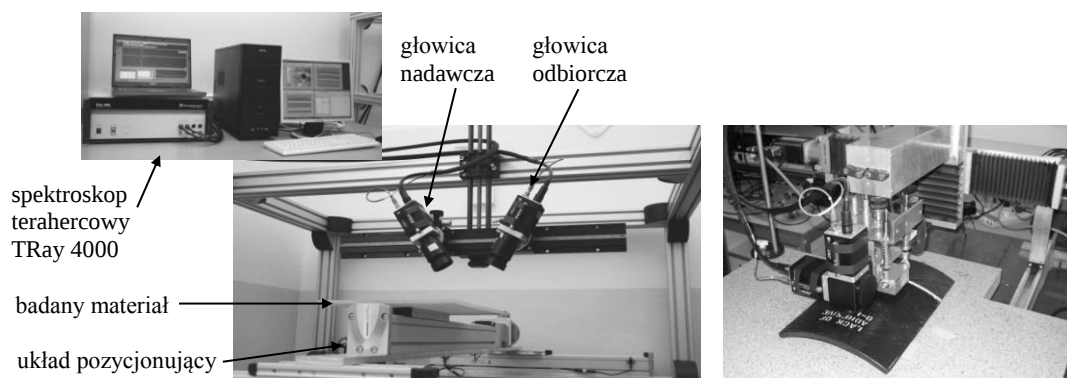
dząc przez soczewkę skupiającą po stronie odbiorczej, docierają do drugiej anteny PCA. Tam następuje detekcja poprzez pomiar zaindukowanego w ramionach anteny prądu.



Ryc. 3.7. Antena fotoprzewodząca firmy Picometrix zastosowana w badaniach własnych: a) widok anteny w głowicy pomiarowej, b) zmierzona charakterystyka promieniowania



Ryc. 3.8. Schemat impulsowego systemu spektroskopii terahercowej wykorzystywanego w badaniach

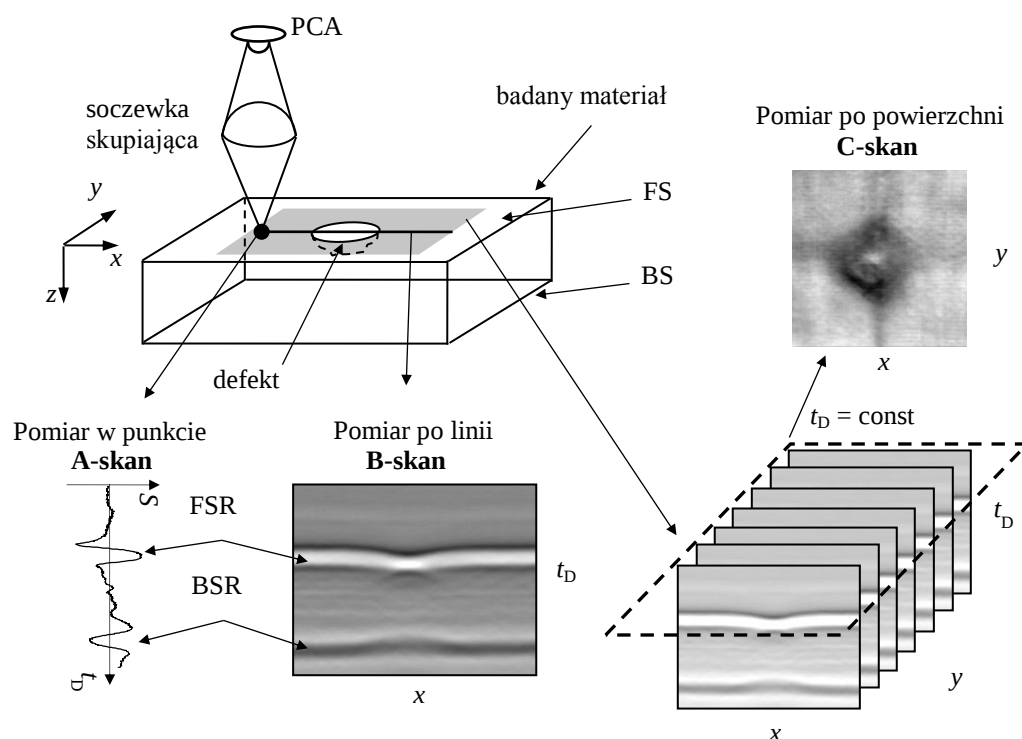


Rys. 3.9. Terahercowy system pomiarowy wykorzystywany w badaniach

System terahercowy wykorzystywany w niniejszych badaniach, znajdujący się w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki ZUT w Szczecinie, przedstawiono na ryc. 3.9. Głównym elementem systemu jest spektroskop terahercowy TRay 4000 firmy Picometrix. Badane próbki przesuwane są za pomocą trójwymiarowego kartezjańskiego układu pozycjonującego ( $x, y, z$ ). Całość zarządzana jest przez komputer sterujący.

### 3.3. Sygnały występujące w badaniach TDS

Obrazowanie wykorzystujące impulsy promieniowania elektromagnetycznego w zakresie terahercowym ma wiele podobieństw do metody ultradźwiękowej UT. Występują podobne zjawiska falowe i sygnały pomiarowe. W związku z tym środowisko naukowców zajmujących się techniką terahercową TDS (ang. Time Domain Spectroscopy) w badaniach nieniszczących przyjęło nazewnictwo stosowane w badaniach ultradźwiękowych – obrazowanie typu A, B i C (ang. A-, B- and C-scan). Rodzaje sygnałów wykorzystywanych w obrazowaniu terahercowym przedstawiono schematycznie na ryc. 3.10.



Ryc. 3.10. Rodzaje sygnałów wykorzystywanych w obrazowaniu terahercowym:  $t_D$  – opóźnienie czasowe [ps], FS (ang. *front surface*) – płaszczyzna materiału od strony głowic pomiarowych, BS (ang. *back surface*) – płaszczyzna materiału od strony przeciwnej

Dla każdego punktu pomiarowego ( $x, y$ ) odczytywany jest sygnał czasowy (skan typu A, A-skan). Impulsowy charakter wzbudzenia elektromagnetycznego implikuje impulsową postać odpowiedzi materiału. Wyróżnić w niej można przynajmniej jeden impuls wynikający z odbicia fali od granicy powietrze–materiał (FSR). Dąży się do tego, żeby widoczny był rów-

niez drugi ważny impuls odbity od granicy materiał–powietrze (BSR). Każdy dodatkowy impuls pomiędzy FSR a BSR wywołany jest niejednorodnością struktury wewnętrznej materiału badanego. Obrazowanie typu B uzyskuje się podczas liniowego przesunięcia głowicy pomiarowej nad badanym materiałem. Natomiast obrazowanie typu C wymaga skanowania powierzchniowego. Dzięki obserwacji rozkładu sygnału dla zadanego opóźnienia czasowego  $t_D$  możliwa jest przykładowo obserwacja ciągłości warstwy lub połączenia klejonego na głębokości odpowiadającej temu opóźnieniu.

### 3.4. Modelowanie numeryczne terahercowych układów pomiarowych

Projektowanie optymalnych geometrii układów pomiarowych, lepsze zrozumienie propagacji fal elektromagnetycznych w skomplikowanych strukturach oraz ocena skuteczności istniejących i opracowywanych algorytmów rekonstrukcji struktury badanego materiału wymagają zastosowania technik modelowania numerycznego. Do symulacji propagacji fal elektromagnetycznych w zakresie terahercowym wykorzystywane są metody szerokopasmowe i czasowe [4, 26]: metoda elementów skończonych (ang. Finite Element Method, FEM), metoda różnic skończonych z bezpośrednim całkowaniem w dziedzinie czasu (ang. Finite Difference Time Domain, FDTD) oraz metody wykorzystujące aproksymację wysokoczęstotliwościową [10, 82]: GO (ang. Geometric Optics), UTD (ang. Uniform Theory of Diffraction), GTD (ang. Geometric Theory of Diffraction), RT (ang. Ray Tracing). Ze względu na potrzebę wykorzystania zarówno informacji amplitudowej, jak i fazowej w badaniach zdecydowano się na wykorzystanie metody różnic skończonych z bezpośrednim całkowaniem w dziedzinie czasu. W związku z dużymi wymaganiami metody FDTD, dotyczącymi potrzebnej mocy obliczeniowej, oraz w związku z małą długością fali elektromagnetycznej w zakresie terahercowym, w porównaniu z rozmiarami geometrycznymi modelowanego obszaru, ograniczono się do modeli dwuwymiarowych. W dalszej części podrozdziału 3.4 przedstawiono najbardziej podstawowe zagadnienia dotyczące metody FDTD, opisano opracowany model numeryczny oraz zaprezentowano wybrane wyniki uzyskane przy jego użyciu. Kod programu głównego i funkcji pomocniczych zaimplementowanych przez autora w środowisku Matlab przedstawiono w pracy [78].

#### 3.4.1. Matematyczny opis problemu

Propagacja i rozpraszanie fal elektromagnetycznych opisane są równaniami Maxwella:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} - \mathbf{J} \quad (3.28)$$

gdzie:  $\mathbf{E}$  – wektor natężenia pola elektrycznego,  $\mathbf{B}$  – wektor indukcji magnetycznej,  $\mathbf{D}$  – wektor indukcji elektrycznej,  $\mathbf{J}$  – wektor gęstości prądu przewodzenia,  $\mathbf{H}$  – wektor natężenia pola magnetycznego.

Wielkości  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{B}$  oraz  $\mathbf{D}$  zdefiniowane są następująco:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (3.31)$$

W kartezjańskim układzie współrzędnych, przy założeniu ośrodka izotropowego, równania (3.27) i (3.28) przedstawić można za pomocą następujących zależności [23, 133]:

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.32)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (3.33)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.34)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \quad (3.35)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \quad (3.36)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \quad (3.37)$$

W przypadku symulacji dwuwymiarowych (płaszczyzna  $x$ - $y$ ) w trybie TM (ang. Transverse Magnetic) występują jedynie składowe natężenia pola elektrycznego  $E_z$  i pola magnetycznego  $H_x$  i  $H_y$ . Zależności (3.32)–(3.37) przyjmują zatem następującą postać:

$$\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \quad (3.38)$$

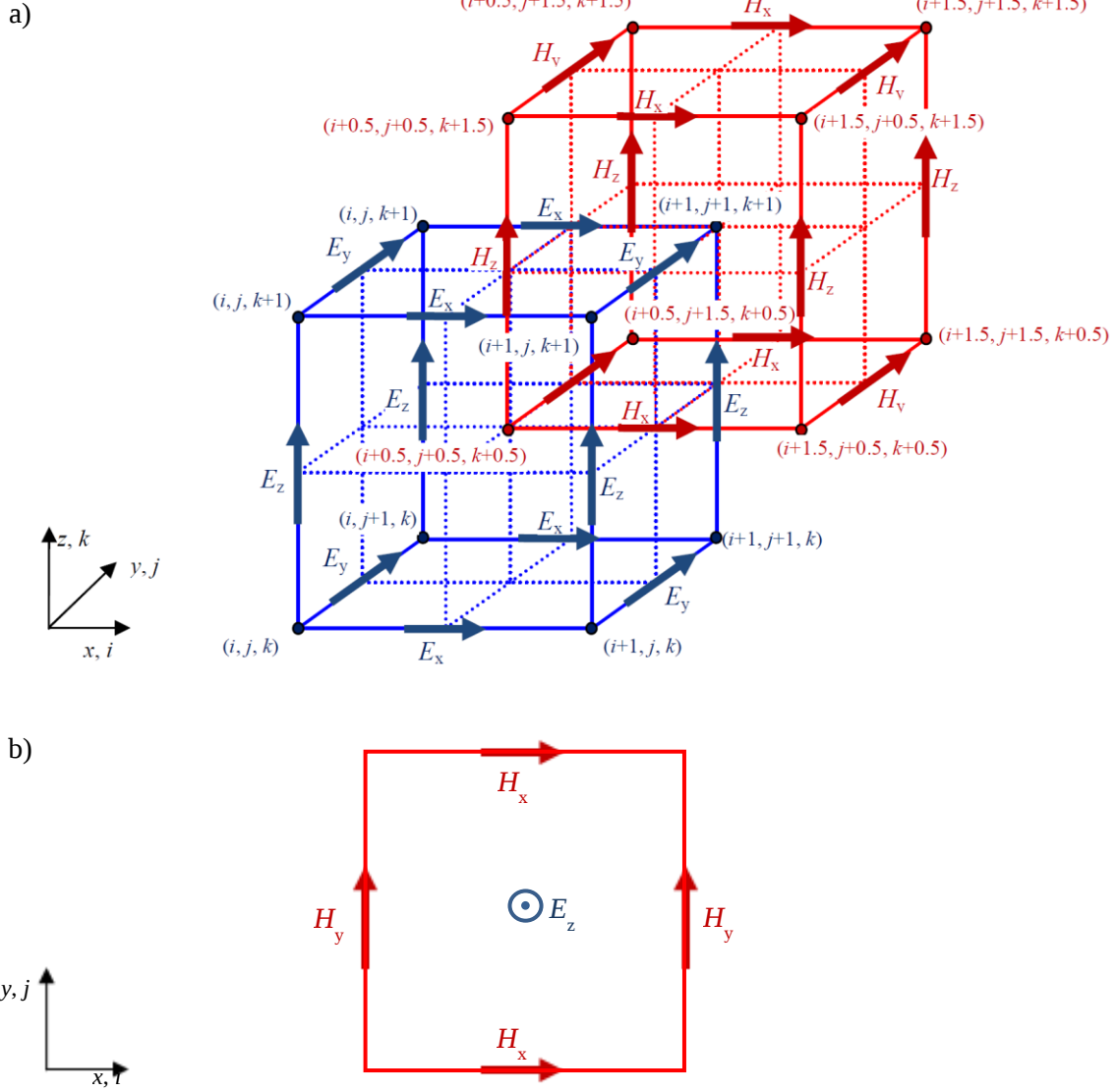
$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.39)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.40)$$

### 3.4.2. Modelowanie metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu

Metoda różnic skończonych z bezpośrednim całkowaniem w dziedzinie czasu jest szeroko stosowana do modelowania zagadnień związanych z propagacją fal elektromagnetycznych [20, 131, 133]. Polega ona na sprowadzeniu układu równań różniczkowych opisujących problem do układu równań różnicowych, a następnie na jego iteracyjnym rozwiązaniu. W meto-

dzie FDTD przyjęto na podstawie [148] przesunięcie pomiędzy wektorami pola elektrycznego i pola magnetycznego (ryc. 3.11).



Ryc. 3.11. Przesunięcie siatek różnicowych opisujących pole elektryczne i magnetyczne w ortogonalnej siatce wykorzystywanej w metodzie FDTD: a) w przestrzeni 3D, b) w przestrzeni 2D – tryb TM

Po przybliżeniu równań (3.38)–(3.40) za pomocą różnic centralnych otrzymujemy następujące zależności różnicowe [133]:

$$\varepsilon \frac{E_z|_{i,j}^{n+0.5} - E_z|_{i,j}^{n-0.5}}{\Delta t} = \frac{H_y|_{i+0.5,j}^n - H_y|_{i-0.5,j}^n}{\Delta x} - \frac{H_x|_{i,j+0.5}^n - H_x|_{i,j-0.5}^n}{\Delta y} - \sigma \frac{E_z|_{i,j}^{n+0.5} - E_z|_{i,j}^{n-0.5}}{2} \quad (3.41)$$

$$\mu \frac{H_x|_{i,j+0.5}^{n+1} - H_x|_{i,j+0.5}^n}{\Delta t} = - \frac{E_z|_{i,j+1}^{n+0.5} - E_z|_{i,j}^{n+0.5}}{\Delta y} \quad (3.42)$$

$$\mu \frac{H_y|_{i+0.5,j}^{n+1} - H_y|_{i+0.5,j}^n}{\Delta t} = \frac{E_z|_{i+1,j}^{n+0.5} - E_z|_{i,j}^{n+0.5}}{\Delta x} \quad (3.43)$$

gdzie:  $n$  – numer kroku czasowego,  $i, j, k$  – indeksy położenia w siatce przestrzennej.

Na podstawie równań (3.41)–(3.43) obliczane są aktualne wartości – kolejno  $E_z$ ,  $H_x$  i  $H_y$ :

$$E_z|_{i,j}^{n+0.5} = \frac{2\varepsilon_{i,j} - \Delta t \sigma_{i,j}}{2\varepsilon_{i,j} + \Delta t \sigma_{i,j}} E_z|_{i,j}^{n-0.5} + \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i,j} + \Delta t \sigma_{i,j}} \left[ \frac{H_y|_{i+0.5,j}^n - H_y|_{i-0.5,j}^n}{\Delta x} - \frac{H_x|_{i,j+0.5}^n - H_x|_{i,j-0.5}^n}{\Delta y} \right] \quad (3.44)$$

$$H_x|_{i,j+0.5}^{n+1} = H_x|_{i,j+0.5}^n - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j+0.5} \Delta y} [E_z|_{i,j+1}^{n+0.5} - E_z|_{i,j}^{n+0.5}] \quad (3.45)$$

$$H_y|_{i+0.5,j}^{n+1} = H_y|_{i+0.5,j}^n + \frac{\Delta t}{\mu_{i+0.5,j} \Delta x} [E_z|_{i+1,j}^{n+0.5} - E_z|_{i,j}^{n+0.5}] \quad (3.46)$$

Obliczenia te wykonywane są w pętli głównej programu. Każda iteracja pętli odpowiada kolejnemu krokowi czasowemu  $\Delta t$ , którego stała długość liczona jest na podstawie następującej zależności:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2c_0} \quad (3.47)$$

gdzie:  $\Delta x = \Delta y \leq \frac{\lambda_{\min}}{10}$ ,  $c_0$  – prędkość propagacji fali EM w próżni. (3.48)

Długości kroku dyskretyzacji przestrzeni w obu kierunkach  $\Delta x$  i  $\Delta y$  zależą od najmniejszej długości fali występującej w modelu obliczeniowym  $\lambda_{\min}$ . Jest ona dzielona przez wartość 10, co umożliwia poprawne odwzorowanie charakteru ruchu falowego. Na jedną długość fali przypada wtedy przynajmniej 10 komórek obliczeniowych. Obliczenie najmniejszej długości fali  $\lambda_{\min}$  sprowadza się do następującej zależności:

$$\lambda_{\min} = \frac{c_0}{f_{\text{EXCmax}} \sqrt{\varepsilon_{\text{max}} \mu_{\text{max}}}} \quad (3.49)$$

gdzie:  $f_{\text{EXCmax}}$  – maksymalna częstotliwość sygnału wzbudzenia,  $\varepsilon_{\text{max}}$ ,  $\mu_{\text{max}}$  – maksymalna występująca w modelu względna przenikalność elektryczna i magnetyczna.

Zależność (3.47) wiążąca krok czasowy z krokiem przestrzennym spełnia warunek stabilności Couranta:

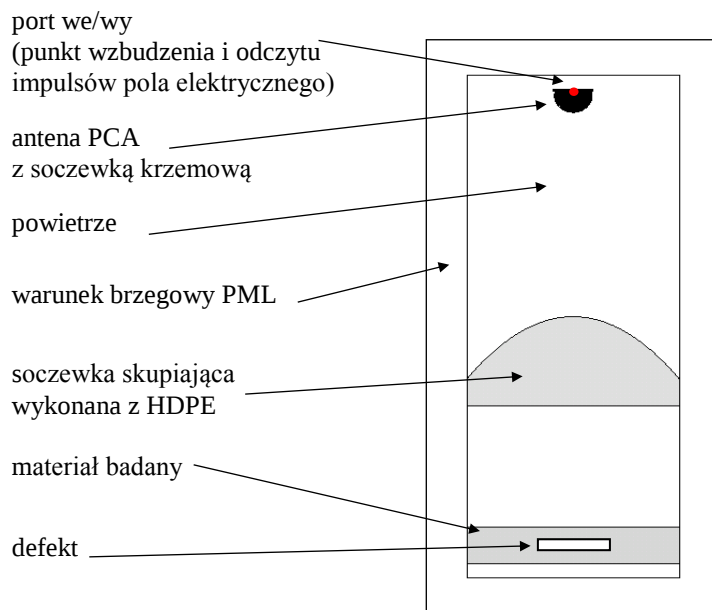
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{\dim} c_0} \quad (3.50)$$

dla przypadku dwuwymiarowego ( $\dim = 2$ ):

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2c_0} \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2}c_0} \quad (3.51)$$

### 3.4.3. Model FDTD układu inspekcji terahercowej pracującego w konfiguracji odbiciowej

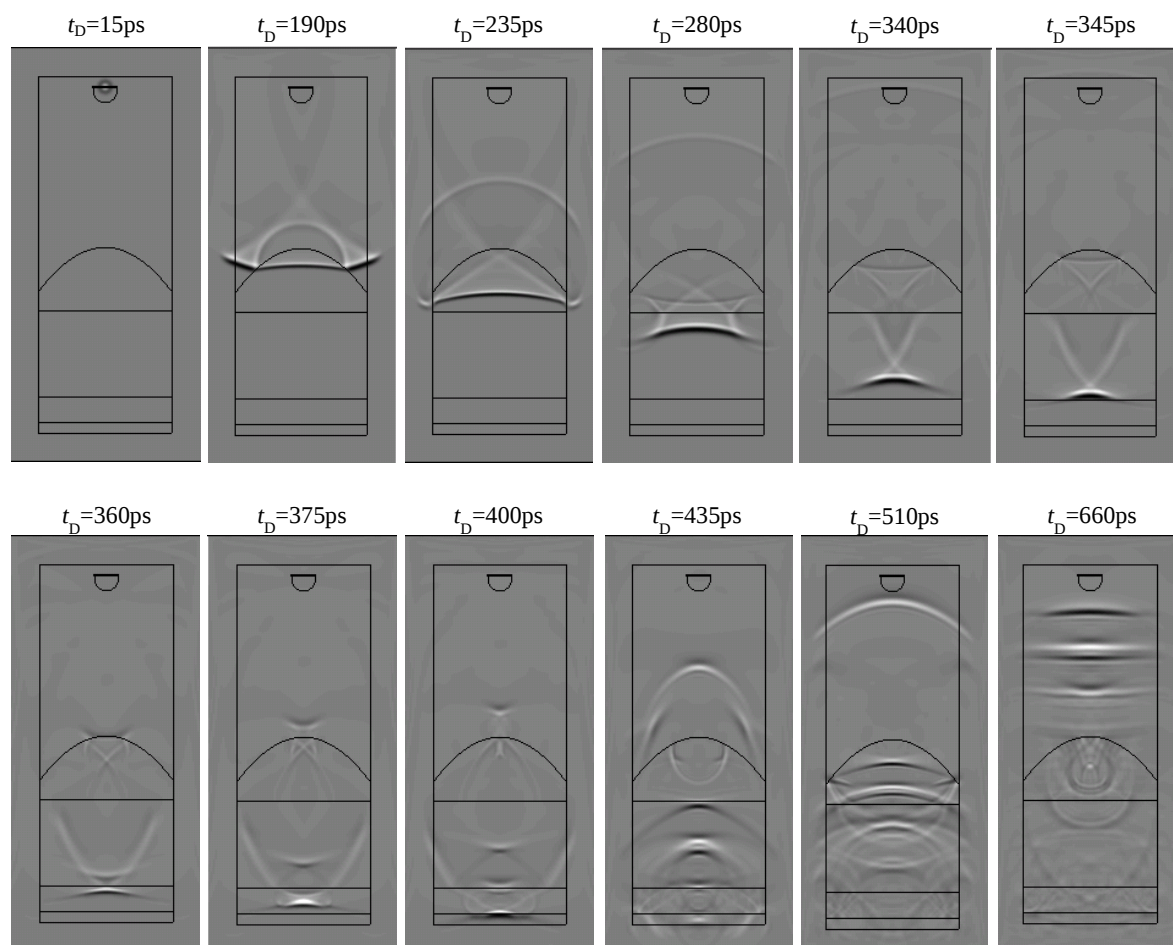
Dwuwymiarowa wersja metody FDTD, przedstawiona w rozdz. 3.4.2, została zaimplementowana przez autora w środowisku Matlab. Geometrię modelu przedstawiono na ryc. 3.12. We właściwym obszarze obliczeniowym znajdują się: antena PCA, soczewka skupiająca oraz badany materiał z ewentualnym defektem. Zewnętrzny obszar domeny obliczeniowej stanowi strefa absorpcyjnych warunków brzegowych (ang. Perfectly Matched Layers, PML). Elementem wzbudzającym jest antena fotoprzewodząca PCA. Sygnał do anteny podawany jest poprzez punktowy port we/wy i z niego jest również odczytywany. Zastosowano źródło typu *soft* [131], wymuszając w porcie gaussowską zmianę składowej  $E_z$  pola elektrycznego. Rozwiązanie powyższe upraszcza model, jednocześnie redukując antenę motylkową wykorzystywaną w rzeczywistym systemie do anteny dipolowej.



Ryc. 3.12. Geometria modelu numerycznego układu do terahercowych badań nieniszczących pracującego w układzie odbiciowym

Na ryc. 3.13 przedstawiono propagację sygnału terahercowego w założonej geometrii. Impuls elektromagnetyczny wypromieniowany przez antenę PCA rozchodzi się w powietrzu. Przechodząc przez soczewkę wykonaną z HDPE, podlega skupieniu. Jednocześnie na skutek różnic impedancji falowych podlega odbiciu na granicach obszarów powietrze–soczewka, a następnie soczewka–powietrze. Powyższe odbicia rejestrowane są przez antenę odbiorczą, ale ich czas powrotu jest na tyle mały, w stosunku do impulsów odbitych od badanego mate-

riału, że nie zniekształcają one odpowiedzi materiału. Obniżają natomiast energię impulsu docierającego do próbki, co przy stałym poziomie szumów prowadzi do obniżenia stosunku sygnał / szum SNR (ang. Signal-Noise Ratio). Efekt ten może zostać zminimalizowany przy zastosowaniu w systemie pomiarowym zwierciadeł skupiających, zamiast soczewek. Po czasie 345 ps od początku symulacji skupiony impuls odbija się od powierzchni materiału badanego, następnie od granic: materiał/defekt, defekt/materiał oraz materiał/powietrze. Powoduje to powstanie czterech impulsów odbitych, rejestrowanych w obliczonej odpowiedzi czasowej (sygnał typu A-skan).



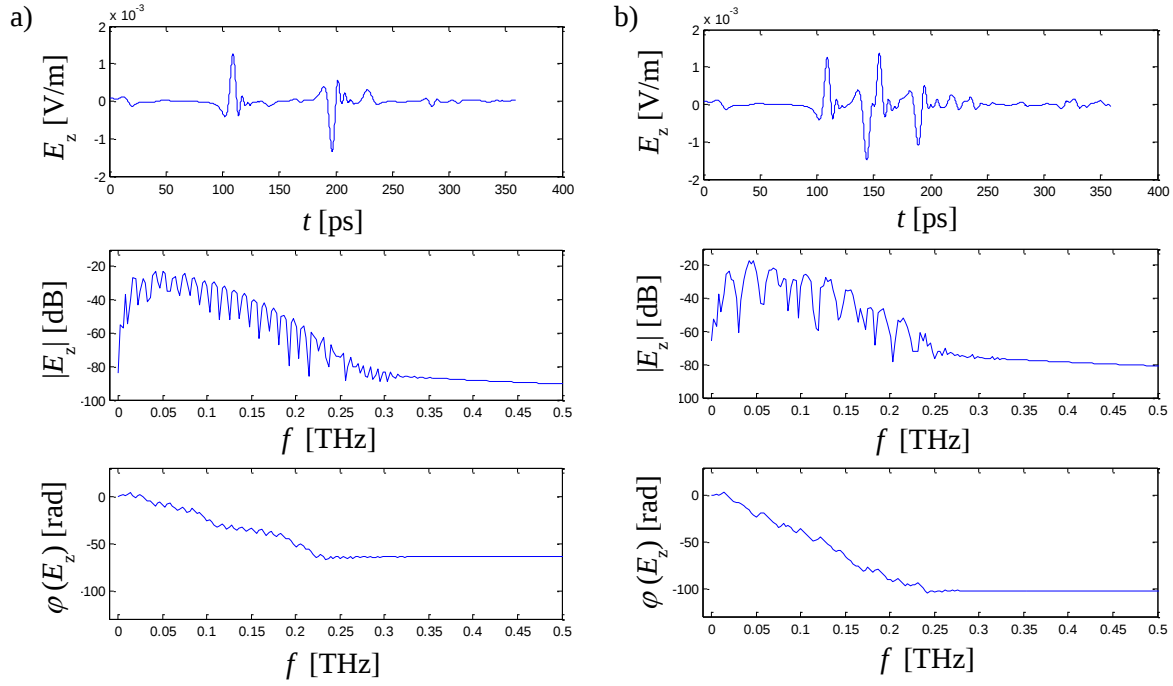
Ryc. 3.13. Przebieg symulacji w czasie (badany materiał: PMMA z powietrznym wtrąceniem)

Na ryc. 3.14 przedstawiono odpowiedzi czasowe oraz odpowiadające im widma amplitudowe i fazowe dla różnych przypadków:

- materiał badany: szkło akrylowe – PMMA (ang. Poly Methyl Methacrylate); brak defektu;
- materiał badany: PMMA; defekt: wtrącenie powietrzne.

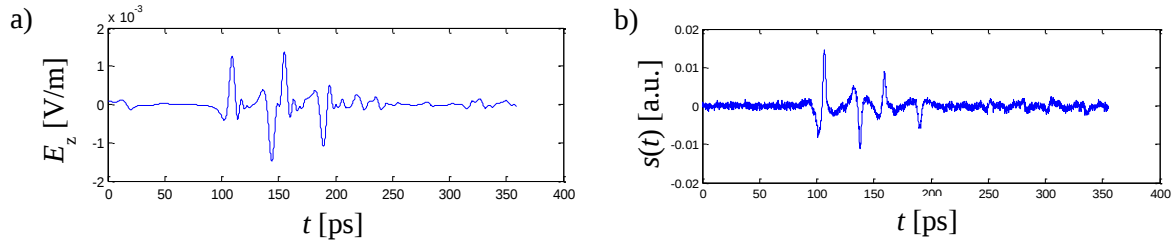
W symulacji przyjęto następujące parametry:  $\epsilon_{\text{tkrzem}} = 11,53$ ,  $\epsilon_{\text{tHDPE}} = 2,36$ ,  $\epsilon_{\text{tPMMA}} = 2,66$ ,  $\Delta t = 147$  fs,  $\Delta x = \Delta y = 88,24$   $\mu\text{m}$ .

Zauważyć można, że zarówno w odpowiedziach czasowych, jak i w ich widmach istnieje wyraźna różnica pomiędzy rozważanymi przypadkami. Szczególnie interesująca jest odpowiedź czasowa, gdyż niesie ona informacje o położeniu (głębokości) defektu.



Ryc. 3.14. Wyniki symulacji (sygnały typu A) metodą FDTD dla materiału: a) jednorodnego, b) zawierającego wtrącenie powietrzne

Przeprowadzono pomiarową weryfikację opracowanego modelu poprzez pomiar struktury wykonanej z PMMA. Na ryc. 3.15 przedstawiono uzyskane sygnały typu A. Można zaobserwować podobieństwo opóźnień i biegunowości impulsów. Uzyskano ten sam charakter obu sygnałów pomimo niewielkich różnic w kształcie impulsów wynikających z braku możliwości dokładnego określenia kształtu impulsu wzbudzającego w rzeczywistym systemie.



Ryc. 3.15. Porównanie wyników (sygnałów typu A) uzyskanych dla materiału PMMA z wtrąceniem powietrznym: a) symulacje metodą FDTD, b) pomiar

Wyniki symulacji numerycznych wykorzystane zostały w procesie optymalizacji układu pomiarowego w trybie odbiciowym. Wyniki optymalizacji przedstawił autor w pracy [76]. Ponadto opracowany model numeryczny po niewielkich modyfikacjach wykorzystany został przez autora w metodzie detekcji niejednorodności *time reversal* (zob. rozdz. 4.4) oraz do analizy układu tomografii terahercowej (zob. rozdz. 7).



## 4. Detekcja defektów w materiałach dielektrycznych i kompozytowych

### 4.1. Algorytmy przetwarzania sygnałów i detekcji defektów

W trakcie inspekcji terahercowej, podobnie jak w przypadku innych metod badań nieniszczących, otrzymujemy sygnał pomiarowy. Sygnał ten może wystąpić w różnej postaci, w zależności od tego, czy przeprowadzono inspekcję jednoczesnościową (CW), wieloczęstotliwościową z przemiataniem częstotliwości czy impulsową w dziedzinie czasu (TDS).

Sygnał wynikający z obecności defektu lub niejednorodności struktury, niezależnie od sposobu reprezentacji (współczynniki rozkładów: fourierowskiego, czasowo-częstotliwościowego, falkowego i innych), wyróżnia się w pewien sposób od sygnału otoczenia – najczęściej ma lokalne ekstremum. We wstępnej fazie detekcji defektów muszą zostać określone własności sygnału, które zmieniają się pod wpływem ich obecności. Analiza ta może być przeprowadzona:

- na podstawie wiedzy o wykorzystywanym zjawisku fizycznym,
- na podstawie symulacji numerycznych modelu układu pomiarowego,
- na podstawie pomiarów wstępnych próbek zawierających bogatą bazę możliwych do wystąpienia defektów,
- w sposób niejawny, np. za pomocą sieci neuronowych, gdzie sieć podczas procesu uczenia się nabywa możliwość odczytu zakodowanej w sygnale informacji o dodatkowym oddziaływaniu defektu.

Detekcja defektów polega na wyodrębnieniu anormalnych wartości fragmentów sygnału lub jego właściwości, wynikających z obecności niejednorodności materiałowej, najczęściej za pomocą porównania z wartościami znanymi (otrzymanymi na podstawie inspekcji obiektów niezawierających defektów) lub operacji progowania.

W przypadku defektów o wyraźnie zdefiniowanych granicach (takich jak: wtrącenie powietrzne, rozwarstwienie, brak kleju) występuje stosunkowo duża różnica impedancji charakterystycznych, co powoduje powstanie wyraźnego impulsu odbitego IIR (ang. Internal Interface Reflection). Wykrycie takiego stanu jest stosunkowo proste. W tym celu zastosować można progowanie lub monitoring wartości sygnału w zadanych oknach czasowych (zdefiniowanych przez opóźnienie czasowe impulsów odbitych od początku i końca materiału).

W przypadku, gdy obecność defektu nie wywołuje wyraźnego odbicia impulsu padającego na badaną strukturę (np. przy penetracji wilgoci w strukturę materiału lub zmianie zawartości wzmocnienia w objętości materiału), możliwa jest parametryzacja sygnału pomiarowego. Operacja ta odbywać się może dla całego sygnału lub w określonych oknach czasowych, co pozwala na wykrycie defektów występujących na różnych głębokościach badanego materiału. Detekcja odbywa się poprzez analizę odchylenia wartości wybranego zestawu parametrów / cech od ich poziomu charakterystycznego dla obszarów niezawierających defektów. Wymagany jest zestaw parametrów (nie pojedyncza cecha), gdyż – jak zaobserwowano

w trakcie wieloletnich pomiarów – charakterystyka zmian wartości parametrów w zależności od rodzaju wywołującego je defektu jest zmienna, co oznacza, że parametry w różny sposób zmieniają się w przypadku różnych rodzajów niejednorodności. (Fakt ten umożliwił w rozdz. 5 przeprowadzenie identyfikacji defektów występujących w polimerowych materiałach kompozytowych.) Jako parametry sygnału terahercowego w procesie parametryzacji wykorzystywane są: amplituda, wartość międzyszczytowa, opóźnienia i czasy trwania impulsów, uśredniona energia sygnału, wartości średnie sygnału (średnia arytmetyczna i średnia geometryczna, mediana), entropia, współczynniki rozkładów: fourierowskiego, czasowo-częstotliwościowego, falkowego i innych. Przykładem zastosowania parametryzacji jest praca [73], w której autor wykorzystał uśrednioną energię oraz entropię sygnału do wykrycia defektów połączeń klejonych materiałów kompozytowych. Uśredniona energia rejestrowanego sygnału zdefiniowana została w następujący sposób:

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^2 \quad (4.1)$$

gdzie:  $N$  – liczba próbek w oknie,  $s_n$  – energia  $n$ -tej próbki sygnału  $s$ .

Entropia (statystyczna miara nieuporządkowania) jest definiowana na podstawie histogramu sygnału przez następującą zależność [33]:

$$E_{nt} = - \sum_{m=1}^M [p_m \log_2(p_m)] \quad (4.2)$$

gdzie:  $M$  – liczba przedziałów histogramu,  $p_m$  – wartość funkcji w  $m$ -tym przedziale histogramu.

Efektywna detekcja defektów za pomocą metody terahercowej badań nieniszczących wymaga sygnałów o dobrej jakości. W związku z niskim stosunkiem sygnału do szumu, wynikającym z niskiej mocy generowanego przez anteny fotoprzewodzące pola elektromagnetycznego, do wykrycia najmniejszych niejednorodności niezbędne jest zastosowanie wydajnych algorytmów filtracji. Obecnie najczęściej w tym celu stosowane są filtry medianowe i algorytmy wykorzystujące przekształcenie falkowe. Ciągła transformacja falkowa (ang. Continuous Wavelet Transform, CWT) opisana jest następującą zależnością [141]:

$$S_{\Psi a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4.3)$$

gdzie:  $a$  – współczynnik skali,  $b$  – współczynnik przesunięcia,  $s(t)$  – transformowana funkcja (np. sygnał terahercowy typu A),  $\Psi(t,a,b)$  – funkcja falkowa (jądro przekształcenia),  $S_{\Psi a,b}$  – współczynnik falkowy zależny od skali i przesunięcia.

Współczynniki falkowe reprezentują przetwarzany sygnał w różnych skalach i przesunięciach. Możliwość analizy wielorozdzielczej okazała się przydatna do redukcji szumu występującego w sygnałach terahercowych. Algorytm odsumiania falkowego przedstawić można w następujących etapach:

1) dekompozycji sygnału wejściowego na współczynniki falkowe;

- 2) nieliniowej modyfikacji, np. progowania wybranych współczynników (najsilniej skorelowanych z szumem);
- 3) rekonstrukcji sygnału wyjściowego (ze zredukowanym poziomem szumów) za pomocą odwrotnej transformaty falkowej.

Odpowiedź materiału badanego na impuls wzbudzający stanowi zbiór impulsów odbitych od granic, na których występuje skokowa zmiana impedancji falowej materiału (początek i koniec obiektu badanego, wewnętrzne warstwy, defekty). Impulsy te, w zależności od struktury wewnętrznej materiału, charakteryzują się różnymi amplitudami, polaryzacjami i opóźnieniami. Odebrany sygnał czasowy  $s_d(t)$  można przedstawić za pomocą następującej zależności [21]:

$$s_d(t) = s_e(t) * r_{\text{odb}}(t) \quad (4.4)$$

gdzie:  $s_e(t)$  – impuls wzbudzający (sygnał czasowy),  $r_{\text{odb}}(t)$  – profil odbiciowy badanej struktury w dziedzinie czasu – odpowiedź impulsowa materiału (po przeskalowaniu przez prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w danej części / warstwie struktury możliwe jest określenie profilu przestrzennego),  $*$  – operacja splotu.

W celu zwiększenia zdolności wykrywania słabych impulsów występujących w zaszumionym sygnale oraz oddzielania odrębnych warstw w materiałach wielowarstwowych przeprowadza się operację rozplotu (dekonwolucji). Ponadto taki sposób przetwarzania jest wykorzystywany w przypadku obrazowania terahercowego do poprawy rozdzielczości przestrzennej [1, 149]. Podstawowy proces dekonwolucji jest bardzo wrażliwy na szum i może powodować znaczne błędy w przypadku wyników eksperymentalnych. Z tego powodu wykorzystywane są zmodyfikowane algorytmy rozplotu. Przykładem jest metoda dekonwolucji najmniejszych kwadratów, opisana następującym równaniem [116]:

$$r_{\text{odb}}(t) = (\mathbf{H}_s^T \mathbf{H}_s + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_s^T s_d(t) \quad (4.5)$$

gdzie:  $\mathbf{H}_s$  – macierz przekształcenia (splotu),  $\mathbf{I}$  – macierz jednostkowa,  $\lambda$  – parametr regularyzacji.

Metoda powyższa została wykorzystana przez autora niniejszej monografii w pracy [77].

W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki badań autora nad zastosowaniem transformacji czasowo-częstotliwościowych, syntetycznej apertury skupiającej oraz metody czasu odwrotnego (*time reversal*) do wykrycia defektów występujących w różnych strukturach technicznych.

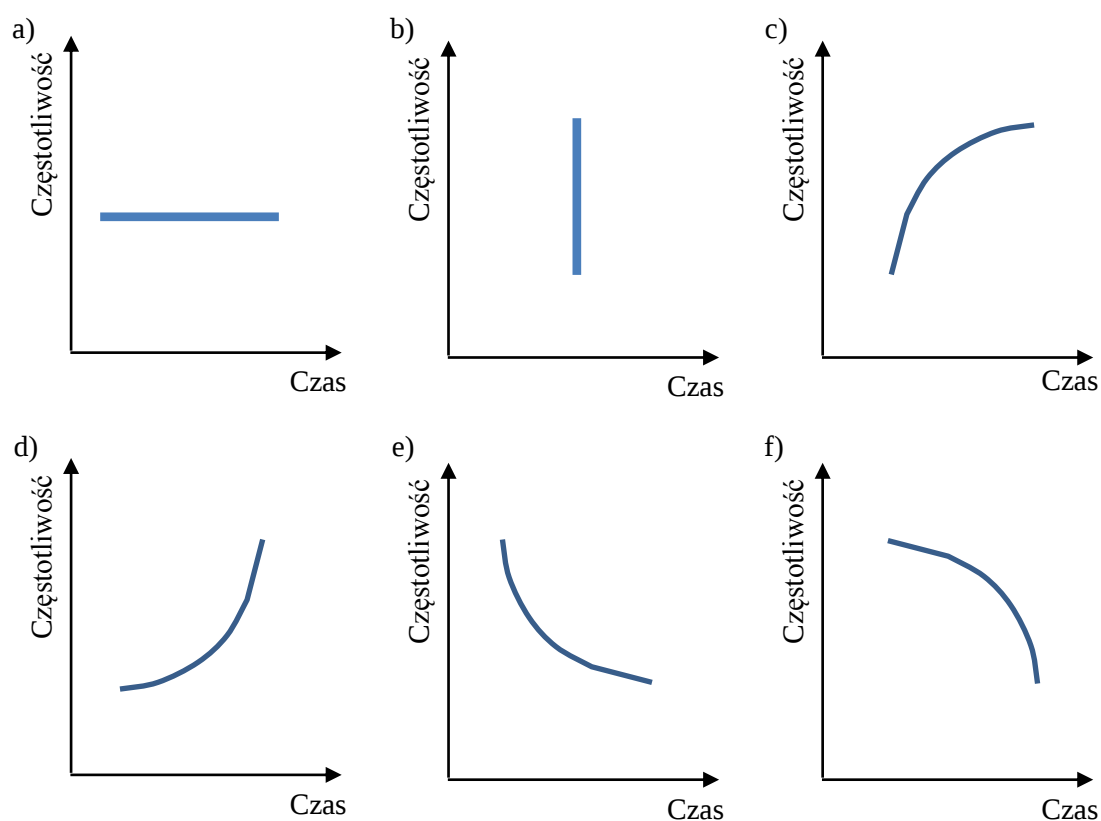
## 4.2. Wykorzystanie transformacji czasowo-częstotliwościowych

### 4.2.1. Reprezentacja czasowo-częstotliwościowa

Sygnały uzyskiwane w pomiarach za pomocą impulsowej metody terahercowej TDS są opisane w dziedzinie czasu. Impulsy wzbudzenia o pikosekundowym czasie trwania są reprezentowane szerokim pasmem częstotliwości. W wyniku zastosowania transformacji Fouriera

sygnał ten może zostać przeniesiony do dziedziny częstotliwości (charakterystyki amplitudowa i fazowa), gdzie następnie jest analizowany. Wadą tego rozwiązania są ograniczone możliwości analizy sygnałów niestacjonarnych, które mogą pojawić się przy badaniu różnorodnych struktur technicznych materiałów bądź struktur geometrycznych (np. przewodnic falowych, rurek lub przekładek typu plaster miodu w kompozytach przekładkowych) charakteryzujących się dyspersją elektryczną. W strukturach tych zachodzi propagacja różnych składowych harmonicznych impulsu z różnymi opóźnieniami przez obiekt badany, co powoduje potrzebę wykorzystania do analizy takich sygnałów przekształceń czasowo-częstotliwościowych TFD. Na ryc. 4.1 schematycznie przedstawiono różne rodzaje rozpraszania fali elektromagnetycznej w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.

Nachylenie krzywych na ryc. 4.1 wynika z różnych prędkości propagacji fali elektromagnetycznej dla różnych długości fali w przypadku struktur dielektrycznych i falowodowych.



Ryc. 4.1. Schematyczne odwzorowanie możliwych do wystąpienia mechanizmów rozpraszania fali elektromagnetycznej po zastosowaniu przekształcenia TFD: a) rezonans, b) centrum rozpraszające, c)–f) dyspersja wywołana geometrią struktury lub przez materiał rozpraszający

Źródło: na podstawie [94].

Najczęściej stosowane w praktyce przekształcenia czasowo-częstotliwościowe zdefiniowane są w następujący sposób [22, 32, 92, 97, 106, 154]:

- krótkoczasowa transformacja Fouriera (ang. Short Time Fourier Transform, STFT)

$$STFT_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \gamma^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.6)$$

- spektrogram (ang. Spectrogram TFD)

$$SP_x(t, f) = |STFT_x(t, f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \gamma^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right|^2 \quad (4.7)$$

gdzie:  $t$  – czas,  $f$  – częstotliwość,  $x(t)$  – sygnał,  $\gamma$  – funkcja okna.

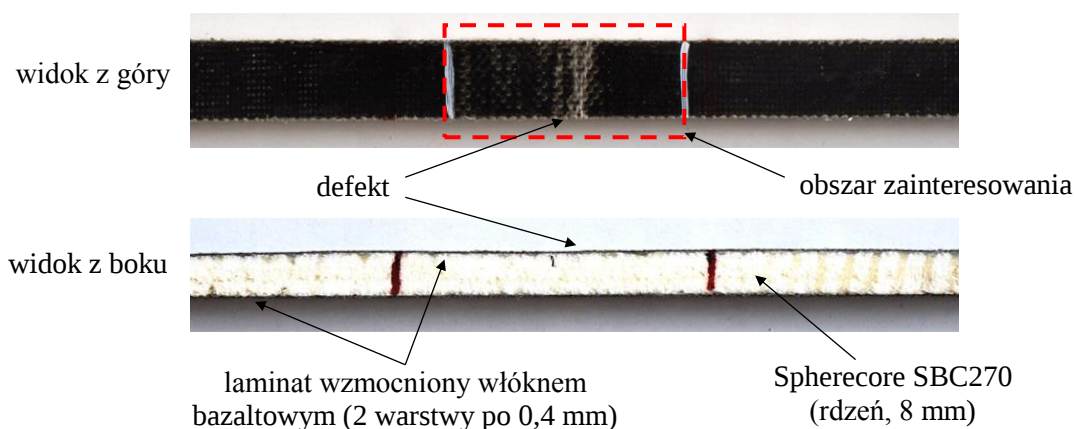
Ponadto wykorzystywane są również następujące transformacje [22, 92, 97]:

- Wignera-Villa (ang. Wigner-Ville TFD, WG),
- wygładzona Wignera-Villa (ang. Smoothed Wigner-Ville TFD, SMW),
- Rihaczka (ang. Rihaczek TFD, RIH),
- Margenau-Hill (ang. Margenau-Hill TFD, MH),
- Choi-Williamsa (ang. Choi-Williams TFD, CHW),
- transformacja Borna-Jordana (ang. Born-Jordan TFD, BJ),
- transformacja Page'a (ang. Page TFD, PG).

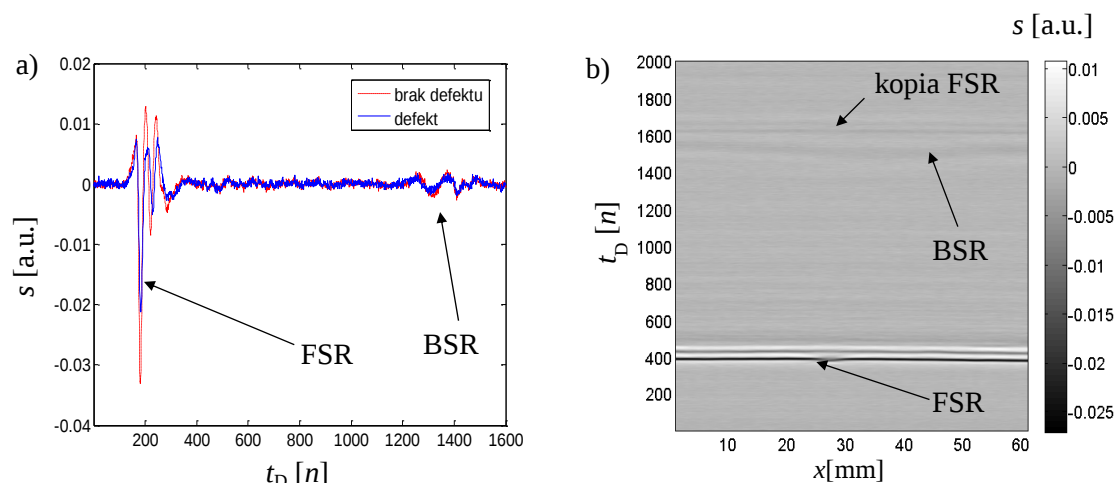
Bardziej szczegółowe informacje na temat przekształceń czasowo-częstotliwościowych dostępne są w pracach [22, 97, 154]. Przykładowe wyniki transformacji sygnałów terahercowych do połączonej dziedziny czasowo-częstotliwościowej za pomocą powyższych przekształceń przedstawiono w dwóch następnych rozdziałach.

#### 4.2.2. Inspekcja kompozytów przekładkowych z wykorzystaniem transformacji czasowo-częstotliwościowych

Kompozyty przekładkowe (ang. *sandwich composites*) to materiały kompozytowe składające się z dwóch warstw zewnętrznych oddzielonych od siebie rdzeniem (ang. *core*) wykonanym z lekkich materiałów (drewno, polimerowe pianki) lub ze struktury typu plaster miodu. Na ryc. 4.2 przedstawiono zdjęcie kompozytu przekładkowego poddanego zewnętrznemu wymuszeniu mechanicznemu.



Ryc. 4.2. Zdjęcie kompozytu przekładkowego wzmocnionego włóknom bazaltowym, poddanego statycznemu wymuszeniu mechanicznemu

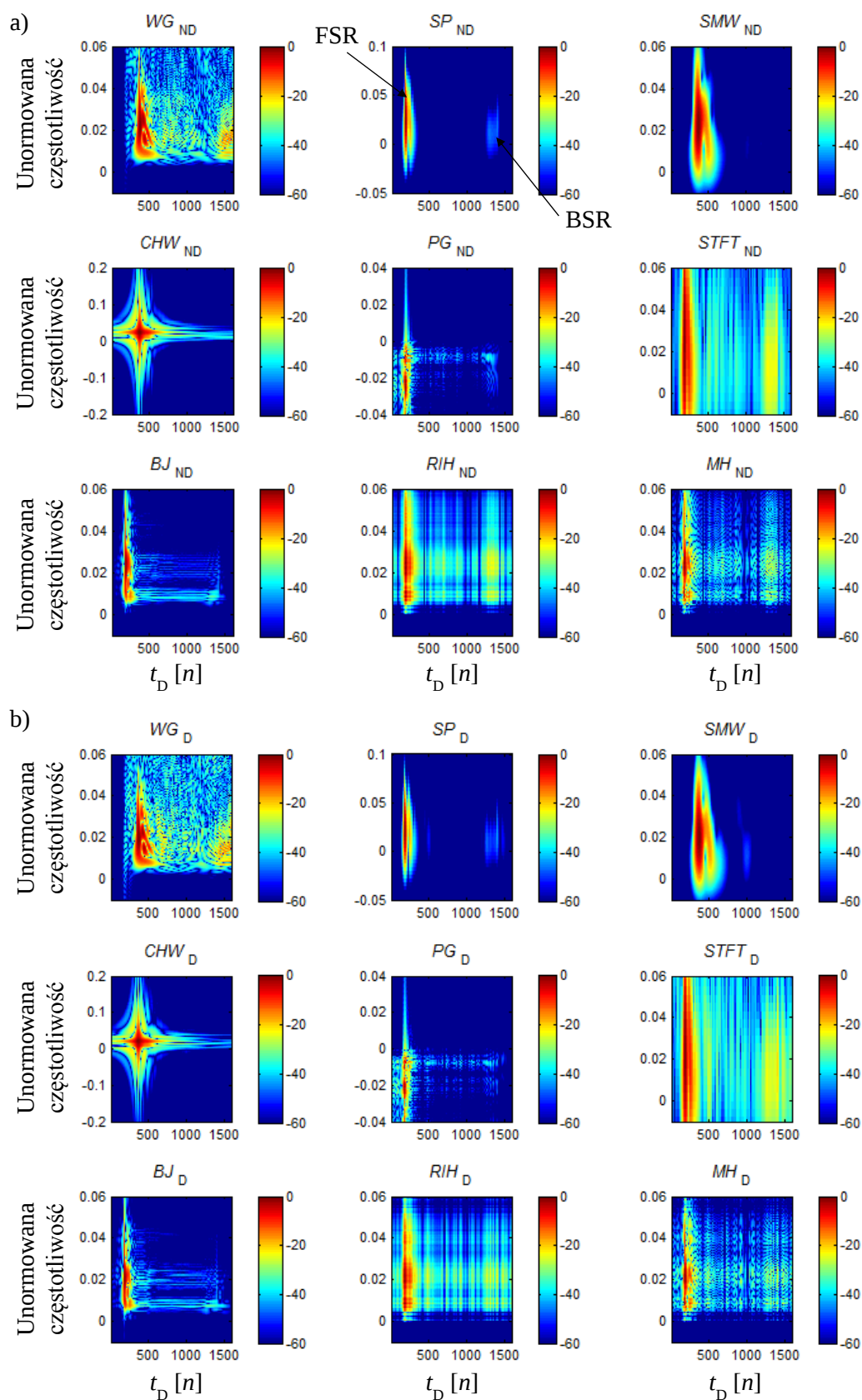


Ryc. 4.3. Sygnały uzyskane w wyniku inspekcji terahercowej kompozytu przekładkowego przedstawionego na ryc. 4.2 poddanego statycznemu wymuszeniu mechanicznemu: a) sygnał typu A (A-skan) uzyskany dla obszaru zawierającego defekt i bez defektu, b) sygnał typu B (B-skan) zmierzony wzdłuż osi próbki

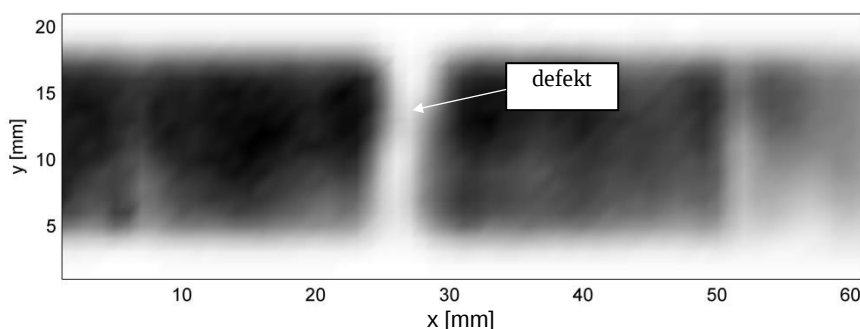
Wyniki inspekcji terahercowej badanego materiału przekładkowego w postaci sygnałów A i B pokazano na ryc. 4.3. Obecność defektu (rozwarstwienia pomiędzy laminatem a rdzeniem od strony głowicy pomiarowej) wpływa na sygnał w pobliżu impulsu FSR.

