

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY
W SZCZECINIE

Wydział Elektryczny

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Zastosowanie aktywnej termografii podczerwonej
ze wzbudzeniem mikrofalowym
do wykrywania niemetalicznych min lądowych**

mgr Barbara Szymanik

Promotor
prof. dr hab. inż. Stanisław Gratkowski

Szczecin 2013

*Pragnę złożyć podziękowania wszystkim,
którzy okazywali mi wsparcie podczas pisania niniejszej pracy.*

*Przede wszystkim dziękuję mojemu promotorowi – Profesorowi Stanisławowi Gratkowskiemu,
za życzliwość jaką okazywał mi podczas dotychczasowej współpracy,
a zwłaszcza za cenne wskazówki merytoryczne
oraz cierpliwość w oczekiwaniu na końcowy rezultat moich badań.*

*Dziękuję również Profesorowi Tomaszowi Chademu,
za cenną współpracę i szansę rozwoju naukowego.*

*Szczególne podziękowania składam mojemu tacie,
za wsparcie, pomoc merytoryczną oraz niezachwianą wiarę we mnie.*

*Pragnę podziękować również moim kolegom z pracy
za stworzenie wspaniałej atmosfery, nie tylko naukowej.*

Praca była współfinansowana przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego i Budżetu
Państwa: Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki 2007-2013
w ramach projektu „Inwestycja w wiedzę motorem rozwoju innowacyjności w regionie”.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	6
1. Wstęp	8
1.1. Cel i teza pracy	9
1.2. Problem min lądowych na świecie	10
1.2.1. Rodzaje min lądowych	12
1.3. Metody wykrywania min lądowych	13
1.4. Badania nad wykrywaniem min lądowych metodą termowizyjną	15
2. Teoretyczny opis mikrofalowo wzbudzanej termografii podczerwonej	17
2.1. Promieniowanie podczerwone i jego detekcja	17
2.2. Wybrane zagadnienia przepływu ciepła	20
2.3. Przegląd wybranych zagadnień elektromagnetyzmu	21
2.3.1. Równania Maxwella	21
2.3.2. Falowody i ich podstawowe parametry	22
2.3.3. Anteny mikrofalowe	24
2.4. Podgrzewanie mikrofalowe	27
3. Model matematyczny mikrofalowo wzbudzanej termografii podczerwonej	30
3.1. Optymalizacja kołnierza falowodu mikrofalowego	30
3.1.1. Optymalizacja w modelu dwuwymiarowym – zdefiniowanie problemu	34
3.1.2. Optymalizacja w modelu dwuwymiarowym – wyniki	36
3.1.3. Optymalizacja w modelu trójwymiarowym – zdefiniowanie problemu	37
3.1.4. Optymalizacja w modelu trójwymiarowym – wyniki	39
3.2. Symulacja numeryczna zjawiska podgrzewania mikrofalowego w oparciu o modele dwuwymiarowe	41
3.3. Symulacja numeryczna zjawiska podgrzewania mikrofalowego w oparciu o modele trójwymiarowe	46
3.3.1. Analiza wpływu kołnierza falowodu na rozkład temperatury	49
4. Badania eksperymentalne	57
4.1. Budowa układu pomiarowego	57
4.2. Ćwiczebne miny lądowe używane podczas pomiarów	59
4.3. Eksperymentalna weryfikacja wyników optymalizacji kołnierza falowodu	62
4.4. Wykrywanie min lądowych metodą termografii impulsowo-fazowej	66

5. Identyfikacja wybranych parametrów min lądowych na podstawie termogramów	72
5.1. Badanie wrażliwości układu na zmiany poszczególnych parametrów	74
5.2. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla danych numerycznych	77
5.3. Eksperymentalna weryfikacja wyników numerycznych	83
5.4. Wnioski	88
6. Podsumowanie i wnioski końcowe	89
6.1. Problemy wymagające dalszej analizy	92
Spis rysunków	94
Spis tablic	98
Bibliografia	99
Publikacje z udziałem autorki	105

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

Φ – strumień cieplny [W],

R, A, T – współczynniki odbicia, absorpcji i transmisji promieniowania cieplnego,

M – emitancja promieniowania [W/m^2],

$M_b(\lambda, T)$ – widmowa emitancja promieniowania dla ciała doskonale czarnego [$\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{sr})$],

$h = 6.62606957 \cdot 10^{-34}$ – stała Plancka [$\text{J} \cdot \text{s}$],

$c = 299792458$ – prędkość światła [m/s],

λ – długość fali elektromagnetycznej [m],

T – temperatura [K],

$k_b = 1.3806488 \cdot 10^{-23}$ – stała Boltzmanna [J/K],

$\sigma_{sb} = 5.670373 \cdot 10^{-8}$ – stała Stefana - Boltzmanna [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$],

Q – energia cieplna [J],

ε – względna zdolność emisyjna ciała,

k – przewodność cieplna materiału [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],