Na ryc. 4.4 przedstawiono sygnały uzyskane dla badanej próbki kompozytu przekładkowego w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, wyznaczone za pomocą wyżej opisanych transformacji. Analizując transformaty w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, zauważyć można, że przeważają w nich mechanizmy rozpraszania typu a) i b) (ryc. 4.1), czyli rezonans (płaski materiał poddawany inspekcji stanowi rezonator dielektryczny) oraz centrum rozpraszające (wynikające z odbicia harmonicznych o wielu częstotliwościach od płaszczyzn prostopadłych do kierunku propagacji impulsu terahercowego występujących w badanym obiekcie). W niewielkim stopniu (wynikającym z zależności przenikalności elektrycznej materiałów od częstotliwości) występuje również mechanizm dyspersyjny przedstawiony na ryc. 4.1e.

Przedstawienie sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej umożliwia określenie zawartości poszczególnych harmonicznych dla danego opóźnienia czasowego  $t_D$ , a więc pośrednio i dla różnych głębokości. Pozwala to na określenie (podobnie jak w przypadku sygnału typu A) głębokości / położenia poszczególnych defektów. Przykładowy rozkład współczynnika otrzymanego na podstawie spektrogramu przedstawiono na ryc. 4.5. Opóźnienie czasowe zostało dobrane tak, aby można było wykryć rozwarstwienie pomiędzy rdzeniem a laminatem bazaltowym od strony głowicy pomiarowej.



Ryc. 4.4. Transformaty czasowo-częstotliwościowe sygnałów z ryc. 4.3 dla kompozytu przekładkowego: a) bez defektu, b) z defektem



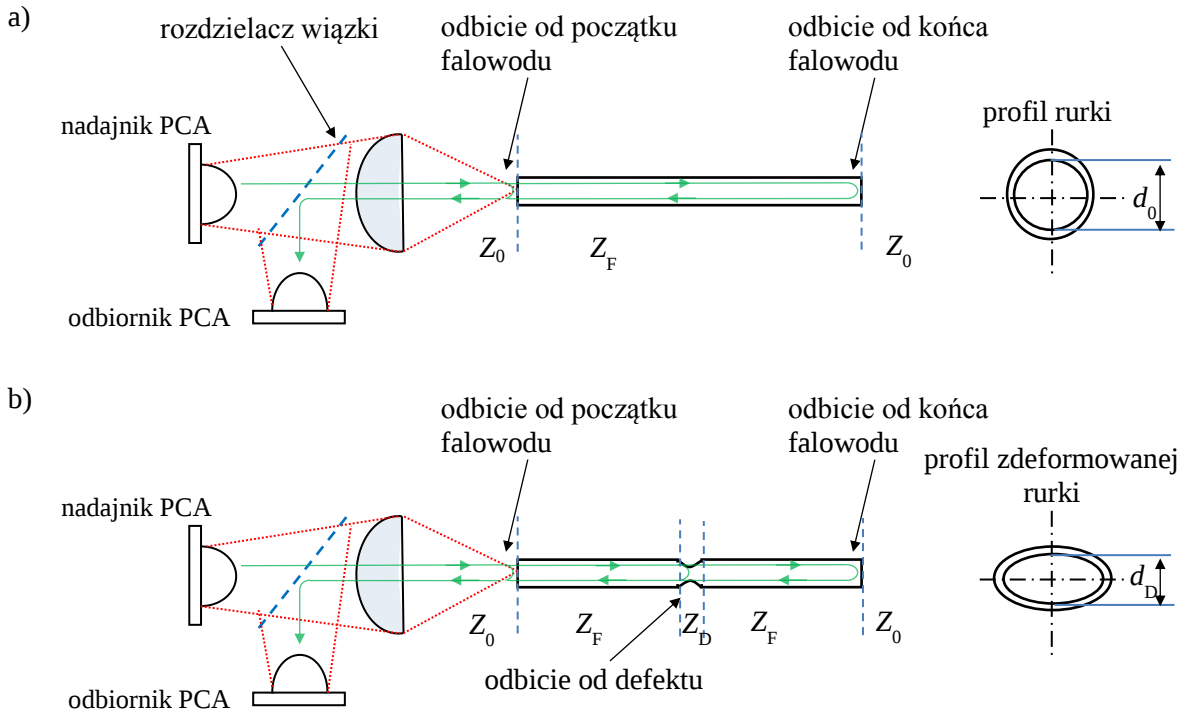
Ryc. 4.5. Rozkład współczynnika  $SP(550;0,01)$  uzyskanego na podstawie przekształcenia czasowo-częstotliwościowego (spektrogramu)

#### 4.2.3. Badanie struktur przewodzących fale z wykorzystaniem transformacji czasowo-częstotliwościowych

Terahercowa metoda inspekcji z wymuszeniem impulsowym umożliwia wykrycie defektów w strukturach, w których występują elementy o charakterze przewodnic falowych, np. pręci lub ich matryce (linie Goubau), rurki o małych średnicach (rzędu kilku długości fali), równoległe płaszczyzny przewodzące. W strukturach takich na skutek dodatkowej dyspersji impulsy terahercowe są zniekształcane (różna prędkość poszczególnych harmonicznych występujących we wzbudzeniu). Sygnały takie mogą być analizowane w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. Poniżej przedstawiony zostanie eksperyment, w którym za pomocą inspekcji terahercowej ze wzbudzeniem impulsowym wykrywane będą defekty wynikające z deformacji ścianki przewodnicy falowej. Schemat zastosowanego układu pomiarowego przedstawiono na ryc. 4.6. Front falowy generowany przez nadawczą antenę PCA jest skupiany przez soczewkę na wejściu do falowodu kołowego – rurki metalowej o średnicy wewnętrznej 2 mm. Wskutek różnicy pomiędzy impedancją wejściową falowodu  $Z_F$  i impedancją falową próżni  $Z_0 = 120\pi \Omega$  następuje częściowe odbicie i częściowa transmisja impulsu do wnętrza. W przypadku braku defektu impuls elektromagnetyczny propagujący się w falowodzie ulega odbiciu od jego końca i powraca do głowicy pomiarowej. Obecność defektu powoduje dodatkowe odbicie. Każda zmiana dielektryka wypełniającego przewodnicę falową lub zmiana jej geometrii (pośrednio rozplywu prądu płynącego w przewodzących ściankach) powoduje zmianę impedancji wewnętrznej fragmentu falowodu  $Z_D$ . Współczynnik odbicia:

$$\Gamma = \frac{Z_D - Z_F}{Z_D + Z_F} \quad (4.8)$$

rośnie wraz ze wzrostem różnicy pomiędzy impedancjami w liczniku a więc również ze zwiększaniem się defektu (przy stałych parametrach materiałowych ośrodka).



Rys. 4.6. Schemat układu do badania struktur falowodowych metodą terahercową ze wzbudzeniem impulsowym: a) falowód bez defektu, b) falowód ze zdeformowaną ścianką (odbicia wielokrotne nie zostały zaznaczone)

Na ryc. 4.7 przedstawiono sygnały w dziedzinie czasu. W przypadku badanego obiektu bez defektu zauważyć można dwa impulsy wynikające z odbić od początku i końca falowodu. Ze względu na kształt i długość trwania różnią się one od impulsu wzbudzenia, co wynika z dyspersji falowodu. Pojawienie się defektu w postaci przewężenia powoduje powstanie dodatkowego impulsu. Względny rozmiar defektu zdefiniowany jest w następujący sposób:

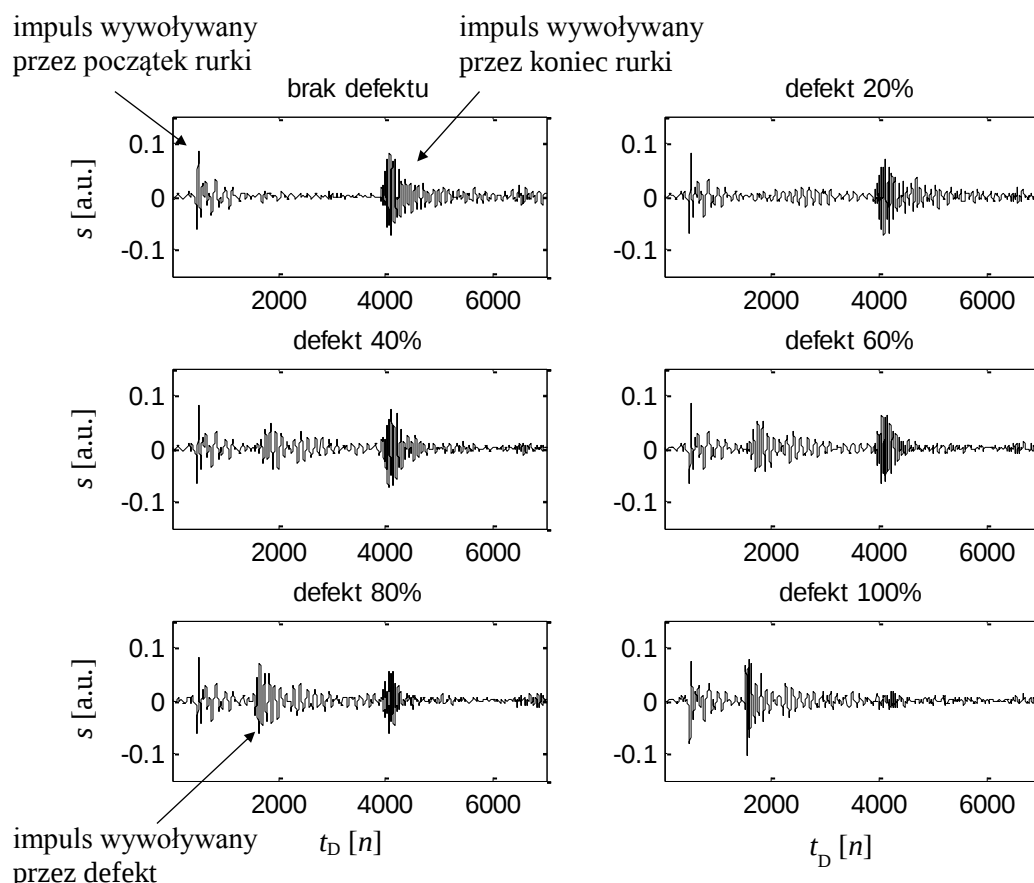
$$def[\%] = \frac{d_0 - d_D}{d_0} 100\% \quad (4.9)$$

gdzie:  $d_0$  – średnica wewnętrzna falowodu bez defektu,  $d_D$  – średnica wewnętrzna zdeformowanej rurki (ryc. 4.6).

W miarę powiększania się defektu amplituda impulsu przez niego wywołanego rośnie, natomiast amplituda impulsu odbitego od końca falowodu maleje. Wynika to z mniejszej energii docierającej do zakończenia falowodu niż w przypadku falowodu bez defektu.

Sygnały z ryc. 4.7 przedstawiono również w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. Na ryc. 4.8 znajdują się spektrogramy uzyskane na podstawie zależności (4.7), natomiast na ryc. 4.9 pokazano wyniki przekształcenia Borna-Jordana.

W przypadku obu transformat w znacznie większym stopniu zaznacza się mechanizm dyspersyjny rozpraszania (przedstawiony na ryc. 4.1e) niż w przedstawionych wyżej wynikach inspekcji kompozytu przekładkowego z laminatem wzmocnionym włóknem bazaltowym. Na podstawie spektrogramów wyznaczono parametry, które umożliwią dokładniejsze określenie położenia i wielkości defektu niż w przypadku wykorzystania sygnałów w dziedzinie czasu.

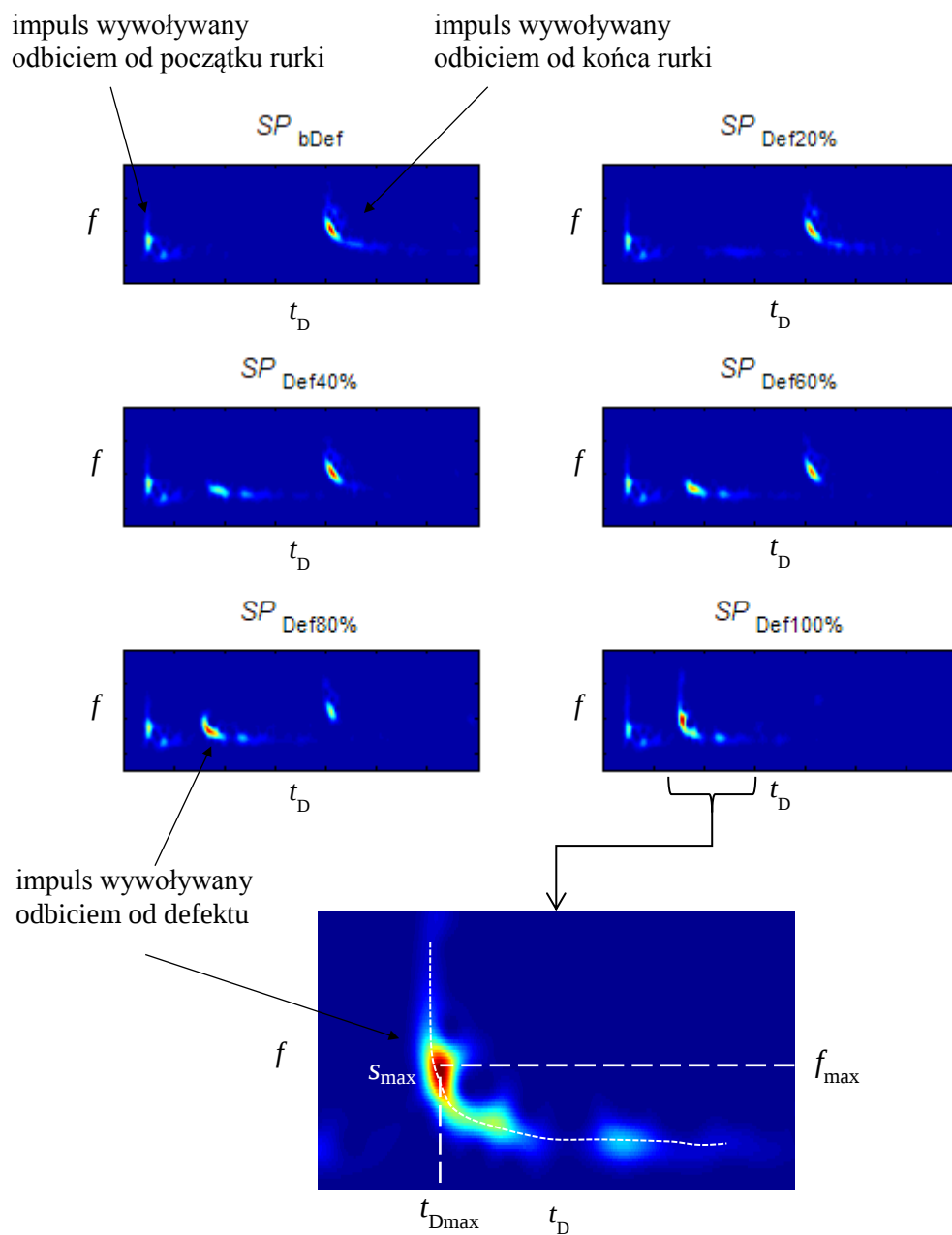


Ryc. 4.7. Sygnały  $s(t)$  w dziedzinie czasu uzyskane podczas inspekcji struktury faliwodowej dla różnego wpływu defektu

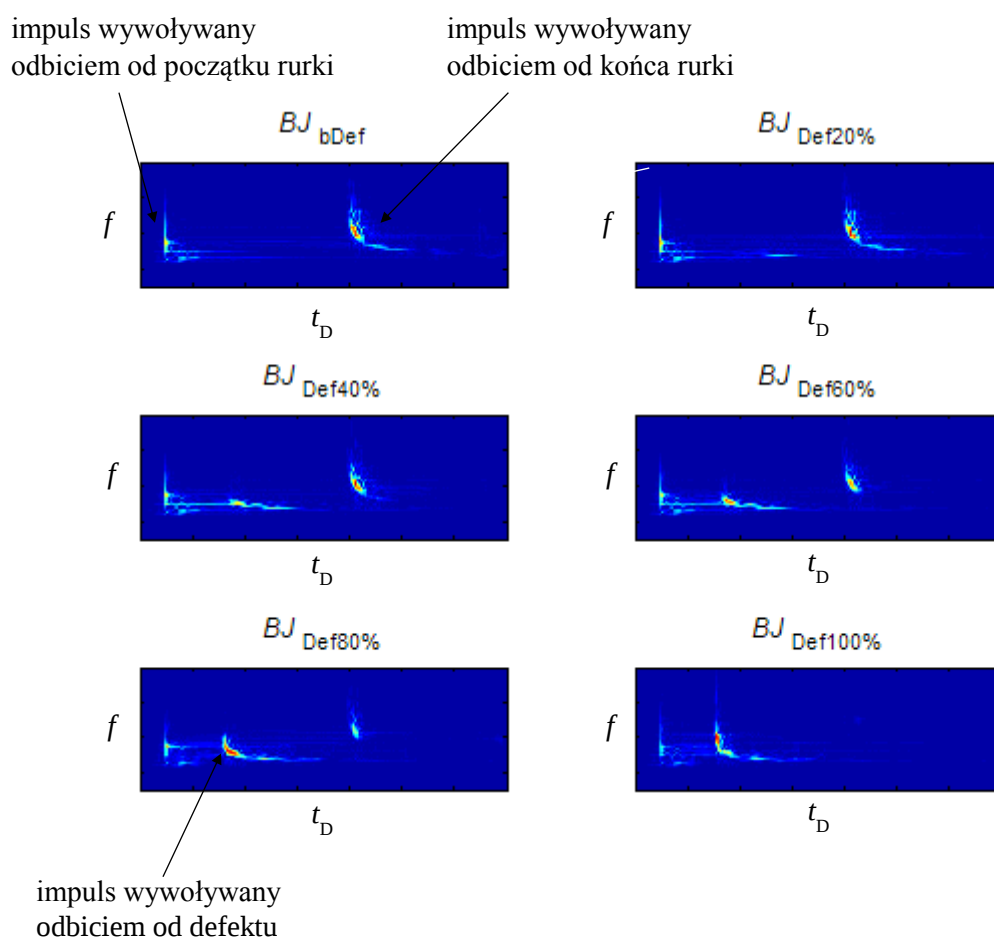
Na ryc. 4.8 przedstawiono definicje trzech podstawowych parametrów opisujących impuls wynikający z odbicia od defektu:

- $s_{\max}$  – maksymalną wartość impulsu w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej;
- $t_{D\max}$  – opóźnienie czasowe, przy którym odnotowuje się maksymalną wartość impulsu;
- $f_{\max}$  – częstotliwość, przy której odnotowuje się maksymalną wartość impulsu.

Definicje powyższe wykorzystywane są również do ewaluacji defektów za pomocą wieloczęstotliwościowej wiroprowadowej metody inspekcji [15, 18].

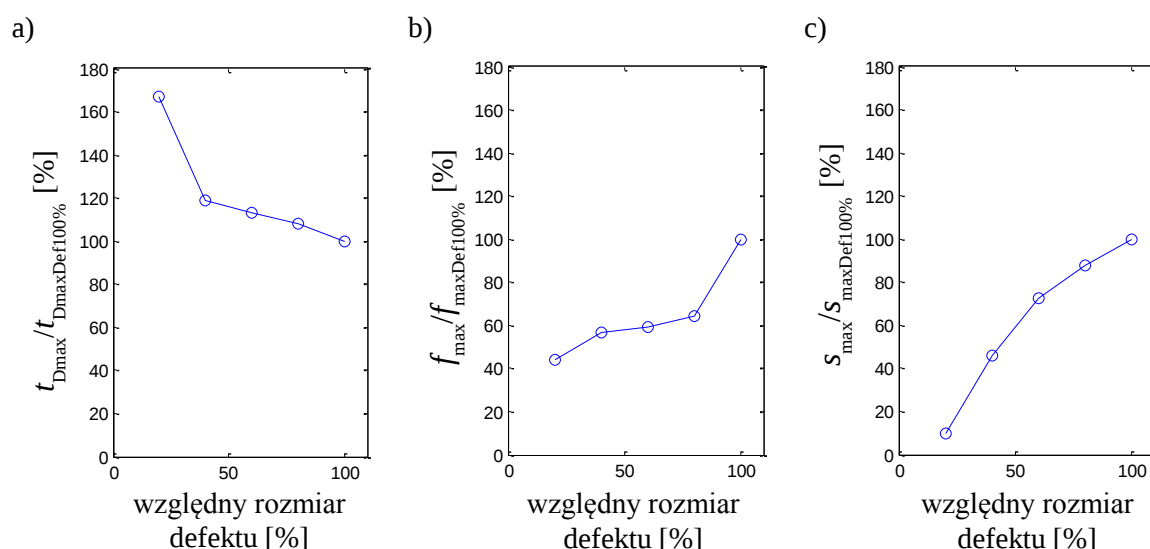


Ryc. 4.8. Spektrogramy  $SP$  uzyskane podczas inspekcji struktury falowodowej przy różnych wielkościach defektu (na podstawie sygnałów opisanych w dziedzinie czasu z ryc. 4.7)



Ryc. 4.9. Transformaty  $BJ$  Borna-Jordana sygnałów opisanych w dziedzinie czasu uzyskane podczas inspekcji struktury falowodowej przy różnych wielkościach mierzonego defektu

Zestawienie względnych wartości parametrów  $s_{\max}$ ,  $t_{D\max}$  i  $f_{\max}$  przedstawiono na ryc. 4.10. Opóźnienie względne impulsu odbitego od defektu maleje w miarę zwiększania się deformacji ścianek, co wynika z powiększania się defektu zarówno w płaszczyźnie normalnej, jak i równoległej do wektora propagacji impulsu. Odległość pomiędzy początkiem rurki a defektem zmniejsza się, prowadząc do skrócenia czasu propagacji fali odbitej od defektu. Parametry  $s_{\max}$  i  $f_{\max}$  zwiększają się wraz ze wzrostem deformacji ścianki. W zależności od rodzaju defektu zaobserwowane zmiany będą miały określony charakter (monotoniczność, nachylenie krzywych). Dzięki temu możliwe jest nie tylko określenie wielkości i położenia defektu w badanej strukturze przewodnicy falowej, ale również jego rodzaju. Zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych badań autora i będzie wymagało określenia większej liczby parametrów opisujących impulsy odbite oraz ich kształt (zgodny z przedstawionym na ryc. 4.1e) w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.



Ryc. 4.10. Zmiana parametrów sygnału w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (spektrogramu z ryc. 4.8) podczas inspekcji struktury falowodowej, wynikająca z wpływu rozmiaru defektu: a) opóźnienie względne impulsu odbitego od defektu  $t_{Dmax}/t_{DmaxDef100\%}$ , b) częstotliwość względna maksimum impulsu odbitego od defektu  $f_{max}/f_{maxDef100\%}$ , c) maksymalna wartość impulsu odbitego od defektu odniesiona do wartości uzyskanej dla największego defektu  $s_{max}/s_{maxDef100\%}$ ;  $t_{DmaxDef100\%}$  – opóźnienie impulsu odbitego od defektu 100%,  $f_{maxDef100\%}$  – częstotliwość, przy której odnotowuje się maksimum impulsu odbitego od defektu 100%,  $s_{maxDef100\%}$  – maksymalna wartość impulsu odbitego od defektu 100%

### 4.3. Wykorzystanie syntetycznej apertury skupiającej

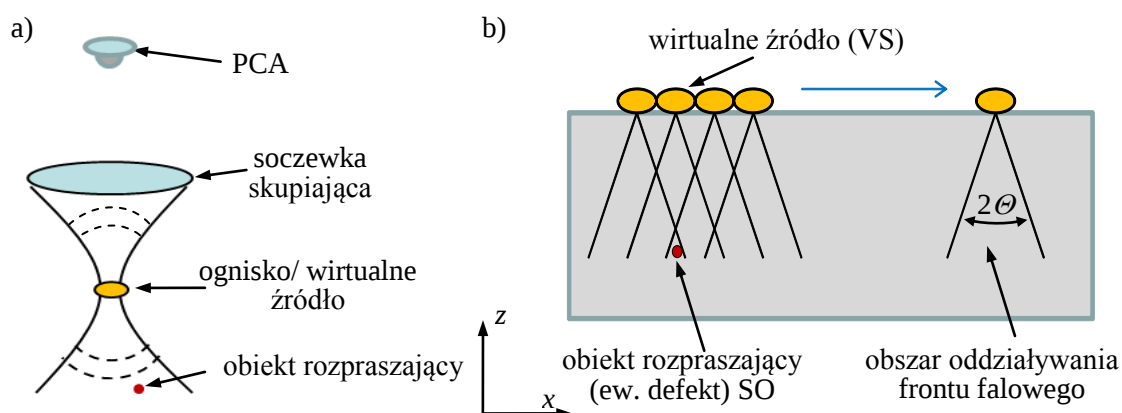
#### 4.3.1. Podstawowy algorytm SAFT

Technika wykorzystująca syntetyczną aperturę skupiającą SAFT jest szeroko wykorzystywana w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących [2, 45, 101, 128], do których trafiła z techniki radarowej SAR (ang. Synthetic Aperture Radar). Zastosowanie powyższej metody daje możliwość zwiększenia rozdzielczości przestrzennej.

W terahercowych badaniach nieniszczących front falowy generowany przez źródło (np. antenę fotoprzewodzącą PCA) najczęściej skupiany jest za pomocą soczewek dielektrycznych lub odpowiednio ukształtowanych reflektorów (ryc. 4.11). Zbudowana w ten sposób głowica pomiarowa umożliwia uzyskanie dużej rozdzielczości przestrzennej jedynie blisko ogniska skupienia (odległość  $z_0$  na ryc. 4.12). W płaszczyźnie ogniskowania przekrój wiązki jest najmniejszy. Poza płaszczyznę ogniskowej (dla odległości  $z > z_0$  i  $z < z_0$ ) front falowy jest rozproszony (przynajmniej kilkukrotnie większe jest pole przekroju). Powoduje to:

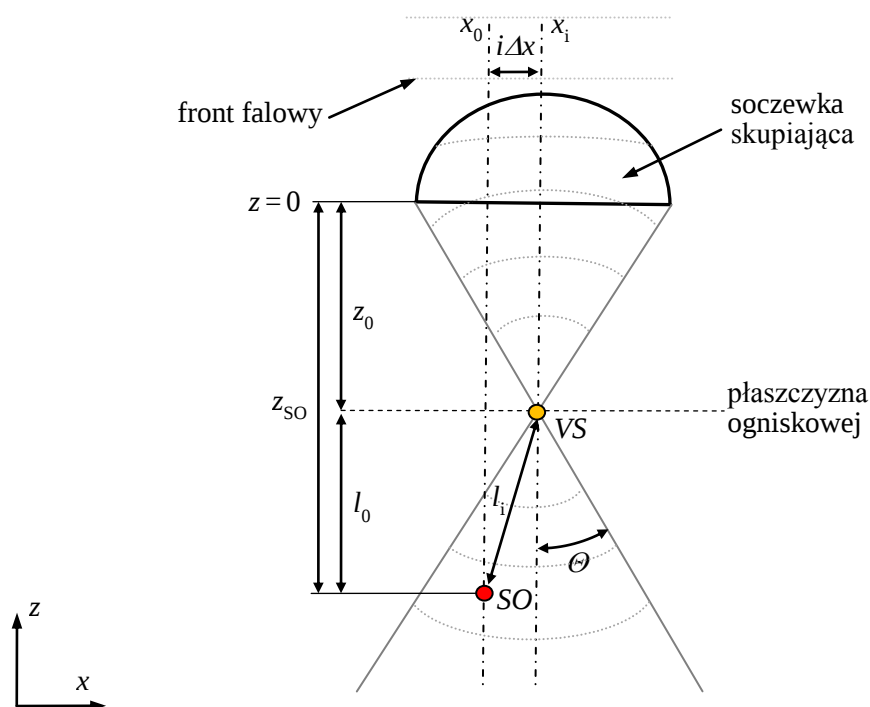
- ograniczenie rozdzielczości przestrzennej – punktowy obiekt rozpraszający „widziany” jest z wielu pozycji znajdujących się w jego otoczeniu, co utrudnia rozróżnienie dwóch lub większej liczby takich obiektów znajdujących się blisko siebie;
- zmniejszenie prawdopodobieństwa wykrycia defektu na skutek mniejszego stosunku sygnału do szumu SNR. Zmiana impedancji falowej materiału, wynikająca z obecności defek-

tu, oddziałuje jedynie na część przekroju rozproszonej wiązki terahercowej, co zmniejsza amplitudę odbitego impulsu.



Ryc. 4.11. Zasada działania metody syntetycznej apertury skupiającej z wirtualnym źródłem, zastosowanej w impulsowej inspekcji terahercowej: a) uproszczona geometria układu obrazowania w wolnej przestrzeni, b) wirtualne źródło przesuwane nad strukturą dielektryczną z defektem

W metodzie syntetycznej apertury skupiającej z wirtualnym źródłem [2, 152] ognisko traktowane jest jako źródło sferycznego frontu falowego, w przypadku którego zachodzi propagacja w ograniczonym kącie bryłowym  $2\theta$  (ryc. 4.11 i ryc. 4.12). Źródło to jest przemieszczane nad badanym obiektem w celu uzyskania sygnału typu B-skan.



Ryc. 4.12. Geometria układu SAFT z wirtualnym źródłem: SO – obiekt rozpraszający, VS – wirtualne źródło (ang. Virtual Source)

Następnie uzyskany sygnał przetwarzany jest zgodnie z zasadami metody SAFT:

- w dziedzinie czasu (TD-SAFT, ang. Time Domain SAFT) [31, 152] następuje koherentne sumowanie odpowiednio opóźnionych sygnałów pochodzących od wirtualnego źródła znajdującego się w kolejnych pozycjach;
- w dziedzinie częstotliwości (FD-SAFT, ang. Frequency Domain SAFT) [43, 130] następuje wsteczna propagacja sygnałów w przestrzeni fourierowskiej, która nie jest rozważana w niniejszej monografii.

W niejednorodnych materiałach anizotropowych wyniki uzyskane za pomocą SAFT mogą być poprawione dzięki zastosowaniu techniki śledzenia promieni (*ray tracing*) do modelowania efektów związanych z propagacją fali [45].

W tej części monografii wyjaśniono zasadę działania podstawowej metody SAFT, natomiast w następnym podrozdziale przedstawiona zostanie modyfikacja powyższej techniki, wprowadzona przez autora. Dokładną geometrię rozważanego układu przedstawiono na ryc. 4.12. Podczas pomiaru wykonanego wzdłuż linii (skan typu B) obszary oddziaływania wirtualnego źródła dla sąsiednich pozycji się nakładają. W związku z tym odpowiedź punktowego elementu rozpraszającego (potencjalnego defektu) widoczna jest w sygnale uzyskanym dla sąsiednich pozycji wirtualnego źródła. Im dalej źródło VS znajduje się od osi defektu, tym odległość  $l_i$  jest większa, co powoduje większe opóźnienie odpowiedzi. Opóźnienie czasowe wynikające z przesunięcia w kierunku  $x$  opisuje zależność:

$$\Delta t_i = \frac{2(l_i - l_0)}{v_m} \operatorname{sgn}(z_{SO} - z_0) \quad (4.10)$$

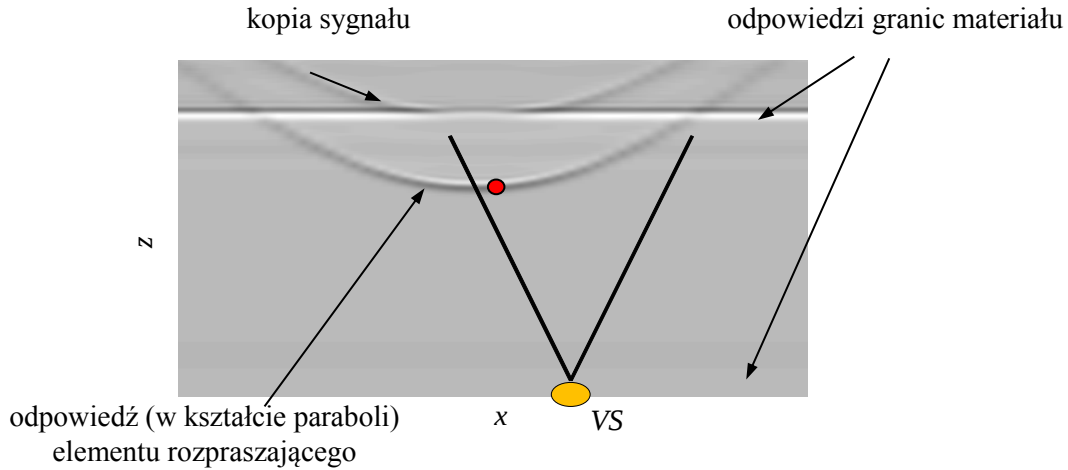
gdzie odległość pomiędzy obiektem rozpraszającym a wirtualnym źródłem wyznaczana jest za pomocą twierdzenia Pitagorasa:

$$l_i = \sqrt{l_0^2 + (i\Delta x)^2} \quad (4.11)$$

Zwiększanie przesunięcia w kierunku  $x$ , w stosunku do położenia centrum symetrii defektu, powoduje również zmniejszenie amplitudy odbitego impulsu (co wynika z quasi-gaussowskiego rozkładu amplitudy impulsu w wiązce terahercowej). W wyniku inspekcji z wykorzystaniem rozproszonej wiązki terahercowej (poza obszarem skupienia) odpowiedź na punktowy obiekt rozpraszający, podobnie jak w technice georadarowej GPR (ang. Ground Penetrating Radar), ma charakter paraboliczny, co przedstawiono na ryc. 4.13. Dzięki uwzględnieniu odpowiednich opóźnień czasowych (zależność 4.10) przy sumowaniu sygnałów uzyskanych dla sąsiednich pozycji  $x$  otrzymać można wynikowy sygnał, w którym amplituda impulsu odbitego od defektu jest wyższa. Ponadto, ze względu na obniżenie poziomu szumów (wielokrotne sumowanie sygnału losowego powoduje jego uśrednienie), wartość stosunku sygnału do szumu jest większa (zob. tab. 4.1 w rozdz. 4.3.2). Ostatecznie zależność na sygnał po transformacji SAFT przyjmuje postać:

$$s_{\text{SAFT}} = \sum_{i=-N}^N s(t + \Delta t_i, i) \quad (4.12)$$

gdzie:  $s_{\text{SAFT}}$  – sygnał po zastosowaniu transformacji SAFT,  $s(t, x)$  – sygnał zmierzony typu B-skan ( $x = i\Delta x$ ),  $N$  – liczba sąsiednich położzeń branych pod uwagę w trakcie obliczeń (zależna od kąta bryłowego  $2\Theta$ ).

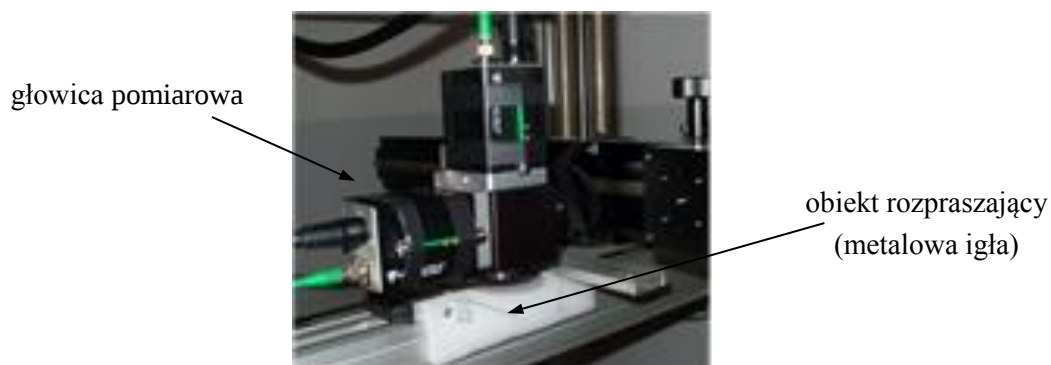


Ryc. 4.13. Sygnał typu B-skan uzyskany dla pojedynczego punkтового elementu rozpraszającego

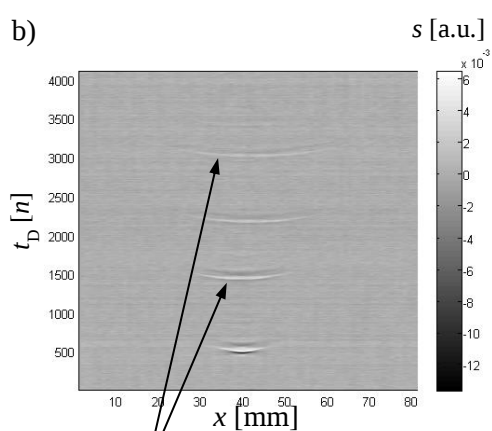
Przeprowadzono również wstępny eksperyment z elementami symulującymi punktowe obiekty rozpraszające w celu weryfikacji implementacji podstawowego algorytmu SAFT. Zdjęcie układu pomiarowego wykorzystywanego w trakcie badania oraz wyniki pomiarów bez przetwarzania i z przetwarzaniem metodą syntetycznej apertury skupiającej przedstawiono na ryc. 4.14.

Działanie algorytmu syntetycznej apertury skupiającej przedstawiono z wykorzystaniem metody FDTD. Opracowano model numeryczny na podstawie metody różnic skończonych w dziedzinie czasu i zależności (3.44)–(3.46), przy założeniach (3.47)–(3.51). Geometrię modelu przedstawiono na ryc. 4.15. W pobliżu granicy powietrza i materiału badanego wykonanego z PMMA umieszczono wirtualne źródło. Odpowiada to sytuacji, w której centralna część ogniska znajduje się przy powierzchni obiektu badanego. W pobliżu przeciwległej ścianki materiału znajduje się otwór symulujący defekt. Zastosowanie wirtualnego źródła pozwoliło na znaczne zmniejszenie geometrii modelu (bez konieczności modelowania anteny fotoprzewodzącej i soczewki skupiającej oraz przestrzeni pomiędzy nimi) i – co za tym idzie – znaczne skrócenie czasu obliczeń.

a)

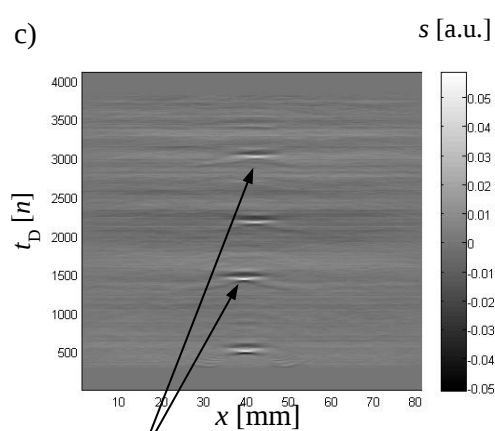


b)

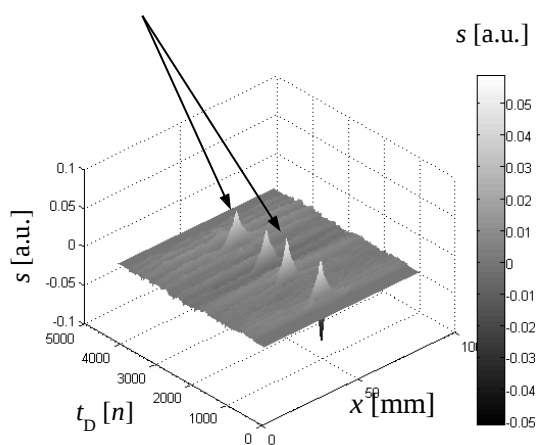
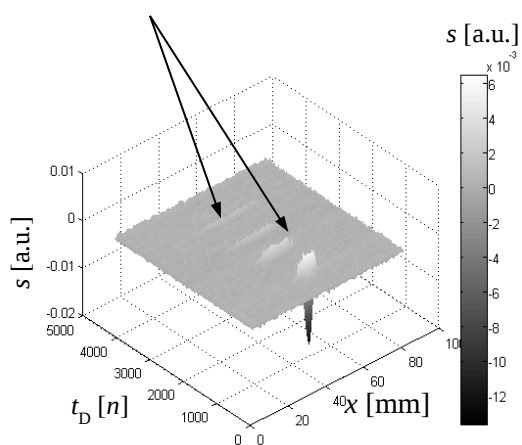


paraboliczne odpowiedzi  
elementów rozpraszających

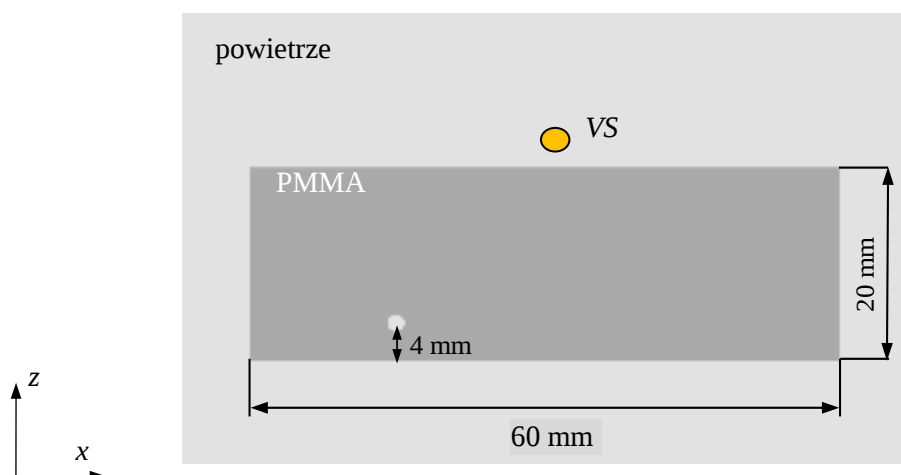
c)



skupione odpowiedzi elementów  
rozpraszających

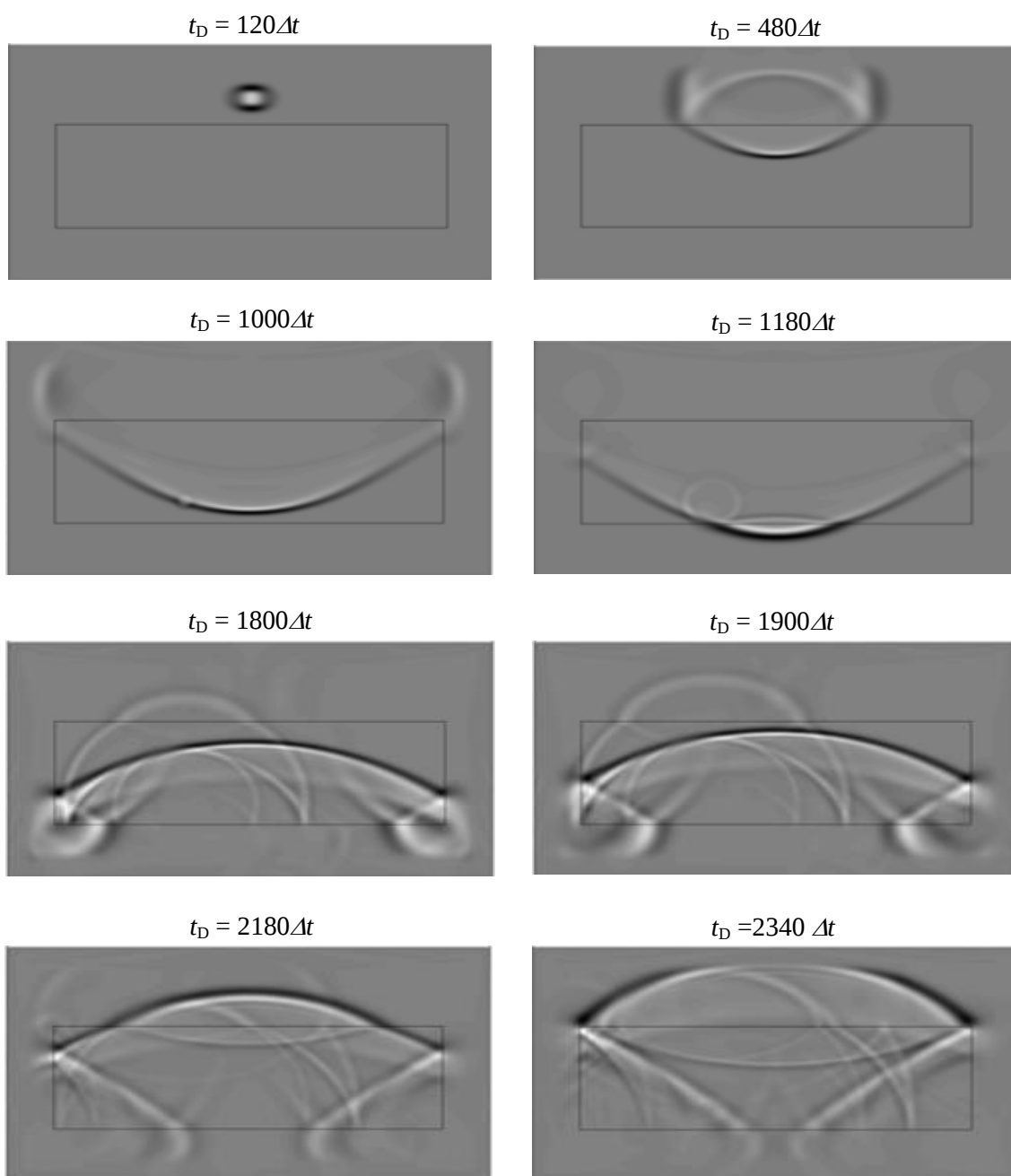


Ryc. 4.14. Eksperyment z elementami symulującymi punktowe obiekty rozpraszające: a) zdjęcie układu pomiarowego, b) skan typu B bez przetwarzania, c) skan typu B po zastosowaniu algorytmu syntetycznej apertury skupiającej

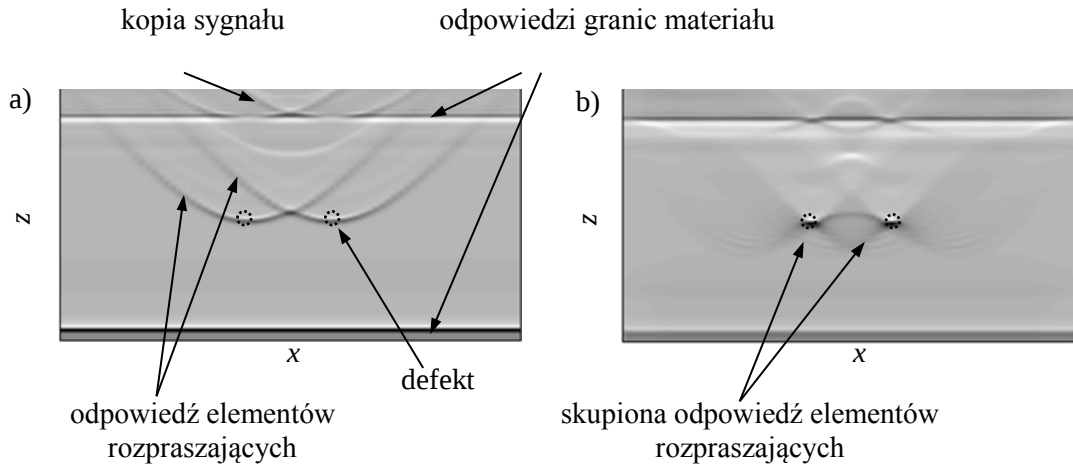


Ryc. 4.15. Geometria uproszczonego modelu układu SAFT z wirtualnym źródłem

Przykładowy wynik symulacji dla centralnie usytuowanego wirtualnego źródła, znajdującego się 5 mm nad powierzchnią materiału badanego, przedstawiono na ryc. 4.16. Front falowy wzbudzony przez wirtualne źródło rozchodzi się w płycie dielektrycznej z wtrąceniem powietrznym. Dla czasu  $t_D = 1000\Delta t$  zauważyć można odbicie od symulowanego defektu, natomiast dla  $t_D = 1800\Delta t$  odbicie to dociera do źródła / detektora. Podobna sytuacja występuje, gdy elementów rozpraszających (ewentualnych defektów) jest więcej. Na ryc. 4.17a przedstawiono sygnał typu B-skan uzyskany na podstawie symulacji dla materiału badanego z dwoma defektami znajdującymi się w połowie jego głębokości. Odpowiedź każdego z obiektów rozpraszających ma charakter paraboliczny. Zastosowanie algorytmu syntetycznej apertury skupiającej, opisanego zależnością (4.12), powoduje istotne skupienie odpowiedzi poszczególnych obiektów rozpraszających oraz znaczne zwiększenie amplitudy sygnału. Efekt ten dobrze widoczny w przypadku materiału jednorodnego może znacznie zwiększyć prawdopodobieństwo wykrycia defektu w rzeczywistych pomiarach, w których wskutek niejednorodności badanego materiału i niskiej mocy generowanych impulsów terahercowych stosunek sygnału do szumu (SNR) bywa bardzo niski. Jednocześnie sygnał spowodowany przez obecność granic materiału nie został rozmyty. Punkty skupienia są wyraźnie określone, co umożliwia dokładniejsze określenie położenia obiektów rozpraszających (defektów).



Ryc. 4.16. Przykładowe wyniki symulacji FDTD – propagacja frontu falowego wzbudzonego przez wirtualne źródło w płycie dielektrycznej z wtrąceniem powietrznym;  $\Delta t = 147$  fs



Ryc. 4.17. Wyniki obliczeń metodą FDTD: a) skan typu B bez przetwarzania, b) skan typu B po zastosowaniu algorytmu syntetycznej apertury skupiającej

#### 4.3.2. Metoda wykorzystująca przekształcenia czasowo-częstotliwościowe TFD-SAFT

W zaproponowanej modyfikacji algorytmu syntetycznej apertury skupiającej w dziedzinie czasu koherentne sumowanie następuje nie dla sygnału zmierzonego  $s(t,x)$ , a dla maksymalnej wartości wybranego przekształcenia czasowo-częstotliwościowego wyznaczonej dla każdej wartości czasowej. Sygnał po transformacji TFD-SAFT przyjmuje postać zależności:

$$s_{\text{TFD-SAFT}} = \sum_{i=-N}^N TFD_{\max}(t + \Delta t_i, i) \quad (4.13)$$

gdzie:  $s_{\text{TFD-SAFT}}$  – sygnał po zastosowaniu transformacji TFD-SAFT,  $TFD_{\max}$  – maksymalna wartość wybranego przekształcenia czasowo-częstotliwościowego, wyznaczona dla zadanej wartości czasowej.

Do następnych analiz wybrano spektrogram zdefiniowany zależnością (4.7). W celu określenia przydatności zaproponowanego algorytmu przeprowadzono eksperyment pomiarowy dla:

- wtrącenia w płycie dielektrycznej wykonanej z polimetakrylanu metylu (PMMA),
- fragmentu łopaty turbiny wiatrowej – kompozytu przekładkowego (materiał okładzin: laminat polimerowy wzmocniany włóknem szklanym; materiał rdzenia: drewno balsa) charakteryzujący się niejednorodnościami rdzenia oraz rozwarstwieniami pomiędzy rdzeniem a laminatem.

Na ryc. 4.18 przedstawiono wyniki inspekcji powyższych struktur dielektrycznych w postaci:

- wyniku pomiaru bez przetwarzania (B-skan),
- wyniku przetworzonego za pomocą podstawowego algorytmu syntetycznej apertury skupiającej (SAFT B-skan),

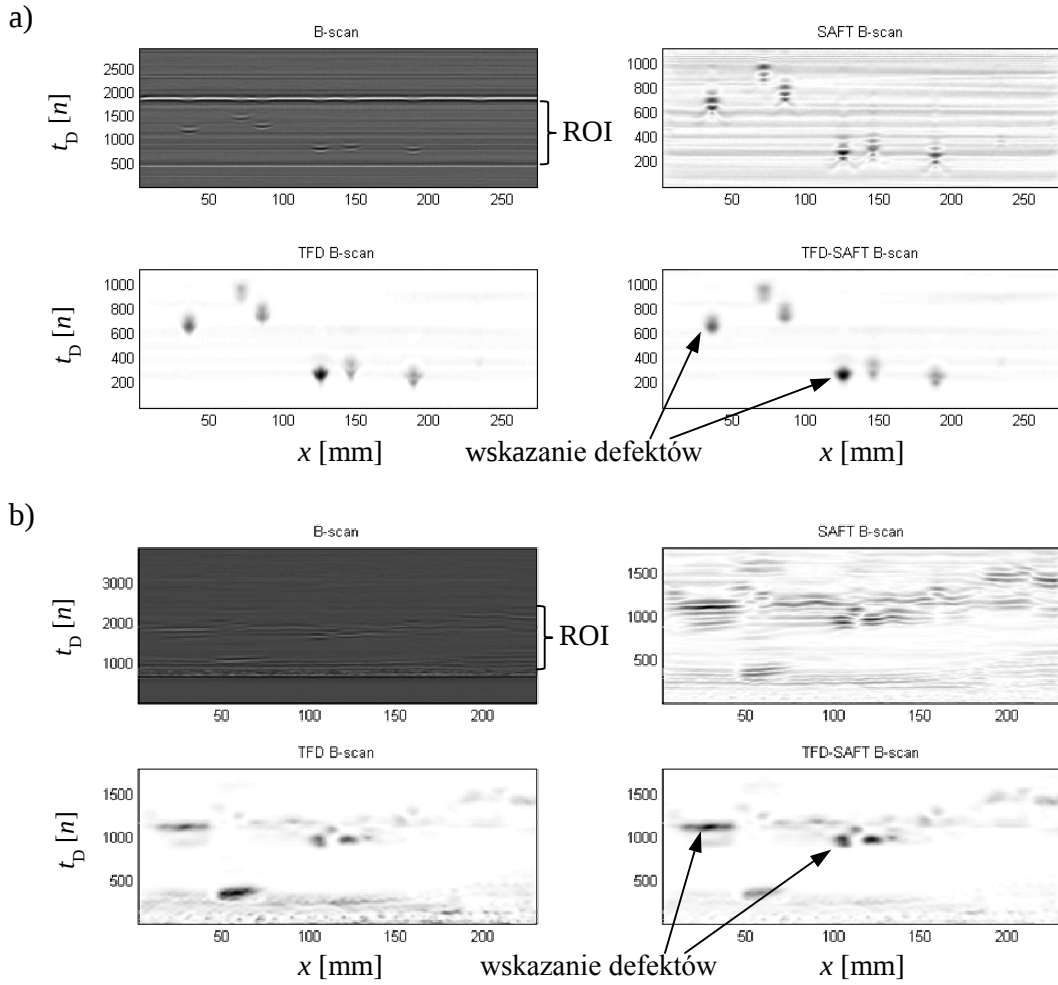
- rezultatu uzyskanego poprzez wykorzystanie przekształcenia czasowo-częstotliwościowego (TFD B-skan),
- wyniku otrzymanego za pomocą zaproponowanego algorytmu (TFD-SAFT B-skan).

Zastosowanie zależności (4.13) wpływa na poprawę jakości sygnału (wzrost stosunku sygnału do szumu, SNR) i eliminuje oscylacyjny charakter impulsu odbitego od defektu, co pozwala na dokładniejsze określenie położenia defektu. Zestawienie stosunku sygnału do szumu w przypadku różnych struktur oraz zastosowanych metod przetwarzania sygnału przedstawiono w tab. 4.1. Duże wartości SNR, uzyskane dla metalowych punktowych obiektów rozpraszających, spowodowane są ich dużą przewodnością oraz jednorodnością otoczenia (powietrza) – występujący szum wynika jedynie z działania zastosowanego spektroskopu terahercowego i nie obejmuje składowej generowanej przez rozpraszanie fali elektromagnetycznej na skutek niejednorodności materiału badanego.

W przypadku wszystkich badanych struktur zaproponowana metoda TFD-SAFT umożliwia uzyskanie największych wartości SNR, przy czym największy wzrost wynika z zastosowania przekształcenia czasowo-częstotliwościowego. Najbardziej miarodajne są wyniki dotyczące rzeczywistych defektów struktury kompozytu przekładowego. Poziom SNR uzyskany w wyniku inspekcji jest niski. Może to być problemem przy automatyzacji procesu wykrywania defektów, co w przypadku łopat turbin wiatrowych jest bardzo istotne (w odniesieniu do prac nad automatyczną inspekcją, prowadzonych przez wiele ośrodków naukowych i przemysłowych na całym świecie). Zastosowanie zaproponowanego algorytmu przetwarzania sygnału spowodowało zwiększenie stosunku sygnału do szumu o 14 dB.

Tabela 4.1. Wartość współczynnika sygnału do szumu dla różnych struktur i konfiguracji metod detekcji

| Badana struktura                                                           | SNR [dB]         |                                 |                                |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
|                                                                            | zmierzony B-skan | B-skan przetwarzany metodą SAFT | B-skan przetwarzany metodą TFD | B-skan przetwarzany metodą TFD-SAFT |
| Punktowe przewodzące obiekty rozpraszające                                 | 56,37            | 66,12                           | 125,51                         | 134,19                              |
| Obiekty rozpraszające w płycie dielektrycznej PMMA                         | 24,44            | 26,33                           | 46,42                          | 48,86                               |
| Kompozyt przekładowy zawierający rozwarstwienie (łopata turbiny wiatrowej) | 3,95             | 6,31                            | 16,15                          | 18,25                               |



Ryc. 4.18. Wyniki inspekcji terahercowej i detekcji defektów przeprowadzonych za pomocą różnych metod w przypadku: a) wtrąceń w płycie dielektrycznej wykonanej z PMMA, b) kompozytu przekładkowego – łopaty turbiny wiatrowej

#### 4.4. Algorytm *time reversal*

Metoda Time Reversal Mirror (TRM) pozwala w wyniku wykonanych obliczeń na skupianie fal elektromagnetycznych w miejscu, z którego zostały wygenerowane (w źródle) lub na obiektach, na których front falowy uległ rozproszeniu (lokalnie traktowanych jako źródła fali). Technika ta stosowana jest w telekomunikacji bezprzewodowej [89, 104] oraz w obrazowaniu mikrofalowym [62, 68, 86, 87] i ultradźwiękowym [14], z którego się wywodzi. Algorytm opiera się na zasadzie niezmienniczości równania falowego [86, 87]:

$$\left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E}(r, t) = 0 \quad (4.14)$$

$$\left( \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{H}(r, t) = 0 \quad (4.15)$$

Równania te mogą być spełnione zarówno dla  $\{\mathbf{E}(r, t), \mathbf{H}(r, t)\}$ , jak i dla  $\{\mathbf{E}(r, -t), \mathbf{H}(r, -t)\}$  [86, 87]. Dzięki powyższej własności możliwe jest powtórne skupienie fali rozchodzącej się i rozpraszającej się od źródła. W przypadku badań nieniszczących zastosowanie algorytmu TRM obejmuje etapy:

- 1) poddanie materiału badanego oddziaływaniu impulsu elektromagnetycznego;
- 2) rejestrację w czasie odbitej lub przechodzącej fali za pomocą matrycy odbiorników TRA (ang. Time Reversal Array);
- 3) odwrócenie w czasie zarejestrowanych sygnałów i ich retransmisję z nadajników TRA;
- 4) skupienie się retransmitowanego frontu falowego w obiektach rozpraszających znajdujących się w badanym elemencie (defektach i na granicach pomiędzy różnymi materiałami);
- 5) określenie obecności i położenia potencjalnych defektów.

Przeprowadzenie 3 i 4 etapu w rzeczywistym środowisku ma sens jedynie w przypadku zastosowań w telekomunikacji bezprzewodowej. W badaniach nieniszczących, niezależnie od tego, czy są to badania elektromagnetyczne czy ultradźwiękowe, etap retransmisji zarejestrowanych uprzednio sygnałów przeprowadzany jest za pomocą symulacji numerycznych [62, 71, 86]. Z powodzeniem stosowana jest metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu. Informacja o obecności i położeniu ewentualnego defektu w badanym materiale uzyskiwana jest na podstawie analizy obszarów skupienia frontu falowego. W badaniach opisanych w pracy [109] w tym celu wyznaczana była energia fali elektromagnetycznej w każdej pozycji przekroju materiału badanego. Operacja ta jest możliwa jedynie przy użyciu modelu numerycznego. Do obliczenia zastosowano następującą zależność:

$$En(i, j) = \int_{t_1}^{t_2} |E(i, j, t)|^2 dt \quad (4.16)$$

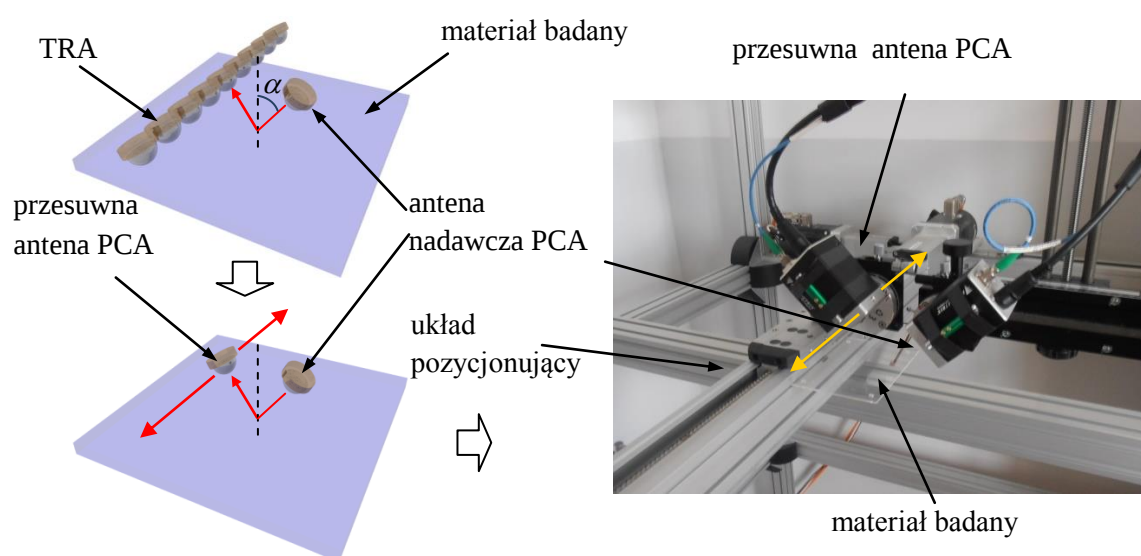
gdzie:  $t_1, t_2$  – czas początku i końca wstecznej propagacji retransmitowanych impulsów przez badany materiał. W miejscach o największych wartościach energii front falowy jest najbardziej skupiony, co oznacza, że są to obszary występowania niejednorodności materiałowych.

Innym sposobem na określenie obecności i położenia elementów rozpraszających w badanym obiekcie (potencjalnych defektów) jest analiza przestrzennego rozkładu pola elektrycznego w chwili, w której front falowy jest skupiony. W przypadku tej metody niezbędne jest określenie czasu, w którym dochodzi do skupienia. W tym celu stosowane jest kryterium bazujące na minimalnej entropii przestrzennego rozkładu pola elektromagnetycznego w przekroju badanego obiektu [62].

W dalszej części rozdziału 4.4 przedstawione zostaną: eksperyment, opracowane kryterium określania optymalnego czasu skupiania frontu falowego oraz wybrane wyniki inspekcji terahercowej, z zastosowaniem algorytmu *time reversal*, zaproponowane przez autora monografii w pracy [71]. (Wyniki badań przedstawionych w niniejszym podrozdziale na ryc. 4.19–

ryc. 4.22 uzyskano w ramach grantu nr N510 538039 pt. „Badania nieniszczące materiałów kompozytowych falami elektromagnetycznymi w paśmie częstotliwości terahercowych”).

Na ryc. 4.19 przedstawiono geometrię układu pomiarowego wykorzystanego podczas inspekcji terahercowej metodą TRM. Jako źródła sygnału i detektory stosowane są anteny foto-przewodzące (PCA) wzbudzane femtosekundowymi impulsami optycznymi. Antena nadawcza skierowana jest w kierunku materiału badanego. Wygenerowany przez nią impuls terahercowy odbija się od materiału badanego, a następnie jest rejestrowany przez matrycę detektorów TRA. W związku z brakiem dostępu do podobnych matryc fotoprzewodzących zastąpiono ją pojedynczą przesuwaną anteną PCA. Rozwiązanie to wydłuża czas inspekcji, ale umożliwia zastosowanie dowolnej odległości pomiędzy elementami matrycy TRA. Układ taki został zrealizowany, co przedstawiono na ryc. 4.19.



Ryc. 4.19. Geometria i zdjęcie układu pomiarowego

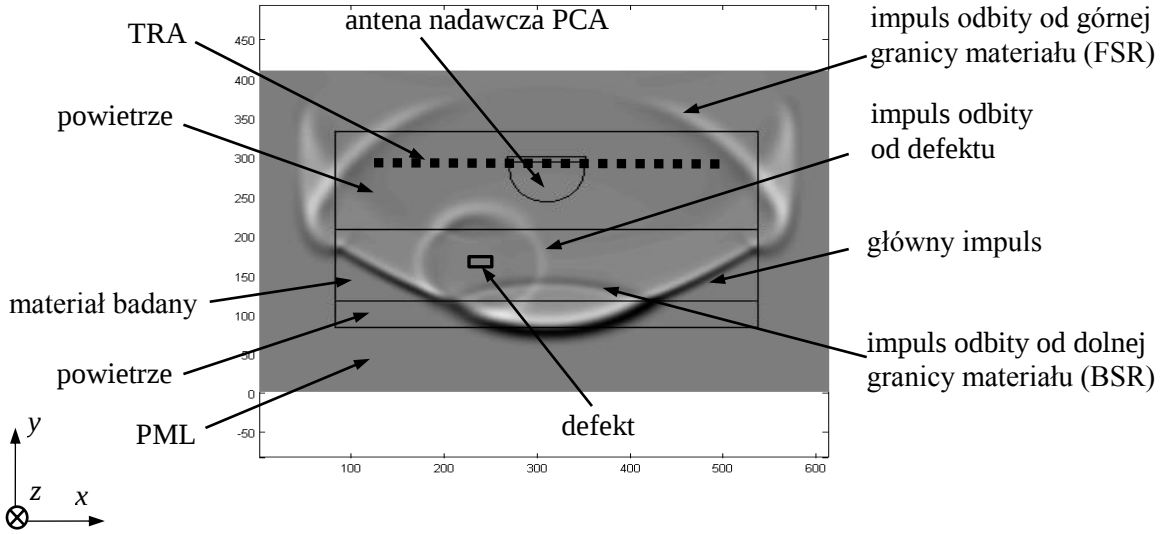
Źródło: na podstawie [71].

Etap retransmisji zarejestrowanych i odwróconych w czasie sygnałów terahercowych realizowany jest przy zastosowaniu obliczeń numerycznych, metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu, na podstawie zależności (3.44)–(3.46), przy założeniach (3.47)–(3.51). Geometrię modelu przedstawiono na ryc. 4.20. Duża różnica pomiędzy długością fali w impulsie terahercowym a rozmiarami rozpatrywanego obszaru powoduje potrzebę wykonania obliczeń z wykorzystaniem bardzo dużej liczby ( $> 10^9$ ) elementów obliczeniowych (komórek FDTD), co skutkowałoby koniecznością zastosowania bardzo dużych mocy obliczeniowych i długim czasem obliczeń. W związku z tym zastosowano model dwuwymiarowy płasko-równoległy. Powoduje to wiele uproszczeń:

- w przypadku modelu numerycznego kąt pomiędzy normalną do powierzchni badanej a osią anteny nadawczej / odbiorczej (kąt  $\alpha$  na ryc. 4.19) równy jest zero stopni (nadajnik i TRA znajdują się w jednej płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni badanego materiału), czego ze względu na wymiary głowic pomiarowych nie można zrealizować fizycznie w eksperymencie pomiarowym;

- matryca TRA odwzorowana została jako zbiór punktów, a nie jako zestaw anten fotoprzewodzących;
- w przypadku dwuwymiarowego modelu numerycznego w antenie PCA nie jest możliwe dokładne odwzorowanie wzbudnika – anteny motylkowej; jest ona modelowana jako punkt, w którym generowana jest składowa z pola elektrycznego ( $E_z$ ).

Jak można zauważyć na podstawie uzyskanych wyników, zastosowanie powyższych uproszczeń nie wpłynęło znacznie na możliwość detekcji i określenia położenia defektów.



Ryc. 4.20. Geometria dwuwymiarowego modelu numerycznego FDTD wraz z rozkładem natężenia pola elektrycznego  $E_z$  (etap poddawania badanego materiału oddziaływaniu impulsu elektromagnetycznego)

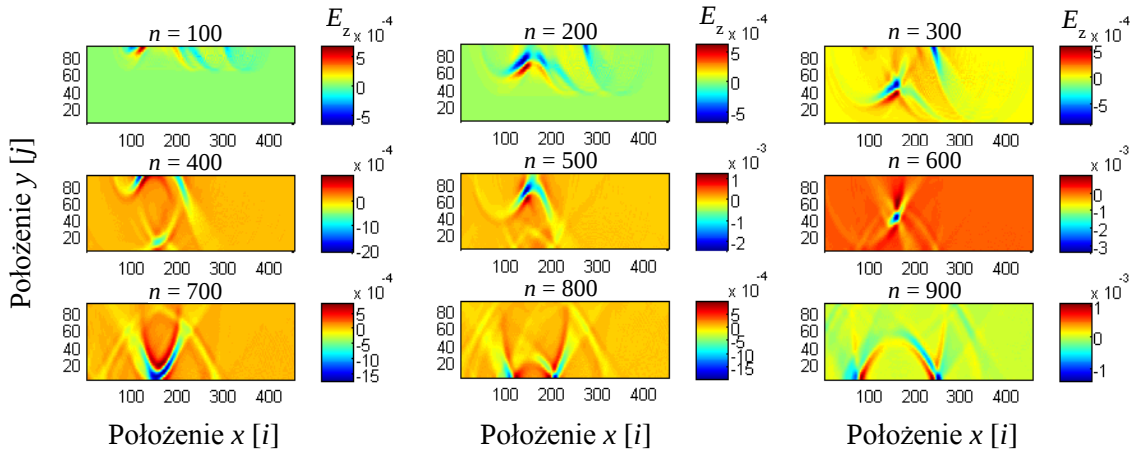
Źródło: na podstawie [71].

Rozkład natężenia pola elektrycznego  $E_z$  w badanym materiale, uzyskany w wyniku obliczeń z użyciem algorytmu wstecznej propagacji, przedstawiono na ryc. 4.21. Fala jest wprowadzana do badanego materiału od jego górnej strony za pomocą matrycy odbiorczo-nadawczej TRA (nieprzedstawionej na ryc. 4.21). Elementy matrycy zasilane są odwróconym w czasie sygnałem zarejestrowanym w trakcie pomiaru za pomocą przesuwnej anteny odbiorczej. Front falowy skupia się w pobliżu pozycji defektu po około 600 krokach czasowych.

Aby określić położenie wady, należy oszacować optymalny czas, w którym front falowy jest najbardziej skupiony. W tym celu wykorzystać można wspomniane wcześniej kryterium minimalnej entropii w następującej formie [62]:

$$vmn(n) = \frac{\left[ \sum_{i \in I_m} \sum_{j \in J_m} [E_z^n(i, j)]^2 \right]^2}{\sum_{i \in I_m} \sum_{j \in J_m} [E_z^n(i, j)]^4} \quad (4.17)$$

gdzie:  $vmn$  – kryterium minimalnej entropii,  $E_z^n$  – składowa z natężenia pola elektrycznego dla  $n$ -tego kroku czasowego,  $n$  – numer kroku czasowego (czas wyznaczany jest z zależności  $t = n \cdot \Delta t$ ),  $i, j$  – dyskretna pozycja w geometrii modelu (fizyczne położenie wyznaczone jest z następujących zależności  $x = i \cdot \Delta x$  oraz  $y = j \cdot \Delta y$ ; długość kroku przestrzennego  $x = \Delta y = 8.8 \cdot 10^{-5}$  m),  $I_m, J_m$  – zbiór dyskretnych pozycji odnoszących się w modelu do obszaru reprezentującego materiał badany.



Ryc. 4.21. Rozkłady unormowanego natężenia pola elektrycznego  $E_z$  w badanym materiale w czasie obliczeń z zastosowaniem wstecznej propagacji (po retransmisji zarejestrowanych sygnałów) co 100 kroków czasowych  $n$  ( $\Delta t = 1.4 \cdot 10^{-13}$  s)

Źródło: na podstawie [71].

W pracy [71] autor niniejszej monografii zaproponował nowe kryterium iloczynowe służące do określania optymalnego czasu skupienia frontu falowego:

$$Fc(n) = [vmn(n) - vmn_{\max}] \cdot mv(n) \cdot sm(n) \cdot smsv(n) \quad (4.18)$$

W związku z tym zdefiniowano następujące kryteria składowe:

- minimalną wartość składowej z natężenia pola elektrycznego

$$mv(n) = \min_{i \in I_m, j \in J_m} [E_z^n(i, j)] \quad (4.19)$$

- sumę wartości  $E_z^n$  w całym przekroju materiału

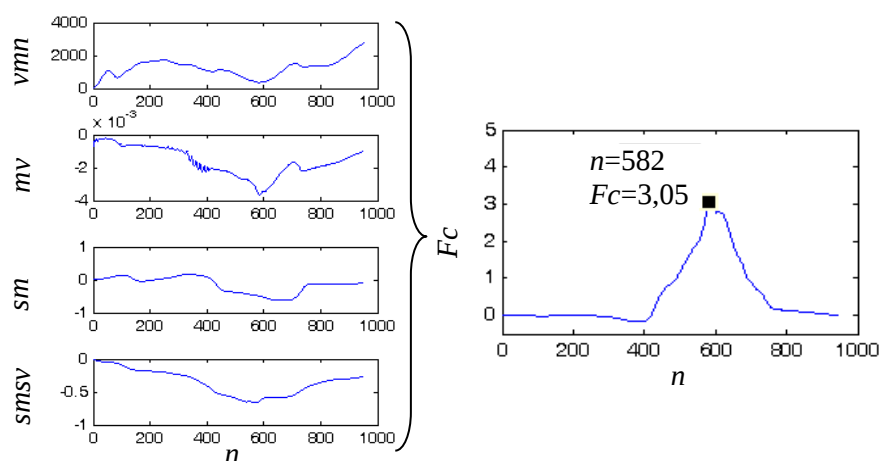
$$sm(n) = \sum_{i \in I_m} \sum_{j \in J_m} [E_z^n(i, j)] \quad (4.20)$$

- sumę 1% najmniejszych wartości składowej z natężenia pola elektrycznego w całym przekroju materiału  $smsv(n)$ .

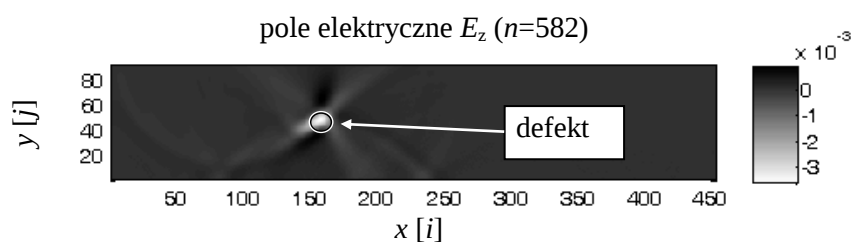
Wartości powyższych kryteriów dla kolejnych kroków czasowych propagacji wstecznej przedstawiono na ryc. 4.22a. W przypadku kryteriów składowych  $vmn$ ,  $mv$ ,  $sm$  i  $smsv$  mniejsza wartość wynika z większego skupienia frontu falowego, natomiast w przypadku kryterium iloczynowego  $Fc$  wartość maksymalna wskazuje największe skupienie. Jak można zauważyć,

zaproponowane kryterium ma wyraźne ekstremum (dla  $n = 582$ ), co pozwala na dokładne wyznaczenie czasu i miejsca skupienia pola elektromagnetycznego, a w związku z tym na określenie położenia defektu.

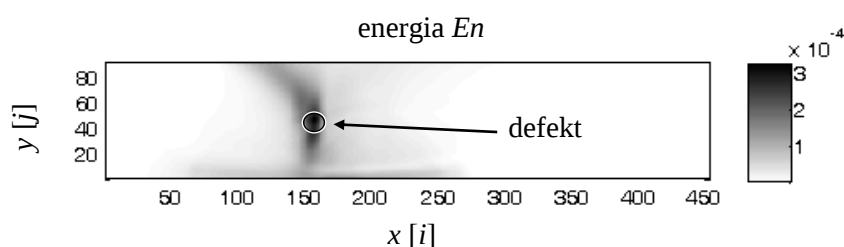
a)



b)



c)



Ryc. 4.22. Wyniki inspekcji terahercowej metodą *time reversal*: a) rozkład kryteriów skupienia frontu falowego w zależności od czasu wstecznej propagacji, b) przestrzenny rozkład składowej z unormowanego pola elektrycznego dla optymalnego czasu skupienia ( $n = 582$ ) wyznaczonego na podstawie kryterium iloczynowego  $F_c$ , c) rozkład energii  $E_n$  w przekroju badanego materiału

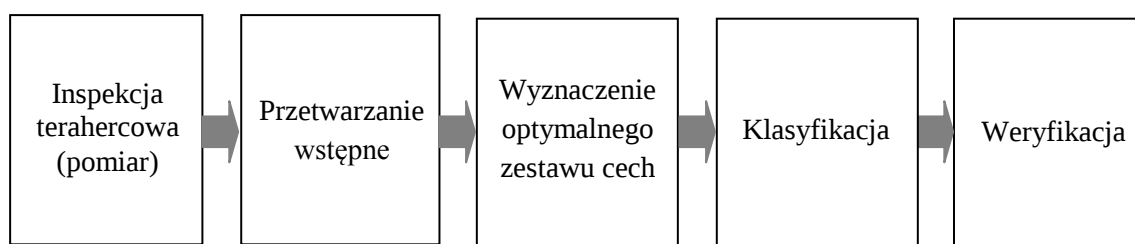
Źródło: na podstawie [71].



## 5. Identyfikacja stanu struktury materiałów kompozytowych

### 5.1. Automatyczne rozpoznawanie defektów

Automatyczna identyfikacja stanu materiałów lub automatyczne rozpoznawanie defektów (ang. Automatic Defect Recognition, ADR) jest bardzo ważnym i obecnie dynamicznie rozwijającym się działem badań nieniszczących. Jak dotąd, systemy takie rozwijane są w odniesieniu do metody wizualnej [50], radiografii cyfrowej [88, 123, 140, 143] i metody ultradźwiękowej [3, 44, 57]. Rozwiązania tego typu umożliwiają zastąpienie lub wsparcie pracy operatorów, szczególnie podczas badania struktur wielkopowierzchniowych, takich jak łopatki turbin wiatrowych, kadłuby samolotów i jachtów. Pozwala to na wyeliminowanie negatywnych cech operatora mających bezpośredni wpływ na możliwość wykrycia i poprawnej klasyfikacji defektów z powodu zmęczenia, określonego stanu psychofizycznego oraz rutyny. System automatycznej identyfikacji stanu badanego materiału pozbawiony jest powyższych wad i umożliwia wykrycie defektów na poziomie porównywalnym lub wyższym od operatora [119, 123]. Skuteczność taka może być uzyskana pod warunkiem odpowiedniego zaprojektowania systemu, zastosowania poprawnego przetwarzania wstępnego oraz doboru odpowiedniego zestawu cech i klasyfikatora, umożliwiających uzyskanie możliwie dużej separowalności poszczególnych klas [69]. Schemat blokowy proponowanego systemu automatycznej identyfikacji stanu struktury przedstawiono na ryc. 5.1. (W kolejnych podrozdziałach przedstawione zostaną kolejne etapy przetwarzania informacji w proponowanym systemie.)



Ryc. 5.1. Schemat blokowy automatycznego systemu identyfikacji stanu struktury

W prezentowanych metodach dotyczących ADR przyjęto następujące założenia wstępne:

- pomiary wykonano metodą terahercową ze wzbudzeniem impulsowym za pomocą systemu przedstawionego na ryc. 3.8 i ryc. 3.9;
- zastosowano układ pomiarowy w konfiguracji odbiciowej – ryc. 3.1d i ryc. 3.1i;
- na potrzeby identyfikacji wykorzystywano wyniki pomiarowe tylko dla danego punktu pomiarowego – nie wykorzystywano informacji z sąsiedztwa tego punktu.

W eksperymentach wykorzystano laminaty o grubości 2 mm, wykonane z sześciowarstwowego kompozytu wzmacnianego włóknem bazaltowym. (Próbki zostały opracowane i wytworzone przez dr. inż. Krzysztofa Gorącego z Instytutu Polimerów ZUT w Szczecinie w ramach grantu nr N510 538039 pt. „Badania nieniszczące materiałów kompozytowych falami elektromagnetycznymi w paśmie częstotliwości terahercowych”.) Identyfikacji podlegały następujące rodzaje defektów:

- wtrącenia z cienkiej folii dielektrycznej pomiędzy różnymi warstwami,
- rozwarstwienia wywołane uderzeniem mechanicznym o różnych wartościach energii,
- przegrzanie kompozytu (3 wartości czasu ekspozycji materiału na wysoką temperaturę),
- niedostateczne przesycenie żywicą.

W dalszej części rozdziału piątego przedstawiono eksperymenty dotyczące identyfikacji powyższych rodzajów niejednorodności, przeprowadzone z zastosowaniem klasyfikatora neuronowego trenowanego w sposób nadzorowany oraz za pomocą neuronowych struktur samoorganizujących się SOM.

## **5.2. Identyfikacja defektów w kompozycie bazaltowym za pomocą nadzorowanych sieci neuronowych**

### **5.2.1. Przetwarzanie wstępne**

Wstępne przetwarzanie danych (ang. *preprocessing*) umożliwia odseparowanie informacji użytecznych z punktu widzenia identyfikacji od wpływu czynników środowiskowych, tła czy szumów.

Pierwszym, ale bardzo istotnym aspektem jest redukcja szumów, ponieważ nawet jeden losowy sygnał może sfałszować wartości wybranych cech, prowadząc do błędów identyfikacji. Technika terahercowa jest jeszcze w początkowym stadium rozwoju, co skutkuje stosunkowo małymi mocami generowanych sygnałów (w porównaniu z sąsiednimi zakresami widmowymi – mikrofalami i podczerwienią). W związku z tym odstęp między poziomem sygnału a poziomem szumu są wciąż niewielkie. Jest to szczególnie istotne w przypadku inspekcji grubych materiałów kompozytowych przeprowadzanych w układzie odbiciowym, w którym impuls dwukrotnie przenika przez grubość materiału. Pomiar w danym położeniu wykonywany jest wtedy wielokrotnie (3–200), a następnie otrzymane odpowiedzi czasowe są uśredniane. Prowadzi to do bardzo dobrych rezultatów, ale kosztem wielokrotnego wydłużenia procesu badawczego (tym bardziej, że najczęściej wykonywane jest skanowanie rastrowe). W przypadku badania dużych lub szybko się poruszających obiektów metoda ta jest niewystarczająca. Stosowane są wtedy filtry medianowe i algorytmy eliminacji szumu wykorzystujące transformację falkową, przedstawione krótko w rozdz. 4.1.

Większym problemem od szumu może okazać się występowanie w sygnale dodatkowego echa, wywołanego np. odbiciem fali od elementu układu pomiarowego lub efektem *Fabry-Perot* (zależność 3.12) w soczewce anteny fotoprzewodzącej lub soczewce skupiającej. Objawia się to dodatkowymi impulsami pojawiającymi się w ramach odpowiedzi czasowej ba-

danego materiału. Eliminacja wpływu powyższego mechanizmu może być przeprowadzona poprzez:

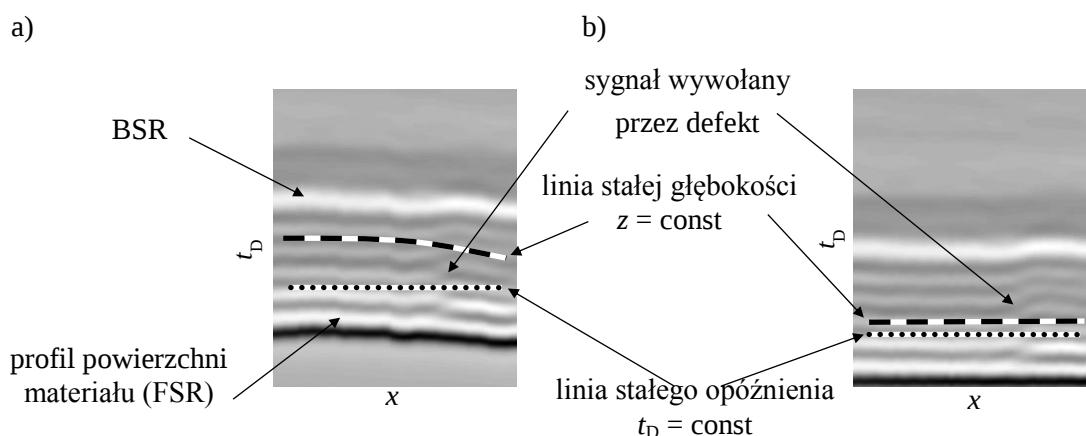
- zastosowanie innej geometrii układu pomiarowego (np. użycie zwierciadeł zamiast soczewek skupiających),
- wykorzystanie algorytmów redukcji echa.

Ostatnim zagadnieniem, które może istotnie utrudnić kolejne etapy zaproponowanego systemu identyfikacji defektów, jest rejestracja sygnałów podczas pomiaru niepłaskich powierzchni. Jeśli powierzchnia materiału badanego nie jest równoległa do płaszczyzny przesunięcia głowicy pomiarowej w trakcie skanowania, to może prowadzić do przekłamań w określaniu głębokości defektów (ryc. 5.2a). W celu uniknięcia tych błędów zastosowano algorytm zaproponowany w pracy [74]. Wykorzystuje on aproksymację profilu materiału do rejestracji sygnału typu B-skan. Przy założeniu małej zmienności profilu powierzchni materiału na podstawie aproksymacji za pomocą dobranej zależności matematycznej można uzyskać trend, który następnie można odjąć (podobnie jak w radiografii cyfrowej). Profil materiału aproksymowany może być np. za pomocą wielomianu:

$$t_{DA}(x) = \sum_{i=1}^{n_{\max}} p_i x^{n_{\max}-i} \quad (5.1)$$

gdzie:  $t_{DA}$  – aproksymowany profil powierzchni badanego materiału wyznaczany na podstawie opóźnień czasowych  $t_D$ , dla których występuje ekstremum impulsu FSR.  $p_i$  – współczynniki wielomianu,  $x$  – położenie w obszarze,  $n_{\max}$  – stopień wielomianu.

Rodzaj funkcji aproksymującej, ewentualny stopień wielomianu oraz zakres zmienności współczynników aproksymacji powinien być tak dobrany, aby funkcja aproksymująca nie dopasowywała się do lokalnych zmian wynikających z obecności defektów (takich jak wgłębienie wywołane uderzeniem mechanicznym o dużej energii). Zastosowanie powyższej operacji pozwala na uzyskanie płaskiego profilu – jak na ryc. 5.2b.



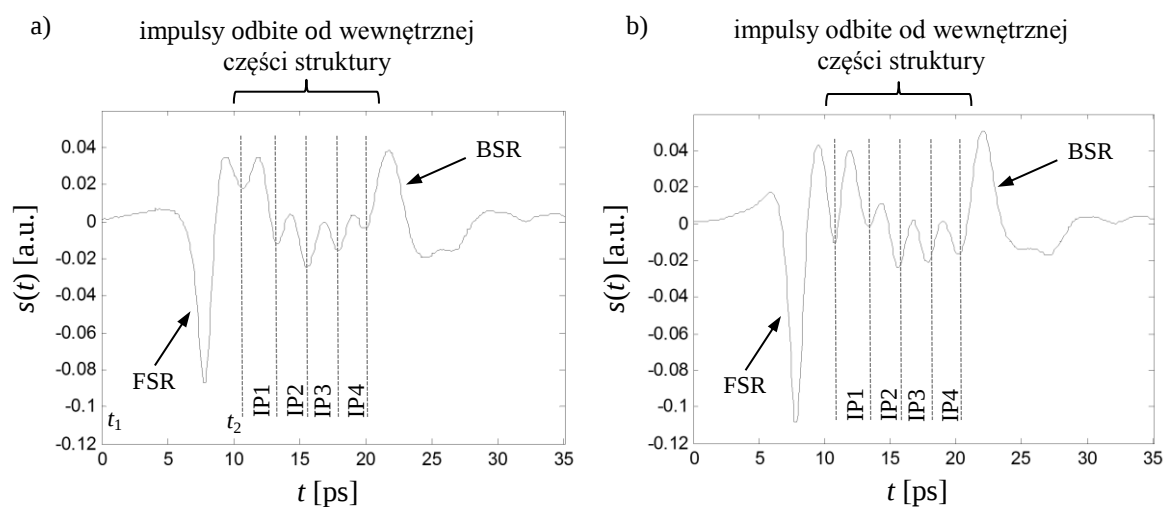
Ryc. 5.2. Wpływ profilu powierzchni badanego materiału na sygnał typu B-skan: a) powierzchnia zakrzywiona w stosunku do płaszczyzny przemieszczania głowicy pomiarowej (defekt: wtrącenie materiału obcego), b) sygnał po zastosowaniu rejestracji danych (linia stałego opóźnienia i linia stałej głębokości są równoległe)

### 5.2.2. Wyznaczanie zestawu cech

W wyniku przeprowadzenia inspekcji urządzenie pomiarowe spektroskop terahercowy umożliwia otrzymywanie sygnałów czasowych  $s(t)$  typu A-skan. W sygnałach tych zawarta jest informacja dotycząca struktury badanego materiału, jednak zastosowanie ich bezpośrednio do klasyfikacji byłoby bardzo dużym problemem (sygnały zapisane są z użyciem 4096 próbek). W związku z tym sygnał  $s(t)$  zastępuje się wektorem cech (ang. *features vector*). Długość tego wektora determinuje rozmiar przestrzeni cech, w którym pojedynczy pomiar staje się punktem. Wyznaczenie optymalnego zbioru cech ma fundamentalne znaczenie dla kolejnego etapu przetwarzania informacji w proponowanym systemie, jakim jest klasyfikacja. Zmniejsza to wymiarowość przestrzeni danych i umożliwia szybsze i bardziej skuteczne działanie algorytmu klasyfikacji. Przyjęcie zbyt licznego zbioru cech niebędących źródłem dodatkowych informacji dla systemu będzie skutkowało znaczną komplikacją procesu uczenia klasyfikatora i będzie wymagało zwiększenia liczby wektorów wykorzystywanych do treningu. W rozdziale tym przedstawione zostaną ogólnie znane oraz zaproponowane przez autora metody wyznaczania cech na podstawie otrzymywanych w trakcie pomiaru sygnałów czasowych  $s(t)$ .

#### 5.2.2.1. Cechy w dziedzinie czasu

Sygnały w dziedzinie czasu przedstawiają profil odbiciowy badanego obiektu. W przypadku materiałów jednorodnych o prostej budowie (ryc. 3.4), gdy obecność defektu powoduje powstanie dodatkowego impulsu lub modyfikację kształtu już istniejącego, określenie stanu struktury jest zadaniem znacznie łatwiejszym niż w przypadku struktur kompozytowych czy wielowarstwowych. Przykładowe sygnały w dziedzinie czasu, otrzymane podczas inspekcji terahercowej (w układzie odbiciowym) kompozytu bazaltowego, przedstawiono na ryc. 5.3.



Ryc. 5.3. Przykładowe sygnały  $s(t)$  w dziedzinie czasu (typu A-skan) uzyskane podczas inspekcji kompozytu bazaltowego w obszarze: a) zawierającym rozwarstwienie wynikające z uderzenia, b) bez defektu

W sygnale wyróżnić można impulsy odbite od granicy powietrze–materiał (FSR), granicy materiał–powietrze (BSR) oraz od wewnętrznych interfejsów pomiędzy poszczególnymi warstwami tkaniny bazaltowej. Jak można zauważyć, sygnały uzyskane dla materiału poprawnie wykonanego i zawierającego defekt nie różnią się znacznie. W związku z tym istotne jest określenie odpowiedniego zestawu cech umożliwiającego wykrycie istniejącego defektu i określenie jego rodzaju.

Do najczęściej wykorzystywanych w procesie klasyfikacji parametrów, wyznaczanych w dziedzinie czasu, należą amplitudy i kształty impulsów, ich opóźnienia czasowe oraz wyniki podstawowych przekształceń statystycznych (wartość średnia, mediana itd.). W niniejszej pracy, na podstawie analizy stosunku sygnału do szumu przestrzennych rozkładów różnych parametrów sygnału terahercowego, zaproponowano 12 cech wyznaczonych w dziedzinie czasu. Ich definicje przedstawiono w tab. 5.1.

Tabela 5.1. Cechy wyznaczone w dziedzinie czasu

| Numer<br>cechy | Definicja / wzór                                                 | Opis                                                                                                      |
|----------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1              | $\xi_{1t} = \int_{t_1}^{t_2}  s(t)  dt$                          | powierzchnia pod bezwzględną wartością sygnału wynikającego z odbicia impulsu od początku materiału (FSR) |
| 2              | $\xi_{2t} = \text{med} [s_{\text{FS}}(t)]$                       | mediana spróbkowanego sygnału odbicia impulsu FSR                                                         |
| 3              | $\xi_{3t} = p_{1\text{BS}}$                                      | współczynnik wielomianowej aproksymacji impulsu BSR                                                       |
| 4              | $\xi_{4t} = p_{2\text{BS}}$                                      | współczynnik wielomianowej aproksymacji impulsu BSR                                                       |
| 5              | $\xi_{5t} = p_{3\text{BS}}$                                      | współczynnik wielomianowej aproksymacji impulsu BSR                                                       |
| 6              | $\xi_{6t} = \text{med} [s_{\text{IP1}}(t)]$                      | mediana spróbkowanego sygnału w przedziale IP1                                                            |
| 7              | $\xi_{7t} = \text{med} [s_{\text{IP2}}(t)]$                      | mediana spróbkowanego sygnału w przedziale IP2                                                            |
| 8              | $\xi_{8t} = \max [s_{\text{IP3}}(t)] - \min [s_{\text{IP3}}(t)]$ | wartość międzyszczytowa spróbkowanego sygnału w przedziale IP3                                            |
| 9              | $\xi_{9t} = \text{med} [s_{\text{IP3}}(t)]$                      | mediana spróbkowanego sygnału w przedziale IP3                                                            |
| 10             | $\xi_{10t} = \frac{p_{1\text{BS}}}{p_{1\text{FS}}}$              | stosunek współczynników aproksymacji $p_1$ sygnałów BSR i FSR                                             |
| 11             | $\xi_{11t} = \frac{p_{2\text{BS}}}{p_{2\text{FS}}}$              | stosunek współczynników aproksymacji $p_2$ sygnałów BSR i FSR                                             |
| 12             | $\xi_{12t} = \frac{p_{3\text{BS}}}{p_{3\text{FS}}}$              | stosunek współczynników aproksymacji $p_2$ sygnałów BSR i FSR                                             |

Sześć z nich obliczono bezpośrednio z sygnału w dziedzinie czasu, który podzielony został na sześć okien czasowych (w zależności od liczby badanych warstw kompozytowych): od-

powieź przedniej powierzchni FSR, cztery części wewnętrzne odpowiedzi IPx ( $x = 1, 2, 3, 4$ ) i odpowiedź tylnej powierzchni BSR. Takie bramkowanie czasowe umożliwia łatwiejsze określenie głębokości defektów. Kolejnych sześć cech uzyskano na podstawie przybliżenia wielomianowego impulsów FSR i BSR w postaci zależności:

$$s_{\text{FSappr}}(t) = p_{1\text{FS}} t^2 + p_{2\text{FS}} t + p_{3\text{FS}} \quad (5.2)$$

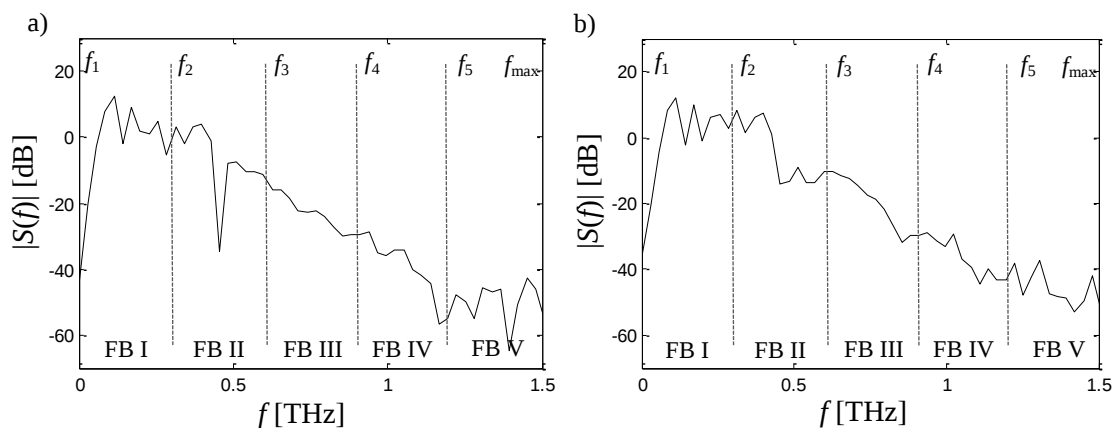
$$s_{\text{BSappr}}(t) = p_{1\text{BS}} t^2 + p_{2\text{BS}} t + p_{3\text{BS}} \quad (5.3)$$

gdzie:  $s_{\text{FSappr}}(t)$  – funkcja aproksymująca impuls FSR,  $s_{\text{BSappr}}(t)$  – funkcja aproksymująca impuls BSR,  $p_{1\text{FS}}$ ,  $p_{2\text{FS}}$ ,  $p_{3\text{FS}}$  – współczynniki aproksymacji impulsu FSR,  $p_{1\text{BS}}$ ,  $p_{2\text{BS}}$ ,  $p_{3\text{BS}}$  – współczynniki aproksymacji impulsu BSR.

Szczególnie współczynniki aproksymacji impulsu odbitego od tylnej granicy materiału (BSR) zawierają wiele informacji o przekroju materiału, ponieważ impuls ten dwukrotnie przemieszcza się przez grubość badanej struktury. Jeżeli badany materiał jest dyspersyjny, to impuls BSR ulegnie degradacji / rozmyciu, co niewątpliwie wpłynie na wartości współczynników aproksymacji  $p_{1\text{BS}}$ ,  $p_{2\text{BS}}$  i  $p_{3\text{BS}}$ .

#### 5.2.2.2. Cechy w dziedzinie częstotliwości

Sygnał zmierzony w trakcie inspekcji terahercowej TDS za pomocą transformacji Fouriera przenieść można do dziedziny częstotliwości, uzyskując w ten sposób charakterystykę częstotliwościową. Przykłady takich odpowiedzi częstotliwościowych dla kompozytu polimerowego, wzmocnionego włóknem bazaltowym z defektem i bez defektu, przedstawiono na ryc. 5.4. Parametry sygnału wyznaczone w dziedzinie częstotliwości również mogą zostać wykorzystane w procesie identyfikacji stanu struktury. Podobnie jak w przypadku cech wyznaczanych w dziedzinie czasu, na podstawie analizy stosunku sygnału do szumu przestrzennych rozkładów różnych parametrów sygnału terahercowego, zaproponowano dziewięć cech wyznaczonych w dziedzinie częstotliwości. Ich definicje przedstawiono w tab. 5.2. Charakterystyka częstotliwościowa została podzielona na pięć pasm (ryc. 5.4).



Ryc. 5.4. Przykładowe charakterystyki amplitudowe  $|S(f)|$  uzyskane w wyniku inspekcji kompozytu bazaltowego w przypadku obszaru: a) zawierającego rozwarstwienie wynikające z uderzenia, b) bez defektu

Tabela 5.2. Cechy wyznaczone w dziedzinie częstotliwości

| Numer cechy | Definicja / wzór                             | Opis                                                                                                     |
|-------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13          | $\xi_{13f} = \int_{f_1}^{f_{max}}  S(f)  df$ | powierzchnia pod pełną charakterystyką częstotliwościową                                                 |
| 14          | $\xi_{14f} = 10 \log_{10}  S(f_3) $          | amplituda wybranej harmonicznej $f_3 = 450$ GHz                                                          |
| 15          | $\xi_{15f} = 10 \log_{10}  S(f_5) $          | amplituda wybranej harmonicznej $f_5 = 850$ GHz                                                          |
| 16          | $\xi_{16f} = \int_{f_1}^{f_2}  S(f)  df$     | powierzchnia pod charakterystyką częstotliwościową w paśmie FB I                                         |
| 17          | $\xi_{17f} = \int_{f_2}^{f_3}  S(f)  df$     | powierzchnia pod charakterystyką częstotliwościową w paśmie FB II                                        |
| 18          | $\xi_{18f} = \int_{f_3}^{f_4}  S(f)  df$     | powierzchnia pod charakterystyką częstotliwościową w paśmie FB III                                       |
| 19          | $\xi_{19f} = b_1$                            | współczynnik transmitancji układu wyznaczony za pomocą algorytmu identyfikacji Steiglitz-McBride'a (5.4) |
| 20          | $\xi_{20f} = a_2$                            | współczynnik transmitancji układu wyznaczony za pomocą algorytmu identyfikacji Steiglitz-McBride'a (5.4) |
| 21          | $\xi_{21f} = a_3$                            | współczynnik transmitancji układu wyznaczony za pomocą algorytmu identyfikacji Steiglitz-McBride'a (5.4) |

Sześć parametrów wyznaczono bezpośrednio z krzywej jako obszar pod charakterystyką amplitudową (w obrębie różnych pasm) lub jako wielkość wybranych harmonicznych (0,45 THz i 0,85 THz). Trzy ostatnie cechy uzyskano w wyniku procedury identyfikacji transmitancji układu. Materiał badany potraktowano jak filtr o transmitancji  $H(z)$ , który oddziałuje na impuls wzbudzający (ryc. 5.5). Podejście takie zastosowano w przypadku terahercowej identyfikacji tkanek biologicznych w pracy [30]. Pierwsze zastosowanie w badaniach nieniszczących (do identyfikacji defektów materiałów kompozytowych) zaproponowane zo-

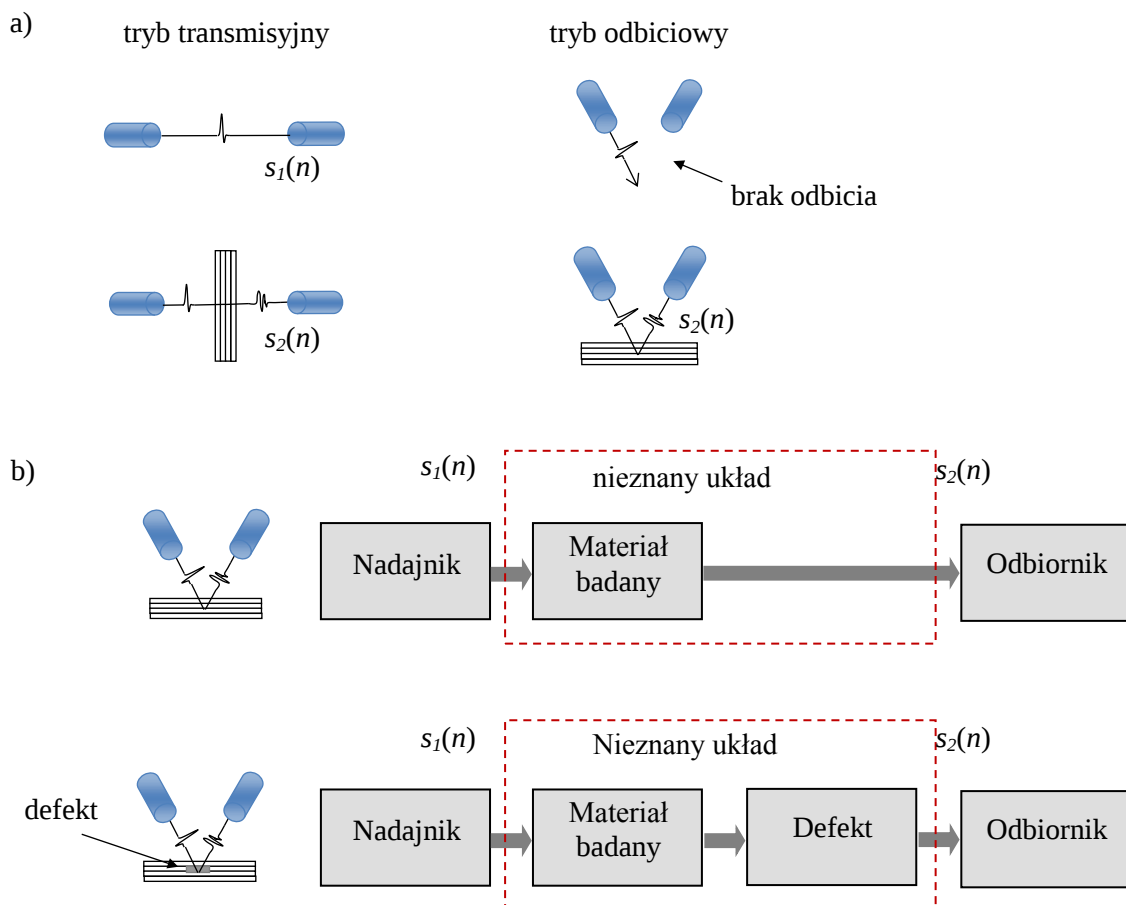
stało przez autora niniejszej monografii i przedstawione w pracach [76] oraz [70]. Wykorzystano w nich zaproponowaną przez Steiglitz i McBride’a w pracy [129] procedurę wyznaczania współczynników transmitancji na podstawie znanych sygnałów wejściowego i wyjściowego. W pracach autora (w przeciwieństwie do pracy [30]) zastosowano tę metodę w układzie odbiciowym ze względu na częsty brak dostępu do wnętrza konstrukcji (np. do łopatek turbin wiatrowych); wymagało to modyfikacji algorytmu. W przypadku układu transmisyjnego współczynniki transmitancji mogą zostać wyznaczone w prosty sposób – poprzez odniesienie sygnału  $s_2(n)$  uzyskanego po przejściu impulsu przez materiał badany do sygnału odniesienia  $s_1(n)$  zmierzonego bez obecności badanego obiektu (ryc. 5.5a). W przypadku pożądanej w przemysłowej inspekcji materiałów kompozytowych konfiguracji odbiciowej nie jest możliwy pomiar sygnału odniesienia  $s_1(n)$  ze względu na brak sygnału docierającego do odbiornika, przy braku badanego materiału. Jednym ze sposobów rozwiązania powyższego problemu jest zastosowanie przewodzącego reflektora, który umieszczony w miejscu badanego materiału umożliwiłby zarejestrowanie sygnału odniesienia. Wadą tego rozwiązania (jeżeli grubość badanych materiałów lub współczynnik refrakcji są stosunkowo duże) jest zależność uzyskanego sygnału od odległości reflektora od głowic pomiarowych. Efekt ten jest szczególnie istotny dla konfiguracji niewykorzystującej rozdzielacza wiązki, w której impuls terahercowy nie rozchodzi się wzdłuż osi prostopadłej do powierzchni badanej. Autor niniejszej monografii zaproponował inny sposób wyznaczania sygnału odniesienia – na podstawie uśrednionej odpowiedzi czasowej uzyskanej dla obszaru niezawierającego defektów. Sposób ten charakteryzuje się większą czułością na zmiany wywoływane obecnością defektów niż w przypadku układu transmisyjnego. W proponowanej metodzie zmienność sygnału badanego, w odniesieniu do sygnału referencyjnego, wynika jedynie z obecności defektu i z niewielkiego odchylenia struktury materiału od struktury statystycznie średniej. W przypadku układu transmisyjnego zmienność badanego sygnału w odniesieniu do sygnału referencyjnego wynika przede wszystkim z obecności materiału, w mniejszym stopniu zaś z obecności defektu. Bardziej szczegółowo sposób wyznaczania sygnału referencyjnego przedstawiono w pracach [70, 76].

Na ryc. 5.6 przedstawiono zaproponowany algorytm wyznaczania współczynników transmitancji filtru reprezentującego wpływ materiału badanego na zawartość częstotliwościową impulsu, który wszedł z nim w interakcję. Algorytm wymaga wstępnego założenia postaci transmitancji. W ramach eksperymentu przetestowano wiele stopni wielomianów występujących w liczniku i mianowniku. Zastosowano następującą postać transmitancji [76]:

$$H(z) = \frac{b_1}{a_1 + a_2 z^{-1} + a_3 z^{-2}} \quad (5.4)$$

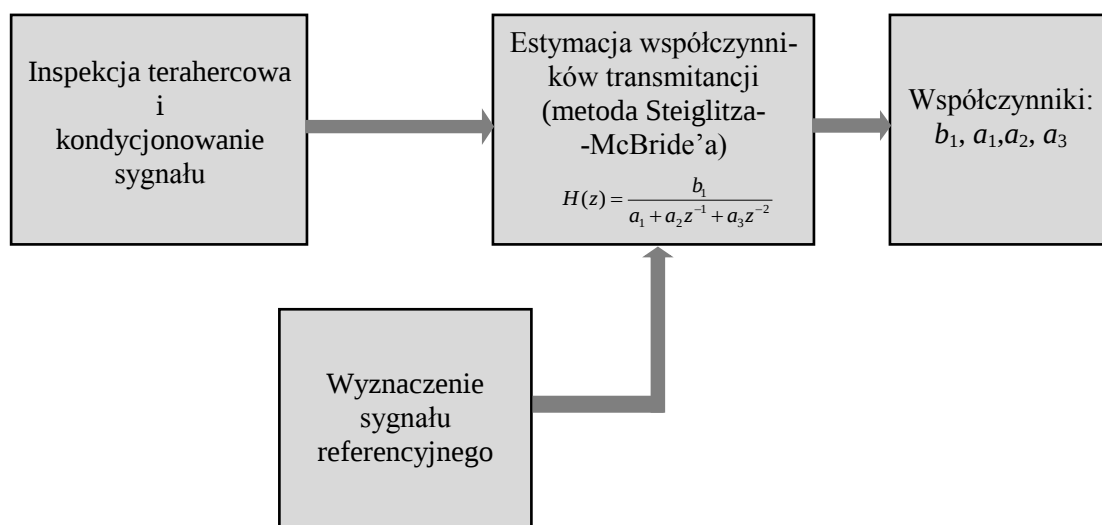
gdzie:  $b$ ,  $a$  – współczynniki wielomianu.

Zastosowana transmitancja jest wynikiem kompromisu pomiędzy jakością odwzorowania oddziaływania materiału na impuls elektromagnetyczny wzbudzenia a ilością otrzymywanych współczynników. Do następnych analiz przyjęto postać zależności (5.4), ponieważ uzyskany w ten sposób zestaw czterech współczynników umożliwił detekcję poszczególnych defektów z wystarczającym stosunkiem sygnału do szumu ( $\text{SNR} > 5 \text{ dB}$ ).



Ryc. 5.5. Schematyczne przedstawienie przepływu sygnału w systemie: a) porównanie układu transmisyjnego z układem odbiciowym, b) uproszczony schemat blokowy przepływu sygnału w przypadku wadliwego i nieuszkodzonego obszaru;  $n$  – numer próbki

Źródło: na podstawie [76].



Ryc. 5.6. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania współczynników transmitancji

Źródło: na podstawie [76].

### 5.2.2.3. Cechy wynikające z reprezentacji czasowo-częstotliwościowych

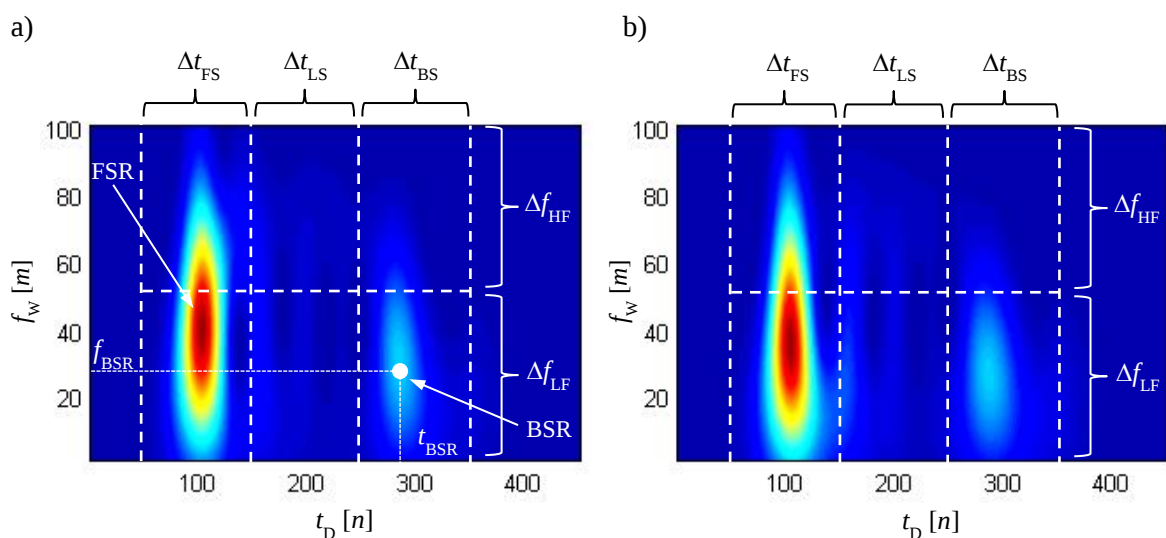
W związku z pomyślnym zastosowaniem w systemach eksperckich cech, wyznaczanych w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej [7, 8, 58, 84, 103, 118], opracowano stosunkowo liczny zestaw takich parametrów znajdujących zastosowanie w identyfikacji stanu struktury kompozytu bazaltowego (tab. 5.3). Na ryc. 5.7 i ryc. 5.8 przedstawiono spektrogramy  $SP(t,f)$  uzyskane dla sygnałów przedstawionych na ryc. 5.3, wyznaczone na podstawie zależności (4.7). Spektrogramy zostały podzielone na trzy zakresy czasowe ( $\Delta t_{FS}$  zawierający impuls odbity od powierzchni materiału,  $\Delta t_{LS}$  i  $\Delta t_{BS}$  zawierające impuls odbity od tylnej granicy obiektu badanego) oraz na dwa pasma częstotliwościowe ( $\Delta f_{HF}$  i  $\Delta f_{LF}$ ), co daje sześć obszarów wykorzystywanych w kolejnej analizie, zaznaczonych na ryc. 5.7. Na podstawie poszczególnych obszarów wyznaczono histogramy zawierające 100 przedziałów klasowych. Jako cechy wykorzystywane dalej w procesie identyfikacji defektów przyjęto sumy wybranych przedziałów histogramów (pozycje nr 22–25 w tab. 5.3).

Tabela 5.3. Cechy wyznaczone w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej

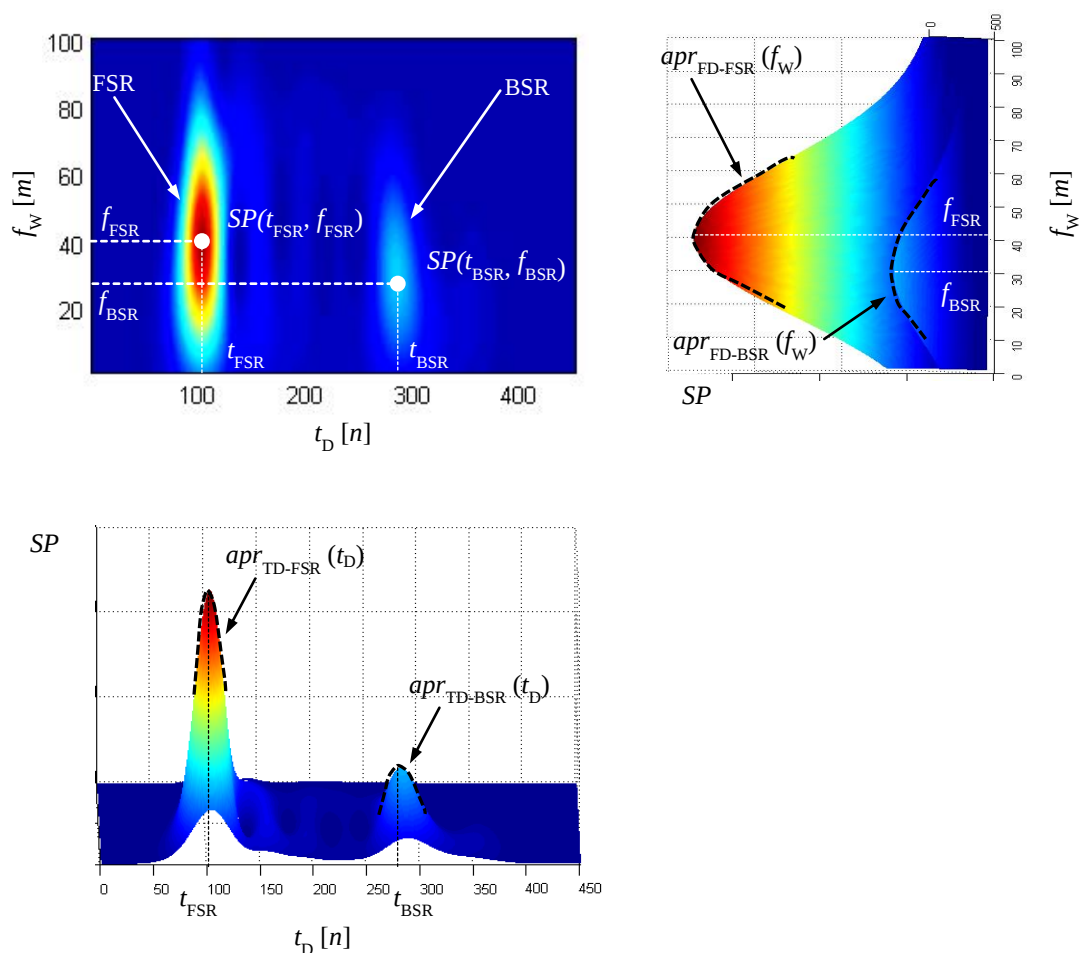
| Numer cechy | Definicja / wzór                                                                                                                                                      | Opis                                                                                                                                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 22          | $\xi_{22tf} = \sum_{n=1}^{30} \text{hist}[SP(\Delta t_{FS}, \Delta f_{LF})]$                                                                                          | suma wybranych elementów histogramu (30–60) wyznaczonego z obszaru ograniczonego przedziałem czasu $\Delta t_{FS}$ i zakresem częstotliwości $\Delta f_{LF}$                         |
| 23          | $\xi_{23tf} = \sum_{n=1}^{30} \text{hist}[SP(\Delta t_{BS}, \Delta f_{LF})]$                                                                                          | suma wybranych elementów histogramu (1–30) wyznaczonego z obszaru ograniczonego przedziałem czasu $\Delta t_{BS}$ i zakresem częstotliwości $\Delta f_{LF}$                          |
| 24          | $\xi_{24tf} = \sum_{n=60}^{100} \text{hist}[SP(\Delta t_{BS}, \Delta f_{LF})]$                                                                                        | suma wybranych elementów histogramu (60–100) wyznaczonego z obszaru ograniczonego przedziałem czasu $\Delta t_{BS}$ i zakresem częstotliwości $\Delta f_{HF}$                        |
| 25          | $\xi_{25tf} = \sum_{n=1}^{30} \text{hist}[SP(\Delta t_{BS}, \Delta f_{\Sigma})]$<br>$\Delta f_{\Sigma} = \Delta f_{LF} + \Delta f_{HF}$                               | suma wybranych elementów histogramu (1–30) wyznaczonego z obszaru ograniczonego przedziałem czasu $\Delta t_{BS}$ i całym zakresem częstotliwości                                    |
| 26          | $\xi_{26tf} = SP(t_{BSR}, f_{BSR})$                                                                                                                                   | maksymalna wartość spektrogramu w impulsie BSR                                                                                                                                       |
| 27          | $\xi_{27tf} = t_{BSR}$                                                                                                                                                | czas wystąpienia maksymalnej wartości w impulsie BSR                                                                                                                                 |
| 28          | $\xi_{28tf} = f_{BSR}$                                                                                                                                                | częstotliwość, przy której odnotowuje się maksymalną wartość w impulsie BSR                                                                                                          |
| 29          | $\xi_{29tf} = \sum_{t_D=0}^{t_{Dmax}} [SP(\Delta t_{\Sigma}, 20) * SP(\Delta t_{\Sigma}, 40)]$<br>$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_{FS} + \Delta t_{LS} + \Delta t_{BS}$ | suma próbek uzyskanych w wyniku operacji splotu pomiędzy wartościami spektrogramu dla dwudziestej i czterdziestej częstotliwości<br>$t_{Dmax}$ – maksymalna wartość czasu opóźnienia |
| 30          | $\xi_{30tf} = \sum_{t_D=0}^{t_{Dmax}} [SP(\Delta t_{\Sigma}, 20) * SP(\Delta t_{\Sigma}, 50)]$                                                                        | suma próbek uzyskanych w wyniku operacji splotu pomiędzy wartościami spektrogramu dla dwudziestej i pięćdziesiątej częstotliwości                                                    |
| 31          | $\xi_{31tf} = \sum_{t_D=0}^{t_{Dmax}} [SP(\Delta t_{\Sigma}, 20) * SP(\Delta t_{\Sigma}, 60)]$                                                                        | suma próbek uzyskanych w wyniku operacji splotu pomiędzy wartościami spektrogramu dla dwudziestej i sześćdziesiątej częstotliwości                                                   |

| Numer<br>cechy | Definicja / wzór                                                                                                                            | Opis                                                                                                                                |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 32             | $\xi_{32tf} = \sum_{t_D=0}^{t_{Dmax}} [SP(\Delta t_{\Sigma}, 20) * SP(\Delta t_{\Sigma}, 70)]$                                              | suma próbek uzyskanych w wyniku operacji splotu pomiędzy wartościami spektrogramu dla dwudziestej i siedemdziesiątej częstotliwości |
| 33             | $\xi_{33tf} = \mathbf{S}(1,1)$<br>$SP(\Delta t_{\Sigma}, \Delta f_{\Sigma}) = \mathbf{USV}^T$                                               | pierwszy element wektora wartości osobliwych uzyskanych za pomocą dekompozycji SVD                                                  |
| 34             | $\xi_{34tf} = \mathbf{S}(2,2)$<br>$SP(\Delta t_{\Sigma}, \Delta f_{\Sigma}) = \mathbf{USV}^T$                                               | drugi element wektora wartości osobliwych uzyskanych za pomocą dekompozycji SVD                                                     |
| 35             | $\xi_{35tf} = \mathbf{S}(3,3)$<br>$SP(\Delta t_{\Sigma}, \Delta f_{\Sigma}) = \mathbf{USV}^T$                                               | trzeci element wektora wartości osobliwych uzyskanych za pomocą dekompozycji SVD                                                    |
| 36             | $\xi_{36tf} = \mathbf{S}(4,4)$<br>$SP(\Delta t_{\Sigma}, \Delta f_{\Sigma}) = \mathbf{USV}^T$                                               | czwarty element wektora wartości osobliwych uzyskanych za pomocą dekompozycji SVD                                                   |
| 37             | $\xi_{37tf} = \left[ \sum_{f_w=0}^{f_{wMAX}} \sum_{t_D=0}^{t_{DMAX}} \sqrt{SP(\Delta t_{\Sigma}, \Delta f_{\Sigma})} \right]^2$             | miara koncentracji [8]<br>$f_{wMAX}$ – maksymalna częstotliwość                                                                     |
| 38             | $\xi_{38tf} = -\kappa \log_2 \kappa$<br>$\kappa = \sum_{f_w=0}^{f_{wMAX}} \sum_{t_D=0}^{t_{DMAX}} SP(\Delta t_{\Sigma}, \Delta f_{\Sigma})$ | entropia Shannona jako statystyczny wskaźnik losowości [8]                                                                          |
| 39             | $\xi_{39tf} = a_{1TD-BSR}$                                                                                                                  | współczynnik aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie czasu                                                                            |
| 40             | $\xi_{40tf} = a_{2TD-BSR}$                                                                                                                  | współczynnik aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie czasu                                                                            |
| 41             | $\xi_{41tf} = a_{3TD-BSR}$                                                                                                                  | współczynnik aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie czasu                                                                            |
| 42             | $\xi_{42tf} = \frac{a_{2TD-FSR}}{a_{2TD-BSR}}$                                                                                              | stosunek współczynnika aproksymacji impulsu FSR do współczynnika aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie czasu                        |
| 43             | $\xi_{43tf} = a_{5FD-FSR}$                                                                                                                  | współczynnik aproksymacji impulsu FSR w dziedzinie częstotliwości                                                                   |
| 44             | $\xi_{44tf} = a_{1FD-BSR}$                                                                                                                  | współczynnik aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie częstotliwości                                                                   |
| 45             | $\xi_{45tf} = a_{2FD-BSR}$                                                                                                                  | współczynnik aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie częstotliwości                                                                   |
| 46             | $\xi_{46tf} = \frac{a_{1FD-FSR}}{a_{1FD-BSR}}$                                                                                              | stosunek współczynnika aproksymacji impulsu FSR do współczynnika aproksymacji impulsu BSR w dziedzinie częstotliwości               |

hist – operacja wyznaczania histogramu.



Ryc. 5.7. Przykładowe spektrogramy sygnałów (z ryc. 5.3) uzyskanych w wyniku inspekcji kompozytu bazaltowego w przypadku obszaru: a) bez obecności defektu, b) zawierającego rozwarstwienie wynikające z uderzenia



Ryc. 5.8. Definicje krzywych aproksymujących kształt impulsów FSR i BSR w dziedzinie czasu i częstotliwości

W związku z tym, że impuls odbity od tylnej (w stosunku do głowicy pomiarowej) granicy badanego materiału zawiera dużo informacji o całym przekroju, jego położenie w spektrogramie i wartość maksymalna zostały wykorzystane również jako cechy (pozycje 26–28 w tab. 5.3). Poprzez spłot sygnałów uzyskanych dla różnych częstotliwości sparametryzowano zmienność całej odpowiedzi na różne rodzaje defektów, w zależności od poszczególnych częstotliwości (pozycje 29–32 w tab. 5.3).

Inną grupą parametrów są elementy wektora wartości osobliwych uzyskanych za pomocą dekompozycji SVD (pozycje 33–36 w tab. 5.3). W zestawie cech wykorzystywanych do identyfikacji znajdują się również parametry statystyczne wykorzystywane przy analizie sygnałów EEG [8] – miara koncentracji i entropia Shannona (pozycje 37 i 38 w tab. 5.3).

Kolejną grupą cech wykorzystanych w trakcie identyfikacji defektów są współczynniki aproksymacji spektrogramów impulsów FSR i BSR, co schematycznie przedstawiono na ryc. 5.8. W dziedzinie czasu impulsy aproksymowane są za pomocą wielomianu drugiego stopnia w płaszczyznach odpowiednio  $f_W = f_{FSR}$  i  $f_W = f_{BSR}$ :

$$apr_{TD-FSR}(t_D) = a_{1TD-FSR} t_D^2 + a_{2TD-FSR} t_D + a_{3TD-FSR} \quad (5.5)$$

$$apr_{TD-BSR}(t_D) = a_{1TD-BSR} t_D^2 + a_{2TD-BSR} t_D + a_{3TD-BSR} \quad (5.6)$$

gdzie:  $a_{nTD-FSR}$ ,  $a_{nTD-BSR}$  – współczynniki wielomianu aproksymującego ( $n = 1, 2, 3$ ).

W dziedzinie częstotliwości kształt impulsów ma bardziej złożony przebieg, więc aproksymowane są one za pomocą sumy funkcji gaussowskiej i liniowej w płaszczyznach odpowiednio  $t_D = t_{FSR}$  i  $t_D = t_{BSR}$ :

$$apr_{FD-FSR}(f_W) = a_{1FD-FSR} e^{-\left(\frac{f_W - a_{2FD-FSR}}{a_{3FD-FSR}}\right)^2} + a_{4FD-FSR} f_W + a_{5FD-FSR} \quad (5.7)$$

$$apr_{FD-BSR}(f_W) = a_{1FD-BSR} e^{-\left(\frac{f_W - a_{2FD-BSR}}{a_{3FD-BSR}}\right)^2} + a_{4FD-BSR} f_W + a_{5FD-BSR} \quad (5.8)$$

gdzie:  $a_{nFD-FSR}$ ,  $a_{nFD-BSR}$  – współczynniki funkcji aproksymującej ( $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ).

W związku z tym, że aproksymacje przeprowadzane są lokalnie, w ramach danego impulsu (jak to przedstawiono na ryc. 5.8) powyższe zależności są wystarczające.

### 5.2.3. Określenie zbioru cech

W poprzednich podrozdziałach określono 46 cech sygnału uzyskanego podczas inspekcji terahercowej. Wszystkie z nich zawierają pewną informację na temat badanej struktury. Część tej informacji powtarza się w wielu parametrach (cechy te są ze sobą silnie skorelowane), ale część informacji się dopełnia. Zastosowanie całego wektora cech:

$$\xi = [\xi_{1t} \cdots \xi_{12t}, \xi_{13f} \cdots \xi_{21f}, \xi_{22f} \cdots \xi_{46f}]^T \quad (5.9)$$

wymagałoby przeprowadzenia klasyfikacji w przestrzeni 46-wymiarowej, co niepotrzebnie skomplikowałoby procesy opracowywania i trenowania klasyfikatora. W związku z tym na-

stępnym krokiem jest redukcja wymiarowości wektora cech. Istnieją dwie metody określania zbioru cech wykorzystywanych w procesie klasyfikacji [28, 63]:

- selekcja cech (ang. *features selection*),
- ekstrakcja cech (ang. *features extraction*).

Selekcja cech polega na usunięciu redundancji z informacji zawartej w większym zbiorze cech, co sprowadza się do wyeliminowania cech nieistotnych, niosących tę samą informację, i pozostawienia tylko tych, które umożliwiają otrzymanie wyższej separowalności klas. Na wejście klasyfikatora podawane są cechy wyznaczone bezpośrednio ze zmierzonych sygnałów. Selekcja może odbywać się [57]:

- bez wykorzystania klasyfikatora,
- z wykorzystaniem klasyfikatora.

W przypadku pierwszej metody informacja o jakości cech (wydajności klasyfikacji przy użyciu danego zestawu cech) uzyskiwana jest za pomocą pośrednich miar, np. odległości międzyklasowej. W drugiej metodzie przeprowadzany jest pełny eksperyment – określany jest zestaw cech, następnie dokonywana jest klasyfikacja. Miara jej poprawności określa przydatność zastosowanego zbioru cech. Przedstawiony schemat postępowania może być wykorzystany do optymalizacji zbioru cech, np. z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Metoda ta umożliwia uzyskanie lepszych rezultatów, ale z definicji jest dużo bardziej wymagająca pod względem nakładu obliczeniowego, co może ograniczać jej zastosowanie.

Ekstrakcja cech polega na transformacji pierwotnego, wielowymiarowego, zestawu cech do nowego, najczęściej mniej liczego, zestawu umożliwiającego lepszą separację poszczególnych klas występujących w analizowanym problemie. Prowadzi to do uproszczenia zadania identyfikacji (uproszczenia klasyfikatora, pozbycia się mało istotnych informacji i zwiększenia zdolności uogólniania klasyfikatora). Do transformacji stosowanych w ekstrakcji cech zalicza się [28, 144]:

- analizę składników głównych (ang. Principal Component Analysis, PCA);
- liniową analizę dyskryminacyjną (ang. Linear Discriminant Analysis, LDA);
- skalowanie wielowymiarowe (ang. Multidimensional Scaling, MDS).

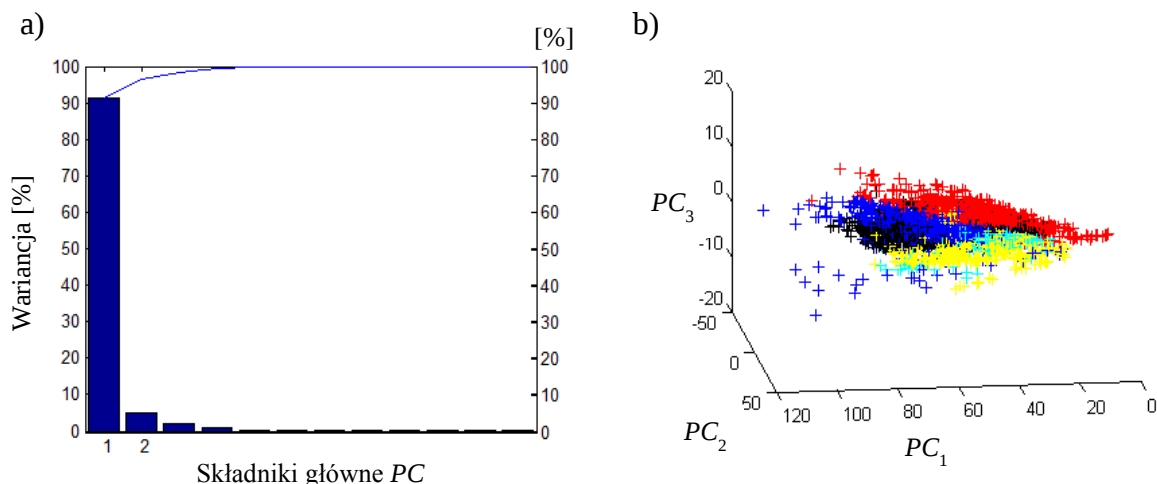
W niniejszej pracy do zmniejszenia wymiarowości przestrzeni cech wykorzystano analizę składników głównych, w której nowe cechy są kombinacją liniową oryginalnych cech, w związku z czym nie można ich bezpośrednio interpretować fizycznie:

$$PC = PCA(\xi) \quad (5.10)$$

gdzie:  $PC$  – wektor składników głównych,  $\xi$  – wektor oryginalnych cech (tab. 5.1–5.3),  $PCA$  – operacja analizy składników głównych.

Wyniki analizy PCA przedstawiono na ryc. 5.9. Uzyskany wektor składników głównych ma taki sam wymiar jak wektor oryginalny, lecz ilość informacji skorelowanej z poszczególnymi składnikami jest bardzo zróżnicowana. Jak można zauważyć na podstawie ryc. 5.9a, trzy pierwsze składniki główne zawierają 98,5% informacji o problemie. W związku z tym nowy wektor danych  $PC_R$  zostanie zbudowany na podstawie pierwszych trzech składników głównych  $PC_1$ ,  $PC_2$  i  $PC_3$ :

$$PC_R = \begin{bmatrix} PC_1 \\ PC_2 \\ PC_3 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$



Ryc. 5.9. Wynik analizy sładników głównych (badania dotyczące defektów występujących w kompozycie ze wzmocnieniem w postaci włókien bazaltowych): a) rozkład wariancji wnoszonej przez poszczególne sładniki główne, b) rozkład wektorów w przestrzeni trzech pierwszych sładników głównych (kolorami oznaczono różne klasy – rodzaje defektów)

#### 5.2.4. Klasyfikacja

Po określeniu optymalnego zbioru cech następuje etap klasyfikacji wektorów wejściowych, czyli etap przypisania ich do określonych klas, np.:

- klasa 1 – obszar bez defektów;
- klasa 2 – obszar z defektem typu a);
- klasa 3 – obszar z defektem typu b);
- klasa  $n$  – obszar z defektami innego typu.

Przy takim podejściu od początku wymagane jest stwierdzenie, jakiego rodzaju defekty system ma rozpoznawać i ile w związku z tym ma rozróżniać klas. Wiedza ta dostarczona może być na podstawie analizy procesu produkcji, obróbki i eksploatacji danego materiału lub elementu.

Istnieją dwa rodzaje uczenia klasyfikatora [28]:

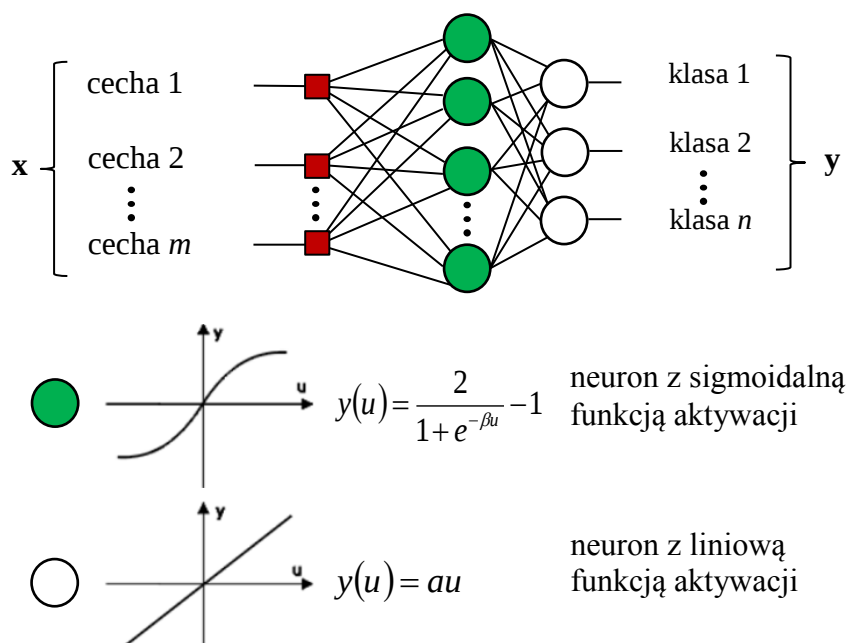
- z nauczycielem – nadzorowane (ang. *supervised training*);
- bez nauczyciela – nienadzorowane (ang. *unsupervised training*).

Trenowanie nadzorowane polega na podawaniu na wejście klasyfikatora wektora uczącego  $\mathbf{x}$  oraz informacji (etykiety)  $\mathbf{d}$ , do której klasy ów wektor należy. Parametry klasyfikatora (wagi, współczynniki itp.) są następnie tak adaptowane, aby dla wszystkich prezentowanych wektorów wejściowych klasyfikator generował na swoim wyjściu stan  $\mathbf{y}$  zgodny z etykietą  $\mathbf{d}$  przedstawianą w trakcie uczenia. Jest to proces optymalizacyjny minimalizujący błąd pomiędzy otrzymywanym  $\mathbf{y}$  a założonym  $\mathbf{d}$  sygnałem wyjściowym. Błąd ten jest wykorzystywany do korekcji parametrów (wag) klasyfikatora. Do metod klasyfikacji wykorzystujących trening

nadzorowany najczęściej stosowanych w uczeniu maszynowym (ang. *machine learning*), również w zagadnieniach związanych z badaniami nieniszczącymi, zaliczyć można [28, 63]:

- drzewa decyzyjne (ang. *decision trees*);
- klasyfikator Bayesa (ang. *Bayesian classifier*);
- wielowarstwowe sztuczne sieci neuronowe (ang. *Multi Layered Artificial Neural Networks*, MLANN);
- metodę wektorów nośnych / wspierających SVM (ang. *Support Vector Machine*).

Ze względu na dużą szybkość klasyfikacji, dokładność i uniwersalność [63] w niniejszych badaniach do klasyfikacji nadzorowanej defektów w kompozycie bazaltowym BFRP (ang. *Basalt Fiber Reinforced Polymer*) wykorzystano wielowarstwowe sieci neuronowe. Przykładową strukturę tego typu przedstawiono na ryc. 5.10. Warstwa ukryta składa się z neuronów o sigmoidalnej funkcji aktywacji, natomiast warstwa wyjściowa ma  $n$  neuronów o liniowej funkcji aktywacji. Struktura ta wykorzystana zostanie w niniejszej pracy w roli klasyfikatora.



Ryc. 5.10. Przykładowa wielowarstwowa sieć neuronowa do klasyfikacji nadzorowanej

Przeprowadzono trzy eksperymenty dotyczące identyfikacji:

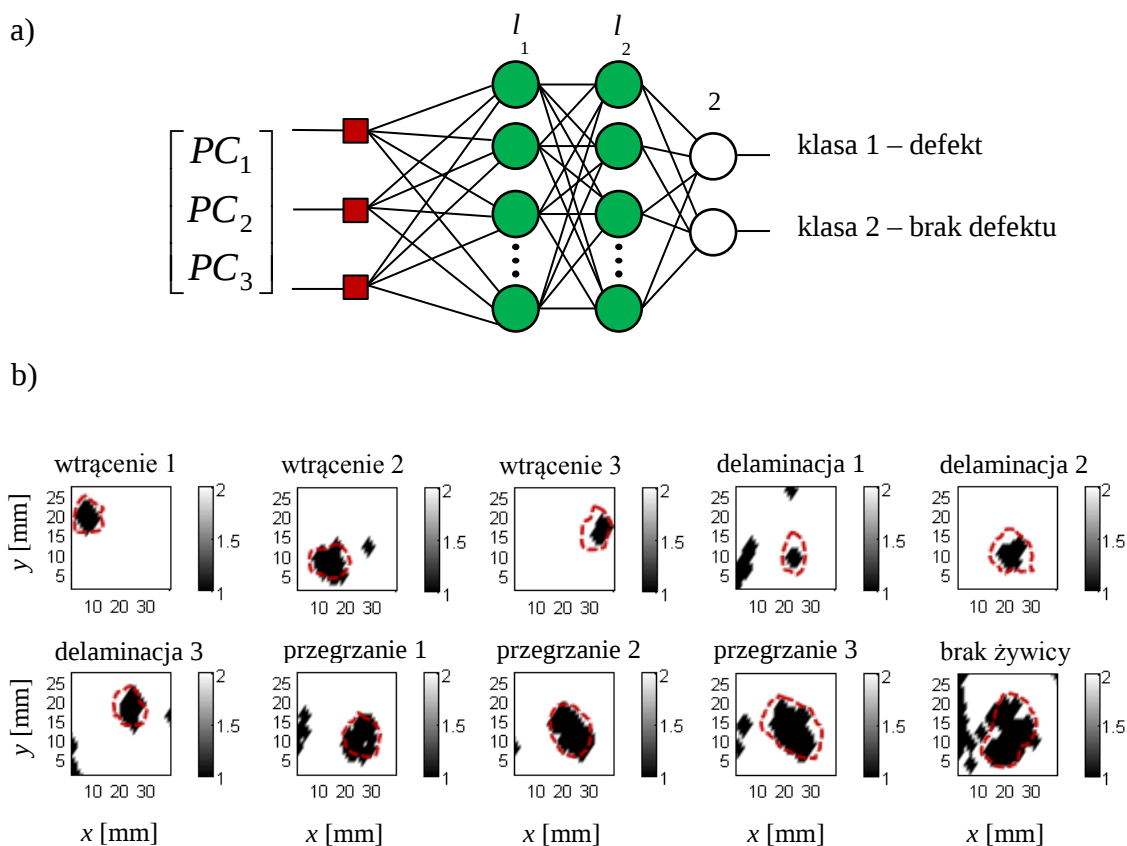
1. Jeden klasyfikator neuronowy identyfikuje dwie klasy – defekt / niedefekt. Strukturę klasyfikatora i wyniki klasyfikacji dla przykładowych defektów występujących w badanym kompozycie bazaltowym przedstawiono na ryc. 5.11.
2. Cztery osobne klasyfikatory neuronowe – każdy z nich jest odpowiedzialny za wykrycie jednego z rodzajów defektów. Strukturę sieci neuronowej przedstawiono na ryc. 5.12, natomiast wyniki identyfikacji dla reprezentatywnej grupy niejednorodności przedstawiono graficznie na ryc. 5.13.
3. Jeden klasyfikator neuronowy identyfikuje pięć klas:
  - klasa 1 – wtrącenie;

- klasa 2 – rozwarstwienie wywołane udarem mechanicznym;
- klasa 3 – przegrzanie;
- klasa 4 – niedostateczne wypełnienie żywicą;
- klasa 5 – brak defektów.

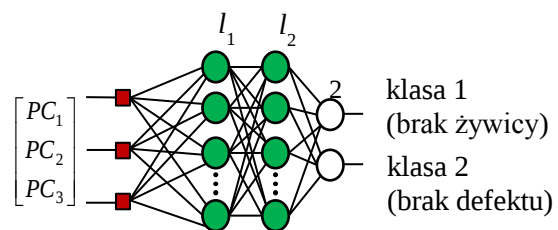
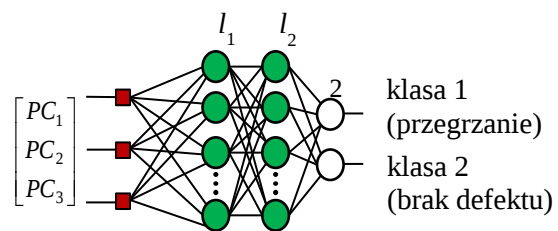
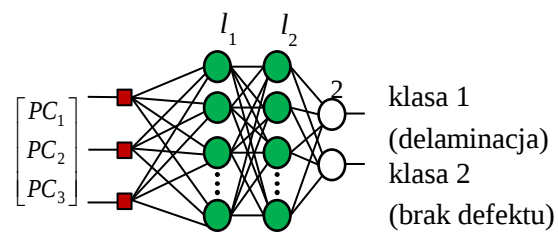
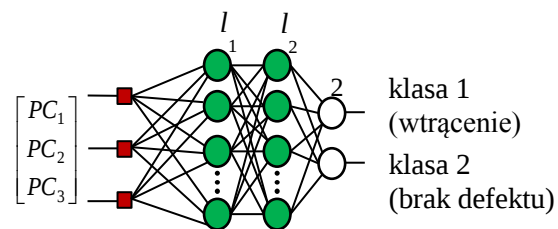
Strukturę klasyfikatora i wyniki klasyfikacji dla przykładowych defektów występujących w badanym kompozycie bazaltowym przedstawiono na ryc. 5.14.

W przypadku eksperymentu 1 wykryte zostały wszystkie defekty, a ich kształt (rozkład powierzchniowy) został w większości przypadków poprawnie odwzorowany; w niewielkim stopniu występują fałszywe wskazania (dokładna analiza przedstawiona zostanie w rozdz. 5.2.5). Wyniki uzyskane w eksperymencie 2 charakteryzują się dużo mniejszą liczbą fałszywych wskazań, jednakże powierzchnia wykrywanych defektów jest wyraźnie niedoszacowana (w największym stopniu w przypadku wtrącenia 1 – zob. ryc. 5.13a). Tu również wszystkie defekty zostały wykryte i zidentyfikowane. Najlepsze wyniki identyfikacji uzyskano w eksperymencie 3, w którym kształty defektów zostały bardzo dobrze odwzorowane, a liczba fałszywych wskazań jest stosunkowo niewielka. Rodzaj defektu został również poprawnie określony.

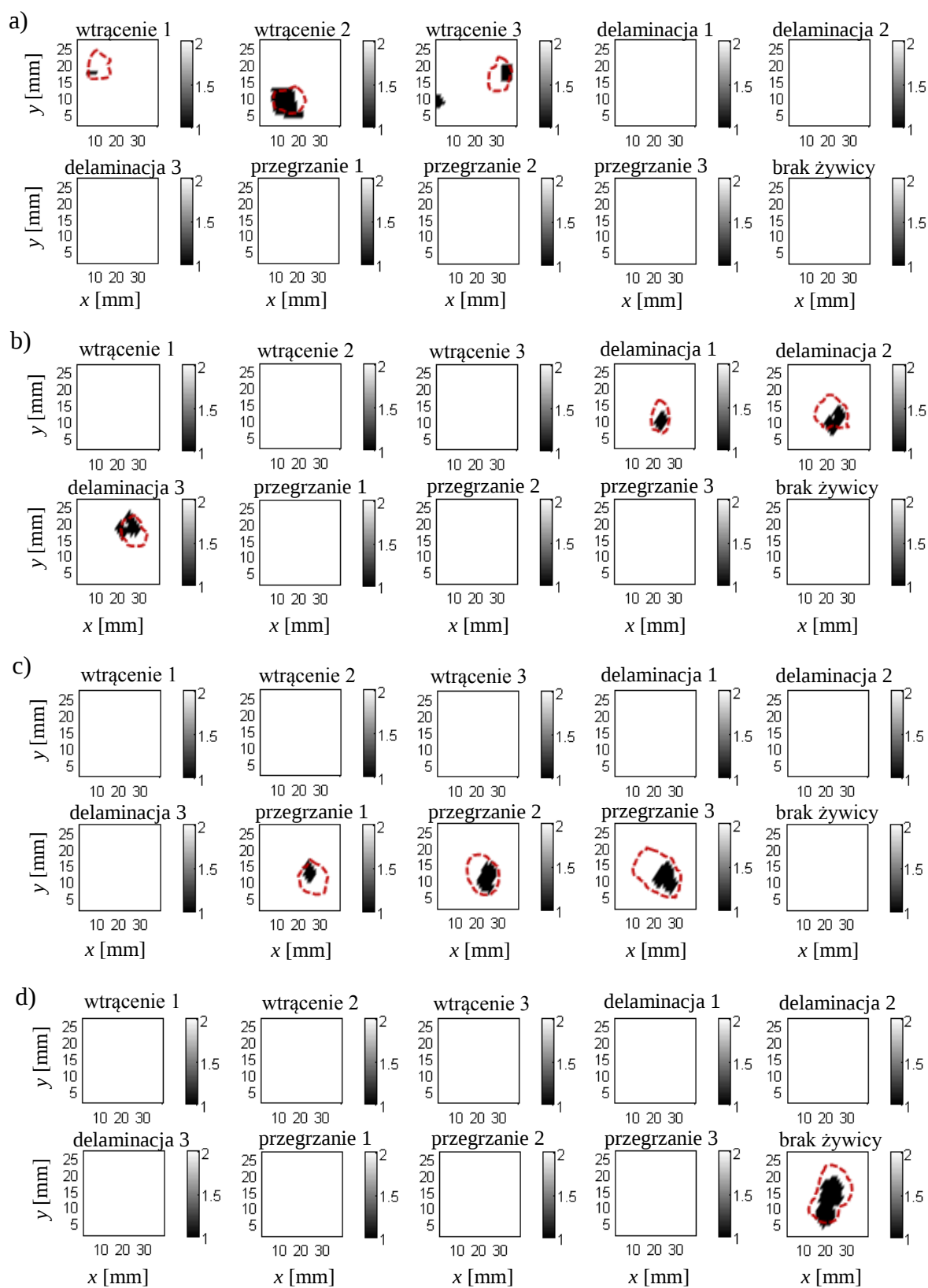
Sieci neuronowe trenowane były metodą Levenberga-Marquardta. W procesie trenowania wykorzystano 180 wektorów uczących, reprezentujących wszystkie rozpoznawane rodzaje defektów oraz obszar niezawierający defektów. Weryfikację procedury uczenia przeprowadzono na grupie 10530 wektorów.



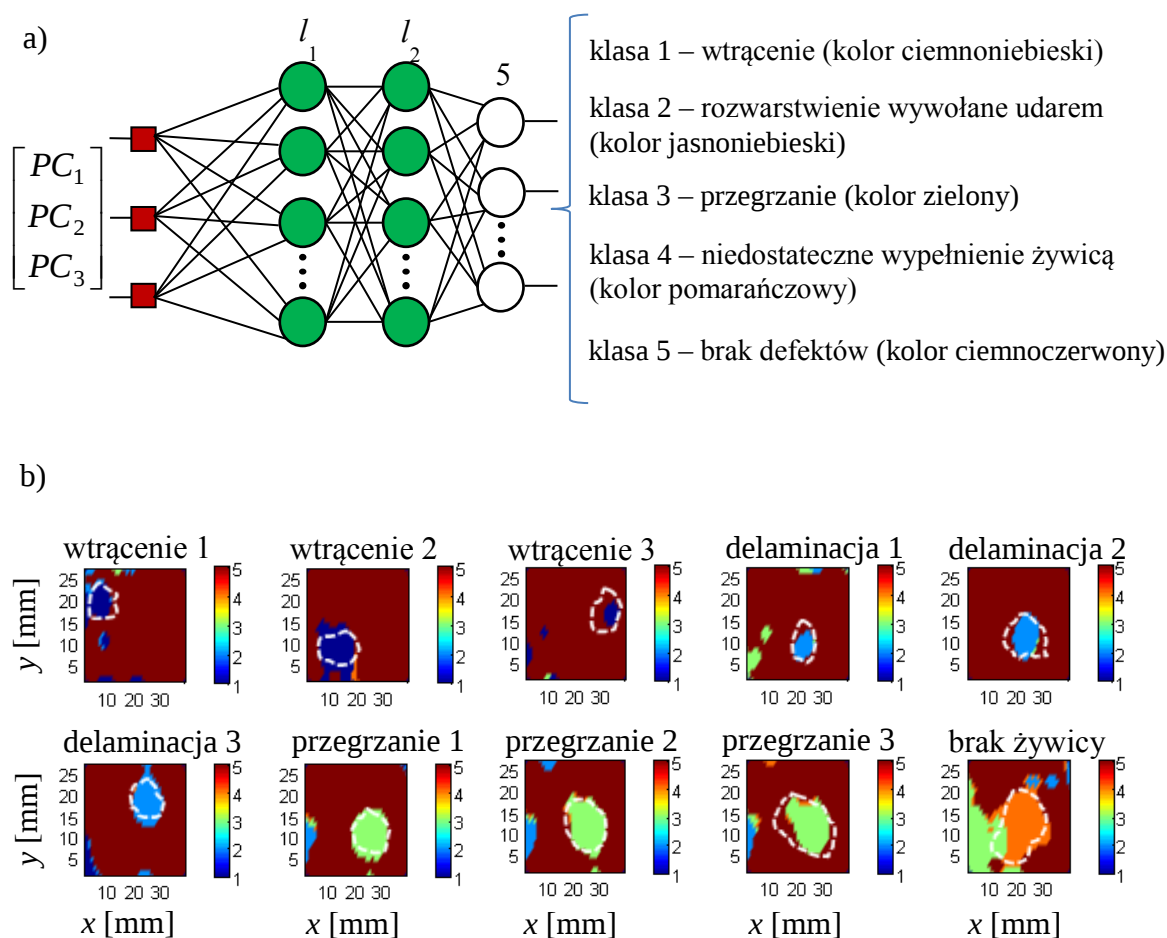
Ryc. 5.11. Eksperyment 1: a) postać klasyfikatora, b) przykładowe wyniki identyfikacji / wykrycia defektów (powierzchniowe rozkłady występowania poszczególnych klas); kolor czarny – klasa 1 (defekt), kolor biały – klasa 2 (brak defektu); linią przerywaną zaznaczono kontury defektów



Ryc. 5.12. Eksperyment 2 – postać klasyfikatorów



Ryc. 5.13. Eksperyment 2 – przykładowe wyniki identyfikacji/wykrycia defektów: a) klasyfikator wykrywający wtrącenia, b) klasyfikator wykrywający rozwarstwienia wywołane uderzeniem mechanicznym, c) klasyfikator wykrywający przegrzanie, d) klasyfikator wykrywający brak żywicy



Ryc. 5.14. Eksperyment 3: a) postać klasyfikatora, b) przykładowe wyniki identyfikacji defektów (powierzchniowe rozkłady występowania poszczególnych klas); zastosowane kolory odpowiadają numerom klas przedstawionym na skali; linią przerywaną zaznaczono kontury defektów

### 5.2.5. Weryfikacja procesu klasyfikacji

Z powodu dużej różnorodności sygnałów otrzymywanych w ramach jednej klasy (np. defektów wywołanych udarem mechanicznym) oraz występowania podobnych zjawisk w wyniku powstawania różnych typów defektów (np. rozwarstwień na skutek uderzeń mechanicznych, defektów pod wpływem ciepła i występowania wtrącenia) opracowanie neuronowego klasyfikatora o dużej skuteczności działania jest zadaniem złożonym. Skuteczność proponowanej metodologii oceniano za pomocą następujących parametrów statystycznych [8]:

- czułości klasyfikatora (ang. *sensitivity*)

$$SEN = \frac{TP}{TP + FN} 100\% \quad (5.12)$$

- specyficzności (ang. *specificity*)

$$SPE = \frac{TN}{TN + FP} 100\% \quad (5.13)$$

- wartości predykcyjnej dodatniej (ang. *positive predictive value*)

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP} 100\% \quad (5.14)$$

- wartości predykcyjnej ujemnej (ang. *negative predictive value*)

$$NPV = \frac{TN}{TN + FN} 100\% \quad (5.15)$$

- dokładności klasyfikatora (ang. *total accuracy*)

$$ACC = \frac{TP + TN}{numP + numN} 100\% \quad (5.16)$$

gdzie:  $TP$  – liczba wyników/wskazań prawdziwie pozytywnych (ang. *true positives*),  $TN$  – liczba wyników prawdziwie negatywnych (ang. *true negatives*),  $FP$  – liczba wskazań fałszywie pozytywnych (ang. *false positives*),  $FN$  – liczba wskazań fałszywie negatywnych (ang. *false negatives*),  $numP$  – liczba wskazań pozytywnych,  $numN$  – liczba wskazań negatywnych.

Wartości powyższych miar jakości detekcji defektów dla różnych rodzajów niejednorodności przedstawiono w tab. 5.4. Uzyskano duże wartości całkowitej dokładności klasyfikatora  $ACC$  oraz czułości  $SEN$ . Podobną analizę przeprowadził autor w pracy [72] przy zastosowaniu jedynie cech wyznaczonych w dziedzinie czasu i dziedzinie częstotliwości. W odniesieniu do wyników pracy [72] uzyskano dokładność  $ACC$  na podobnym poziomie, natomiast czułość  $SEN$  wyższą o 5%. Szczególnie w przypadku wtrąceń pomiędzy różnymi warstwami, rozwarstwień wywołanych udarem mechanicznym oraz niejednorodności wynikających z niedostatecznego przesycenia wzmocnienia żywicą uzyskano lepsze wyniki, co potwierdza słuszność zastosowania cech wyznaczanych w połączonej dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.

Tabela 5.4. Skuteczność neuronowej detekcji defektów (klasyfikator 1)

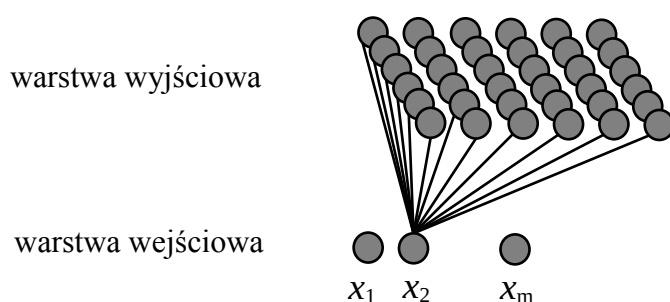
| Rodzaj defektu                              | $SEN$ | $SPE$ | $PPV$ | $NPV$ | $ACC$ |
|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                             | %     |       |       |       |       |
| Wtrącenia pomiędzy różnymi warstwami        | 80,7  | 97,9  | 69,3  | 98,9  | 96,9  |
| Rozwarstwienia wywołane udarem mechanicznym | 61,7  | 95,7  | 53,2  | 97,0  | 93,3  |
| Defekty wywołane przegrzaniem               | 84,6  | 88,8  | 38,5  | 98,6  | 88,5  |
| Niedostateczne przesycenie żywicą           | 87,1  | 82,6  | 53,2  | 96,6  | 83,9  |
| Wszystkie typy defektów                     | 77,7  | 93,4  | 49,6  | 98,0  | 92,2  |

### 5.3. Identyfikacja niejednorodności za pomocą neuronowych struktur samoorganizujących się SOM

#### 5.3.1. Struktury samoorganizujące się

Trenowanie nienadzorowane lub inaczej grupowanie: (ang. *clustering*) polega na podziale- niu wektorów wejściowych na grupy na podstawie jedynie ich statystycznych własności. In- formacje o przynależności do klas poszczególnych wektorów nie są podawane lub wręcz nie są znane [28]. Sytuacja taka wystąpić może, gdy inspekcja dotyczy np. nowego materiału i gdy nie mamy jeszcze informacji o możliwych defektach. Wektory „podobne” do siebie, czyli znajdujące się blisko siebie, w przestrzeni cech będą stanowiły jedną grupę. Istnieją róż- ne miary tych odległości, np.: odstęp euklidesowy oraz jego kwadrat, miara Manhattan oraz odstęp Mahalanobisa [28]. Do najczęściej stosowanych w badaniach nieniszczących (radio- grafii cyfrowej, metodzie ultradźwiękowej i emisji akustycznej) metod grupowania zaliczyć można [12, 28, 49, 59, 100, 108, 117, 119]:

- algorytm centroidów (k-średnich, ang. *k-means*);
- grupowanie hierarchiczne (ang. *hierarchical clustering*);
- neuronowe struktury samoorganizujące się SOM (ang. *self-organizing maps*).



Ryc. 5.15. Neuronowa sieć samoorganizująca się SOM

Wykorzystanie sieci SOM (map Kohonena) po raz pierwszy zaproponowano w pracy [61]. Sieć SOM schematycznie przedstawiono na ryc. 5.15. Składa się ona z warstwy wejściowej o rozmiarze tożsamym z rozmiarem wektora wejściowego oraz warstwy wyjściowej, najczę- ściej dwuwymiarowej. Jedno- i trójwymiarowe mapy są również spotykane, jednakże w tej monografii autor ograniczył się tylko do map dwuwymiarowych. Warstwa wyjściowa stanowi mapę neuronów. Organizuje się ona w ten sposób, że otrzymywane jest topologiczne sąsiedz- two odpowiedzi podobnych wektorów wejściowych. Można w ten sposób uzyskać odwzoro- wania przestrzeni wielowymiarowej ( $\mathbf{x} \in R^m$ ) na dwuwymiarową mapę. Uzyskiwane jest to za pomocą uczenia konkurencyjnego (ang. *competitive learning*). Po zainicjowaniu wag sieci na wejście podawany jest wektor:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

gdzie:  $m$  – liczba cech wykorzystywanych w treningu.

Następnie obliczana jest odległość euklidesowa wektora wag  $\mathbf{w}$  każdego neuronu od wektora wejściowego  $\mathbf{x}$ . Element, dla którego dystans ten jest najmniejszy, nazywany jest zwycięzcą (ang. *best matching unit*, BMU). Neuron ten oraz jego topologiczne sąsiedztwo podlegają adaptacji wag, czyli przesunięciu wartości wag w kierunku wektora uczącego  $\mathbf{x}$ , zgodnie z następującą zależnością [93]:

$$\mathbf{w}_i(k+1) = \mathbf{w}_i(k) + \eta(k)h_{\text{BMU}-i}(k)[\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}_i(k)] \quad (5.18)$$

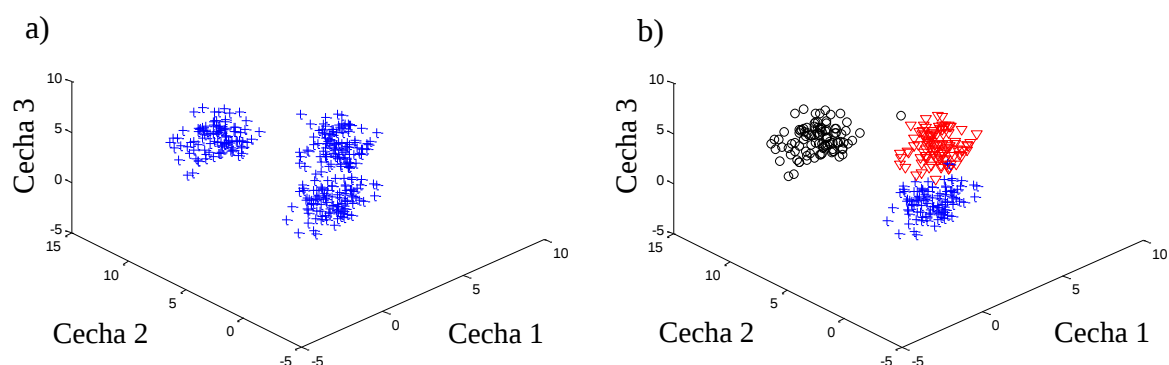
gdzie:  $k$  – kolejna iteracja procesu trenowania sieci;  $i$  – numer neuronu, którego wagi są aktualnie adaptowane;  $\eta(k)$  – współczynnik uczenia bliski wartości 1 na początku i malejący (liniowo, wykładniczo lub hiperbolicznie) w trakcie treningu;  $h_{\text{BMU}-i}(k)$  – funkcja z przedziału  $\langle 0,1 \rangle$  określająca przynależności  $i$ -tego neuronu do sąsiedztwa BMU,  $\mathbf{w}_i$  – wektor wag aktualnie adaptowanego neuronu.

Funkcja  $h_{\text{BMU}-i}$  zależy od liczby przeprowadzonych iteracji  $k$ . Wraz ze zwiększaniem się wartości  $k$ , maleje promień sąsiedztwa tak, że pod koniec tylko wagi neuronu wygrywającego są zmieniane zgodnie z następującą zależnością:

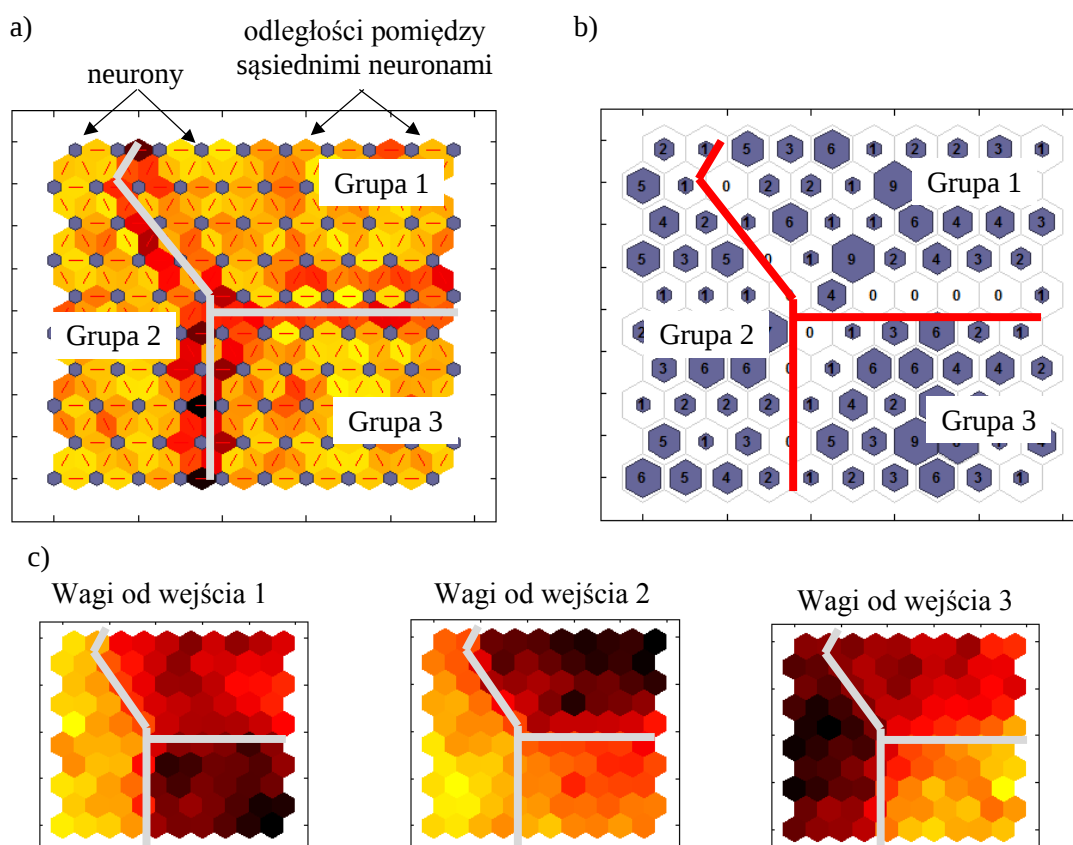
$$\mathbf{w}_{\text{BMU}}(k+1) = \mathbf{w}_{\text{BMU}}(k) + \eta(k)[\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}_{\text{BMU}}(k)] \quad (5.19)$$

W wyniku działania powyższego algorytmu wektory wag przemieszczają się w kierunku dużych skupisk punktów danych w przestrzeni cech  $R^m$ , a neurony grupują się topologicznie na mapie. Neurony zatem zgrupowane w ramach pewnego obszaru mapy odpowiadają podobnie na należące do tej samej grupy wymuszenia. (Bardziej szczegółowo zagadnienia trenowania i zastosowań map Kohonena przedstawiono w pracach [60, 91, 93].)

Przykład grupowania przeprowadzonego za pomocą sieci SOM przedstawiono na ryc. 5.16 oraz ryc. 5.17. W przestrzeni cech znajdują się trzy skupiska punktów, które w problemach związanych z badaniami nieniszczącymi odpowiadałyby różnym stanom badanej struktury (np. różnym typom defektów). W wyniku treningu nienadzorowanego sieci neuronowej Kohonena, o rozmiarze  $10 \times 10$  i topologii heksagonalnej, otrzymano topologiczne uporządkowanie mapy przedstawione na ryc. 5.17. Rozkład odległości w przestrzeni wag pomiędzy sąsiadującymi neuronami pokazany jest na ryc. 5.17a. Kolor jaśniejszy oznacza mniejszy dystans w przestrzeni wag pomiędzy sąsiednimi neuronami. Obszary mapy o jaśniejszym kolorze stanowią zbiór neuronów odpowiadających na wektory wejściowe należące do jednej grupy. Obszary te rozdzielone są miejscami o większych odległościach do sąsiednich neuronów (o ciemniejszym kolorze), stanowiącymi granice pomiędzy grupami. Na ryc. 5.17b przedstawiono liczbę wektorów wejściowych używanych w procesie uczenia, wzbudzających poszczególne neurony. Rozkład ten jest stosunkowo równomierny w ramach całej mapy, co potwierdza poprawność przeprowadzonego treningu. Na ryc. 5.17c pokazane są rozkłady wag łączących neurony warstwy wyjściowej z poszczególnymi wejściami. Jeśli rozkłady te są podobne do siebie, co oznacza, że wejścia (cechy) są ze sobą silnie skorelowane, część z nich można pominąć w dalszym procesie analizy informacji.



Ryc. 5.16. Przykładowy zbiór wektorów w przestrzeni cech: a) przed grupowaniem, b) po grupowaniu, z wykorzystaniem sieci SOM o rozmiarze  $10 \times 10$  i topologii heksagonalnej (przynależność do danej grupy określona jest kształtem i kolorem znacznika)



Ryc. 5.17. Wyniki dla wytrenowanej sieci SOM o rozmiarze  $10 \times 10$  i topologii heksagonalnej dla przestrzeni cech przedstawionej na ryc. 5.16: a) odległości w przestrzeni wag pomiędzy sąsiednimi neuronami, b) rozkład wektorów wejściowych wzbudzających poszczególne neurony, c) rozkład wag łączących neurony warstwy wyjściowej z poszczególnymi wejściami; kolor ciemniejszy oznacza większą wartość odległości / wagi

W rozdziale 5.3.2 przedstawiono zastosowanie samoorganizujących się struktur neuronowych do wykrywania i grupowania defektów występujących w materiałach kompozytowych wzmacnianych włóknem bazaltowym.

### 5.3.2. Identyfikacja defektów w kompozycie bazaltowym

W pracy [70] autor niniejszej monografii zaproponował wykorzystanie zbioru cech wynikających ze współczynników transmitancji filtru opisującego wpływ badanego materiału na sygnał (współczynniki transmitancji uzyskane za pomocą procedury Steiglitz-McBride'a przedstawione w rozdz. 5.2.2.2) oraz sieci Kohonena (SOM) do klasyfikacji nienadzorowanej wybranych defektów występujących w kompozycie bazaltowym. W niniejszym rozdziale wyniki te zostaną bardziej szczegółowo przedstawione i przedyskutowane.

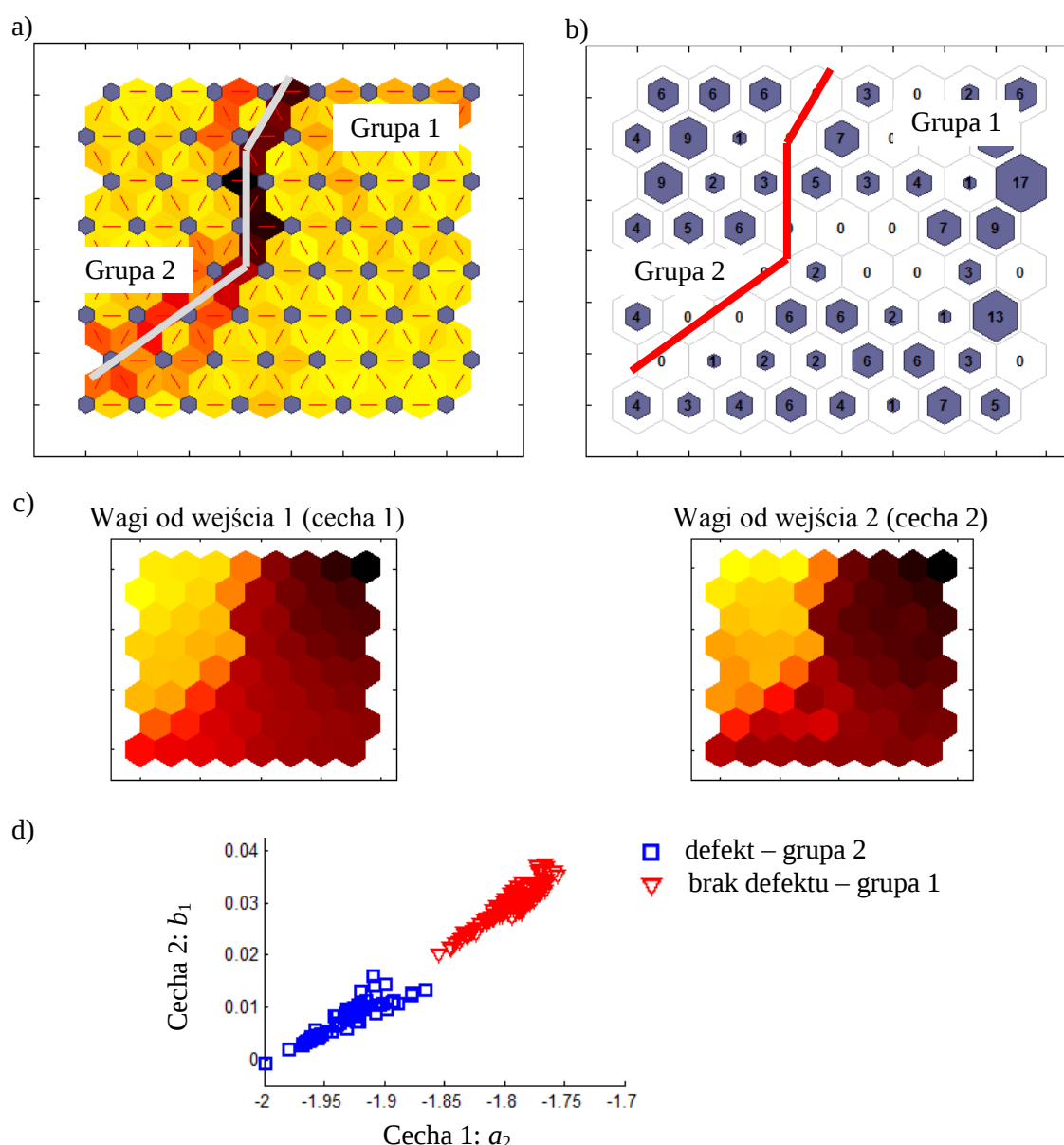
W przypadku eksperymentu z trenowaniem nienadzorowanym skoncentrowano się tylko na dwóch typach defektów – wtrąceniach i delaminacjach wywołanych udarem mechanicznym. Pierwszym eksperymentem było pogrupowanie danych uzyskanych w wyniku inspekcji terahercowej na dwie grupy:

- grupa 1 – brak defektu;
- grupa 2 – obecność defektu (wtrącenia lub delaminacji wywołanej udarem mechanicznym).

Zadanie to sprowadza się do detekcji niejednorodności w materiale badanym bez jakiegokolwiek informacji o jego strukturze. Do analizy wybrano dwie cechy wyznaczane w dziedzinie częstotliwości na podstawie zależności (5.4) – cecha 1: współczynnik  $a_2$ , cecha 2: współczynnik  $b_1$ . Wynik grupowania przedstawiono graficznie na ryc. 5.18. W wyniku treningu mapa podzielona została na dwa obszary (ryc. 5.18a,b). W przyjętej dwuwymiarowej przestrzeni cech (ryc. 5.18d) różne typy defektów są do siebie bardzo podobne (ich odległości są małe, co powoduje ich skupienie) i jednocześnie wszystkie istotnie odstają od wektorów reprezentujących materiał niezawierający defektów. Jak można zauważyć, przyjęty zestaw cech umożliwia uzyskanie separowalności obu grup, nawet jeśli tylko jedna z cech zostałaby wykorzystana w procesie grupowania. Potwierdzeniem powyższego stwierdzenia jest stosunkowo duża korelacja pomiędzy rozkładami wag łączących neurony warstwy wyjściowej z poszczególnymi wejściami (cechami) – ryc. 5.18c.

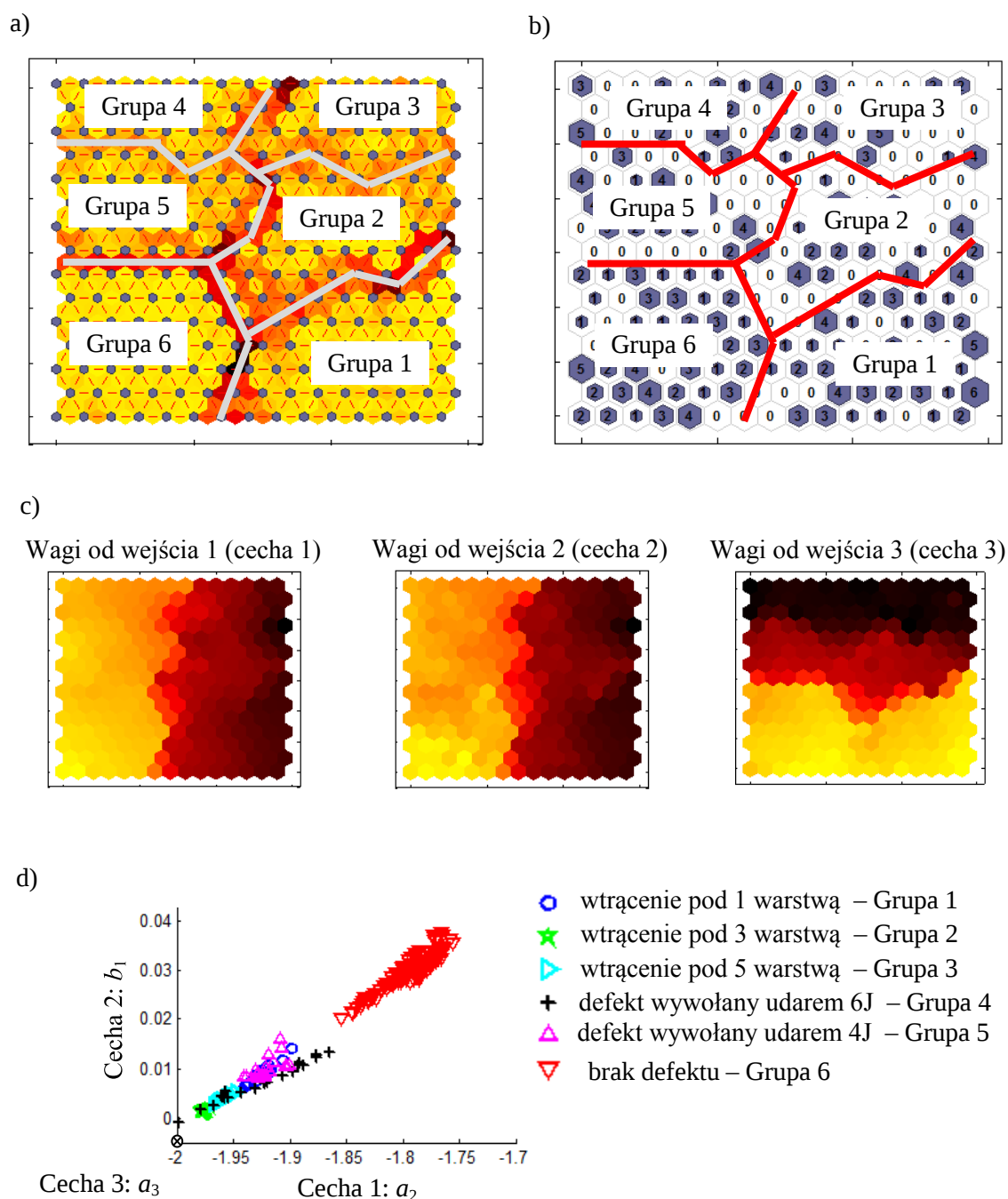
W ramach drugiego eksperymentu badano zdolności neuronowych struktur samoorganizujących się do identyfikacji różnych typów niejednorodności występujących w kompozycie wzmacnianym włóknem bazaltowym. W rozdziale 5.2 w jednej grupie znajdowały się wtrącenia pomiędzy różnymi warstwami laminatu bazaltowego. Podobnie było również w przypadku rozwarstwień wywołanych udarem mechanicznym o różnych energiach. Powoduje to istotne różnice w sygnale w ramach jednej grupy (zmiany parametrów w innych oknach czasowych), co ma bezpośredni wpływ na cechy w dziedzinie czasu. Podejście takie utrudnia proces opracowania klasyfikatora neuronowego (większy rozmiar, dłuższy czas treningu i potrzeba większej liczby danych treningowych). Defekty wykorzystane w opisywanym eksperymencie podzielono na podgrupy w zależności od głębokości wtrącenia i energii uderzenia:

- 1) wtrącenie pod 1 warstwą;
- 2) wtrącenie pod 3 warstwą;
- 3) wtrącenie pod 5 warstwą;
- 4) defekt wywołany udarem mechanicznym o energii 6J;
- 5) defekt wywołany udarem mechanicznym o energii 4J;
- 6) brak defektu.



Ryc. 5.18. Detekcja defektów w kompozycie wzmacnianym włóknami bazaltowymi – wynik grupowania za pomocą samoorganizującej się sieci neuronowej SOM o rozmiarze  $8 \times 8$  i topologii heksagonalnej: a) mapa odległości pomiędzy neuronami zorganizowana w dwie grupy, b) rozkład wektorów wejściowych wzbudzających poszczególne neurony, c) rozkład wag łączących neurony warstwy wyjściowej z poszczególnymi wejściami, d) wynik grupowania – rozkład wektorów reprezentujących poszczególne punkty pomiarowe w przestrzeni cech

Zastosowanie dwuwymiarowej przestrzeni cech z eksperymentu pierwszego nie jest wystarczające do identyfikacji oczekiwanej liczby sześciu grup. W związku z tym do dalszej analizy wybrano trzy cechy wyznaczane w dziedzinie częstotliwości na podstawie zależności (5.4) – cecha 1:  $a_2$ , cecha 2:  $b_1$ , cecha 3:  $a_3$ . Dodanie trzeciego wymiaru w przestrzeni cech umożliwiło separację skupisk wektorów reprezentujących poszczególne rodzaje defektów. Wyniki grupowania przedstawiono na ryc. 5.19. W wyniku treningu mapa podzielona została na sześć obszarów (ryc. 5.19a,b).



Ryc. 5.19. Identyfikacja defektów w kompozycie bazaltowym – wynik grupowania za pomocą samoorganizującej się sieci neuronowej SOM o rozmiarze  $15 \times 15$  i topologii heksagonalnej: a) mapa odległości pomiędzy neuronami zorganizowana w sześć grup, b) rozkład wektorów wejściowych wzbudzających poszczególne neurony, c) rozkład wag łączących neurony warstwy wyjściowej z poszczególnymi wejściami, d) wynik grupowania – rozkład wektorów reprezentujących poszczególne punkty pomiarowe w przestrzeni cech

Jak można zauważyć, przyjęty zestaw cech umożliwia uzyskanie separowalności klas. W przyjętej trójwymiarowej przestrzeni cech (ryc. 5.19d) różne typy defektów zostały poprawnie rozróżnione (skupiska wektorów je reprezentujących są rozciągnięte wzdłuż osi ce-

chy 3) i jednocześnie wszystkie w sposób istotny odstają od wektorów reprezentujących materiał niezawierający defektów.

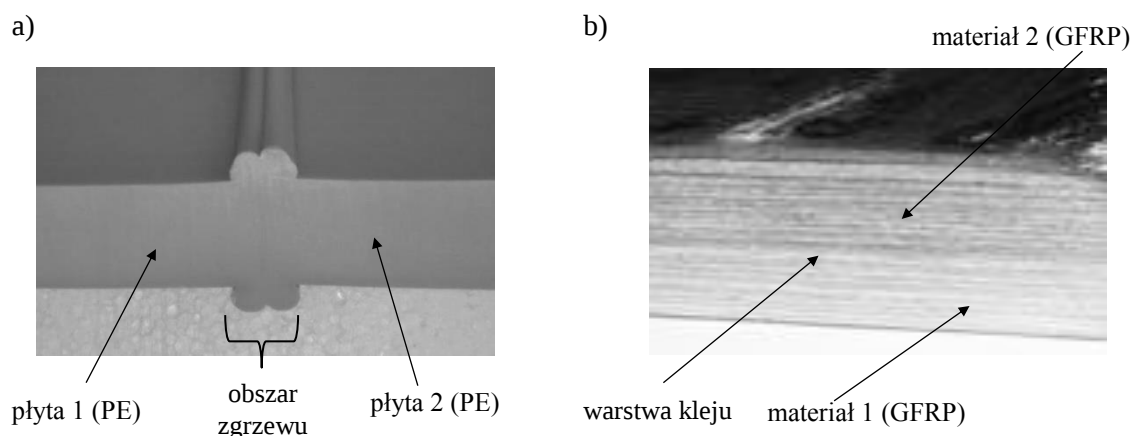
Podsumowując, stwierdzić można, że zastosowana neuronowa sieć samoorganizująca się jedynie na podstawie wektorów wejściowych (bez dodatkowej informacji) umożliwiła wykrycie sześciu występujących stanów badanej struktury (brak niejednorodności i pięć różnych defektów). Identyfikacja grupy, do której należy badany obszar materiału, polega na stwierdzeniu, do której grupy należy neuron najsilniej pobudzony przez zadany wektor wejściowy.

## 6. Wybrane problemy inspekcji materiałów dielektrycznych

### 6.1. Badanie połączeń klejonych

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną wybrane problemy dotyczące badania materiałów dielektrycznych i kompozytowych, w których wykorzystano inspekcję terahercową ze wzbudzeniem impulsowym.

Zaobserwować można obecnie coraz większe wykorzystanie dielektrycznych, w tym również kompozytowych, materiałów w konstrukcjach występujących w różnych gałęziach przemysłu. Fakt ten wiąże się ze zwiększającą się liczbą połączeń zgrzewanych i klejonych. Przykłady takich połączeń przedstawiono na ryc. 6.1.

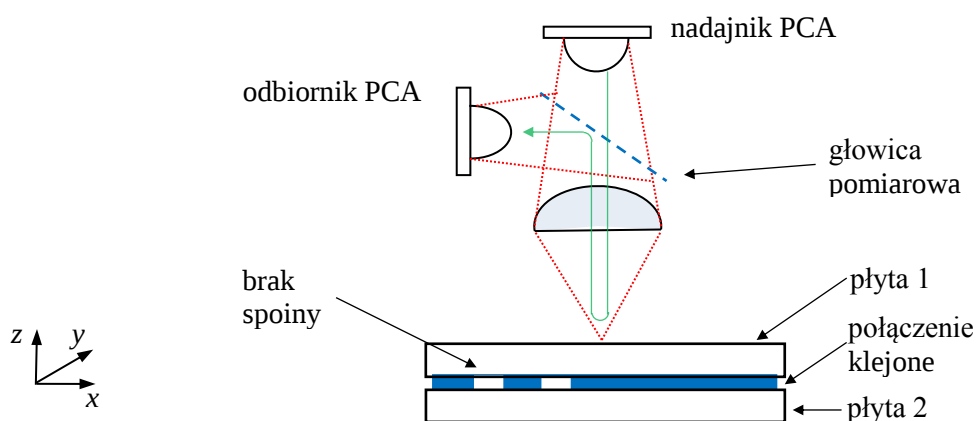


Ryc. 6.1. Popularne w przemyśle metody zespawania materiałów dielektrycznych: a) przykład połączenia zgrzewanego elementów polietylenowych (PE), b) przekrój przez połączenie klejone komponentów wykonanych z kompozytu wzmacnianego włóknem szklanym (GFRP)

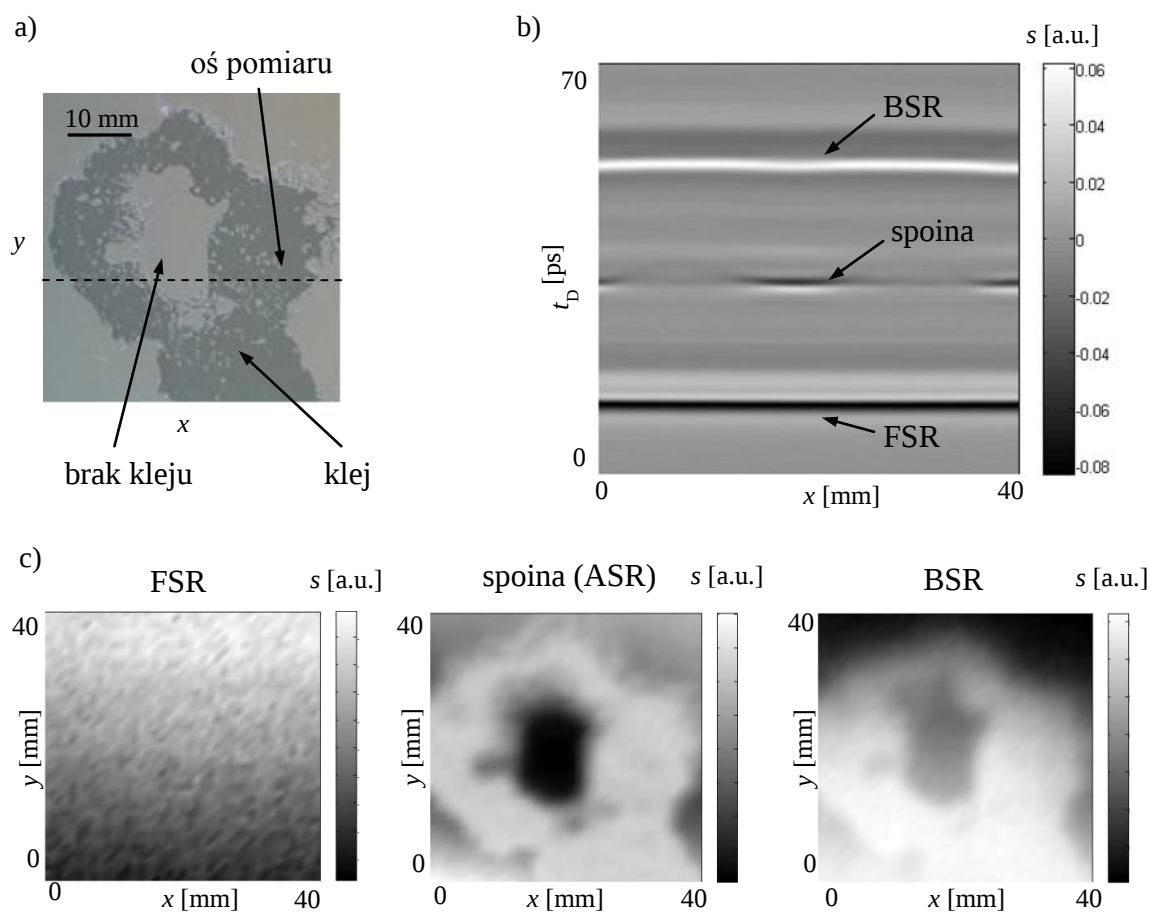
Przedmiotem badań (Badania przedstawione w niniejszym podrozdziale na ryc. 6.3–ryc. 6.6 przeprowadzono w ramach grantu nr NR01 0037 06/2000 pt. „Inteligentny system analizy radiogramów”) przedstawionych w niniejszym podrozdziale są:

- połączenia klejone materiałów jednorodnych w postaci płyt z polimetakrylanu metylu (PMMA);
- połączenia klejone płyt kompozytowych wzmacnianych włóknem szklanym z regularnym rozkładem włókien;
- monitorowanie procesu utwardzania kleju.

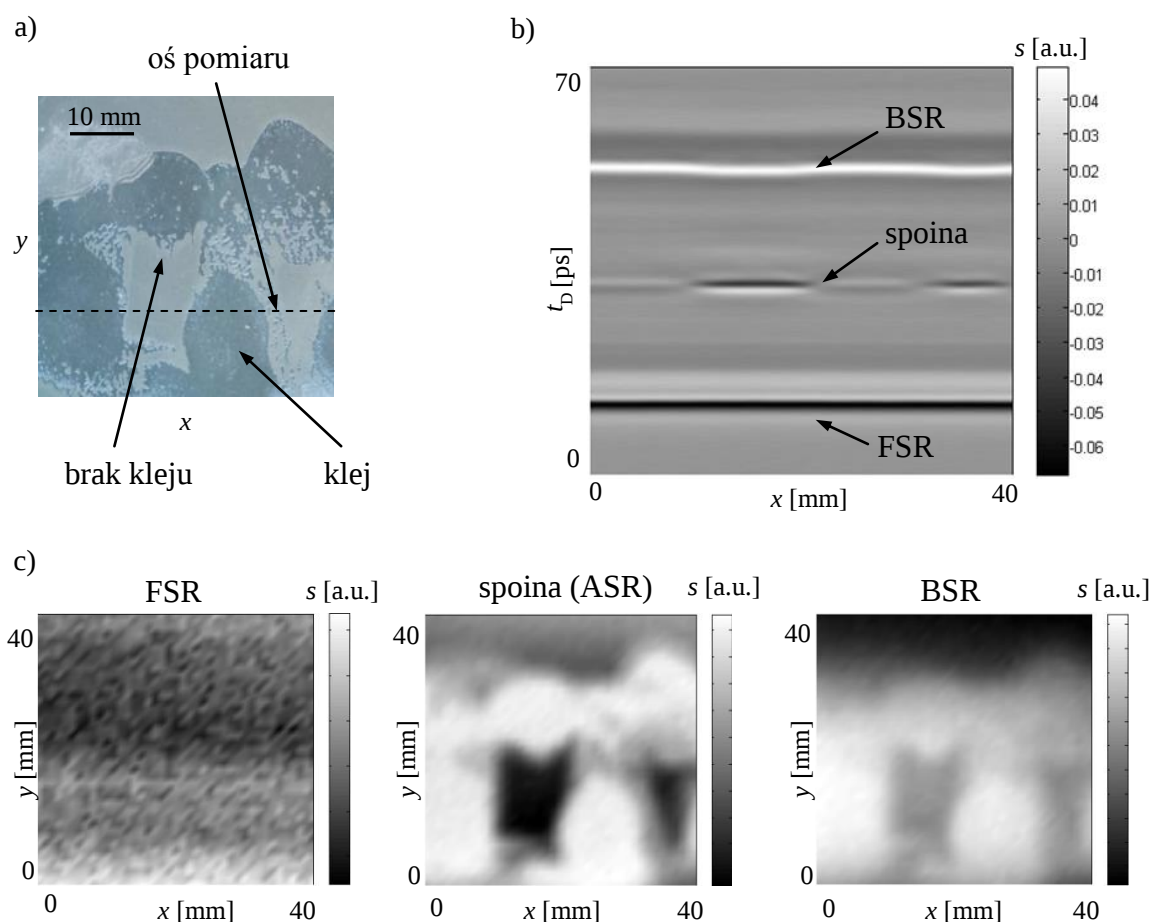
Układ pomiarowy wykorzystywany w powyższych eksperymentach schematycznie przedstawiono na ryc. 6.2. Za pomocą głowicy pomiarowej w konfiguracji odbiciowej dokonano pomiarów połączeń klejonych płyt dielektrycznych. Wyniki inspekcji przedstawiono na ryc. 6.3–ryc. 6.6.



Ryc. 6.2. Konfiguracja pomiarowa stosowana do badania metodą terahercową (ze wzbudzeniem impulsowym) połączeń klejonych

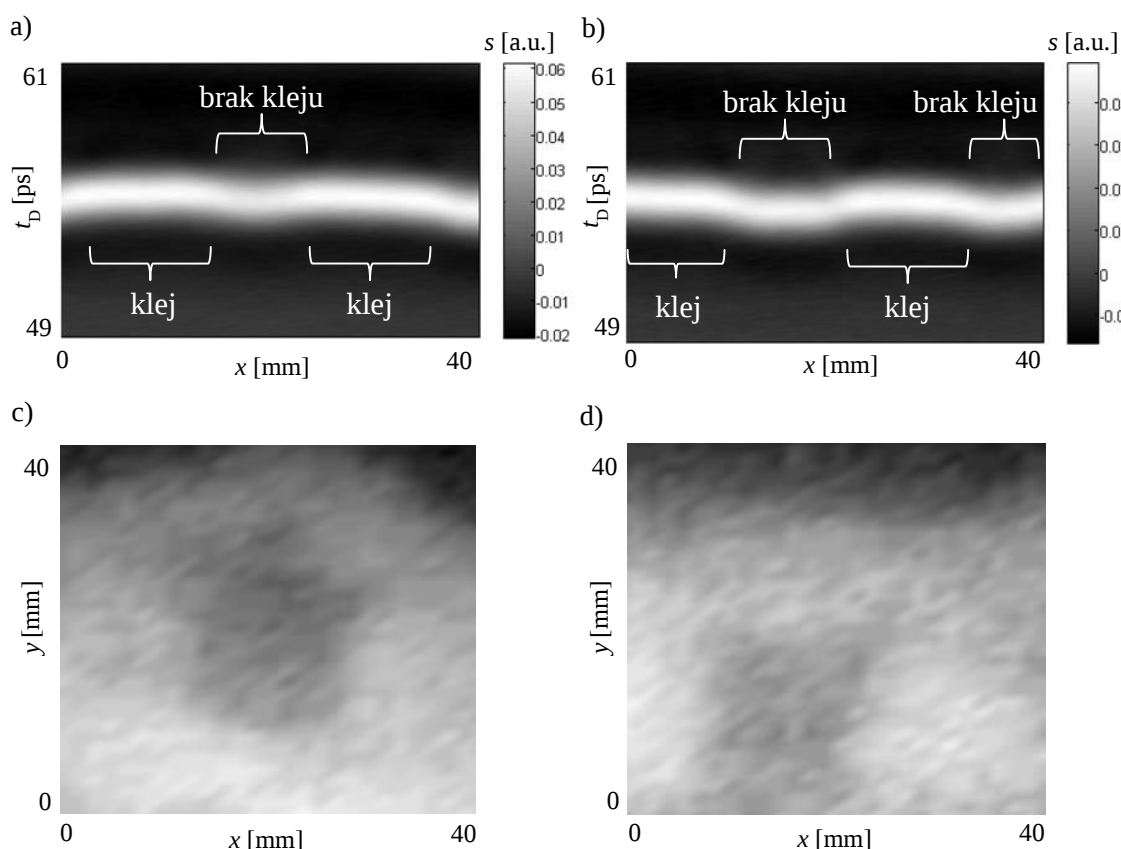


Ryc. 6.3. Inspekcja terahercowa połączenia klejonego płyt PMMA (klej: chloroform): a) widok połączenia z zaznaczoną osią pomiaru, b) sygnał typu B-skan, c) sygnały typu C-skan dla różnych głębokości; ciemne miejsca wskazują brak kleju



Ryc. 6.4. Inspekcja terahercowa połączenia klejonego płyt PMMA (klej dwuskładnikowy UHU): a) widok połączenia z zaznaczoną osią pomiaru, b) sygnał typu B-skan, c) sygnały typu C-skan dla różnych głębokości – ciemne miejsca wskazują brak kleju

Na ryc. 6.3 przedstawiono przykładowe połączenie klejone płyt PMMA (z użyciem chloroformu) oraz wyniki jego inspekcji metodą terahercową z wymuszeniem impulsowym. Zastosowane płyty (ze względu na ich przezroczystość dla światła widzialnego) umożliwiają bezpośrednią obserwację rozkładu spoiny, co pozwala na łatwą weryfikację poprawności działania metody terahercowej. Na podstawie obrazowania typu B (ryc. 6.3b) zauważyć można dwa wyraźne impulsy odbicia od początku i końca łączonej struktury (FSR i BSR). Ich amplituda jest duża ze względu na znaczną zmianę impedancji charakterystycznej na wspomnianych granicach (powietrze–PMMA, PMMA–powietrze). W połowie odległości pomiędzy FSR a BSR zaobserwować można impulsy o mniejszych amplitudach, wynikające z odbicia sygnału wzbudzającego od obszaru spoiny ASR (ang. Adhesive Surface Reflection). Impulsy te charakteryzują się zróżnicowaną amplitudą w zależności od tego, czy w danym miejscu penetracja kleju była wystarczająca. Wyższe amplitudy występują, jeśli w danym miejscu nie ma kleju – przestrzeń pomiędzy płytami wypełniona jest powietrzem. W przypadku obecności kleju zmiana impedancji charakterystycznej jest mniejsza, co powoduje redukcję współczynnika odbicia i amplitudy impulsu ASR.



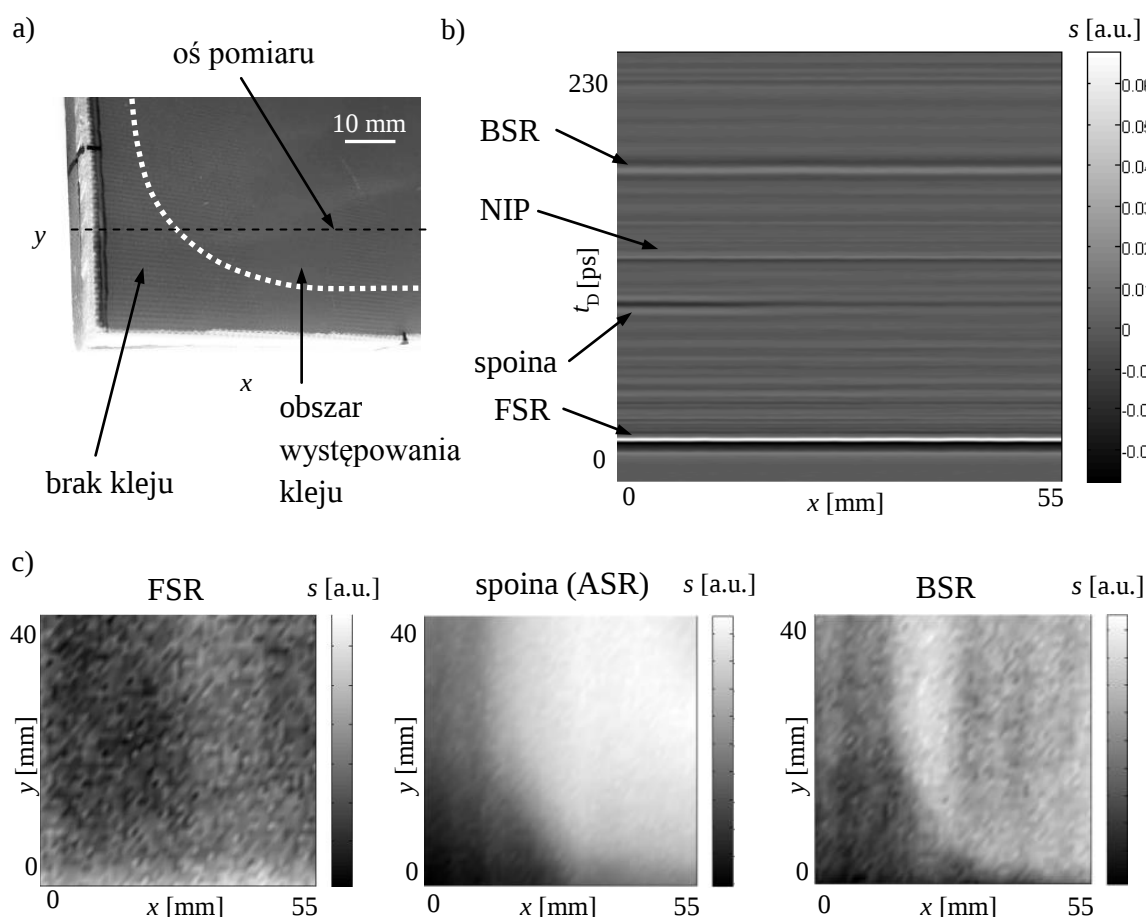
Ryc. 6.5. Opóźnienie impulsu BSR wywołane obecnością kleju: a) sygnał typu B-skan dla połączenia za pomocą chloroformu, b) sygnał typu B-skan dla połączenia za pomocą kleju epoksydowego UHU Plus, c) przestrzenny rozkład opóźnienia  $t_D$  sygnału BSR (klej: chloroform), d) przestrzenny rozkład opóźnienia  $t_D$  sygnału BSR (klej: UHU Plus)

Możliwe jest więc wykrycie obecności kleju poprzez monitorowanie amplitudy impulsu ASR. Dwuwymiarowe rozkłady amplitudy poszczególnych impulsów (FSR, ASR i BSR) przedstawiono na ryc. 6.3c. Mając na uwadze rozkład kleju przedstawiony na zdjęciu, zauważyć można, że tylko dwa ostatnie impulsy zawierają informację o rozkładzie spoiny, przy czym zmiana jest ponaddwukrotnie większa w przypadku ASR.

Bardzo podobna sytuacja ma miejsce w przypadku połączenia klejonego, w którym wykorzystano dwuskładnikowy klej na bazie żywicy epoksydowych UHU Plus Epoxy (ryc. 6.4); również uzyskano zgodność pomiędzy wynikami otrzymanymi za pomocą inspekcji terahercowej a wynikami otrzymanymi za pomocą inspekcji wizualnej. Zastosowany klej z punktu widzenia inspekcji terahercowej umożliwia uzyskanie podobnego prawdopodobieństwa wykrycia braku spoiny.

W obu przypadkach możliwe jest wykrycie obszarów niezawierających kleju na podstawie opóźnienia impulsu BSR. Jeśli w spoinie znajduje się powietrze, fala elektromagnetyczna rozchodzi się szybciej niż w innym środowisku dielektrycznym, jakim jest np. klej polimerowy. Zmiana prędkości rozchodzenia się fali odbywa się na bardzo krótkiej drodze (szerokość spoiny), w związku z czym zmiany opóźnienia  $t_D$  są również niewielkie (wynoszące ok. 0,39 ps w przypadku chloroformu i 0,55 ps w przypadku kleju epoksydowego UHU Plus). Efekt ten przedstawiono na ryc. 6.5.

W prezentowanych w niniejszym rozdziale eksperymentach, dotyczących połączeń klejonych, wykorzystywano materiał jednorodny. Inspekcja terahercowa wykorzystująca wzbudzenie impulsowe może być również zastosowana do badania połączeń klejonych materiałów niejednorodnych, w tym wielowarstwowych kompozytów polimerowych. Do kolejnych eksperymentów wybrano materiał epoksydowy (GFRP), o grubości 5 mm (pojedynczą płytę), wzmocniony regularnie ułożonymi włóknami szklanymi. Dwie płyty poddane zostały procesowi łączenia za pomocą kleju epoksydowego UHU Plus. Widok tak przygotowanej próbki przedstawiono na ryc. 6.6a. W przeciwieństwie do wcześniej używanego PMMA kompozyt ze wzmocnieniem w postaci włókien szklanych nie jest transparentny dla światła widzialnego, w związku z czym nie jest możliwe porównanie wyników inspekcji terahercowej z inspekcją wizualną. Przykładowy sygnał typu B-skan, uzyskany w wyniku inspekcji terahercowej, przedstawiono na ryc. 6.6b. Zauważyć można pewne podobieństwa i różnice w odniesieniu do wyników uzyskanych w przypadku materiału jednorodnego. Do podobieństw zaliczyć można występowanie impulsów FSR, ASR i BSR. Do różnic natomiast należą impulsy odbite od poszczególnych warstw wewnętrznych w obrębie całego materiału.



Ryc. 6.6. Inspekcja terahercowa klejonego połączenia płyt GFRP (klej dwuskładnikowy UHU): a) zdjęcie obiektów klejonych z zaznaczoną osią pomiaru, b) sygnał typu B-skan, c) sygnały typu C-skan dla różnych głębokości; ciemne miejsca wskazują brak kleju

Ponadto amplituda impulsu BSR jest ponaddwukrotnie mniejsza niż FSR, co spowodowane jest większym tłumieniem fali elektromagnetycznej ze względu na jej rozpraszanie się na włóknach szklanych i wielowarstwową budowę. Zauważyć można również niepożądany impuls zakłócający (NIP), niewynikający z właściwości wewnętrznych materiału badanego. Impuls ten spowodowany jest przez strukturę wewnętrzną spektroskopu terahercowego – jest to opóźniona w czasie kopia impulsu głównego.

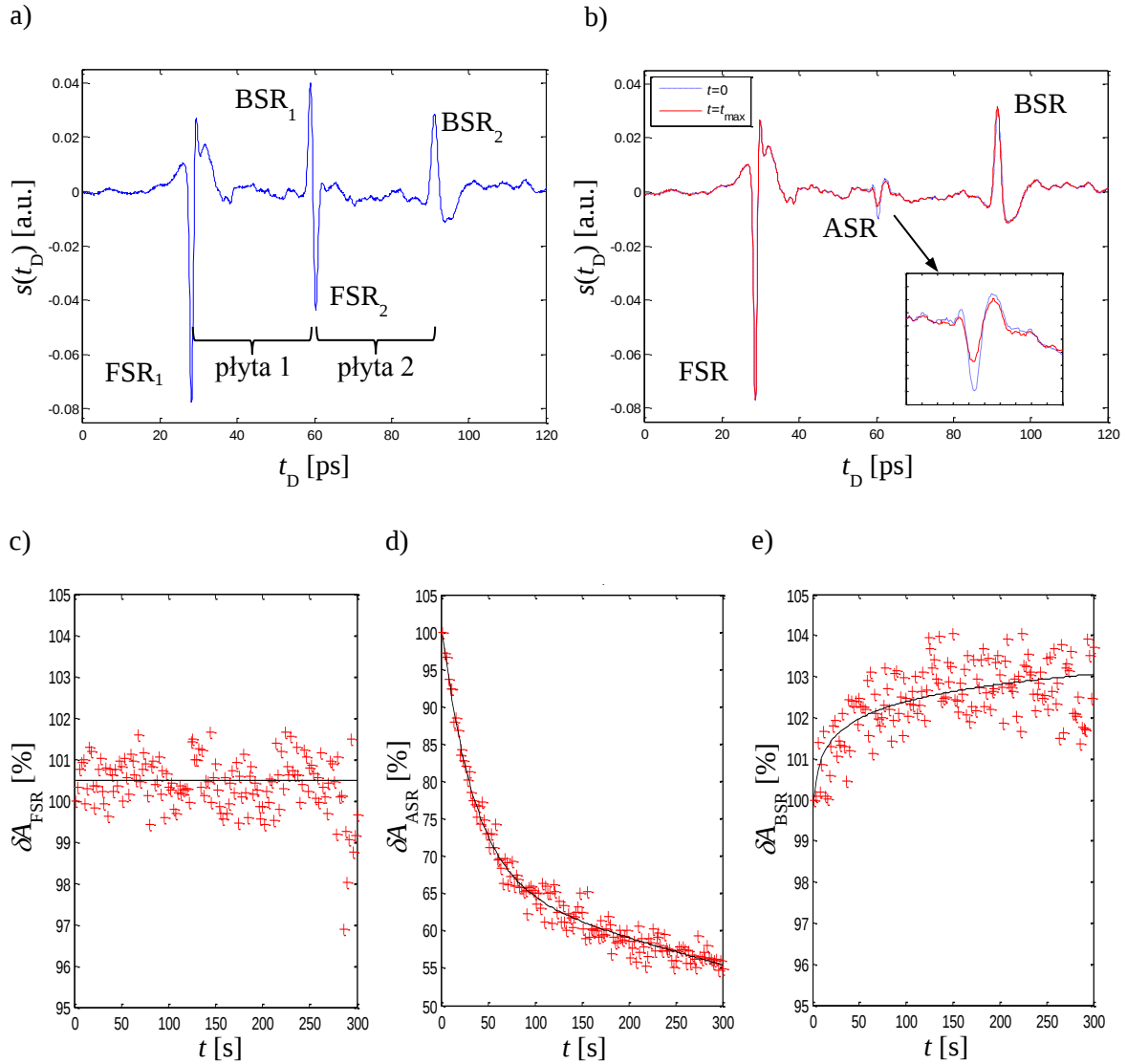
Warstwowy charakter badanej struktury kompozytowej może wywoływać dodatkowe impulsy w odpowiedzi czasowej (odbicia od warstw wewnętrznych), w odniesieniu do materiałów jednorodnych. Amplituda tych impulsów jest mniejsza niż impulsów powodowanych przez odbicie od spoiny ASR, a więc detekcja obszarów zawierających defekty jest możliwa, aczkolwiek utrudniona. Dwuwymiarowe rozkłady amplitudy FSR, ASR i BSR przedstawiono na ryc. 6.6c. Podobnie jak w przypadku połączeń klejonych materiałów jednorodnych, jedynie impulsy ASR i BSR, będąc w interakcji z obszarem spoiny (ASR odbija się od spoiny, natomiast BSR dwukrotnie przechodzi przez spoinę), zawierają informację o rozkładzie kleju. Rozróżnialność obszaru zawierającego klej i obszaru jego pozbawionego jest lepsza w przypadku impulsu ASR.

W celu określenia rozkładu kleju w połączeniu klejonym wyznaczyć można również rozkłady wybranych parametrów, np. uśrednionej energii  $E_{av}$  czy entropii  $E_{nt}$ , zdefiniowanych zależnościami (4.1) i (4.2), lub współczynników wynikających z analizy czasowo-częstotliwościowej. Analizę taką przedstawił autor w pracach [73, 75].

W przypadku przedstawionych powyżej eksperymentów klej w spoinie był w postaci utwardzonej [73, 124]. Za pomocą metody terahercowej badać można stopień polimeryzacji komponentów poddawanych klejeniu [146], jak również sam proces utwardzania kleju [102, 126]. Jest to możliwe w wyniku zmian przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r$  związanych z procesem utwardzania [127]. Badanie takie nie wymaga dostępu do spoiny i jest bezdotykowe w przeciwieństwie do wykorzystywanego w tym celu badania ultradźwiękowego.

Przeprowadzono również eksperyment monitorowania stanu utwardzenia spoiny w połączeniu klejonym, z zastosowaniem impulsowej inspekcji terahercowej w konfiguracji przedstawionej na ryc. 6.2. Dwie płyty wykonane ze szkła akrylowego PMMA połączono za pomocą chloroformu. Substancja ta rozpuszcza cienkie warstwy PMMA znajdujące się w pobliżu połączenia klejonego. Po ich połączeniu chloroform odparowuje, pozostawiając stosunkowo jednorodny materiał. Przykładowy wynik pomiaru dla połączenia niezawierającego spoiny przedstawiono na ryc. 6.7a. W przypadku tym przestrzeń pomiędzy płytami wypełniona jest powietrzem. Zaobserwować można cztery impulsy odbite od badanej struktury – dwa pochodzące od płyty 1 znajdującej się od strony głowicy pomiarowej ( $FSR_1$ ,  $BSR_1$ ) oraz dwa pochodzące od płyty 2 ( $FSR_2$ ,  $BSR_2$ ). Impulsy  $BSR_1$  i  $FSR_2$  wskazują również początek i koniec obszaru pomiędzy płytami, czyli potencjalnej spoiny. W przypadku, gdy odległość pomiędzy płytami (grubość spoiny) jest bardzo mała, oba impulsy nakładają się na siebie, co może być rozpatrywane jako powstanie jednego impulsu o innym kształcie niż impuls wzbudzający. Różnica w przenikalności dielektrycznej na granicy PMMA–powietrze jest większa niż w przypadku PMMA–spoina, co skutkuje ponadczterokrotnie mniejszą amplitudą odbitego od spoiny impulsu ASR – zob. ryc. 6.7b. Przedstawiono na nim sygnał (typu A-skan) uzyskany

na początku procesu klejenia ( $t = 0$  s, chwilę po połączeniu płyt) oraz sygnał zmierzony po wstępnym utwardzeniu kleju ( $t = t_{\max} = 300$  s). Jak można zauważyć, pewnym zmianom uległy amplitudy impulsów ASR i BSR. Impuls FSR powstaje w wyniku odbicia od powierzchni płyty 1, w związku z czym nie wchodzi w interakcję z połączeniem klejowym. Jego amplituda nie powinna ulegać zmianie w czasie przeprowadzanego eksperymentu. Jedyne jego wahania wynikać mogą z powtarzalności pomiarów wykonywanych wykorzystywanym spektroskopem (TRay4000).



Ryc. 6.7. Wyniki monitorowania utwardzania spoiny w połączeniu klejonym chloroformem płyt PMMA za pomocą inspekcji terahercowej: a) sygnał czasowy  $s(t)$  uzyskany przy braku spoiny, b) sygnały czasowe  $s(t)$  uzyskane na początku ( $t = 0$ ) i na końcu ( $t = t_{\max}$ ) monitorowania procesu utwardzania, c) procentowa zmiana amplitudy impulsu FSR w trakcie utwardzania, d) procentowa zmiana amplitudy impulsu odbitego od spoiny (ASR) w wyniku utwardzania, e) procentowa zmiana amplitudy impulsu FSR w trakcie utwardzania

Procentowe zmiany wartości amplitudy impulsów wyznaczono za pomocą następujących zależności:

$$\delta A_{\text{FSR}}(t) = \frac{A_{\text{FSR}}(t)}{A_{\text{FSR}}(t=0)} 100\% \quad (6.1)$$

$$\delta A_{\text{ASR}}(t) = \frac{A_{\text{ASR}}(t)}{A_{\text{ASR}}(t=0)} 100\% \quad (6.2)$$

$$\delta A_{\text{BSR}}(t) = \frac{A_{\text{BSR}}(t)}{A_{\text{BSR}}(t=0)} 100\% \quad (6.3)$$

gdzie:  $A_{\text{FSR}}(t)$ ,  $A_{\text{ASR}}(t)$ ,  $A_{\text{BSR}}(t)$  – zależne od czasu amplitudy impulsów FSR, ASR i BSR,  $\delta A_{\text{FSR}}(t)$ ,  $\delta A_{\text{ASR}}(t)$ ,  $\delta A_{\text{BSR}}(t)$  – względne amplitudy impulsów FSR, ASR i BSR.

Procentowe zmiany wartości amplitudy impulsu FSR przedstawiono na ryc. 6.7c. Zauważyć można pewne fluktuacje, ale średnia wartość amplitudy pozostaje bez zmian w ramach analizowanego czasu. Impuls ten może być potraktowany jako impuls odniesienia. Niezmienność jego parametrów pozwala na stwierdzenie, że zmiany parametrów pozostałych impulsów wynikają tylko z procesu utwardzania zastosowanego połączenia klejonego. Największe zmiany amplitudy występują w przypadku impulsu odbitego od spoiny; przedstawiono je na ryc. 6.7d. W początkowej fazie (do 80 s) proces przebiega najszybciej. Następnie jego dynamika maleje i wartość amplitudy zaczyna się ustalać. W wyniku utwardzenia się połączenia klejonego amplituda impulsu ASR zmniejsza się o prawie 50%. Zmianie ulega też amplituda impulsu odbitego od końca klejonej struktury (BSR). Podobnie jak w przypadku inspekcji innych materiałów (przedstawionych w niniejszej monografii) impuls odbity od końca badanego obiektu zawiera uśrednioną informację o całym przekroju, przez który się przemieszczał. W przeciwieństwie do ASR amplituda BSR rośnie w miarę utwardzania się spoiny (ryc. 6.7e). Można to wytłumaczyć w prosty sposób: Wskutek zmiany przenikalności elektrycznej spoiny wartość jej impedancji charakterystycznej zbliża się do wartości impedancji płyty PMMA, co powoduje zmniejszenie się współczynnika odbicia. Impuls odbity od spoiny (ASR) zmniejsza się, w związku z czym więcej energii zostaje przekazane w kierunku tylnej ścianki badanego obiektu; na skutek odbicia impuls BSR ma większą amplitudę. Z powodu dużej dysproporcji w amplitudach impulsów ASR i BSR wzrost tego drugiego nie przekracza 3% podczas procesu utwardzania spoiny.

Na podstawie powyższego eksperymentu stwierdzić można, że nawet nie wykorzystując modeli numerycznych czy analitycznych obiektu badanego, jedynie na podstawie pomiarów połączenia, bez obecności spoiny i z utwardzoną spoiną, można monitorować stopień utwardzenia połączenia klejonego.

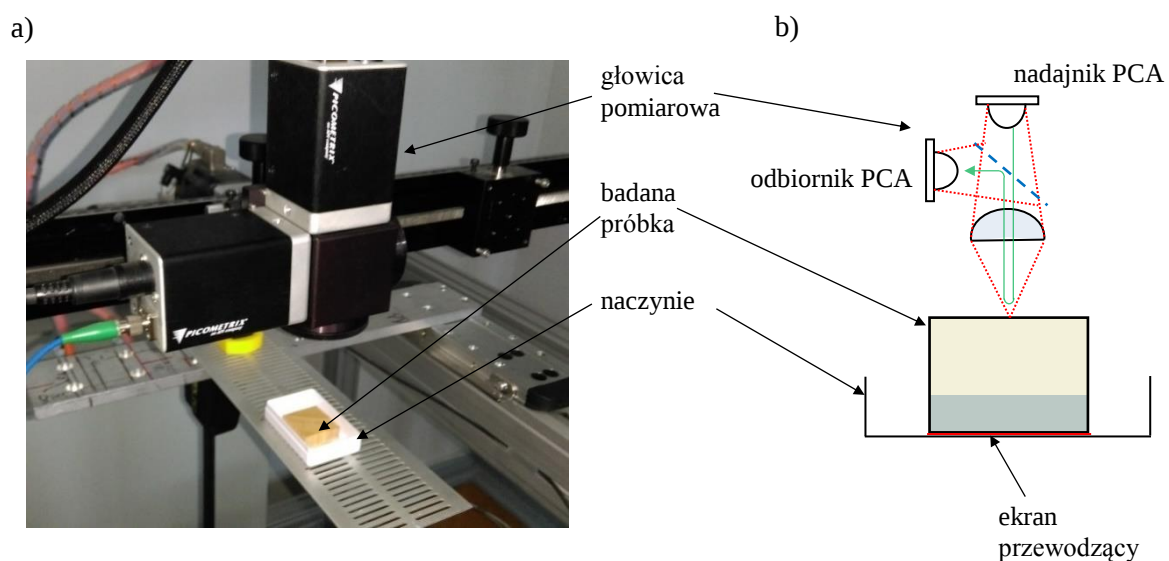
## 6.2. Badanie desorpcji wilgoci

Ogólnie znany jest fakt, że absorpcja wody przez dielektryczne materiały konstrukcyjne (np. drewno, kompozyty polimerowe) niekorzystnie wpływa na ich własności mechaniczne [27, 65, 138]. W kompozytach wilgoć przenika przez matrycę i połączenie matryca–włókno. Powoduje to uplastycznienie matrycy, pęcznienie i rozwarstwianie kompozytu, a tym samym degradację ogólnej wytrzymałości i sztywności struktury kompozytowej [96]. W związku z powyższym monitorowanie zawartości wilgoci w materiałach dielektrycznych ma obecnie bardzo duże znaczenie praktyczne. Jego wykorzystanie w przemyśle sprowadza się do:

- monitorowania różnorodnych procesów fizykochemicznych, w których występuje woda jako składnik pożądaný lub niepożądaný, np. procesu twardnienia betonu [105, 112];
- badania wilgotności półfabrykatów wykorzystywanych w procesie produkcji w celu zapewnienia odpowiedniego reżimu technologicznego (np. drewna balsa wykorzystywanego do produkcji łopat turbin wiatrowych jako rdzeń kompozytu przekładkowego);
- określenia stopnia zawilgocenia elementów konstrukcyjnych narażonych na działanie środowiska eksploatacyjnego, co może prowadzić do osłabienia mechanicznego konstrukcji (np. ze względu na pęcznienie lub kurczenie się drewna w wyniku odpowiednio absorpcji lub desorpcji wody) [51].

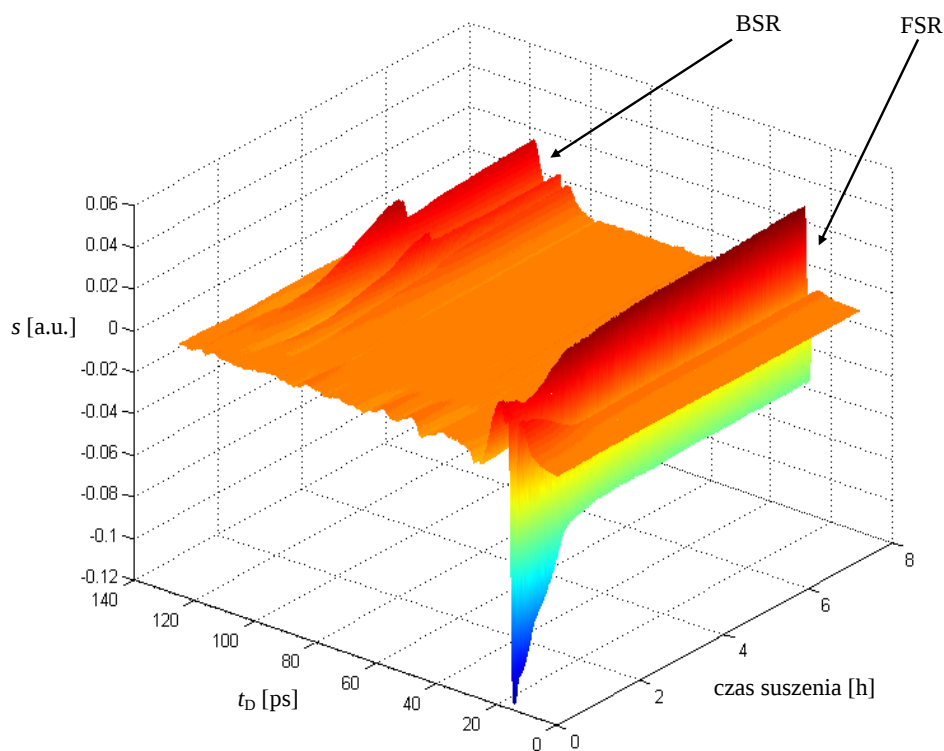
Obecność wody w dielektrycznych i kompozytowych materiałach konstrukcyjnych wykrywana może być poprzez zastosowanie fal elektromagnetycznych z zakresu mikrofalowego [64, 79] i terahercowego [81, 149]. Możliwe jest to dzięki znacznie większej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon$  i przewodności elektrycznej  $\sigma$  wody niż innych materiałów dielektrycznych. Ponadto wykorzystać można również zjawisko absorpcji energii przez cząsteczki wody dla różnych częstotliwości rezonansowych. Poniżej przedstawiono eksperyment polegający na monitorowaniu za pomocą impulsowej spektroskopii terahercowej oddawania (desorpcji) wilgoci przez materiał dielektryczny. Jako obiekt badany wybrano prostopadłościenną próbkę ze wspomnianego już drewna balsa (*Ochroma pyramidale*) wykorzystywanego jako przekładki w procesie produkcji łopat turbin wiatrowych. Materiał ten ma stosunkowo małą gęstość ( $150 \text{ kg/m}^3$ ) i w związku z włóknistą budową – dużą anizotropię własności mechanicznych, dielektrycznych i transportu wilgoci [65]; wiąże się to również z jego dużą nasiąkliwością. Zdjęcie próbki i układu pomiarowego przedstawiono na ryc. 6.8a, natomiast uproszczony schemat – na ryc. 6.8b. Próbkę o grubości 10 mm umieszczona została w naczyniu na ekranie przewodzącym. Zastosowanie dodatkowego przewodnika wzmacnia impuls odbity od końcowej granicy materiału. Przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne układu pomiarowego jest pomocne w przypadku pomiarów dużych grubości i zawartości wilgoci w badanym materiale.

Podobnie jak w przypadku badania innych materiałów impuls wygenerowany przez głowicę pomiarową odbija się od granicy powietrze–materiał, rozchodzi się w próbce zawierającej nieznaną ilość wody, a następnie odbija się od końcowej granicy badanego obiektu i wraca tą samą drogą do głowicy pomiarowej. Impuls pokonuje zatem dwukrotnie grubość materiału, którego właściwości dielektryczne (przewodność elektryczną, przenikalność elektryczną i absorpcję) zmodyfikowane są przez obecność wody w postaci związanej lub wolnej [65].



Ryc. 6.8. Pomiar desorpcji wilgoci z materiału dielektrycznego metodą terahercową: a) zdjęcie układu pomiarowego i obiektu badanego, b) przekrój badanego obiektu wraz ze schematem układu pomiarowego podczas suszenia

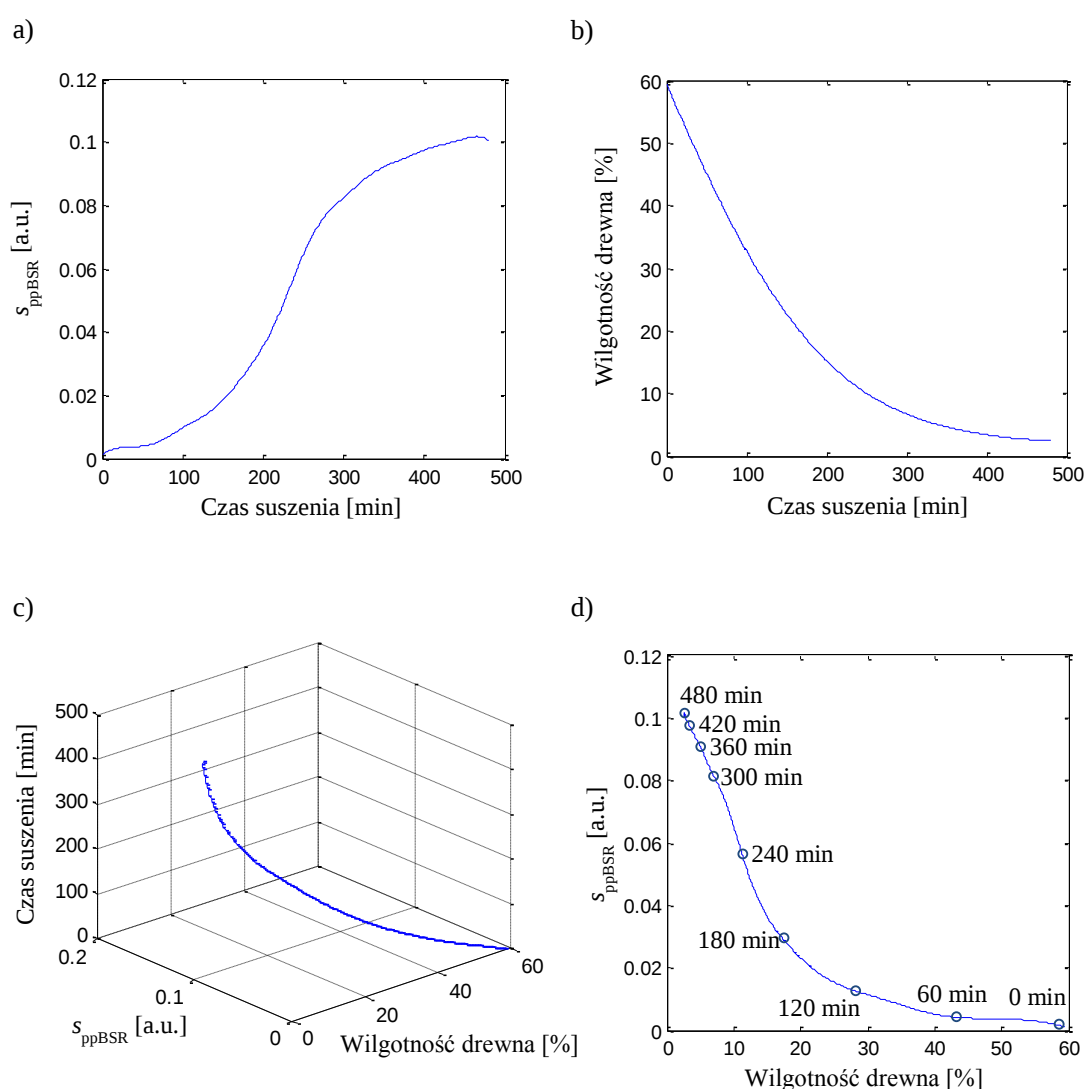
Próbka zanurzona była w wodzie przez 24 godziny w celu jej nasączenia. Następnie przez 8 godzin dokonywano pomiarów w układzie odbiciowym. Wyniki przedstawiono na ryc. 6.9.



Ryc. 6.9. Sygnał terahercowy  $s(t)$  zarejestrowany w trybie odbiciowym w trakcie suszenia próbki drewna balsa

W otrzymanym sygnale wyróżnić można wyraźne impulsy FSR i BSR. Wartość międzyszczytowa impulsu FSR zależy od właściwości dielektrycznych (głównie dużych wartości przenikalności elektrycznej i przewodności elektrycznej, wnoszonych przez obecność wody) obiektu badanego na granicy powietrze–materiał i w cienkiej warstwie pod tą granicą. Na podstawie amplitudy impulsu FSR można wnioskować, że na początku oddawanie wilgoci przy powierzchni zachodzi stosunkowo szybko, po czym proces się ustala.

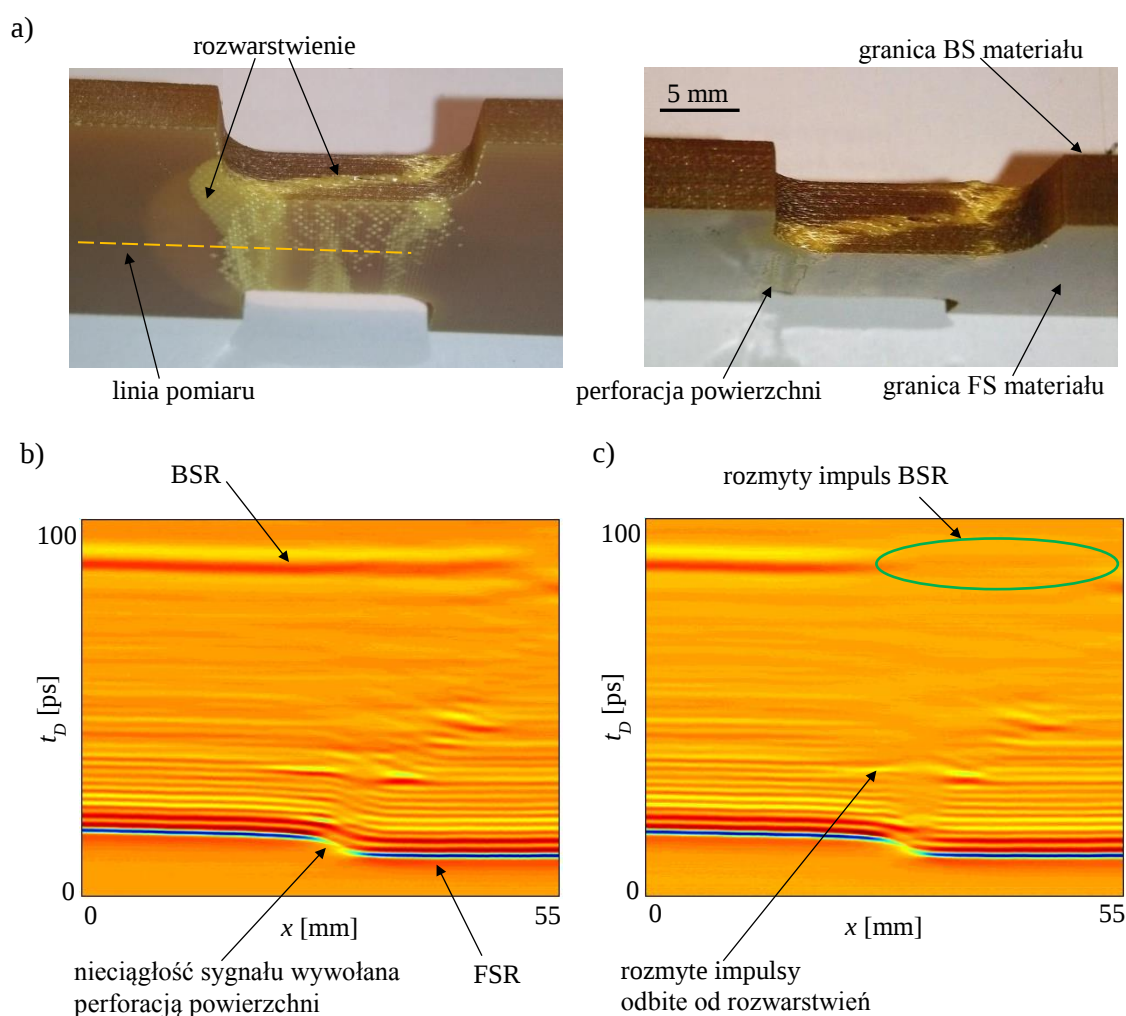
Eksperymentalnie określono zależność pomiędzy amplitudą sygnału terahercowego a wilgotnością względną badanej próbki (ryc. 6.10). Otrzymana w ten sposób krzywa kalibracyjna wymaga wzorcowania dla różnych materiałów / obiektów badanych, jednak nie jest to znaczne ograniczenie, jeśli w praktyce przemysłowej spotykamy się z powtarzalnymi (często standaryzowanymi) elementami.



Ryc. 6.10. Wynik monitorowania stanu zawilgocenia w trakcie schnięcia próbki drewna balsa: a) zależność wartości międzyszczytowej impulsu BSR –  $s_{ppBSR}$  od czasu suszenia, b) zmiana wilgotności względnej próbki w zależności od czasu suszenia, c) trójwymiarowa krzywa kalibracyjna, d) dwuwymiarowa krzywa kalibracyjna

Dla większych wartości wilgotności względnej (większych niż 45%) czułość zaproponowanej metody spada (małe nachylenie krzywej kalibracyjnej). Wiąże się to z potrzebą bardzo dokładnego szacowania wartości międzyszczytowej impulsu odbitego od granicy BS materiału badanego w przypadku, gdy wartość ta jest mała.

Woda zgromadzona w badanych materiałach nie tworzy jednolitej jednoznacznej powierzchni granicznej (jak woda w naczyniu), która powodowałaby wyraźne odbicie impulsu terahercowego; nie powstaje odosobniony impuls w sygnale odbitym. Na skutek nierównomierności struktury materiału rozkład wody jest również bardzo nierównomierny, a co za tym idzie impuls jest rozpraszany i silnie absorbowany przez wilgotną część materiału. Objawia się to rozmyciem impulsów generowanych na skutek odbicia od poszczególnych warstw, rozwarstwień oraz granicy materiał–powietrze (BS).



Ryc. 6.11. Wyniki terahercowej inspekcji wielowarstwowego materiału GFRP zawierającego rozwarstwienia na różnych głębokościach, narażonego na wnikanie wilgoci: a) zdjęcie obiektu badanego, b) sygnał typu B-skan suchej próbki, c) sygnał typu B-skan próbki zawierającej wodę (zgromadzoną w rozwarstwieńiach); grubość próbki: 5 mm

Na ryc. 6.11 przedstawiono wyniki inspekcji wielowarstwowego kompozytu ze wzmocnieniem w postaci włókien szklanych, poddanego wstępnie obciążeniu mechanicznemu wywołującemu rozwarstwienie, a następnie narażonego na penetrację wody. Woda, wnikać przez perforację powierzchni i od strony ścianek bocznych, została zmagazynowana wewnątrz materiału. Jej obecność objawia się:

- zmniejszeniem amplitudy impulsów odbitych od rozwarstwień;
- rozmyciem impulsu obitego od przeciwnej ścianki materiału badanego (BSR).

Powyższe efekty wynikają z większej absorpcji fali elektromagnetycznej oraz z dodatkowego rozpraszania frontu falowego.



## 7. Tomografia terahercowa

### 7.1. Podstawowe informacje

Tomografia to technika diagnostyczna umożliwiająca uzyskanie rozkładu wybranych właściwości materiałowych w przekroju obiektu badanego (ang. Object Under Test, OUT) na podstawie jego odpowiedzi na zadane wymuszenie zewnętrzne. Możliwe jest więc „zajrzenie” do wnętrza obiektu na podstawie pomiarów wykonanych z zewnątrz i na podstawie odpowiedniej procedury rekonstrukcyjnej. W zależności od zjawiska fizycznego wykorzystanego podczas inspekcji rozróżnić można wiele technik tomografii:

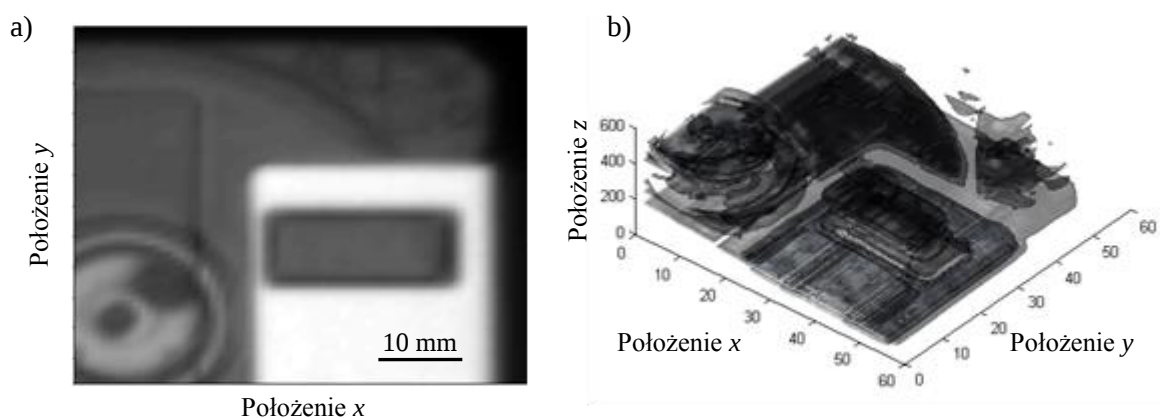
- rentgenowską wykorzystującą jonizujące promieniowanie X;
- akustyczną (AE) i ultradźwiękową (UT);
- pojemnościową (ang. Electrical Capacitance Tomography, ECT);
- impedancyjną (ang. Electrical Impedance Tomography, EIT);
- magnetyczno-indukcyjną (ang. Magnetic Induction Tomography, MIT);
- optyczną, w tym koherentną (ang. Optical Coherence Tomography, OCT);
- mikrofalową i terahercową.

Wszystkie powyższe techniki różnią się właściwościami. Podobnie jak w przypadku innych metod badań nieniszczących nie istnieje technika jednoznacznie najlepsza we wszystkich aspektach. Najbardziej uniwersalną i najszerzej stosowaną metodą jest tomografia rentgenowska. Niska absorpcja promieni X przez materiały, takie jak drewno, kompozyty polimerowe, papier, tkaniny, powoduje jednak problemy z wykryciem występujących w nich defektów. Niedoskonałość ta może być wyeliminowana poprzez zastosowanie fal elektromagnetycznych z zakresu terahercowego. W związku z tym możliwe do uzyskania są rozkłady parametrów elektromagnetycznych, takich jak przenikalność elektryczna (lub współczynnik refrakcji) i współczynnik absorpcji lub pochodnych. Często jesteśmy zainteresowani nie bezwzględnymi wartościami parametrów, a stopniem ich zmian. Zastosowanie wzbudzenia impulsowego umożliwia wyznaczanie rozkładów powyższych parametrów dla różnych częstotliwości oraz identyfikację charakterystyki częstotliwościowej wybranego parametru w zadanym położeniu wewnątrz obrazowanego obiektu.

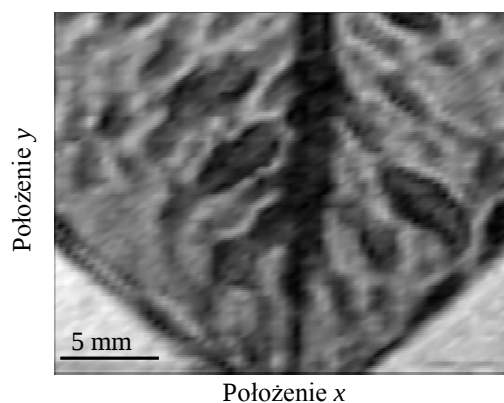
Istnieją różne metody tomograficznego obrazowania mikrofalowego i terahercowego [29, 142, 155]:

- odbiciowa tomografia czasowa (ang. Terahertz Time of Flight Reflection Tomography, THz ToFRT);
- tomografia dyfrakcyjna (ang. Terahertz Diffraction Tomography, THz DT);
- tomografia z wykorzystaniem soczewki binarnej (ang. Terahertz Binary Lens Tomography, THz BLT);
- holografia cyfrowa (ang. Terahertz Digital Holography, THz DH);
- tomografia komputerowa (ang. Terahertz Computed Tomography, THz CT).

Terahercowa odbiciowa tomografia czasowa przedstawiana była już wielokrotnie w niniejszej monografii. Jest to najprostszy i najbardziej rozpowszechniony sposób obrazowania terahercowego. Polega on na wysłaniu w kierunku obiektu badanego impulsu, a następnie na obserwacji impulsów odbitych od obiektu i w różnym stopniu opóźnionych – w zależności od jego struktury wewnętrznej. Na podstawie wyników pomiaru bezpośrednio lub za pomocą odpowiedniego przetwarzania sygnałów (m.in. filtracji, dekonwolucji) możliwe jest określenie jednowymiarowego rozkładu właściwości elektrycznych obiektu wzdłuż osi optycznej układu pomiarowego (normalnej do powierzchni). Wykonanie skanu 2D umożliwia uzyskanie trójwymiarowego obrazowania obiektu. Przykładowy wynik działania tomografii ToFRT przedstawiono na ryc. 7.1; jest to trójwymiarowa rekonstrukcja warstwowej struktury magnetycznego nośnika informacji. Na ryc. 7.2 przedstawiono wynik tomografii ToFRT struktury biologicznej – liścia rośliny fikus (łac. *Ficus benjamina*). Wadą tego rodzaju tomografii jest występowanie artefaktów wynikających z wielokrotnych odbić, występujących w materiałach o wielu warstwach, różniących się własnościami elektrycznymi (zob. ryc. 3.2 i ryc. 3.4) – każda warstwa zachowuje się jak rezonator, wewnątrz którego impuls elektromagnetyczny wielokrotnie odbija się od jej granic.



Ryc. 7.1. Wynik czasowej odbiciowej tomografii terahercowej obiektu warstwowego (magnetycznego nośnika informacji): a) rozkład energii impulsu odbitego, b) trójwymiarowa prezentacja amplitudy impulsów odbitych



Ryc. 7.2. Wynik czasowej odbiciowej tomografii terahercowej struktury biologicznej (fragment liścia *Ficus benjamina*) – rozkład energii impulsu odbitego

W przypadku terahercowej tomografii dyfrakcyjnej badany obiekt oświetlany jest płaską falą elektromagnetyczną, a następnie na podstawie pomiaru pola przez niego rozproszonego i podlegającego dyfrakcji określana jest struktura wewnętrzna materiału. Amplituda zespolona pola fali elektromagnetycznej  $u_{\text{in}}(\mathbf{r})$  padającej na OUT opisana jest zależnością [55, 67]:

$$u_{\text{in}}(\mathbf{r}) = e^{jk\mathbf{q}_0\mathbf{r}} = e^{j\Phi_0(\mathbf{r})} \quad (7.1)$$

gdzie:  $\Phi_0(\mathbf{r})$  – faza początkowa,  $k = 2\pi/\lambda$  – liczba falowa,  $\mathbf{q}_0$  – wektor jednostkowy skierowany w kierunku propagacji padającej fali płaskiej,  $\mathbf{r}$  – wektor wodzący.

Wskutek propagacji przez obiekt i dyfrakcji przez niego wywołanej w płaszczyźnie pomiaru występuje fala w postaci:

$$u(\mathbf{r}) = e^{j(\Phi_0(\mathbf{r}) + \delta\Phi(\mathbf{r}))} = e^{j\Phi(\mathbf{r})} \quad (7.2)$$

gdzie:  $\delta\Phi(\mathbf{r})$  – zmiana fazy wywołana obecnością obiektu,  $\Phi(\mathbf{r})$  – faza w płaszczyźnie pomiaru.

Bez uwzględniania polaryzacji fali dla  $u(\mathbf{r})$  spełnione jest następujące skalarne równanie falowe:

$$(\nabla^2 + k_0^2)u(\mathbf{r}) = O(\mathbf{r})u(\mathbf{r}) \quad (7.3)$$

gdzie:  $O(\mathbf{r}) = k^2(1 - n^2(\mathbf{r}))$  – funkcja obiektu.

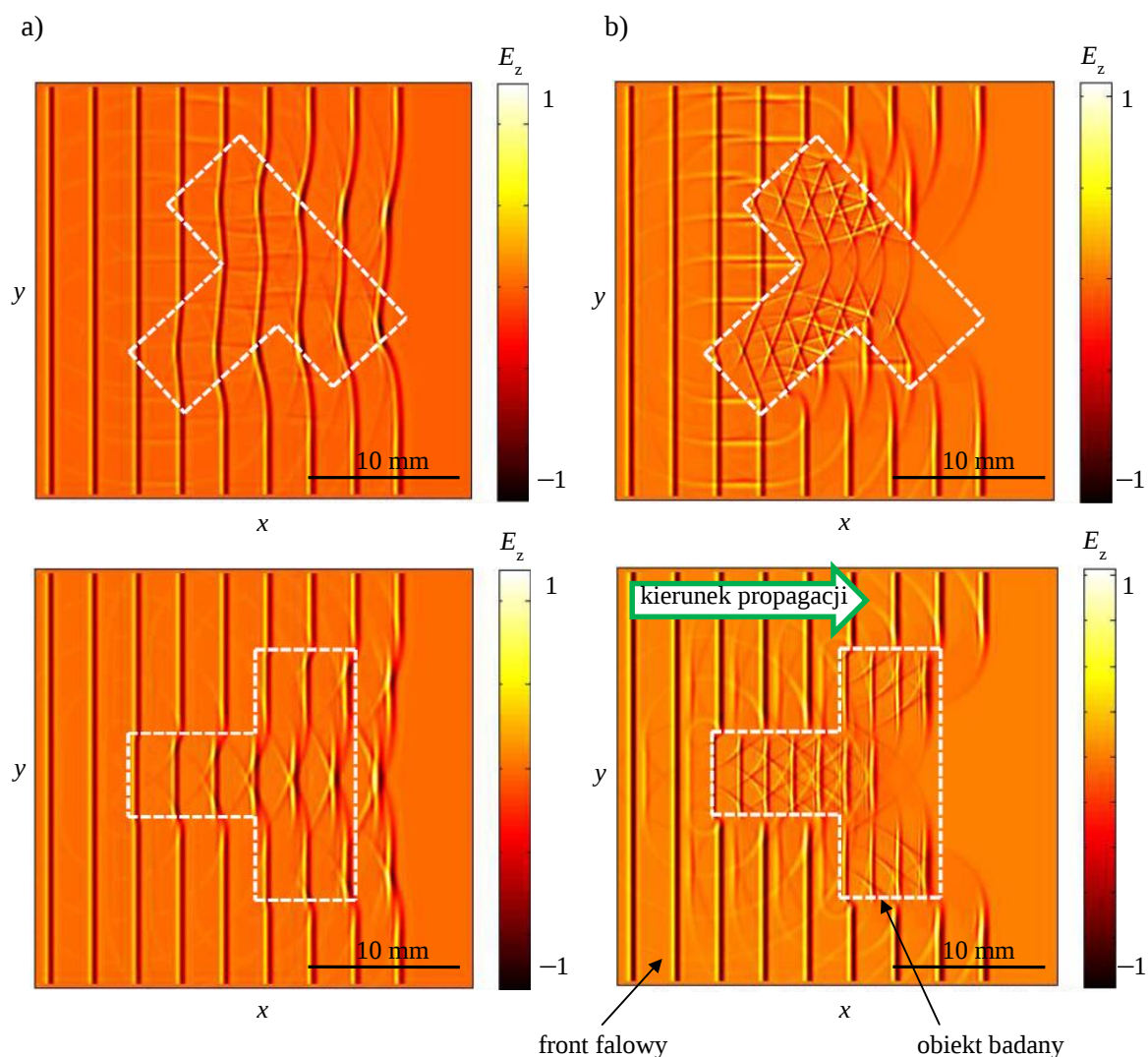
W terahercowej tomografii dyfrakcyjnej, na podstawie równania falowego i pomiaru  $u(\mathbf{r})$ , dla różnych kątów ekspozycji otrzymywany jest trójwymiarowy rozkład współczynnika refrakcji  $n(\mathbf{r})$ . W tym celu stosowane są aproksymacje Borna i Rytova. (Bardziej szczegółowo problem tomografii dyfrakcyjnej w zakresie częstotliwości mikrofalowych i terahercowych przedstawiono w pracach [21, 29, 38, 55, 67, 142].)

Rzadziej stosowane techniki tomograficzne to terahercowa holografia cyfrowa, będąca modyfikacją ogólnie znanej holografii optycznej [38], oraz tomografia z wykorzystaniem soczewki Fresnela [38]. Ogniskowa soczewki Fresnela zależy od długości fali elektromagnetycznej padającej w jej aperturę. Właściwość tę, przy jednoczesnym pobudzaniu obiektu za pomocą impulsu terahercowego, zawierającego szerokie spektrum częstotliwości, zastosować można do obrazowania tomograficznego. Przy ustawieniu odbiornika terahercowego w ustalonej odległości za soczewką Fresnela, a obiektu badanego przed soczewką (od strony źródła fali elektromagnetycznej) obraz uzyskany w płaszczyźnie odbiornika dla różnych częstotliwości odpowiada różnym odległościom płaszczyzny cięcia od soczewki. Powyższą metodę obrazowania tomograficznego można stosować, gdy z różnych powodów nie jest możliwe obracanie badanego obiektu.

Ostatnim rodzajem obrazowania jest terahercowa tomografia komputerowa THz CT. Metoda ta zostanie bardziej szczegółowo przedstawiona w dalszej części tego rozdziału.

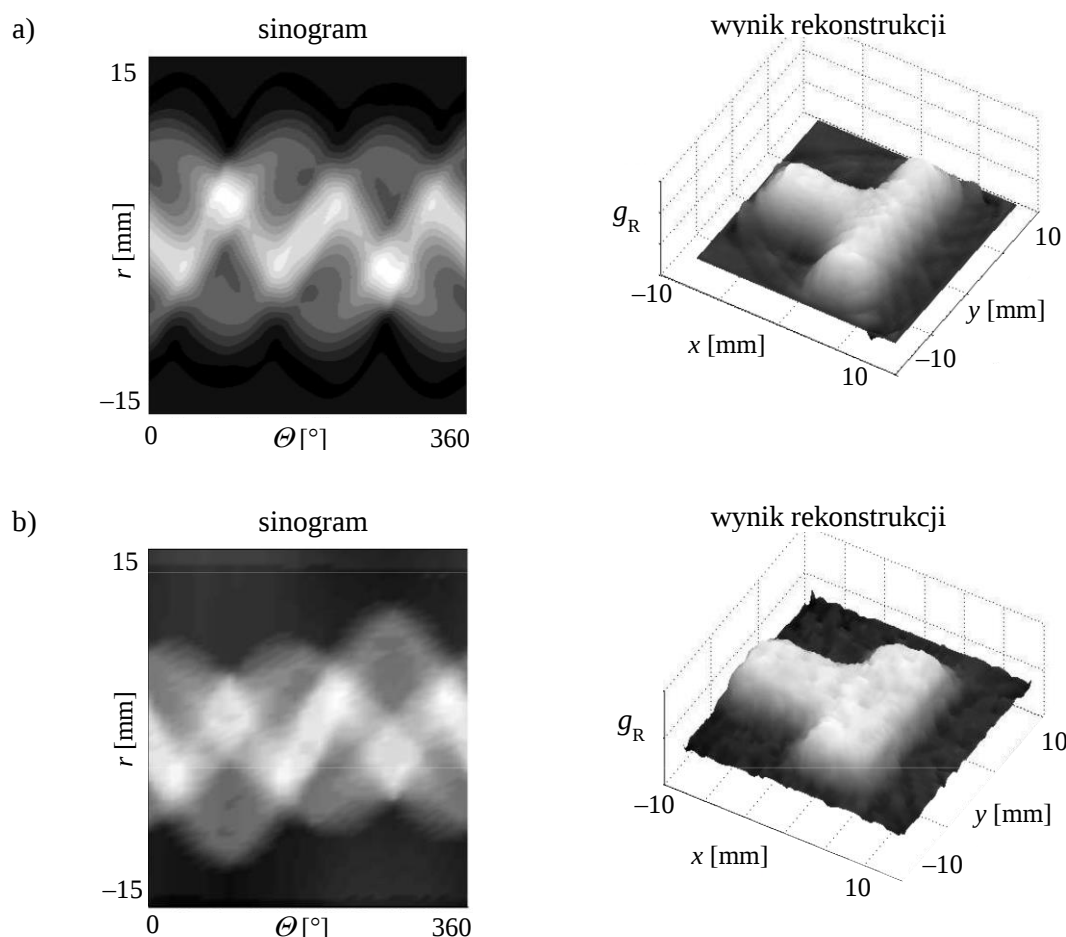
## 7.2. System do komputerowej tomografii terahercowej THz CT

Terahercowa tomografia komputerowa wywodzi się z rentgenowskiej tomografii komputerowej, która zakłada oświetlanie obiektu badanego z różnych kątów za pomocą źródła promieniowania X. W związku z dużą przenikliwością promienie rentgenowskie rozchodzą się po liniach prostych; zjawiska refrakcji i dyfrakcji nie są rozważane. W przypadku zastosowania fal elektromagnetycznych z zakresu milimetrowego i terahercowego warunek propagacji po linii prostej jest spełniony tylko dla obiektów, w których nie występują duże skokowe zmiany współczynnika refrakcji. Podczas inspekcji obiektów o dużej zmienności współczynnika refrakcji metodą THz CT powstają dodatkowe błędy. Jeżeli nie są one możliwe do zaakceptowania, to należy wykorzystać metodę trudniejszą w implementacji – tomografię dyfrakcyjną. Propagację płaskiego frontu falowego przez fantom w kształcie litery T przedstawiono na ryc. 7.3.



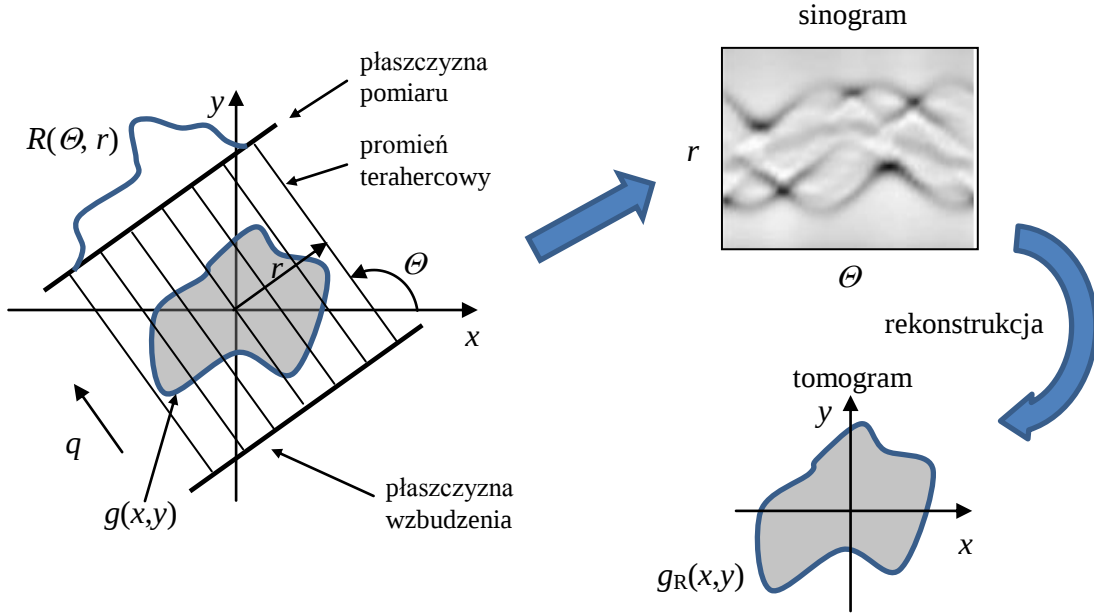
Ryc. 7.3. Rozkład składowej z unormowanego natężenia pola elektrycznego ( $E_z$ ), uzyskany za pomocą metody FDTD. Obiekt badany – fantom dielektryczny w kształcie litery T wykonany z: a) pianki polistyrenowej ( $\epsilon_r = 1,05$ ), b) litego polistyrenu ( $\epsilon_r = 2,67$ )

Symulację numeryczną przeprowadzono za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Wykorzystano równania (3.44)–(3.46) przedstawione w rozdz. 3.4. W związku z impulsowym wzbudzeniem i detekcją w dziedzinie czasu, zastosowanymi w tomografii, metoda FDTD wydaje się naturalnym rozwiązaniem. Jak można zauważyć, w przypadku obiektu wykonanego ze spienionego polistyrenu (ryc. 7.3a), którego zastępcza względna przenikalność elektryczna jest bliska jedności, następuje opóźnienie fali wywołane propagacją w ośrodku o mniejszej prędkości fazowej oraz stosunkowo mały wpływ dyfrakcji. W przypadku obiektu z litego polistyrenu, w związku z większą przenikalnością dielektryczną ( $\epsilon_r = 2,67$ ), opóźnienia są większe (mniejsza jest prędkość fazowa w polistyrenie) oraz bardziej widoczny jest efekt dyfrakcji. W modelu przyjęto stałą wartość przenikalności dielektrycznej, niezależnie od częstotliwości występujących w impulsie wymuszającym, oraz materiał bezstratny. Pomimo powyższych założeń upraszczających wyniki inspekcji tomograficznej (sinogramy) i rekonstrukcji, uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych metodą FDTD oraz w wyniku pomiarów, są bardzo zbliżone. Ich porównanie przedstawiono na ryc. 7.4.



Ryc. 7.4. Sinogram i wynik rekonstrukcji za pomocą transformaty Radona w przypadku: a) symulacji numerycznej metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu, b) pomiarów;  $r$  – odległość promienia od osi obrotu,  $\Theta$  – kąt projekcji,  $g_R(x,y)$  – zrekonstruowany przestrzenny rozkład wybranego parametru elektromagnetycznego

Ideę terahercowej tomografii komputerowej przedstawiono na ryc. 7.5.



Ryc. 7.5. Terahercowa tomografia komputerowa

Badany obiekt poddawany jest oddziaływaniu fali elektromagnetycznej rozchodzącej się z kierunku określonego przez kąt  $\Theta$ . Wzbudzenie to może mieć charakter fali ciągłej (CW – z reguły jednoczęstotliwościowe) lub impulsowy (o szerokim paśmie częstotliwości). Przechodzące przez obiekt promienie terahercowe rejestrowane są w płaszczyźnie pomiaru, gdzie dla danego kąta  $\Theta$  otrzymywana jest projekcja  $R(\Theta, r)$ . W pracy [142] udowodniono, że zmiana fazy fali elektromagnetycznej w płaszczyźnie pomiaru może być wykorzystana do określania rozkładu współczynnika refrakcji  $n$  w przekroju obiektu oraz że problem prosty matematycznie jest opisany za pomocą przekształcenia Radona (wykorzystywanego również w rentgenowskiej tomografii komputerowej) [21, 55, 142]:

$$R(\Theta, r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \delta(r - x \cos \Theta - y \sin \Theta) dx dy \quad (7.4)$$

gdzie:  $g(x, y)$  – przestrzenny rozkład wybranego parametru elektromagnetycznego w przekroju obrazowanego obiektu, np. współczynnika refrakcji  $n(x, y)$ ;  $\delta$  – delta Diraca;  $\Theta$  – kąt projekcji;  $r$  – odległość promienia od osi obrotu.

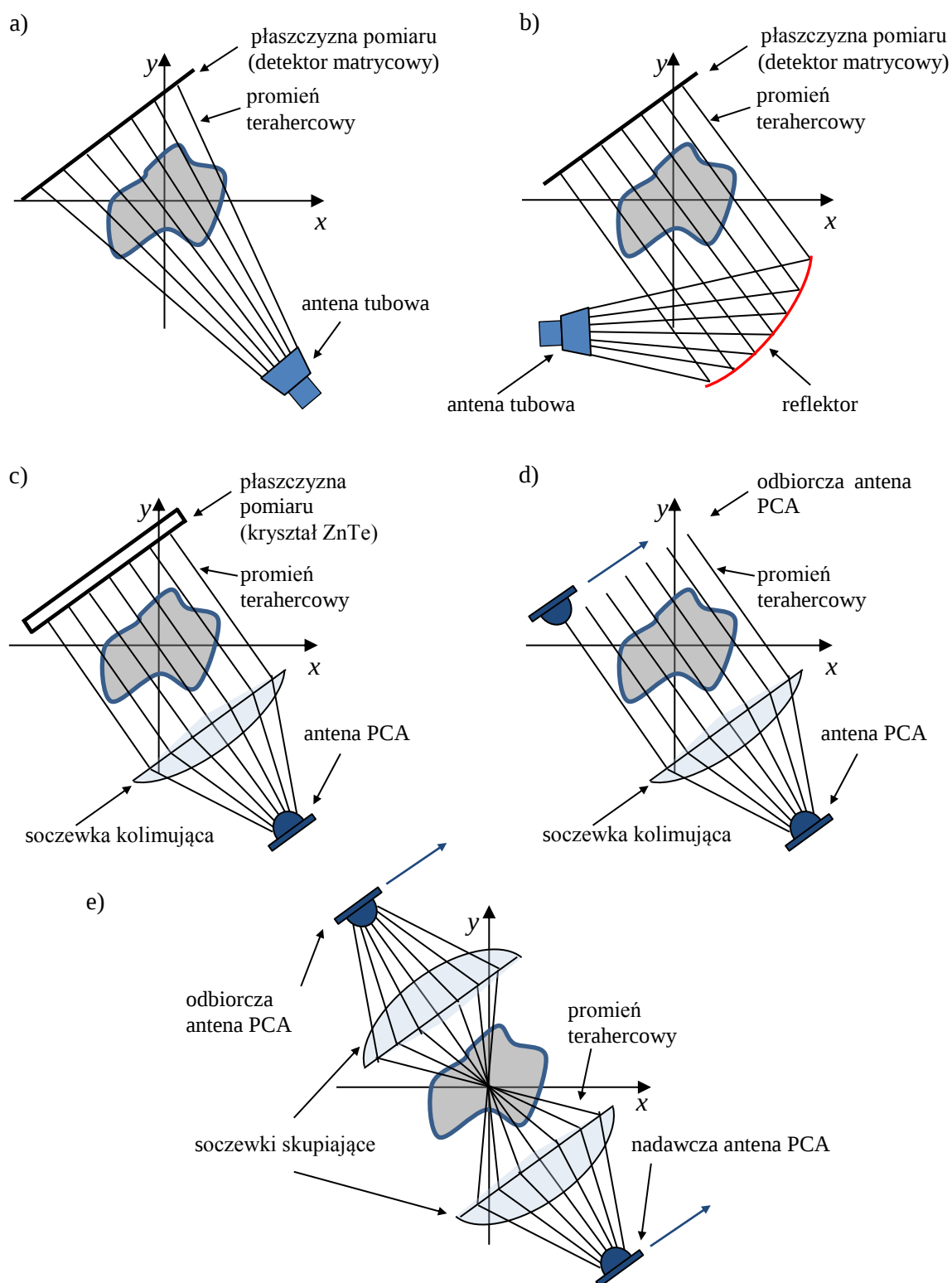
Problem odwrotny, czyli rekonstrukcja przestrzennego rozkładu parametrów elektromagnetycznych OUT, matematycznie opisany jest za pomocą odwrotnej transformaty Radona [21, 55]:

$$g_R(x, y) = \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\Theta, r) \delta(r - x \cos \Theta - y \sin \Theta) dr d\Theta \quad (7.5)$$

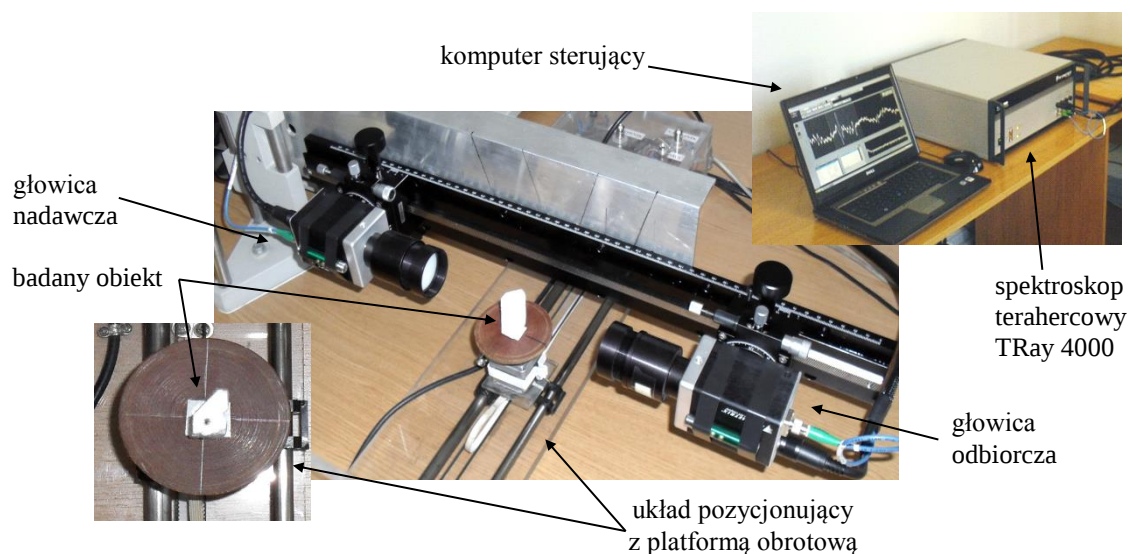
gdzie:  $g_R(x,y)$  – zrekonstruowany przestrzenny rozkład wybranego parametru elektromagnetycznego.

Do rekonstrukcji mogą być wykorzystywane również inne (niż przesunięcie fazowe) parametry sygnału zmierzonego w płaszczyźnie pomiaru. W przypadku wymuszenia typu CW określana jest amplituda lub moc fali elektromagnetycznej. W przypadku wymuszenia impulsowego (TDS) określone są energia, amplituda impulsu lub opóźnienie czasowe wprowadzane przez obecność obiektu. Akwizycja sygnałów czasowych umożliwia wyznaczenie bardzo dużej liczby parametrów w dziedzinie czasu (TD), częstotliwości (FD) i w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (TFD). W zależności od parametru wykorzystywanego podczas rekonstrukcji wynikowy obraz będzie miał różny charakter, co oznacza, że różne jego cechy zostaną wyeksponowane. Przykładowo wykorzystanie parametrów częstotliwościowych, tj. amplitud różnych harmonicznych, zwiększa czułość wykrycia materiałów o różnych współczynnikach absorpcji lub o współczynnikach w różnym stopniu zmieniających się w funkcji częstotliwości. Zastosowanie rekonstrukcji na podstawie wielu parametrów, a następnie fuzja uzyskanych rozkładów umożliwia uzyskanie lepszych rezultatów, co zostanie przedstawione w dalszej części rozdziału.

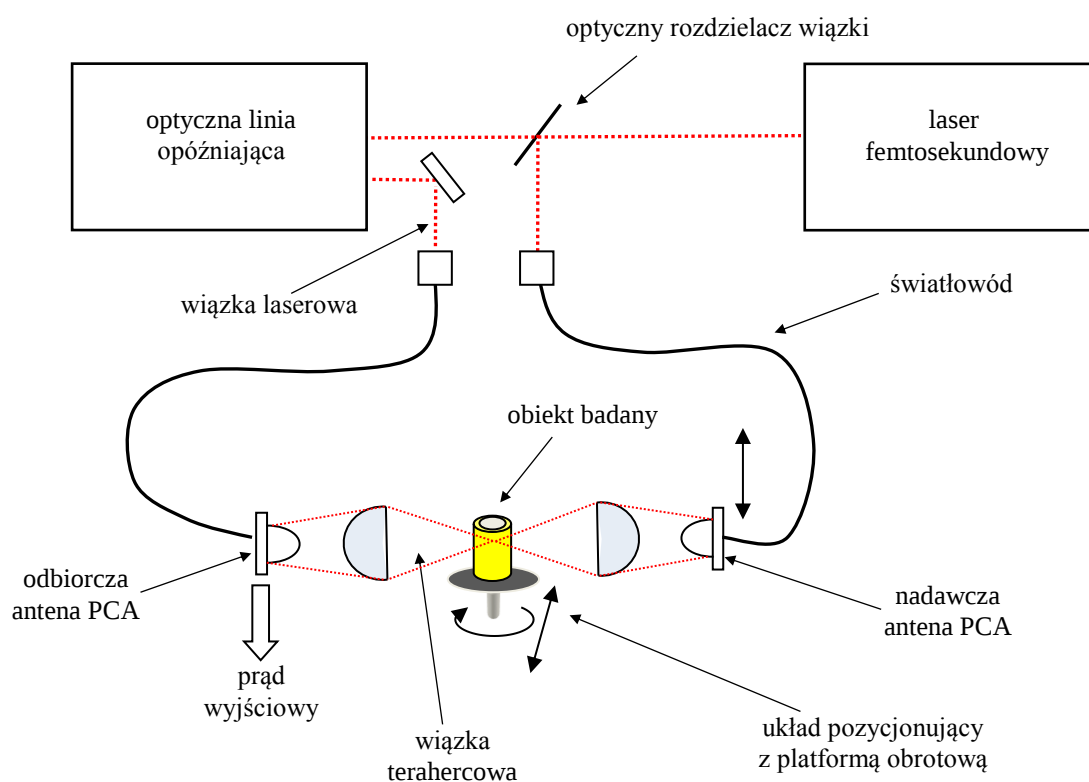
Różne możliwe sposoby oświetlania badanego obiektu falą terahercową przedstawiono na ryc. 7.6. Autor zaproponował i zbudował system tomografii komputerowej wykorzystujący zasadę działania z ryc. 7.6e. Opracowany tomograf znajduje się w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki (KETiI) Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Zdjęcie systemu z zaznaczonymi głównymi elementami składowymi przedstawiono na ryc. 7.7. System działa w trybie impulsowym. Jego główną częścią jest spektroskop TRay-4000 firmy Picometrix. Odpowiada on za generację i detekcję impulsów terahercowych o czasie trwania rzędu kilku pikosekund. Podobnie jak w przypadku eksperymentów przedstawionych w poprzednich rozdziałach, impulsy generowane są przez anteny PCA, a następnie skupiane przez soczewki wykonane z polietylenu wysokiej gęstości (HDPE). Anteny fotonoprowadzące wraz z soczewkami skupiającymi stanowią głowice pomiarowe (nadawczą i odbiorczą), które w przedstawionym systemie ustawione są wzdłuż osi  $y$  i mogą się poruszać wzdłuż osi  $z$  w celu wykonania kolejnego przekroju tomograficznego. Obiekt badany jest przesuwany wzdłuż osi  $x$  i obracany względem głowic pomiarowych za pomocą układu pozycjonującego z platformą obrotową. Schemat systemu przedstawiono na ryc. 7.8.



Ryc. 7.6. Przykładowe geometrie stosowane w tomografii terahercowej: a) układ wykorzystujący antenę tubową jako jednoczesne źródło oświetlające i matrycę odbiorczą, b) układ z kształtowaniem frontu falowego za pomocą odpowiedniej krzywizny reflektora, c) układ wykorzystujący antenę PCA i soczewkę kolimującą oraz dwuwymiarowy detektor, d) układ z przesuwającym się detektorem, e) geometria ze skupioną wiązką terahercową i z przesuwającym się układem głowic nadawczo-odbiorczych



Ryc. 7.7. Widok systemu do tomografii terahercowej CT opracowanego przez autora (dostępne w KETiI ZUT w Szczecinie)



Ryc. 7.8. Schemat systemu do tomografii terahercowej CT, opracowanego przez autora, zainstalowanego w KETiI ZUT w Szczecinie

### 7.3. Badanie materiałów dielektrycznych metodą tomografii terahercowej CT

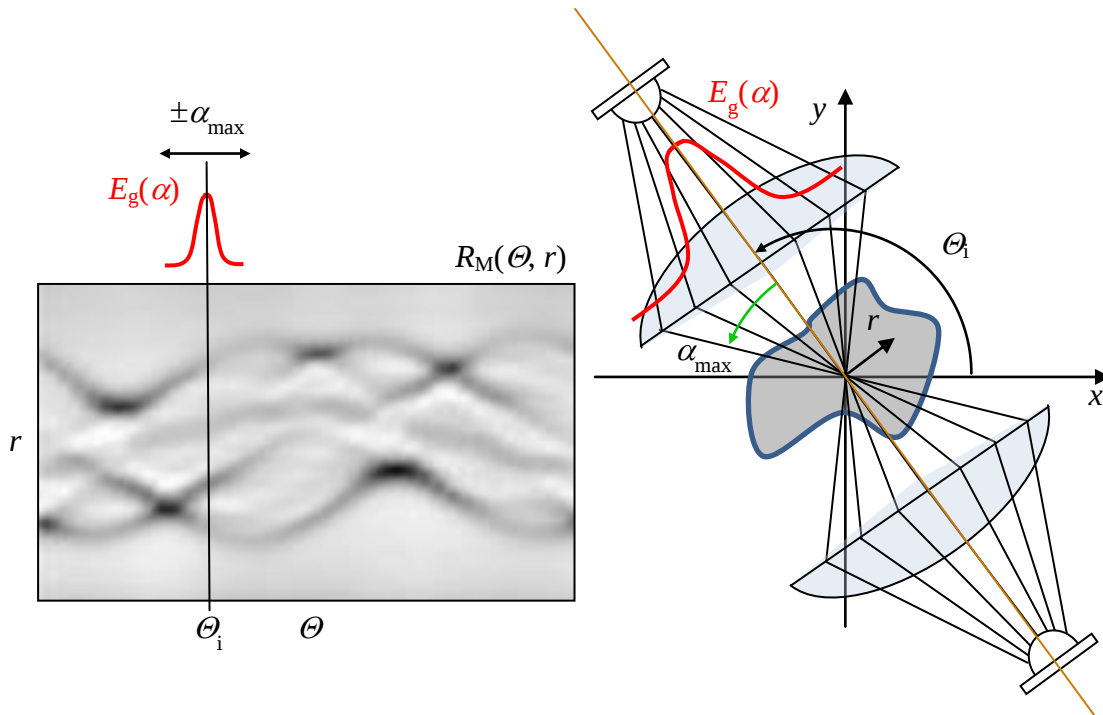
#### 7.3.1. Wiązka terahercowa

W zrealizowanym przez autora układzie tomografii terahercowej z soczewkami skupiającymi i przesuwaniem układu głowic nadawczo-odbiorczych (ryc. 7.6e) dla danego promienia  $r$  i kąta projekcji  $\Theta_i$  nie przechodzi przez materiał badany i nie jest rejestrowany pojedynczy promień terahercowy, lecz wiązka promieni przechodząca pod różnymi kątami w przedziale:

$$\Theta_i \pm \alpha_{\max} \quad (7.6)$$

gdzie:  $\Theta_i$  – bieżący kąt projekcji,  $\alpha_{\max}$  – kątowa szerokość wiązki terahercowej (maksymalny kąt, pod jakim padają promienie przechodzące przez soczewkę skupiającą).

Powyższą sytuację przedstawiono na ryc. 7.9.



Ryc. 7.9. Ilustracja wpływu zastosowania terahercowej wiązki gaussowskiej na rozmycie mierzonego sygnału (sinogramu)

Kąt  $\alpha_{\max}$  zależy od średnicy i ogniskowej soczewki skupiającej. W związku z powyższą sytuacją sygnał odebrany dla danego kąta projekcji  $\Theta_i$  w rzeczywistości jest ważoną sumą sygnałów z sąsiednich kątów projekcji rozchodzących się po różnych drogach, a przez to w różnych obszarach obiektu badanego. Największą amplitudę ma promień główny rozchodzący się z kierunku  $\Theta_i$ . Promienie z kątów sąsiednich  $\Theta_i \pm \alpha_n$  charakteryzują się odpowiednio niższymi amplitudami. Zależność intensywności pola elektrycznego od kąta  $\alpha_n$  ma charakter gaussowski [38] i ukształtowana jest przez antenę fotorzprzewodzącą oraz soczewkę

skupiającą. Dla wiązki równoległej do osi  $x$  ( $\Theta_i = 0^\circ$ ) intensywność wiązki gaussowskiej określona jest następującą zależnością [11, 19, 38]:

$$E_I(r_B, x) = E_{I0} \left( \frac{w_0}{w(x)} \right)^2 e^{\frac{-2r_B^2}{w(x)^2}} \quad (7.7)$$

gdzie:  $E_{I0}$  – intensywność wiązki w środku przewężenia,  $r_B$  – odległość od osi wiązki,  $x$  – położenie wzdłuż osi wiązki,  $w(x)$  – promień wiązki w odległości  $x$  od przewężenia,  $w_0$  – promień przewężenia wiązki gaussowskiej.

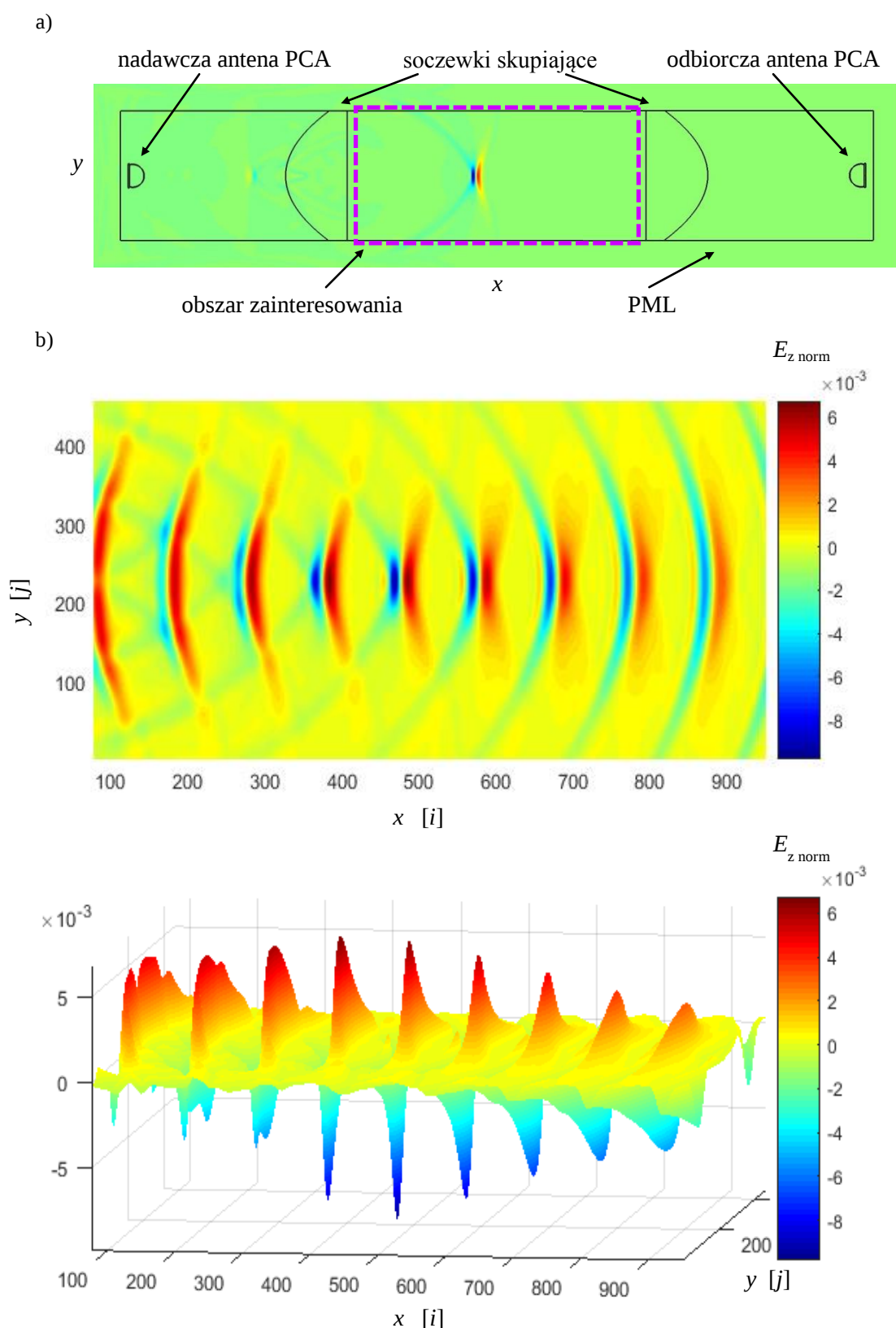
W zaproponowanym układzie wykorzystano wzbudzenie impulsowe. Przestrzenny rozkład impulsów, wyznaczony metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu, przedstawiony jest dla wybranych dyskretnych punktów czasu na ryc. 7.10. Jak można zauważyć, w ognisku amplituda impulsu jest maksymalna, natomiast zajmowane przez niego pole powierzchni (objętość w rzeczywistości lub w modelu trójwymiarowym) jest niewielkie; występuje maksymalna koncentracja energii w obszarze. Rozkład amplitudy impulsu zarejestrowany w sposób ciągły przedstawiono na ryc. 7.11. Maksymalna wartość amplitudy impulsu występuje w odległości 22,0 mm od płaszczyzny soczewki skupiającej, po stronie nadawczej. Wyznaczając w każdym punkcie energię pola elektromagnetycznego, uzyskać można profil wiązki terahercowej w opracowanym tomografie. Wyznaczony rozkład energii przedstawiono na ryc. 7.12. Maksymalna wartość energii występuje w nieco mniejszej odległości (21,6 mm) od płaszczyzny soczewki skupiającej, po stronie nadawczej. Po zastosowaniu transformacji Fouriera uzyskać można rozkład promieniowanego pola elektrycznego dla różnych częstotliwości. Na ryc. 7.13 przedstawiono wyniki dla niższej, natomiast na ryc. 7.14 dla wyższej częstotliwości z zakresu zastosowanego pasma terahercowego. Maksymalne wartości dla poszczególnych harmonicznych odnotowano odpowiednio 23,3 mm i 22,2 mm od płaszczyzny soczewki skupiającej, po stronie nadawczej, co daje ponad milimetr różnicy w położeniu ogniska dla różnych częstotliwości.

Dla zadanej zatem wartości  $r_z$  otrzymana wartość projekcji  $R_M(\Theta, r_z)$  określona jest następującą zależnością:

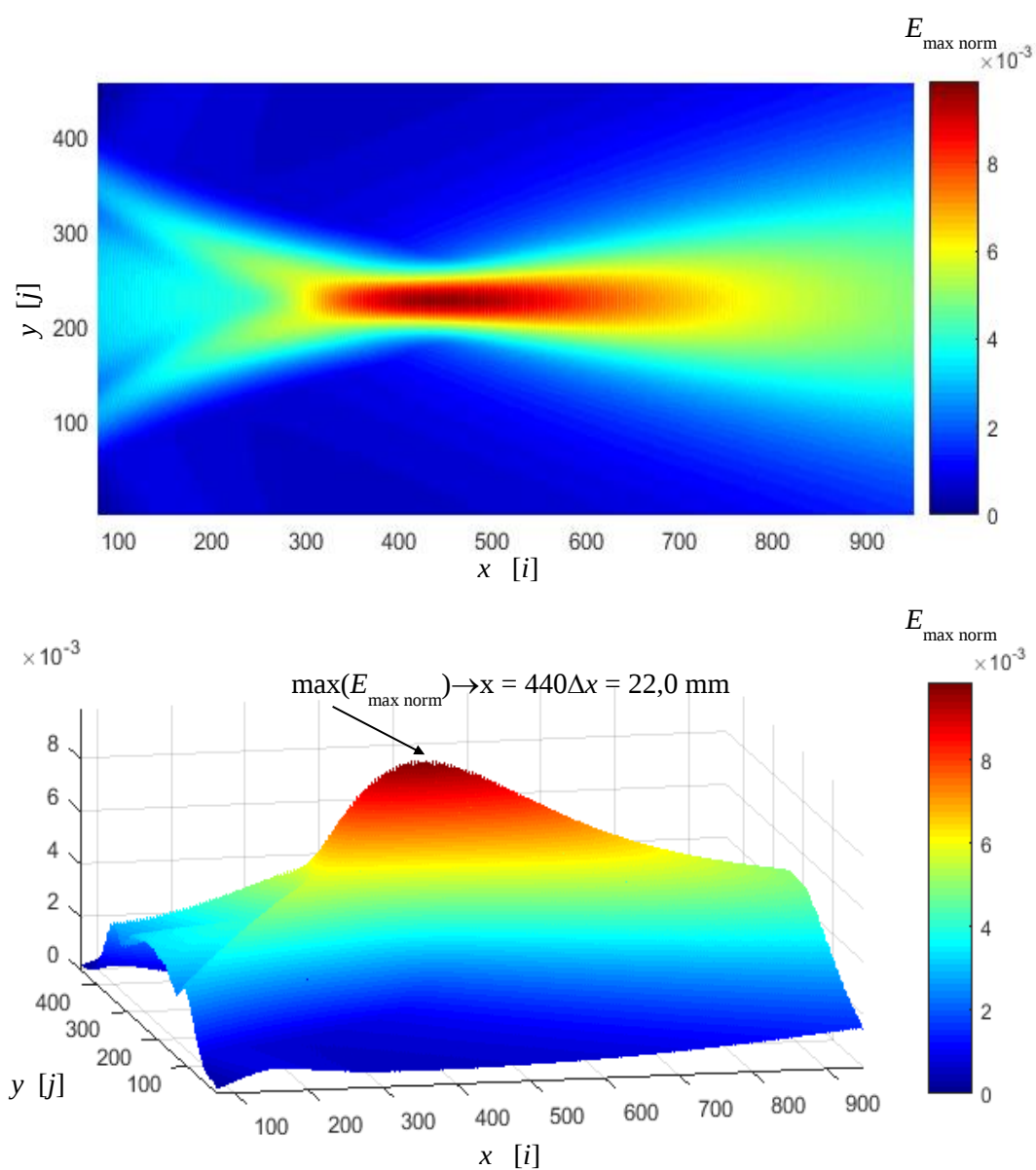
$$R_M(\Theta, r_z) = R_R(\Theta, r_z) * E_g(\alpha) \quad (7.8)$$

gdzie:  $R_R(\Theta, r_z)$  – projekcja przy działaniu pojedynczego promienia,  $E_g(\alpha)$  – funkcja określająca rozkład amplitudy impulsu (promienia) w pobliżu kąta  $\Theta_i$ , wynikający z gaussowskiego wzbudzenia i zastosowania soczewki skupiającej,  $r_z$  – zadana wartość  $r$ ,  $*$  – operacja splotu.

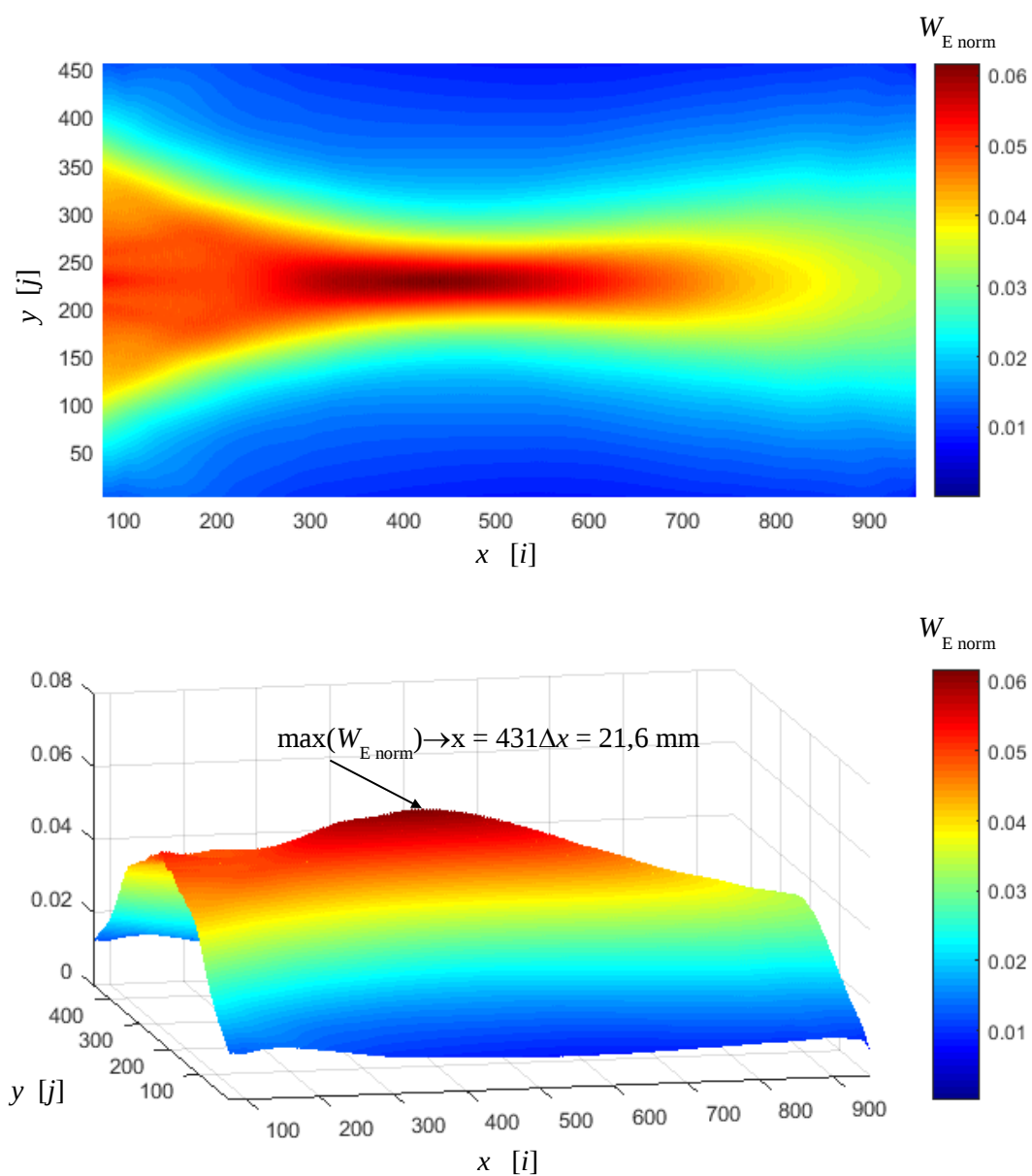
Powyższa zależność opisuje rozmycie sinogramu oraz wynikające z tego rozmycie rekonstruowanego obrazu. W celu odzyskania wartości  $R_R(\Theta, r_z)$  w zaproponowanym algorytmie rekonstrukcyjnym zastosowano operację dekonwolucji.



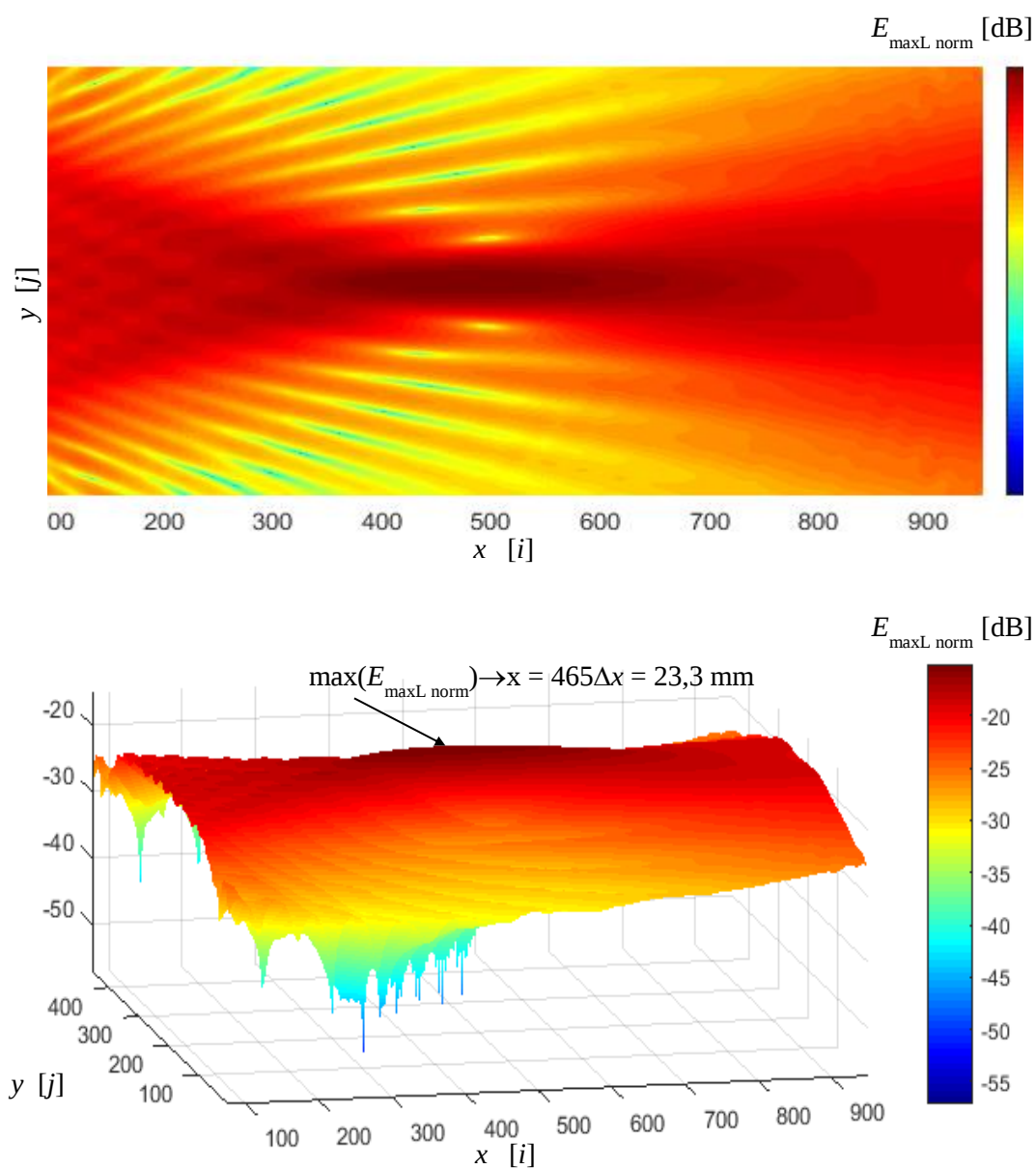
Ryc. 7.10. Impuls elektromagnetyczny (składowa z wektora pola elektrycznego  $E_{z \text{ norm}}$ ) rozchodzący się w opracowanym tomografii terahercowej, uzyskany w wyniku symulacji metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu: a) geometria modelu numerycznego, b) położenie impulsu terahercowego w obszarze zainteresowania (sumowanie w odstępach co  $\Delta t = 15$  ps);  $\Delta x = \Delta y = 50 \mu\text{m}$



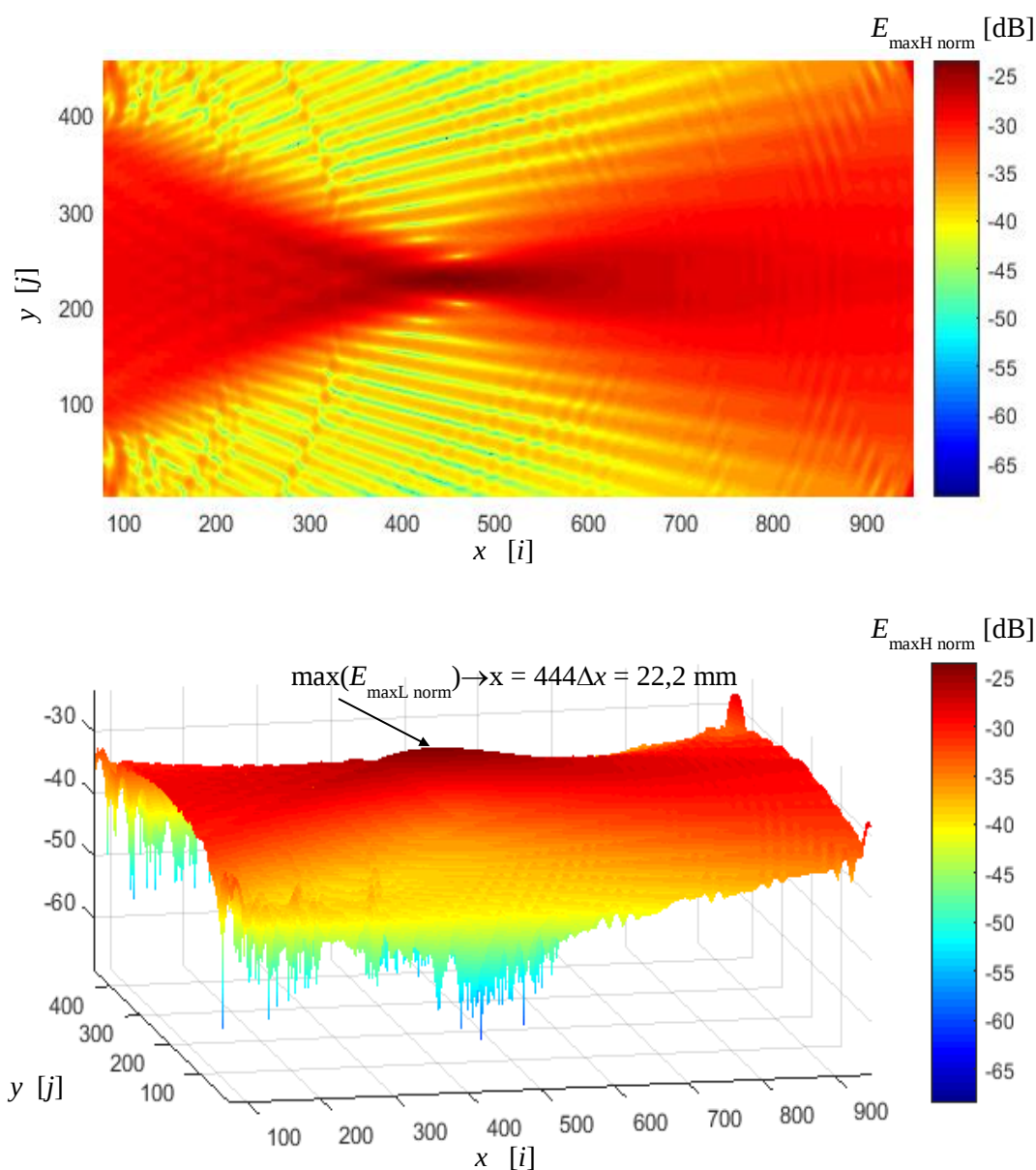
Ryc. 7.11. Rozkład obwiedni amplitudy impulsu  $E_{\max \text{ norm}}$  w wiązce terahercowej występującej w opracowanym tomografii terahercowej, uzyskany w wyniku symulacji metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu;  $\Delta x = \Delta y = 50 \mu\text{m}$



Ryc. 7.12. Rozkład obwiedni energii  $W_{E \text{ norm}}$  w wiązce terahercowej występującej w opracowanym tomografie terahercowym, uzyskany w wyniku symulacji metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu;  $\Delta x = \Delta y = 50 \mu\text{m}$



Ryc. 7.13. Rozkład obwiedni amplitudy  $E_{\max L \text{ norm}}$  niskiej częstotliwości z zastosowanego pasma ( $f_L = 0,2 \text{ THz}$ ) w wiązce terahercowej występującej w opracowanym tomografie terahercowym, uzyskany w wyniku symulacji metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu;  $\Delta x = \Delta y = 50 \mu\text{m}$

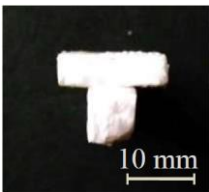
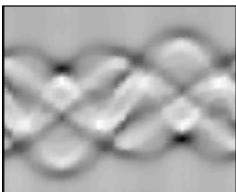
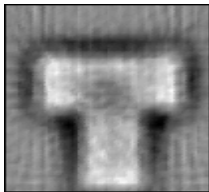
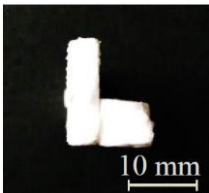
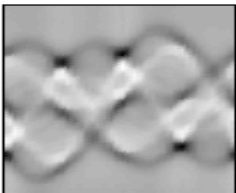
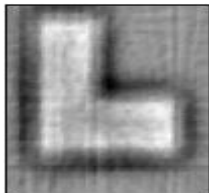
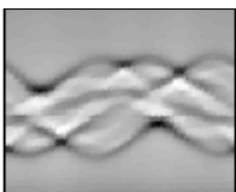
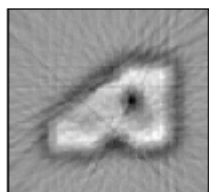
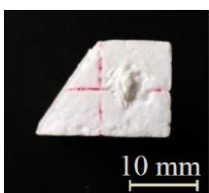
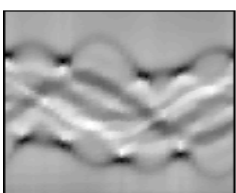
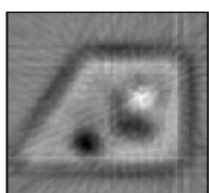
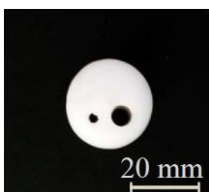
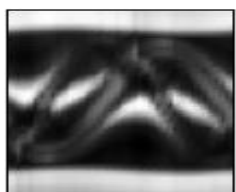
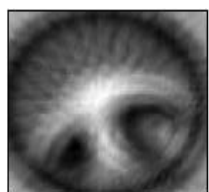
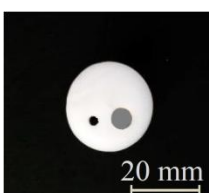
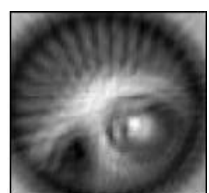


Ryc. 7.14. Rozkład obwiedni amplitudy  $E_{\max H \text{ norm}}$  wysokiej częstotliwości z zastosowanego pasma ( $f_H = 0,8 \text{ THz}$ ) w wiązce terahercowej występującej w opracowanym tomografie terahercowym, uzyskany w wyniku symulacji metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu;  $\Delta x = \Delta y = 50 \mu\text{m}$

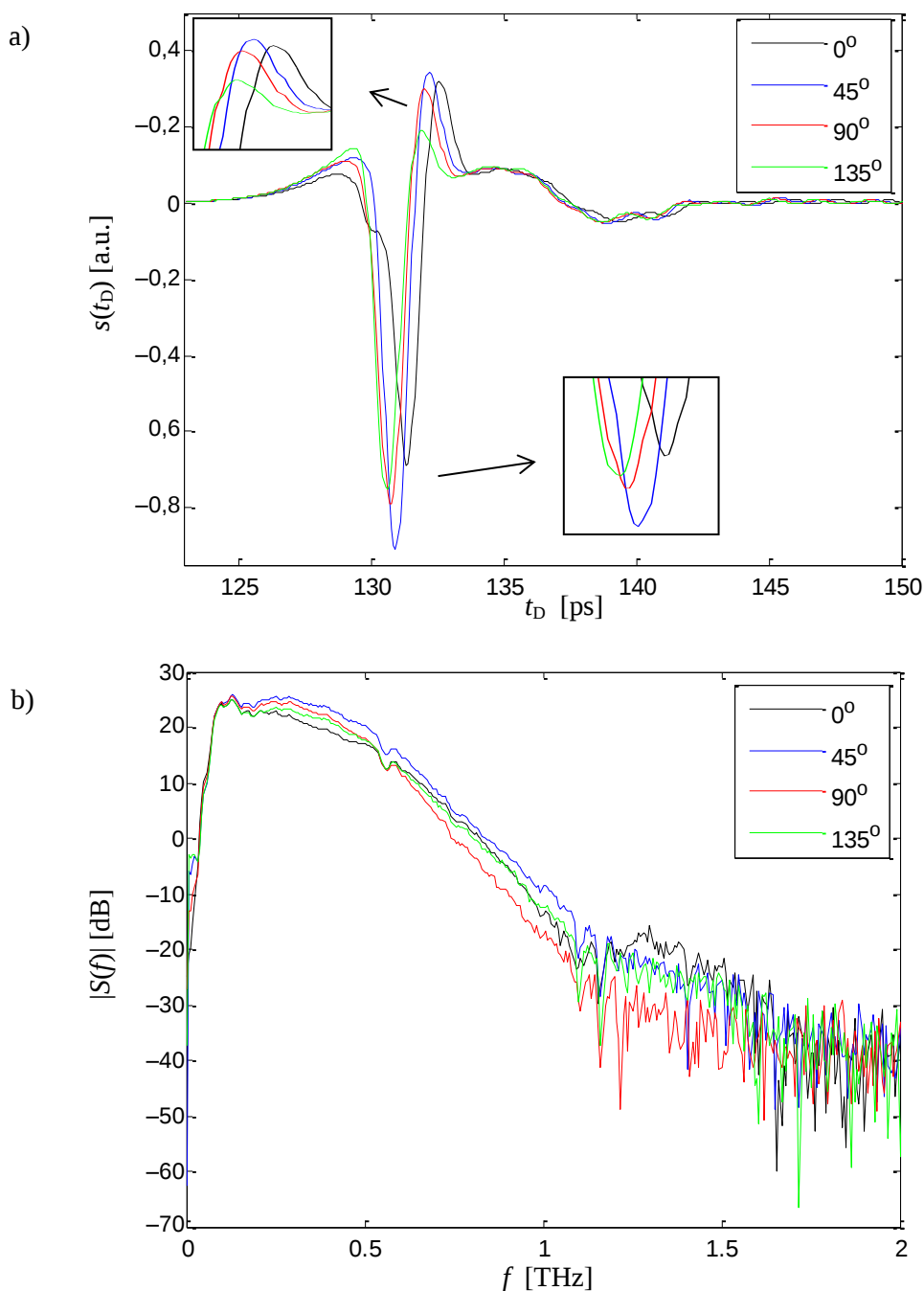
### 7.3.2. Algorytm rekonstrukcji wieloparametrycznej

W celu zaprezentowania możliwości zbudowanego układu tomografii terahercowej CT (ryc. 7.7), przeprowadzono inspekcję tomograficzną wielu obiektów dielektrycznych. Przekroje i wymiary wybranych fantomów, jak również zmierzone sinogramy i wyniki rekonstrukcji za pomocą odwrotnej transformacji Radona – zależność (7.5) – przedstawiono w tab. 7.1. Fantomy 1–5 w całości wykonane są ze spienionego polistyrenu. Jak można zauważyć, zarówno kontury obiektu, jak i sztuczny defekt zostały poprawnie odwzorowane.

Tabela 7.1. Obiekty wykorzystane w eksperymentach dotyczących THz CT

| Nr fantomu | Widok z góry badanego obiektu                                                       | Sinogram                                                                            | Wynik rekonstrukcji za pomocą odwrotnej transformacji Radona                         | Opis fantomu                                                                                                                               |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          |    |    |    | fantom „T”<br>materiał: spieniony polistyren                                                                                               |
| 2          |    |    |    | fantom „L”<br>materiał: spieniony polistyren                                                                                               |
| 3          |   |   |   | fantom pięciokątny z dwoma sztucznymi defektami (nacięcie trójkątne na krawędzi i otwór o średnicy 3 mm)<br>materiał: spieniony polistyren |
| 4          |  |  |  | fantom czworokątny ze sztucznym i rzeczywistym defektem<br>materiał: spieniony polistyren                                                  |
| 5          |  |  |  | fantom „S”<br>materiał: spieniony polistyren                                                                                               |
| 6          |  |  |  | fantom walcowy z dwoma powietrznymi wtrąceniami sztucznymi<br>materiał: teflon                                                             |
| 7          |  |  |  | fantom walcowy z dwoma wtrąceniami sztucznymi<br>materiał: teflon, PMMA                                                                    |

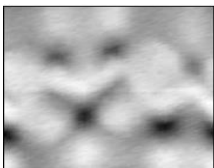
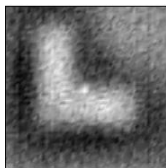
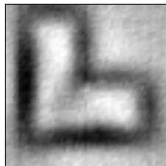
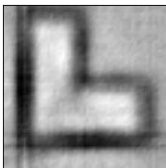
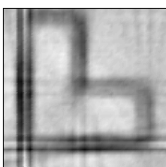
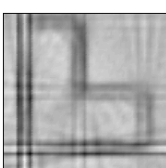
Wykorzystanie wzbudzenia impulsowego (ryc. 7.15a) w opracowanym tomografie terahercowym umożliwia podczas jednego pomiaru otrzymanie informacji dla całego pasma częstotliwości przedstawionego na ryc. 7.15b. Pozwala to na lepsze rozróżnienie materiałów występujących w badanym obiekcie. Szczególnie dotyczy to materiałów, w których zależność przenikalności dielektrycznej od częstotliwości nie jest funkcją stałą.



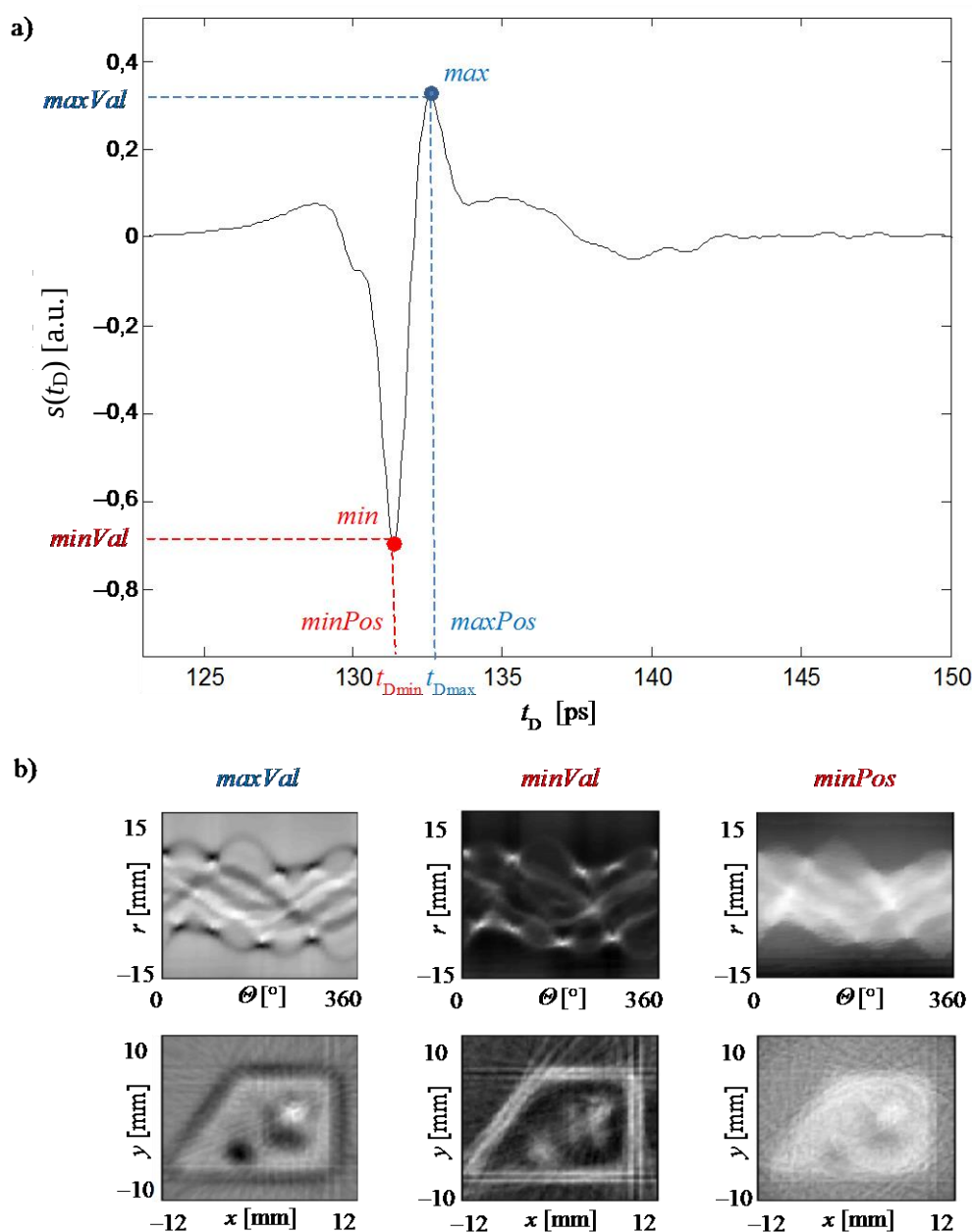
Ryc. 7.15. Sygnał terahercowy rejestrowany podczas inspekcji tomograficznej fantomu „L” przy różnych kątach projekcji  $\theta$ : a) sygnał w dziedzinie czasu, b) widmo amplitudowe

W związku z różnym stosunkiem sygnału do szumu oraz różnymi długościami fali, występującymi dla częstotliwości analizowanego sygnału, uzyskane rekonstrukcje różnią się od siebie. Przykładowe sygnały (sinogramy) i wyniki rekonstrukcji, uzyskane przez zastosowanie transformaty Radona dla fantomu „L” i pięciu wybranych częstotliwości z wykorzystawanego pasma, przedstawiono w tab. 7.2. Zastosowanie wyższych częstotliwości powoduje uwydatnienie detali, np. krawędzi obiektów.

Tabela 7.2. Wyniki rekonstrukcji tomograficznej (fantom „L”) dla różnych częstotliwości sygnału

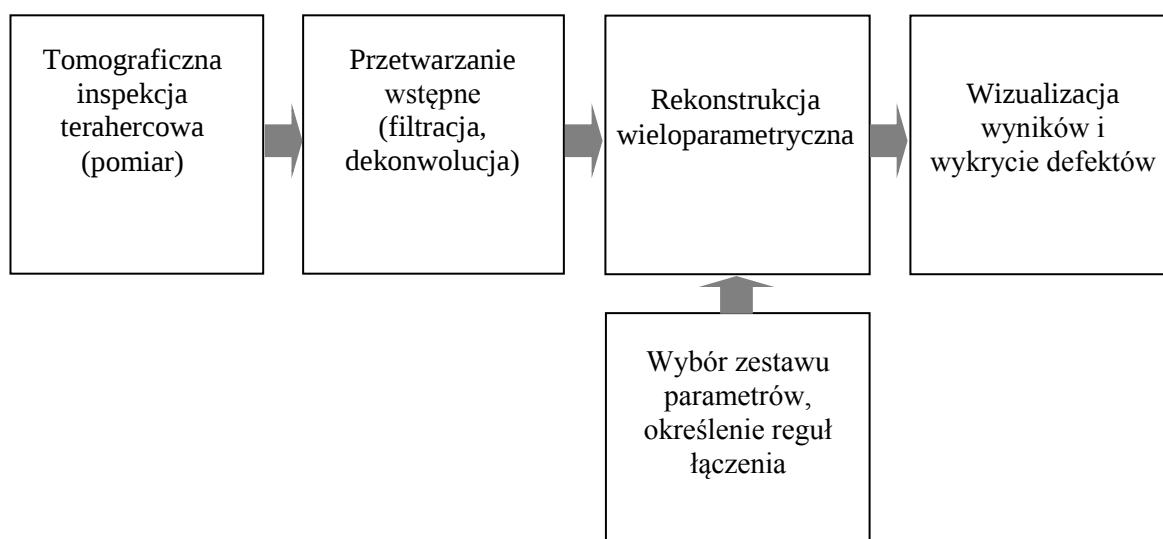
| Nr częstotliwości | Sinogram                                                                            | Wynik rekonstrukcji za pomocą odwrotnej transformacji Radona                         | Wartość częstotliwości |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 1                 |    |    | 70 GHz                 |
| 2                 |   |   | 100 GHz                |
| 3                 |  |  | 250 GHz                |
| 4                 |  |  | 0,6 THz                |
| 5                 |  |  | 1,3 THz                |

Sinogramy przedstawione w tab. 7.1 wyznaczone zostały na podstawie maksymalnej wartości odebranego sygnału terahercowego (*maxVal*). Jak już wspomniano w rozdz. 7.2, do rekonstrukcji wykorzystane mogą być również inne parametry sygnału. Definicje wybranych parametrów, jak również odpowiadające im sinogramy i wyniki rekonstrukcji przedstawiono na ryc. 7.16. Jak można zauważyć, sprawdza się postawiona wcześniej teza o wyeksponowaniu różnych cech rekonstruowanego obiektu przy użyciu różnych parametrów (np. obraz uzyskany na podstawie *minVal* zawiera informację wysokoczęstotliwościową, natomiast na podstawie *minPos* – niskoczęstotliwościową).



Ryc. 7.16. Wpływ parametru wykorzystywanego do rekonstrukcji na jej wynik: a) zmierzony sygnał  $s(t)$  i definicje podstawowych parametrów w dziedzinie czasu, b) wyniki eksperymentu (sinogramy i rekonstrukcje) z obiektem zawierającym rzeczywisty defekt (fantom nr 4 z tab. 7.1) dla różnych parametrów wykorzystywanych w procesie rekonstrukcji ( $maxVal$ ,  $minVal$  i  $minPos$ )  
 Źródło: na podstawie [79].

Wnioski wynikające z analizy kształtu wiązki terahercowej i jego wpływu na rozmycie wyników rekonstrukcji oraz różnice w informacji uzyskanej w procesie rekonstrukcji, na podstawie różnych parametrów odebranego sygnału  $s(t)$ , przyczyniły się do opracowania algorytmu wieloparametrycznej rekonstrukcji, wykorzystującego odwrotną transformację Radona oraz sztuczne sieci neuronowe w procesie łączenia informacji uzyskanych na podstawie różnych parametrów [79]. Blokowy schemat zaproponowanej procedury przedstawiono na ryc. 7.17.

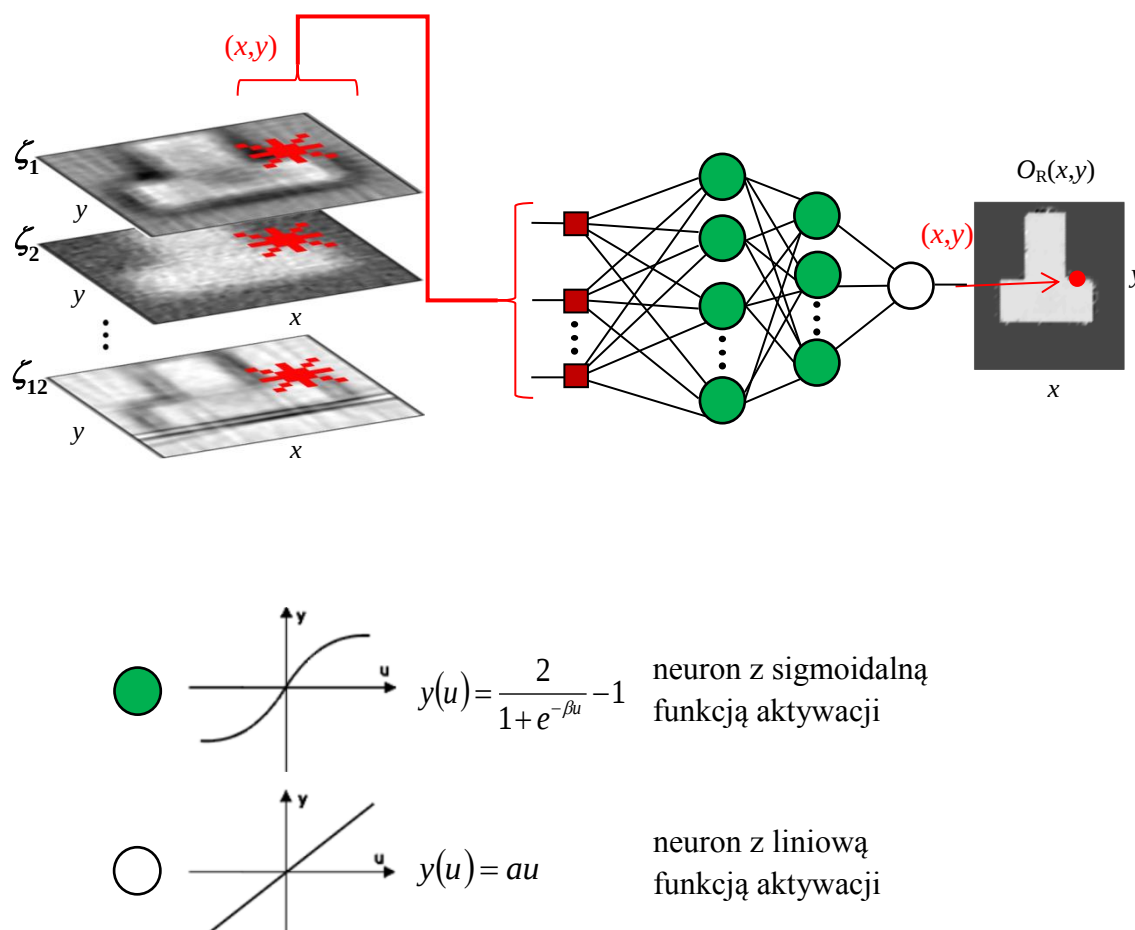


Ryc. 7.17. Schemat blokowy procedury tomograficznego określania stanu struktury  
Źródło: na podstawie [79].

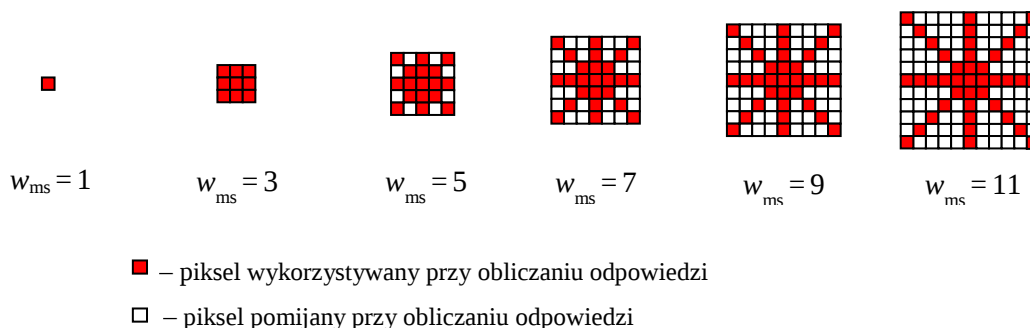
Pierwszym etapem jest przeprowadzenie inspekcji za pomocą opracowanego tomografu (ryc. 7.7). Następnie odbywa się przetwarzanie wstępne, w ramach którego realizowane są filtracja i dekonwolucja. Filtracja może być zaimplementowana w postaci jednowymiarowego filtru medianowego zastosowanego bezpośrednio do sygnału pomiarowego  $s(t)$  lub w postaci dwuwymiarowego filtru medianowego zastosowanego w odniesieniu do sinogramu  $R_M(\theta, r)$ . W obu przypadkach zamiast filtracji medianowej może być zastosowane odszumianie falkowe – odpowiednio jedno- lub dwuwymiarowe. Kolejnym zadaniem realizowanym w tym etapie jest dekonwolucja sinogramu  $R_M(\theta, r)$  – implementacja zależności odwrotnej do wzoru (7.8). Dane przetworzone w powyższy sposób wykorzystywane są w następnym etapie, czyli w rekonstrukcji wieloparametrycznej, którą schematycznie przedstawiono na ryc. 7.18.

Dwanaście dwuwymiarowych rozkładów wybranych parametrów  $\zeta$ , otrzymanych w wyniku rekonstrukcji wykorzystującej odwrotne twierdzenie Radona, zostało przeskanowanych za pomocą przesuwającego okna o geometrii przedstawionej na ryc. 7.19. Maskę okna w kształcie gwiazdy umożliwiła redukcję liczby przetwarzanych informacji w stosunku do pełnego okna prostokątnego. Zestaw 12 parametrów wybrano na podstawie wstępnej analizy stosunku sygnału do szumu większej liczby (27) parametrów. Ich definicje przedstawione są w tab. 7.3. Zastosowano zarówno cechy w dziedzinie czasu ( $\zeta_1$ – $\zeta_9$ ), jak i wyznaczane w dziedzinie częstotliwości ( $\zeta_{10}$ – $\zeta_{12}$ ). Rekonstrukcje uzyskane przy użyciu wybranych parametrów umożliwiają identyfikację zarówno krawędzi badanych fantomów, jak i obiektów znajdujących się wewnątrz struktury, np. defektów sztucznych lub rzeczywistych. Charakteryzują się one również zróżnicowaną zawartością informacji na temat obrazowanego obiektu. Sinogramy i rekonstrukcje dla fantomu „T”, uzyskane za pomocą odwrotnej transformacji Radona, przy użyciu wybranych 12 parametrów przedstawiono na ryc. 7.20. Dane z okna przesuwającego jednocześnie po 12 rekonstrukcjach (bazujących na różnych parametrach) podawane są na wejście wytrenowanej wcześniej sztucznej sieci neuronowej. Model neuronowy estymuje wartość finalnej rekonstrukcji  $O_R$  dla położenia określonego przez pozycję środka okna przesuwającego  $(x, y)$ .

Zastosowano sieć trzywarstwową: dwie warstwy z sigmoidalną funkcją aktywacji oraz jedna warstwa wyjściowa charakteryzująca się liniową funkcją aktywacji. Sieć neuronowa trenowana była za pomocą metody Levenberga-Marquardta. W procesie trenowania wykorzystano 3136 wektorów uczących.



Ryc. 7.18. Schemat rekonstrukcji wieloparametrycznej wykorzystującej model neuronowy  
Źródło: na podstawie [79].

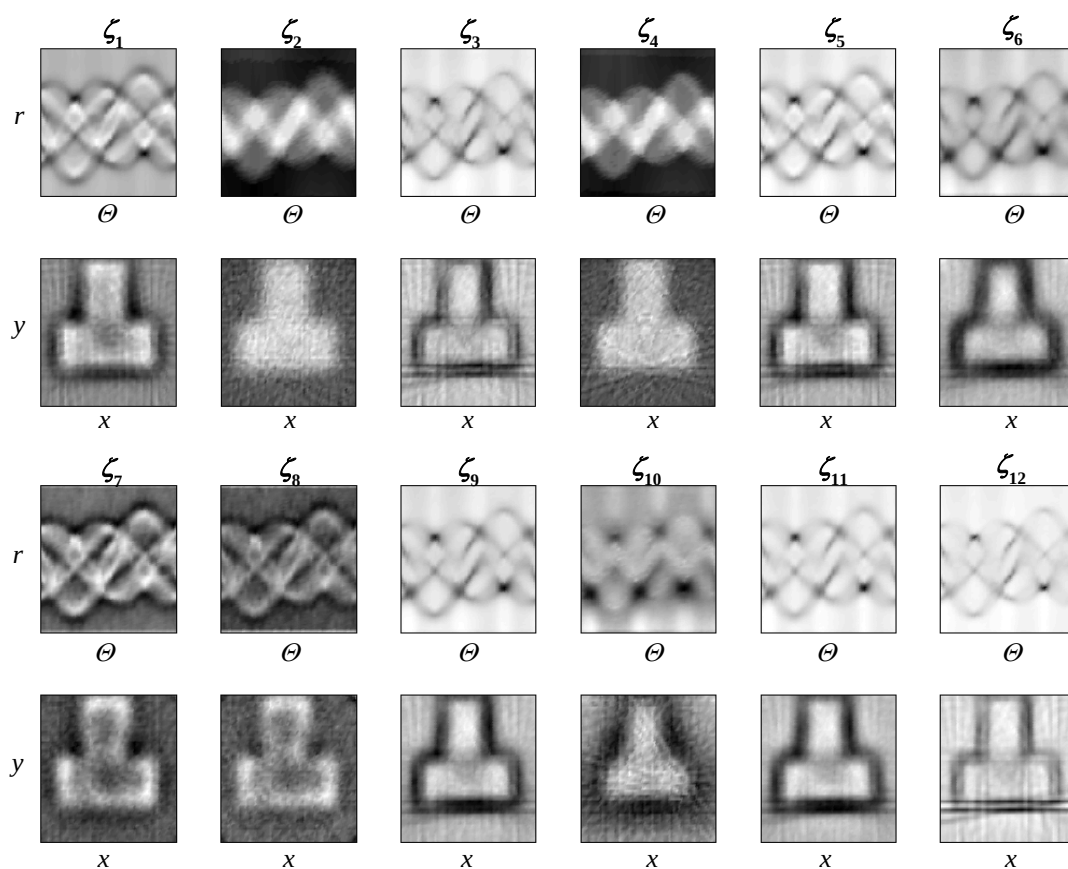


Ryc. 7.19. Maska okna przesuwnej wykorzystywana do trenowania modelu neuronowego

Tabela 7.3. Parametry wyznaczone z sygnału pomiarowego i wykorzystane do wieloparametrycznej rekonstrukcji tomograficznej

| Numer | Definicja / wzór                       | Opis                                                                                              |
|-------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | $\zeta_1 = \max[s(t)] = \max Val$      | wartość maksymalna sygnału ( <i>maxVal</i> z ryc. 7.16)                                           |
| 2     | $\zeta_2 = t_{Dmax}$                   | opóźnienie czasowe, przy którym występuje wartość maksymalna sygnału ( <i>maxPos</i> z ryc. 7.16) |
| 3     | $\zeta_3 = \min[s(t)] = \min Val$      | wartość minimalna sygnału ( <i>minVal</i> z ryc. 7.16)                                            |
| 4     | $\zeta_4 = t_{Dmin}$                   | opóźnienie czasowe, przy którym występuje wartość minimalna sygnału ( <i>minPos</i> z ryc. 7.16)  |
| 5     | $\zeta_5 = \max[s(t)] - \min[s(t)]$    | wartość międzyszczytowa sygnału                                                                   |
| 6     | $\zeta_6 = \int_{t_1}^{t_2}  s(t)  dt$ | pole powierzchni pod bezwzględną wartością sygnału                                                |
| 7     | $\zeta_7 = \text{mean}[s(t)]$          | wartość średnia sygnału                                                                           |
| 8     | $\zeta_8 = \text{med}[s(t)]$           | mediana próbkowanego sygnału                                                                      |
| 9     | $\zeta_9 = \text{std}[s(t)]$           | odchylenie standardowe próbkowanego sygnału                                                       |
| 10    | $\zeta_{10} = 10 \log_{10}  S(f_1) $   | amplituda wybranej harmonicznej $f_1 = 70$ GHz                                                    |
| 11    | $\zeta_{11} = 10 \log_{10}  S(f_3) $   | amplituda wybranej harmonicznej $f_3 = 250$ GHz                                                   |
| 12    | $\zeta_{12} = 10 \log_{10}  S(f_5) $   | amplituda wybranej harmonicznej $f_5 = 1,3$ THz                                                   |

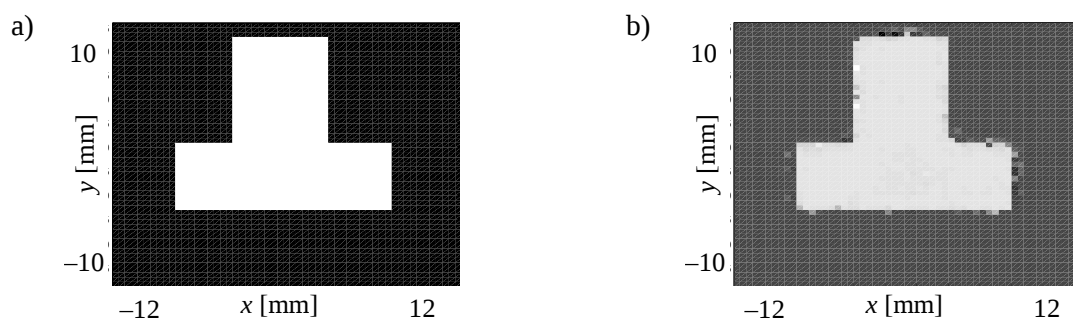
Źródło: na podstawie [79].



Ryc. 7.20. Sinogramy i wyniki rekonstrukcji dla wybranych 12 parametrów (zob. tab. 7.3), wykorzystywanych podczas treningu modelu neuronowego (numery parametrów wpisano nad rysunkami)

### 7.3.3. Wyniki rekonstrukcji

Na ryc. 7.21 przedstawiono zbiór wykorzystywany w procesie uczenia klasyfikatora wyznaczony na podstawie zdjęcia przekroju fantomu oraz odpowiedź wytrenowanego modelu neuronowego dla zbioru uczącego.



Ryc. 7.21. Zbiór uczący wyznaczony na podstawie zdjęcia przekroju (a) i odpowiedź wytrenowanego modelu neuronowego dla zbioru uczącego (b)

Źródło: na podstawie [79].

W celu określenia parametrów proponowanej procedury rekonstrukcyjnej i modelu neuronowego przyjęto następujące kryterium oceny rekonstruowanego obrazu:

$$K_R(w_{ms}, N_{ANN}, k_\zeta) = K_{FN}(w_{ms}, N_{ANN}, k_\zeta) \cdot K_{FP}(w_{ms}, N_{ANN}, k_\zeta) \quad (7.9)$$

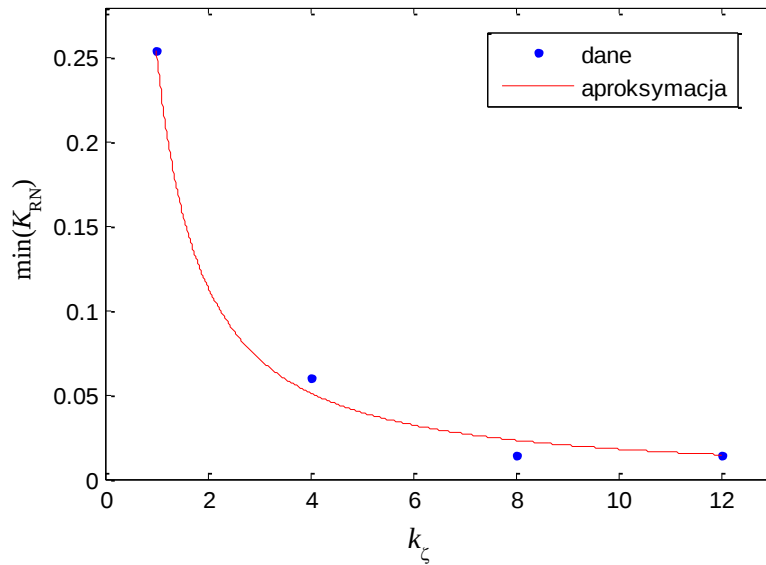
gdzie:  $K_R$  – kryterium oceny wyniku rekonstrukcji za pomocą proponowanej procedury,  $w_{ms}$  – rozmiar okna przesuwne,  $N_{ANN}$  – liczba neuronów w modelu neuronowym,  $k_\zeta$  – liczba parametrów  $\zeta$  wykorzystywanych do rekonstrukcji,  $K_{FN}$  – suma błędnych wskazań w obszarze, w którym powinien znajdować się przekrój obiektu (ang. *false negatives*),  $K_{FP}$  – suma błędnych wskazań na zewnątrz obszaru, w którym powinien znajdować się przekrój obiektu (ang. *false positives*).

Zarówno w przypadku sum  $K_{FN}$ ,  $K_{FP}$ , jak i iloczynowego kryterium  $K_R$  im mniejsze wartości przyjmują te parametry, tym lepszy jest wynik rekonstrukcji, a zatem w celu określenia parametrów zastosowanego modelu neuronowego poszukiwana będzie wartość minimalna  $K_R$ . W następnej analizie wykorzystywane będzie powyższe kryterium w postaci unormowanej:

$$K_{RN} = \frac{K_R}{\max(K_R)} \quad (7.10)$$

gdzie:  $K_{RN}$  – kryterium oceny wyniku rekonstrukcji za pomocą proponowanej procedury.

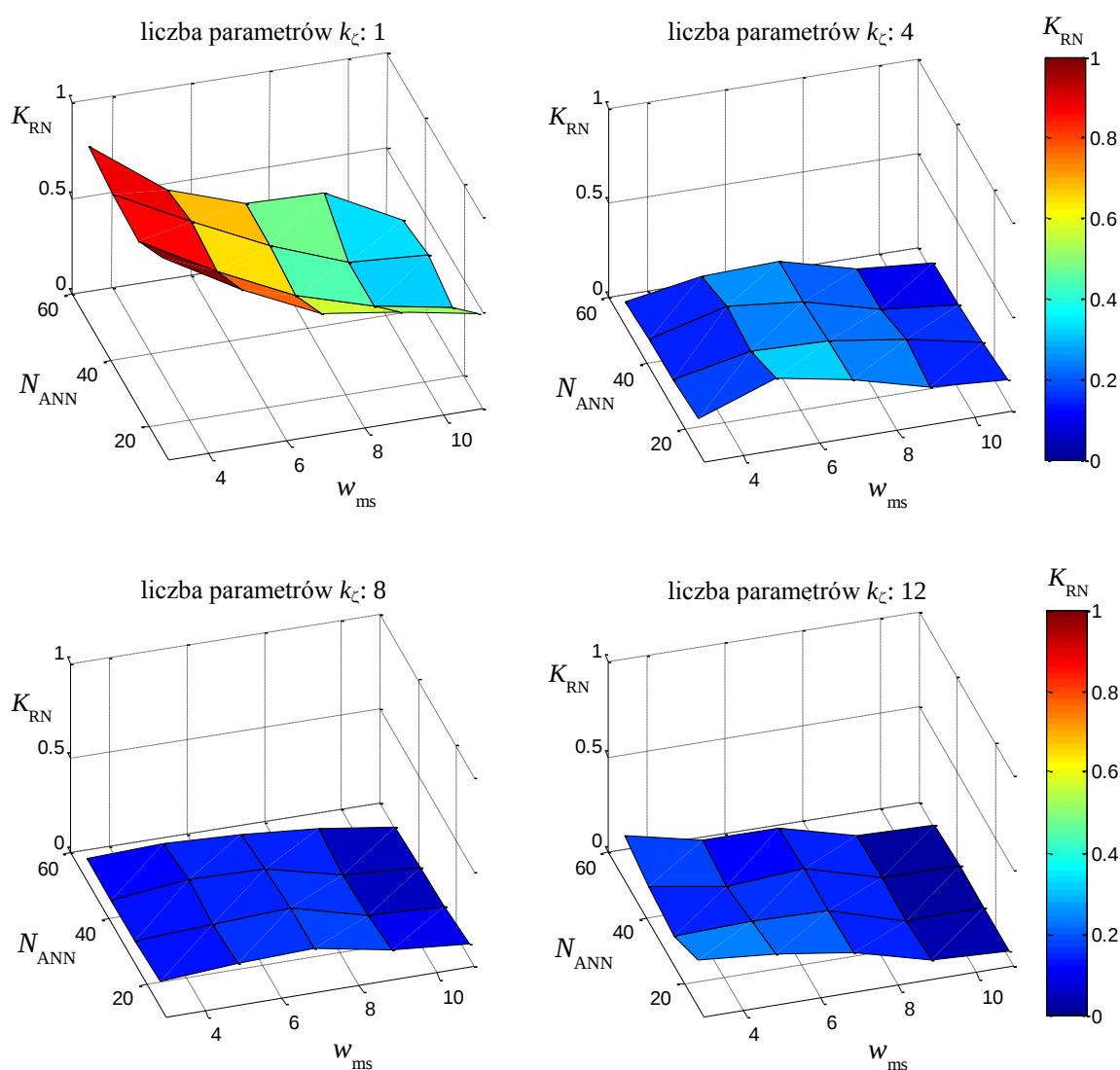
Na ryc. 7.22 przedstawiono zależność minimalnej wartości unormowanego kryterium oceny jakości rekonstrukcji od liczby wykorzystywanych parametrów. Jak można zauważyć, zwiększanie liczby parametrów zmniejsza wartość kryterium (zwiększa jakość rekonstrukcji), przy czym w pobliżu wartości  $k_\zeta = 8$  zależność się ustala i dalsze zwiększanie liczby parametrów nie powoduje już istotnego wzrostu jakości rekonstrukcji. Potwierdza to zasadność wykorzystania wielu parametrów w rekonstrukcji tomograficznej.



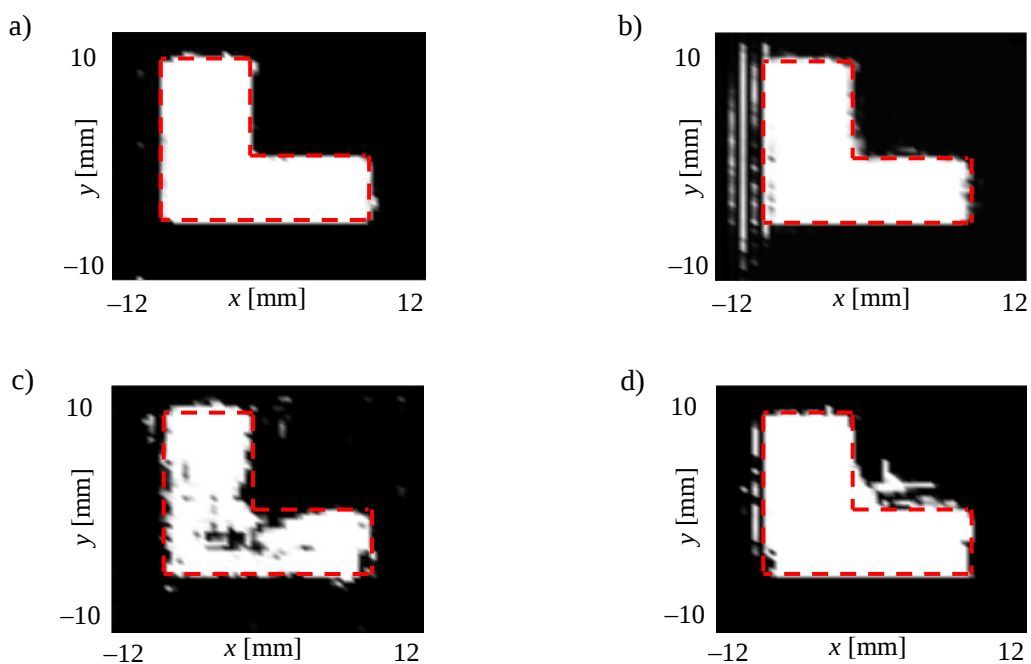
Ryc. 7.22. Kryterium oceny wytrenowanego modelu neuronowego w zależności od liczby parametrów wykorzystywanych do trenowania

Źródło: na podstawie [79].

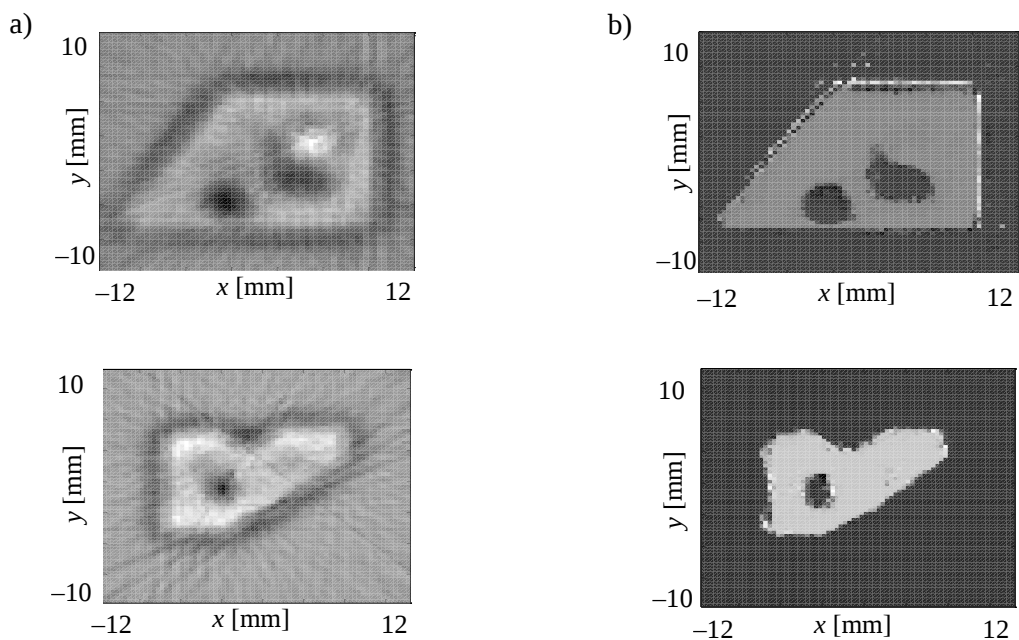
Bardziej szczegółowo zależność unormowanego kryterium oceny wytrenowanego modelu neuronowego  $K_{RN}$  od liczby parametrów oraz wielkości sieci neuronowej i okna przesunowego przedstawiono na ryc. 7.23. Zgodnie z oczekiwaniami zastosowanie dużych rozmiarów okna przesunowego, wielkości sieci neuronowej i liczby parametrów umożliwia uzyskanie najlepszego wyniku. Przykładowe wyniki rekonstrukcji (zarówno poprawne, jak i niepoprawne) dla fantomu typu „L” przedstawiono na ryc. 7.24. Przykładowe wyniki rekonstrukcji dla fantomów zawierających otwór i defekt sztuczny przedstawiono na ryc. 7.25. Jak można zauważyć, w rezultacie zastosowanego algorytmu zarówno kontury obiektów, jak i defektów w nich występujących są wyraźne (charakteryzujące się mniejszym rozmyciem niż w przypadku zastosowania jedynie odwrotnej transformacji Radona), co umożliwia ich dokładne wymiarowanie.



Ryc. 7.23. Zależność unormowanego kryterium oceny wytrenowanego modelu neuronowego  $K_{RN}$  od liczby parametrów oraz wielkości sieci neuronowej i okna przesunowego



Ryc. 7.24. Przykładowe wyniki rekonstrukcji dla fantomu typu „L”: a) poprawna rekonstrukcja, b) niepoprawny wynik rekonstrukcji – model neuronowy wzmocnił wpływ parametrów  $\zeta$  zawierających informację wysokoczęstotliwościową, c) niepoprawny wynik rekonstrukcji – występują błędne wskazania defektów, d) niepoprawny wynik rekonstrukcji – zmieniona wymiarowość obiektu; linią przerywaną zaznaczono rzeczywisty profil badanego obiektu



Ryc. 7.25. Przykładowe wyniki rekonstrukcji dla fantomów z otworami i defektem sztucznym: a) za pomocą transformacji Radona, b) przy użyciu zaproponowanej procedury



## 8. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wiele zagadnień dotyczących detekcji i identyfikacji defektów występujących w strukturach dielektrycznych za pomocą inspekcji terahercowej ze wzbudzeniem impulsowym (TDS). Na wstępie przedstawiono podstawowe informacje na temat metody terahercowej, jej zasadę działania, właściwości oraz zastosowania. Przybliżono również tematykę polimerowych materiałów kompozytowych, metod ich nieniszczącego badania oraz defektów w nich występujących. Następnie przeanalizowano różne metody detekcji i identyfikacji niejednorodności materiałów dielektrycznych. Zaproponowano wiele nowych rozwiązań i modyfikacji już istniejących, pozwalających na pewniejsze i bardziej niezawodne wykrywanie defektów w strukturach dielektrycznych, a także na rozróżnianie i automatyczną identyfikację różnych rodzajów występujących niejednorodności i stanów makroskopowej struktury wewnętrznej badanych materiałów. W końcowej części przedstawiono możliwości terahercowej tomografii z wymuszeniem impulsowym oraz algorytm rekonstrukcji umożliwiający wykorzystanie wielu parametrów uzyskiwanych w trakcie inspekcji tomograficznej.

Wyniki badań przeprowadzonych przez autora w ramach niniejszej monografii pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Metoda terahercowa ze wzbudzeniem impulsowym, mimo że wciąż jest we wstępnej fazie rozwoju, doskonale nadaje się do inspekcji kompozytów polimerowych. Ze względu na niskie moce nadawanych impulsów jej zastosowanie jest ograniczone w przypadku materiałów stratnych lub grubych. W ramach dalszego rozwoju elektroniki półprzewodnikowej i optoelektroniki wada ta może zostać wyeliminowana lub jej wpływ ograniczony.
2. Zastosowanie przekształceń czasowo-częstotliwościowych i analiza sygnałów terahercowych w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (zob. rozdz. 4.2) poprawiają wyniki inspekcji materiałów dielektrycznych, w tym szeroko stosowanych w różnych gałęziach przemysłu kompozytów polimerowych.
3. Zaproponowana metoda syntetycznej apertury skupiającej, zmodyfikowana przez wprowadzenie przekształcenia czasowo-częstotliwościowego (zob. rozdz. 4.3), umożliwia uzyskanie większych wartości stosunku sygnału do szumu, co jest szczególnie istotne ze względu na wykrywalność defektów oraz ich rozróżnialność w procesie automatycznej identyfikacji.
4. Kryterium określenia skupienia frontu falowego, zaproponowane w metodzie *time reversal* (zob. rozdz. 4.4), ma wyraźne ekstremum, co pozwala na zwiększenie precyzji określania czasu skupienia i pozycji wykrywanego defektu.
5. Identyfikacja neuronowa z wykorzystaniem cech wyznaczonych w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (zob. rozdz. 5.2) umożliwia uzyskanie lepszych efektów niż wykorzystanie osobno cech w dziedzinie czasu i osobno w dziedzinie częstotliwości.
6. W przypadku braku informacji o rodzajach niejednorodności możliwe jest ich wykrycie i pogrupowanie ze względu na podobieństwo cech sygnałów za pomocą neuronowych struktur samoorganizujących się (SOM). Analiza taka (przedstawiona w rozdz. 5.3) może być bardzo przydatna, gdy badany materiał jest nowy, gdy nie przeprowadzono wcześniej

pomiarów testowych / kalibrujących lub gdy nie jest dostępna pomiarowa baza danych dla różnych typów defektów.

7. Metoda inspekcji terahercowej ze wzbudzeniem impulsowym może być wykorzystywana w różnych gałęziach przemysłu. Poza wykrywaniem defektów w materiałach można ją wykorzystać do wykrywania błędów połączeń spawanych i klejonych oraz do monitorowania procesu nasiąkania i suszenia materiałów dielektrycznych (w tym drewna), co przedstawiono w rozdz. 6.
8. Podczas badań nad terahercową tomografią komputerową ze wzbudzeniem impulsowym (przedstawionych w rozdz. 7) zauważono różną zawartość informacji dotyczących struktury wewnętrznej badanego obiektu dielektrycznego, wynikającą z zastosowania różnych parametrów odbieranego sygnału. Informacje te mogą się uzupełniać, w związku z czym zaproponowano algorytm rekonstrukcji wykorzystujący fuzję danych uzyskanych z wybranego zestawu parametrów (rozdz. 7.3.2). Algorytm umożliwił poprawne odwzorowanie struktury wewnętrznej badanego obiektu wraz z występującymi defektami.

Ze względu na potencjał metody terahercowej ze wzbudzeniem impulsowym oraz wczesne stadium jej rozwoju prace nad jej ulepszeniem powinny być kontynuowane.

## Literatura

1. Ahi K., Anwar M.: Developing terahertz imaging equation and enhancement of the resolution of terahertz images using deconvolution, *SPIE Proceedings – Terahertz Physics, Devices, and Systems X: Advanced Applications in Industry and Defense*, 2016, vol. 9856, DOI:10.1117/12.2228680.
2. Alavudeen S., Krishnamurthy V., Balasubramanian K.: Technique for imaging using virtual array of sources (TIVAS), *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2011, vol. 30, no. 1, s. 1687–1694.
3. Aldrin C., Coughlin C., Forsyth D., Welter J.: Progress on the development of automated data analysis algorithms and software for ultrasonic inspection of composites, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2014, vol. 1581, no. 1, s. 1920–1927.
4. Anastasi R.F.: Investigation of fiber waviness in a thick glass composite beam using THz NDE, *SPIE Proceedings, Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security*, 2008, vol. 6934, DOI:10.1117/12.776765.
5. Bahr A.J.: Experimental techniques in microwave NDE, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1995, vol. 14, s. 593–600.
6. Bełzowski A., Stasińko J., Ziółkowski B., Kamińska A.: Niektóre kryteria akceptacji defektów w kompozytach na przykładzie laminatu ciętego strumieniem wody, *Kompozyty*, 2004, vol. 4, no. 12, s. 389–395.
7. Benitez-Perez H., Medina-Gomez L.: Diverse time-frequency distributions integrated to an ART2 network for non-destructive testing, *Journal of Applied Research and Technology*, 2008, vol. 6, no. 1, s. 14–32.
8. Boashash B., Azemi G., Khan N.A.: Principles of time-frequency feature extraction for change detection in non-stationary signals: Applications to newborn EEG abnormality detection, *Pattern Recognition*, 2015, vol. 48, s. 616–627.
9. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2015.
10. Brown E.R., Lee A.W.M., Navi B.S., Bjarnason J.E.: Characterization of a planar self-complementary square-spiral antenna in the THz region, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, vol. 48, no. 3, s. 524–529.
11. Brundermann E., Hubers H.W., Kimmit M.F.: *Terahertz techniques*, Berlin, Springer-Verlag, 2012.
12. Buethe I., Torres-Arredondo M.A., Mujica L.E., Rodellar J., Fritzen C.P.: Damage detection in piping systems using pattern recognition techniques, in: *Proceedings of 6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Dresden, Germany, July 3–6, 2012, s. 1–8, <http://www.ndt.net/article/ewshm2012/papers/fr1d3.pdf>, dostęp: 7.02.2018.
13. Campbell F.C.: *Structural composite materials*, Ohio, ASM International, 2010.
14. Cassereau D., Fink M.: Time-reversal of ultrasonic fields. Part III. Theory of the closed time-reversal cavity, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1992, vol. 39, no. 5, s. 579–592.
15. Chady T., Lopato P.: Flaws identification using an approximation function and artificial neural networks, *IEEE Transaction on Magnetics*, 2007, vol. 43, no. 4, s. 1769–1772.
16. Chady T., Łopato P., Gorący K., Pilawka R.: *Przeprowadzenie badań niszczących próbek, weryfikacja wyników identyfikacji defektów, ocena przydatności zaproponowanych układów pomiarowych i algorytmów. Sprawozdanie wewnętrzne z grantu MNiSW nr N510 538039*, Katedra

- Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki, ZUT w Szczecinie 2013 [materiały niepublikowane].
17. Chady T., Łopato P., Szymanik B.: Terahertz and thermal testing of glass–fiber reinforced composites with impact damages, *Journal of Sensors*, 2012, vol. 2012, s. 1–14, DOI:10.1155/2012/954867.
  18. Chady T.: *Wieloczęstotliwościowe algorytmy identyfikacji w układach defektoskopii wiroprowadzowej*, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2003.
  19. Cheville A.: Terahertz time-domain spectroscopy with photoconductive antennas, *Terahertz spectroscopy. Principles and applications*, red. Dexheimer S.L., Boca Raton, USA, Taylor&Francis CRC Press, 2008, s. 1–39.
  20. Chiu C.-C., Huang C.-H.: Time domain inverse scattering for a buried homogeneous cylinder in a slab medium using NU–SSGA, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, vol. 40, no. 3, s. 195–204.
  21. Choi H., Son J.-H.: Terahertz imaging and tomography techniques, in: *Terahertz Biomedical Science and Technology*, red. Son J.-H., Boca Raton, USA, CRC Press, 2014, s. 47–66.
  22. Cohen L.: Time-frequency distributions. A review, *Proceedings of the IEEE*, 1989, vol. 77, no. 7, s. 941–981.
  23. Collin R.E.: *Field theory of guided waves*, New York, Wiley–IEEE Press, 1990.
  24. Davis M., Tomblin J.: *Best practice in adhesive–bonded structures and repairs*, DOT/FAA/AR–TN06/57 Technical note of U.S. Department of Transportation, Springfield, Virginia, USA, Federal Aviation Administration, 2007.
  25. Deibel J., Escarra M., Mittleman D.: Photoconductive terahertz antenna with radial symmetry, *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no. 5, s. 226–228.
  26. Deibel J.A., Mittleman D.M.: Designing and simulating THz wire waveguides using FEM modeling, *RF Design Magazine*, 2006, no. 8, s. 36–43.
  27. Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W.: Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, s. 1674–1683.
  28. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G.: *Pattern classification*, New York, John Wiley & Sons, 2001.
  29. Ferguson B., Wang S., Gray D., Abbott D., Zhang X.C.: Towards functional 3D T-ray imaging, *Physics in Medicine and Biology*, 2002, no. 47, s. 3735–3742.
  30. Ferguson B., Wang S., Gray D., Abbott D., Zhang X.: Identification of biological tissue using chirped probe THz imaging, *Microelectronics Journal*, 2002, vol. 33, s. 1043–1051.
  31. Fratzscher D., Beckmann J., Chranowski L.S. von, Ewert U.: Computed THz – tomography, in: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, April 16–20, 2012, Bad Breisig, Germany, NDT.net, [http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/291\\_wcndt-final00291.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/291_wcndt-final00291.pdf), dostęp: 10.02.2018.
  32. Garbaruk M., Litwińczuk M.: Krótkoczasowa transformata Fouriera impulsów ultraszerokopasmowych UWB, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, R. 91, nr 1, s. 95–98.
  33. Gonzalez, R.C., Woods R.E., Eddins S.L.: *Digital image processing using MATLAB*, New Jersey, Prentice Hall, 2003.
  34. Griffiths D.J.: *Podstawy elektrodynamiki*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005.
  35. Grimberg R., Savin A., Steigmann R., Serghiac B., Bruma A.: Electromagnetic nondestructive evaluation using metamaterials, *Insight*, 2011, no. 53, s. 132–137.
  36. Gros X.E.: *NDT Data Fusion*, London, John Wiley & Sons, 1997.
  37. Gruner G.: *Millimeter and submillimeter wave spectroscopy of solids*, Berlin, Springer-Verlag, 1998.

38. Guillet J.P., Recur B., Frederique L., Bousquet B., Canioni L., Manek-Honninger I., Desbarats P., Mounaix P.: Review of terahertz tomography techniques, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2014, vol. 35, no. 4, s. 382–411.
39. Hale J.: Boeing 787 from the ground up, *Aero Magazine*, 2006, vol. 24, no. 4, s. 17–24.
40. Hejase J.A., Paladhi P.R. and Chahal P.: Terahertz characterization of dielectric substrates for component design and nondestructive evaluation of packages, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2011, vol. 1, no. 11, s. 1685–1694.
41. Hejase J.A., Rothwell E.J., Chahal P.: A multiple angle material parameter extraction method for stacked layers of dielectrics using THz time domain spectroscopy, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2012, vol. 1430, no. 1, s. 581–588.
42. Hejase J.A., Rothwell E.J., Chahal P.: Self-calibrating technique for terahertz time-domain material parameter extraction, *Journal of Optical Society of America*, 2011, vol. 28, no. 12, s. 2561–2567.
43. Heremans R., Vandewal M., Acheroy M.: Space-time versus frequency domain signal processing for 3D THz imaging, in: *IEEE Sensors Conference*, Christchurch, New Zealand, October 25–28, 2009, [b.m.], IEEE, s. 739–744, DOI:10.1109/ICSENS.2009.5398545.
44. Hinders M., Miller C.: Intelligent feature selection techniques for pattern classification of lamb wave signals, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2014, vol. 1581, no. 1, s. 294–301.
45. Hohne Ch., Kolkoori S., Rahman M., Boehm R., Prager J.: SAFT Imaging of transverse cracks in austenitic and dissimilar welds, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, vol. 32, s. 51–66.
46. Huke P., Focke O., Falldorf C., Kopylow C., Bergmann R.B.: Contactless defect detection using optical methods for non destructive testing, in: *Materials of 2nd International Symposium on NDT in Aerospace*, Hamburg, Germany, 2010, Hamburg, Bad Breisig Germany, NDT.net, s. 1–8, <http://www.ndt.net/article/aero2010/papers/tu1a1.pdf>, dostę: 10.02.2018.
47. Huke P., Klattenhoff R., Kopylow C., Bergmann R.B.: Novel trends in optical non-destructive testing methods, *Journal of the European Optical Society – Rapid Publications*. 2013, vol. 8, no.13043, s. 1–7.
48. Ibrahim M.E.: Nondestructive evaluation of thick-section composites and sandwich structures: A review, *Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 64, s. 36–48.
49. Iscan Z., Kurnaz M.N., Dokur Z., Olmez T.: Ultrasound image segmentation by using wavelet transform and self-organizing neural network, *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, 2006, vol. 10, no. 8–9, s. 183–191.
50. Islam A., Akhter S., Mursalin T.: Automated textile defect recognition system using computer vision and artificial neural networks, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, vol. 13, s.1–6.
51. Jain S.K., Kurhekar S.P.: Water absorption and desorption characteristics of wood, *International Journal of Agricultural Engineering*, 2015, vol. 8, no. 2, s. 244–247, DOI:10.15740/HAS/IJAE/8.2/244–247.
52. Jarzab P., Nowak K., Walczakowski M., Augustyn Ł., Mikulics M., Wilk R., Witkowski J., Pliński E.F.: Selected polymers on CW and pulsed THz investigations, *Opto-Electronics Review*, 2012, vol. 20, no. 4, s. 335–339, ISSN 1230–3402.
53. Jin Y.S., Kim G.J., Jeon S.G.: Terahertz dielectric properties of polymers, *Journal of the Korean Physical Society*, 2006, vol. 49, no. 2, s. 513–517.
54. Johnson M., Gudmundson P.: Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates, *Composites Science and Technology*, 2000, no. 60, s. 2803–2818.

55. Kak A.C., Slaney M.: *Principles of computerized tomographic imaging*, New York, IEEE Press, 1988.
56. Kapadia A.: *Non destructive testing of composite materials*, Great Abington, Cambridge, UK, TWI Ltd., 2014 [opracowanie przemysłowe].
57. Kesharaju M., Nagarajah R.: Feature extraction for ultrasonic sensor based defect detection in ceramic components, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2014, vol. 1581, no. 1, s. 1933–1940.
58. Kim K.S., Seo J.H., Kang J.U., Song C.G.: An enhanced algorithm for knee joint sound classification using feature extraction based on time-frequency analysis, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2009, vol. 94, s. 198–206.
59. Kohler A., Ohrnberger M., Riggelsen C., Scherbaum F.: Unsupervised feature selection for pattern search in seismic time series, *JMLR: Workshop and Conference Proceedings*, 2008, vol. 4, s. 106–121.
60. Kohonen T.: *Self-organizing maps*, Berlin, Springer-Verlag, 1995.
61. Kohonen T.: The self-organizing map, *Proceedings of IEEE*, 1990, vol. 78, no. 9, s. 1464–1480, DOI:10.1109/5.58325.
62. Kosmas P., Rappaport C.: Time reversal with the FDTD method for microwave breast cancer detection, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, vol. 53, no. 7, s. 2317–2323.
63. Kotsiantis S.B.: Supervised machine learning: A review of classification techniques, *Informati-ca*, 2007, vol. 31, s. 249–268.
64. Kruschwitz S., Bischof E., Taffe A.: Multi-sensor investigation of concrete moisture using ultrasound, radar and microwave, in: *International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, September 15–17, 2015, Berlin, Bad Breisig Germany, NDT.net, <http://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=18322>, dostęp: 12.07.2017.
65. Krzysik F.: Wpływ wilgoci i wody na podstawowe własności drewna, *Ochrona Zabytków*, 1961, R. 14, nr 1–2, s. 50–65.
66. Kurzydłowski K., Boczkowska A., Schmidt J., Konopka K., Spychalski W.: Monitorowanie uszkodzeń w kompozytach metodami nieniszczącymi, *Polimery*, 2005, vol. 50, no. 4, s. 255–261.
67. Lee Y.-S.: *Principles of Terahertz Science and Technology*, New York, Springer, 2009.
68. Liu D., Kang G., Li L., Chen Y., Vasudevan S., Joines W., Liu Q. H., Krolik J., Carin L.: Electromagnetic time-reversal imaging of a target in a cluttered environment, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, vol. 53, no. 9, s. 3058–3066.
69. Löffler T., Siebert K., Czasch S., Bauer T., Roskos H.: Visualization and classification in biomedical terahertz pulsed imaging, *Physics in Medicine and Biology*, 2002, vol. 47, s. 3847–3852.
70. Łopato P.: Identification of defects in composite materials using terahertz inspection and self-organizing maps, in: *Electromagnetic nondestructive evaluation*, red. K. Capova, L. Udpa, L. Janousek, B.P.C. Rao, Amsterdam, IOS Press, 2014, vol. 17, s. 339–346, DOI:10.3233/978-1-61499-407-7-339.
71. Łopato P., Chady T.: Time reversal pulsed terahertz inspection of dielectric structures, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, vol. 39, no. 1–4, s. 427–433.
72. Łopato P.: Automatic defect recognition for pulsed terahertz inspection of basalt fiber reinforced composites, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2016, vol. 35, no. 4, s. 1346–1359.
73. Łopato P., Chady T.: Energy and entropy based signal processing for terahertz inspection of homogeneous and composite materials adhesive joints, *Materials Science Forum*, 2012, vol. 721, s. 132–137, DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.721.132.

74. Łopato P., Chady T., Gorący K.: Image and signal processing algorithms for THz imaging of composite materials, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2010, vol. 1211, no. 1, s. 766–773.
75. Łopato P., Chady T.: Pulsed terahertz inspection of non-conducting sandwich composites, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2013, vol. 1511, no. 1, s. 659–666.
76. Łopato P., Chady T.: Terahertz detection and identification of defects in layered polymer composites and composite coatings, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2013, vol. 28, no. 1, s. 28–43.
77. Łopato P.: Double-sided terahertz imaging of multilayered glass fiber-reinforced polymer, *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 7 (661), DOI:10.3390/app7070661.
78. Łopato P.: *Modelowanie wybranych uproszczonych układów defektoskopii elektromagnetycznej w zakresie częstotliwości THz – przegląd literatury i implementacja modelu FDTD układu do badań THz. Sprawozdanie wewnętrzne z grantu MNiSW nr N510 538039*, Szczecin, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2013 [materiały niepublikowane].
79. Łopato P.: Pulsed excitation terahertz tomography – multiparametric approach, *Open Physics*, 2018 (w druku).
80. Maladegue X.: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, New York, John Wiley and Sons, 2001.
81. Malinowski P., Pałka N., Opoka S., Wandowski T., Ostachowicz W.: Moisture detection in composites by terahertz spectroscopy, *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 628, no. 012100, s. 1–8, DOI:10.1088/1742-6596/628/1/012100.
82. Melapudi V.R., Udpa L., Udpa S., Winfree W.P.: Ray-tracing model for terahertz imaging on sofi inspection, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006, vol. 820, no. 1, s. 477–483.
83. Mittelman D.M., Gupta M., Neelamani R., Baraniuk R.G., Rudd J.V., Koch M.: Recent advances in terahertz imaging, *Applied Physics B, Lasers and Optics*, 1999, vol. 68, no. 6, s. 1085–1094.
84. Molchanov P., Astola J., Egiazarian K., Totsky A.: Classification of ground moving radar targets by using joint time-frequency analysis, in: *IEEE Radar Conference*, Atlanta, USA, May 7–11, 2012, IEEE Atlanta Section, s. 1–6, DOI: 10.1109/RADAR.2012.6212166.
85. Morawski T., Gwarek W.: *Teoria pola elektromagnetycznego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1985.
86. Mukherjee S., Haq M., Udpa L.: Time reversal microwave methods for detecting disbonds in adhesively bonded metal-composite structures, in: *Proceedings of the American Society for Composites – 30th Technical Conference*, Lancaster, USA, September 28–30, 2015, [b.m.], DEStech Publications, ISBN 978-1-60595-225-3.
87. Mukherjee S., Tamburrino A., Udpa L., Udpa S.: NDE of composite structures using microwave time reversal imaging, *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1706, no. 1, s. 100002–1–100002-10, DOI:10.1063/1.4940562.
88. Nacereddine N., Tridi M.: Computer-aided shape analysis and classification of weld defects in industrial radiography based invariant attributes and neural networks, in: *Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Zagreb, Croatia, September 15–17, 2005, [b.m.], IEEE, s. 88–93, DOI:10.1109/ISPA.2005.195389.
89. Naqvi I.H., El Zein G., Lerosey G., Rosny J., Besnier P., Tourin A., Fink M.: Time reversal UWB communication: Experimental study for high data rates in dense multipath propagation channels, in: *The Mosharaka International Conference on Communications, Propagation and Electronics – CCS: Communications Circuits and Systems*, Amman, Jordan, February 6–8, 2009, s. 148–151, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00448869/document>, dostę: 10.02.2018.

90. Nowak K., Pliński E.F., Karolewicz B., Jarzab P., Plińska S., Fuglewicz B., Walczakowski M., Augustyn Ł., Sterczewski Ł., Grzelczak M., Hruszowiec M., Beziuk G., Mikulics M., Pałka N., Szustakowski M.: Selected aspects of terahertz spectroscopy in pharmaceutical sciences, *Acta Poloniae Pharmaceutica – Drug Research*, 2015, vol. 72, no. 5, s. 851–866.
91. Oja E., Kaski S. (red.): *Kohonen Maps*, Amsterdam, Elsevier, 1999.
92. O'Neill J.C., Flandrin P., Williams W.J.: On the existence of discrete Wigner distributions, *IEEE Signal Processing Letters*, 1999, vol. 6, no. 12, s. 304–306.
93. Osowski S., Nghia D.: Fourier and wavelet descriptors for shape recognition using neural networks – a comparative study, *Pattern Recognition*, 2002, vol. 35, s. 1949–1957.
94. Özdemir C.: *Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2012.
95. Pałka N., Miedzińska D.: Detailed non-destructive evaluation of UHMWPE composites in the terahertz range, *Optical and Quantum Electronics*, 2014, vol. 46, no. 4, s. 515–525.
96. Pantelakis S.G., Katsiropoulos C.V., Tserpes K.I., Felgeyrolles T.: Effect of water absorption on strength of the aeronautical composite material fiberdux HTA/6376, *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 417–418, s. 457–460, DOI:10.4028/www.scientific.net /KEM.417–418.457.
97. Papandeou-Suppappola A. (red.): *Applications in time-frequency signal processing*, Boca Raton, CRC Press, 2003.
98. Piesewicz R., Kleine-Ostmann T., Krumbholz N., Mittelman D., Koch M., Kurner T.: Terahertz characterization of building materials, *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no. 18, s. 1002–1004.
99. Pliński E.F.: *Światło czy fale? Wybrane aspekty techniki terahercowej od elektroniki do biomedycyny*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012, ISBN 978-83-7493-665-1.
100. Pomponi E., Vinogradov A.: Real-time acoustic emission classification: New evolutionary approach, in: *Proceedings of 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission*, Granada, September 12–15, 2012, s. 1–8, [http://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/39\\_Pomponi\\_Rev1.pdf](http://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/39_Pomponi_Rev1.pdf), dostęp: 10.02.2018.
101. Prager J., Kitzke J., Achero C., Brackrock D., Brekow G., Kreutzbruck M.: SAFT and TOFD – A comparative study of two defect sizing techniques on a reactor pressure vessel mock-up, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, vol. 32, no. 1, s. 1–13.
102. Probst T., Sommer S., Soltani A., Kraus E., Baudrit B., Town G.E., Koch M.: Monitoring the polymerization of two-component epoxy adhesives using a terahertz time domain reflection system, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, vol. 36, no. 6, s. 569–577.
103. Qidwai U., Costa A.H., Chen C.H.: Detection and classification of defects in ultrasonic NDE signals using time-frequency representations, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2000, vol. 509, no. 1, s. 717–724.
104. Qiu R.C., Zhou C., Guo N., Zhang J. Q.: Time reversal with MISO for ultra-wideband communications: experimental results, in: *Proceedings of 2006 IEEE Radio and Wireless Symposium*, San Diego, USA, October 17–19, 2006, [b.m.], IEEE, s. 499–502, DOI:10.1109/RWS.2006.1615203.
105. Quinn W., Angove P., Buckley J., Barrett J., Kelly G.: Design and performance analysis of an embedded wireless sensor for monitoring concrete curing and structural health, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2011, vol. 1, no. 1–2, s. 47–59, DOI:10.1007/s13349–011–0005–9.
106. Rak R.J., Majkowski A.: Czasowo-częstotliwościowa analiza sygnałów, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2004, vol. 80, no. 5, s. 515–520.
107. Ranachowski Z.: Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych, *Drogi i Mosty*, 2012, nr 2, s. 65–87.
108. Ray C., Sasmal K.: A new approach for clustering of x-ray images, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2010, vol. 7, no. 4(8), s. 22–26.

109. Reyes-Rodriguez S., Lei N., McGough R.J., Udpa S., Udpa L., Kim J.: Model based study of time reversal imaging in microwave NDE, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2010, vol. 1211, no. 1, s. 750–757.
110. Rostami A., Rasooli H., Baghban H.: *Terahertz technology. Fundamentals and applications*, Berlin, Springer-Verlag, 2011, ISBN 978–3–642–15792–9.
111. Roux J., Garet F., Coutaz J.: Principles and applications of THz time domain spectroscopy, in: *Physics and applications of terahertz radiation*, red. M. Perenzoni, J. Paul, Dordrecht, Springer, 2014, s. 203–231.
112. Rzepecka M.A., Hamid M.A.K., Soliman A.H.: Monitoring of concrete curing process by microwave terminal measurements, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 1972, vol. IECI–19, no. 4, s. 120–125, DOI:10.1109/TIECI.1972.351126.
113. Saeedkia D. (red.): *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications*, New Delhi, Woodhead Publishing Limited, 2013.
114. Salem B., Morris D., Aimez V., Beerens J., Beauvais J., Houde D.: Pulsed photoconductive antenna sources made on ion-implanted GaAs substrates, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, vol. 17, no. 46, s. 7327–7333.
115. Sankowski D., Sikora J. (red.): *Electrical capacitance tomography – Theoretical basis and applications*, Warszawa, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, 2010.
116. Santamarina, J., Fratta D.: *Discrete signals and inverse problems: An introduction for engineers and scientists*, Chichester, John Wiley & Sons, 2005.
117. Sarin C.R., Manu R.K.: Growing self organized maps for radiographic non destructive testing of metallic products, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2012, vol. 1, no. 6, s. 311–317.
118. Sejdic E., Djurovic I., Jiang J.: Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances, *Digital Signal Processing*, 2009, vol. 19, no. 1, s. 153–183.
119. Seyedtabaai S.: Performance evaluation of neural network based pulse–echo weld defect classifiers, *Measurement Science Review*, 2012, vol. 12, no. 5, s. 168–174.
120. Shen Q., Omar M., Dongri S.: Ultrasonic NDE techniques for impact damage inspection on CFRP laminates, *Journal of Materials Science Research*, 2012, vol. 1, no. 1, s. 1–16.
121. Shull P.J. (red.): *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*, New York, Marcel Dekker Inc., 2002.
122. Sikora R., Chady T., Baniukiewicz P., Łopato P., Napierała L., Pietruszewicz T., Psuj G., Piekarczyk B.: Intelligent system for radiogram analysis, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2011, vol. 1335, no. 1, s. 525–532.
123. Sikora R., Chady T., Baniukiewicz P., Piekarczyk B., Napierała L., Pietruszewicz T., Łopato P., Psuj G.: *Sprawozdanie końcowe z projektu rozwojowego nr N R01 0037 06/2009. Inteligentny system analizy radiogramów*, Szczecin, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie 2012 [materiały niepublikowane].
124. Sikora R., Chady T., Łopato P., Szymanik B., Baniukiewicz P., Psuj G., Piekarczyk B., Gorący K.: *Opracowanie algorytmów oceny jakości połączeń materiałów kompozytowych, Sprawozdanie wewnętrzne z wykonania projektu rozwojowego nr N R01 0037 06/2000*, Szczecin, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2011 [materiały niepublikowane].
125. Sikora R., *Teoria pola elektromagnetycznego*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1977.
126. Soltani A., Probst T., Sommer S., Koch M.: Curing monitoring of two-component epoxy adhesives at THz frequencies, in: *40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Te-*

- rahertz waves (IRMMW–THz), Hong Kong, August 23–28, 2015, [b.m.], IEEE, s. 1–2. DOI:10.1109/IRMMW–THz.2015.7327394.
127. Sommer, S., Probst, T., Kraus, E., Baudrit B., Town G.E., Koch M.: Cure monitoring of two-component epoxy adhesives by terahertz time-domain spectroscopy, *Polymer Science Series B*, 2016, vol. 58, no. 6, s. 769–776, DOI:10.1134/ S1560090416060154.
  128. Spies M., Rieder H., Dillhofer A.: On-site evaluation of large components using SAFT and TOFD ultrasonic imaging, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2011, vol. 1335, no. 1, s. 1394–1401.
  129. Steiglitz K., McBride L.E.: A technique for the identification of linear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1965, vol. 10, no. 4, s. 461–464.
  130. Stepiński T.: An implementation of synthetic aperture focusing technique in frequency domain, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, vol. 54, no. 7, s. 1399–1408.
  131. Sullivan D.M., *Electromagnetic simulation using the FDTD method*, New York, IEEE Press, 2000.
  132. Szóstka J.: *Fale i anteny*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001.
  133. Taflov A., Hagness S.C., *Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method*, Boston, Artech House, 2000.
  134. Tani M., Herrmann M., Sakai K.: Generation and detection of terahertz pulsed radiation with photoconductive antennas and its application to imaging, *Measurement Science and Technology*, 2002, no. 13, s. 1739–1745.
  135. Tani M., Hirota Y., Que C., Tanaka S., Hattori R., Yamaguchi M., Nishizawa S., Hangyo M.: Novel terahertz photoconductive antennas, *International Journal of Infrared and Milimeter Waves*, 2006, vol. 27, no. 4, s. 531–546.
  136. The American Society for Nondestructive Testing, <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT>, dostęp: 9.01.2015.
  137. Thirumalai M., Anup Kumar P., Jayagopi K., Prakash V., Anandbabu C., Kalyanasundaram P., Vaidyanathan G.: Vibration diagnostics as NDT tool for condition monitoring in power plants, in: *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, Tiruchirappalli, India, December 10–12, 2009, Bad Breisig, Germany, NDT.net, s. 50–55, <http://www.ndt.net/article/nde-india2009/pdf/5-D-4.pdf>, dostęp: 10.02.2018.
  138. Upadhyaya P., Garg M., Kumar V., Nema A.K.: The effect of water absorption on mechanical properties of wood flour/wheat husk polypropylene hybrid composites, *Materials Sciences and Applications*, 2012, vol. 3, no. 5, s. 317–325, DOI:10.4236/msa.2012.35047.
  139. Vaara P., Leinonen J.: Technology survey on NDT of carbon-fiber composites, *Publications Kemi-Tornio University of Applied Sciences*, Ser. B, 2012, no. 8, [http://www3.token.fi/kirjasto/tiedostot/Vaara\\_Leinonen\\_B\\_8\\_2012.pdf](http://www3.token.fi/kirjasto/tiedostot/Vaara_Leinonen_B_8_2012.pdf), dostęp: 9.02.2018.
  140. Vilar R., Zapata J., Ruiz R.: An automatic system of classification of weld defects in radiographic images, *Nondestructive Testing and Evaluation International*, 2009, vol. 42, no. 5, s. 467–476.
  141. Walker J.S.: *A primer on wavelets and their scientific applications*, Boca Raton, Chapman & Hall/CRC, 1999.
  142. Wang S., Zhang X.C.: Pulsed terahertz tomography, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, vol. 37, no. 4, s. R1–R36.
  143. Wang, G., Liao, T.W.: Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images, *Nondestructive Testing and Evaluation International*, 2002, vol. 35, no. 8, s. 519–528.
  144. Webb A.R.: *Statistical pattern recognition*, New York, Oxford University Press Inc., 1999, ISBN 0340741643.

145. Xu Z.: A kind of potential practical sensors of metamaterial in electromagnetic flaw nondestructive testing, *Engineering*, 2011, no. 3, s. 750–754.
146. Yakovlev E.V., Zaytsev K.I., Dolganova I.N., Yurchenko S.O.: Non-destructive evaluation of polymer composite materials at the manufacturing stage using terahertz pulsed spectroscopy, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, vol. 5, no. 5, s. 810–816, DOI:10.1109/TTHZ.2015.2460671.
147. Yashchyshyn Y., Godziszewski K.: A new method for dielectric characterization in sub-THz frequency range, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, vol. 8, no. 1, DOI:10.1109/TTHZ.2017.2771309.
148. Yee K.S.: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, vol. 14, no. 3, s. 302–307.
149. Zeitler J.A., Shen Y.: Industrial applications of terahertz imaging, in: *Terahertz spectroscopy and imaging*, red. K.E. Peiponen, A. Zeitler, M. Kuwata-Gonokami, Springer Series in Optical Sciences, vol. 171, Berlin, Springer, 2012, s. 451–489.
150. Zhang J., Hong Y., Braunstein S., Shore K.: Terahertz pulse generation and detection with LT-GaAs photoconductive antenna, *IEE Proceedings – Optoelectronics*, 2004, vol. 151, no. 2, s. 98–101.
151. Zhang X.-C., Xu J.: *Introduction to THz wave photonics*, New York, Springer, 2010.
152. Zhang Z., Buma T.: Adaptive terahertz imaging using a virtual transceiver and coherence weighting, *Optics Express*, 2009, vol. 17, no. 20, s. 17812–17817.
153. Zhang Z., Richardson M.: Visualization of barely visible impact damage in polymer matrix composites using an optical deformation and strain measurement system (ODSMS), *Composites*, 2005, vol. 36, no. 8, s. 1073–1078.
154. Zhu Q., Wang Y., Shen G.: Research and comparison of time–frequency techniques for nonstationary signals, *Journal of Computers*, 2012, vol. 7, no. 4, s. 954–958.
155. Zimdars D., Fichter G., Chemovski A.: Time domain terahertz computed axial tomography for nondestructive evaluation, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2009, vol. 1096, no. 1, s. 426–433.
156. Zimdars D., Valdmanis J.A., White J.S., Stuk G., Williamson S., Winfree W.P., Madaras E.I.: Technology and applications of terahertz imaging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005, vol. 760, no. 1, s. 570–577.



## Summary

### **Detection and identification of defects in dielectric and composite structures using terahertz electromagnetic waves**

Non-destructive testing is (in terms of technical structures safety) an extremely important issue related to various industrial branches including, but not limited to the construction, aviation, shipbuilding and machinery industries. This kind of testing allows to determine the properties of structures and to detect the conditions, which create a threat of damage or destruction of examined objects. The study presents the terahertz non-destructive testing technique with pulsed excitation (time domain spectroscopy, TDS) as well as the development of the new, practical methods of the detection and identification of defects in dielectric and composite structures. New solutions and modifications of the existing ones are proposed. These solutions allow detecting defects in dielectric structures in a more reliable way. The automatic identification methods for various types of the materials heterogeneities have also been developed.

At the beginning of the study the composite materials, the defects, which are formed inside composite materials and the various methods of these defects detection are briefly described. Then, the basic issues related to the terahertz method are discussed (the principle of operation, properties, application and types of signals obtained during measurements). Moreover, the measurement system, located at Department of Theoretical Electrical Engineering and Computer Science of West Pomeranian University of Technology, Szczecin is also described. The numerical model of the measurement system, implemented by the author in the programming environment with the use of the finite-difference time-domain method (FDTD) is also presented and formulated.

The developed algorithms for the detection of defects formed in the dielectric and composite materials which use the time-frequency distributions (TFD), the synthetic aperture focusing technique (SAFT) and the time reversal mirror technique (TRM) are presented. The use of terahertz signal analysis in the joint time-frequency domain allows to improve the quality of the results of dielectric materials inspection (including polymer composites widely used in various industries) and the waveguide structures. Furthermore, the SAFT method, modified by the introduction of the time-frequency transformation is proposed. This method provides the higher values of the signal-to-noise ratios, which is particularly important for the detection of defects and their distinguishability in the process of automatic identification. The TRM method consists in the excitation of the wavefront, which interacts with the material under study, on its registration by the transmitting-receiving matrix and on the retransmission of the signal reversed in time. The secondary wavefront focuses on the original source and on any scattering objects such as defects. The study presents the implementation of the TRM method for the terahertz inspection with the pulsed excitation and the criterion for determining the time of the wavefront focusing which has a clear extreme allowing to

increase the precision of determining the focusing time and thus the position of the defect under detection.

The study also presents the results of the research on the identification of defects detected in the composite materials. This follows the global trend in the non-destructive testing related to the creation of systems for automated defect recognition (ADR). It is proposed the optimum set of the obtained signals features, which allow to identify the structure heterogeneity (basalt fiber reinforced polymer composite) by means of the supervised artificial neural networks and self-organizing maps (SOM). The supervised neural identification based on the features determined in the combined time-frequency domain allows obtaining better results than in the case of the features calculated in the time and frequency domains separately. If the information about the types of heterogeneities in a given material is not available, it is possible to detect and cluster them due to the similarity of the signals features by means of the neural self-organizing structures. Such analysis may be very useful when the examined material is new, if no test measurements have been made or if a measurement database for different types of defects is not available. The conducted experiment confirmed the possibility of detecting and clustering particular types of defects in the case of real inspections of composite materials containing both defects formed in the production phase and in the operation phase.

The selected practical problems related to the terahertz inspection of various composite materials are also discussed in the monograph. The examination of the adhesive joints, monitoring of the adhesive hardening process and the penetration of moisture into dielectric materials (in particular in wood) are described.

The possibilities of the use of pulsed excitation terahertz tomography for dielectric materials testing are presented the final part of the book. The computed terahertz tomography (THz CT) system made by the author is described. As a result of the performed work, a different content of the information about the internal structure of the tested dielectric object resulting from the use of the reconstruction based on various parameters of the received signal have been observed. This information can be complementary, therefore a reconstruction algorithm which uses the inverse Radon transform and data fusion (by means of the artificial neural network) obtained from the selected set of parameters is proposed. The verification of the algorithm using the results of the various shapes dielectric phantoms inspection was made. Based on proposed assessment criterion, a clear reconstruction quality improvement has been noted, resulting from increasing the number of utilized parameters. The applied algorithm enables correct reconstruction of the internal structure of the examined object (together with the existing defects), with the reduced blurring of the obtained cross-sectional images.