C_p – ciepło właściwe materiału [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$],

t – czas [s],

ρ_m – gęstość materiału [kg/m^3],

$\mathbf{E}$ – wektor natężenia pola elektrycznego [V/m],

$\mathbf{H}$ – wektor natężenia pola magnetycznego [A/m],

$\mathbf{B}$ – wektor indukcji magnetycznej [T],

$\mathbf{D}$ – wektor przesunięcia dielektrycznego [C/m^2],

$\mathbf{J}$ – wektor gęstości prądu [A/m^2],

ρ – gęstość ładunku elektrycznego [C/m^3],

σ – konduktywność [S],

$\epsilon_0 = 8.841941283 \cdot 10^{-12}$ – przenikalność elektryczna próżni [F/m],

ϵ – przenikalność elektryczna materiału [F/m],

ϵ_r – względna przenikalność elektryczna materiału ϵ/ϵ_0 ,

$\underline{\epsilon}$ – względna zespolona przenikalność elektryczna materiału,

ϵ' – część rzeczywista względnej zespolonej przenikalności elektrycznej materiału,

ϵ'' – część urojona względnej zespolonej przenikalności elektrycznej materiału,

$\tan \delta$ – tangens kąta stratności materiału,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – przenikalność magnetyczna próżni [H/m],

μ – przenikalność magnetyczna materiału [H/m],

μ_r – względna przenikalność magnetyczna materiału μ/μ_0 ,

f – częstotliwość fali elektromagnetycznej [Hz],

f_{od} – częstotliwość odcięcia dla falowodu [Hz],

FEM – metoda elementów skończonych (ang. FEM – finite element method),

GA – algorytm genetyczny (ang. genetic algorithm),

PS – algorytm poszukiwania wzorca (ang. pattern search),

MSE – błąd średniokwadratowy (ang. mean square error).

1. Wstęp

Historia konfliktów zbrojnych sięga początków istnienia cywilizacji. Z wojnami nieodzownie związany jest postęp techniczny, którego skutkiem jest często tworzenie nowych, bardziej efektywnych środków niosących śmierć nie tylko wrogim wojskom, ale również ludności cywilnej. Ze względu na swoją historię mina lądowa może być zaliczana do kategorii najstarszych, najprostszych, ale też najbardziej efektywnych wynalazków militarnych.

W chwili obecnej miny lądowe są wciąż jednym z największych zagrożeń dla żołnierzy oraz ludności cywilnej w krajach dotkniętych konfliktami zbrojnymi, które trwają teraz, lub trwały tam w przeszłości. Zgodnie z wydawanym rokrocznie raportem Landmine Monitor, tylko w 2012 roku z powodu niewybuchów ucierpiało na świecie 4286 osób, przy czym w każdym z następujących 10 krajów: Afganistan, Pakistan, Kolumbia, Mjanma (Birma), Kambodża, Sudan Południowy, Libia, Somalia, Irak i Sudan, odnotowano ponad 100 ofiar [1]. Wiele z używanych obecnie min lądowych jest niewykrywalnych standardowymi sposobami (za standardowe uznajemy metody wykorzystujące wykrywacze metali). Miny te charakteryzują się niewielką lub zerową zawartością metalu, dlatego są niewidzialne dla wykrywacza metali nawet wtedy, gdy są zakopane na niewielkiej głębokości. Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż rozminowanie ręczne za pomocą wykrywaczy metali jest najczęściej wykorzystywaną metodą oczyszczania pola minowego. Widać zatem potrzebę znalezienia i wdrożenia do użytku nowej metody wykrywania min – takiej, która pozwoli również na detekcję min z minimalną zawartością metalu.

Aktualnie na świecie trwają prace nad kilkoma metodami wykrywania min przeciwpiechotnych, alternatywnymi bądź komplementarnymi do wykrywaczy metali [2]. Niniejsza praca jest poświęcona jednej z takich metod – aktywnej termografii ze wzbudzeniem mikrofalowym. Praca obejmuje opis teoretyczny tej techniki wykrywania min lądowych, modelowanie numeryczne niektórych zjawisk fizycznych z nią związanych, realizację praktyczną, czyli budowę prototypu urządzenia oraz opracowanie algorytmów pozwalających na ekstrakcję niektórych parametrów szukanej miny na podstawie sygnałów otrzymanych bezpośrednio z detektora. Istotnym elementem pracy jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem lądowych min ćwiczebnych, które najpierw próbowano wykryć wykrywaczem metali (co opisano szczegółowo w rozdziale 4). Próba wykazała, że badane miny są niewykrywalne metodami standardowymi, a ich wykrycie metodą aktywnej termografii ze wzbudzeniem mikrofalowym potwierdza skuteczność opisywanej techniki.

1.1. Cel i teza pracy

Miny lądowe z obudowami plastikowymi, drewnianymi, betonowymi oraz szklanymi zbudowane są tak, aby uniemożliwić ich wykrycie za pomocą wykrywacza metali. Jedyne elementy metalowe (wykonane z metali niemagnetycznych) tych min to części zapalnika – iglica, sprężyna iglicy, lub tak, jak w minie PMF-1 aluminiowa walcowa obudowa zapalnika. Przeciętna waga elementów metalowych w minach z minimalną zawartością metalu nie przekracza kilkunastu gramów. Elementy te są niewielkich rozmiarów, co stawia je na równi z odpadami metalowymi często zanieczyszczającymi pola minowe [3]. Jest rzeczą jasną, że nowa metoda wykrywania min lądowych powinna mieć zalety wykrywacza metali (szybkość działania, wygoda użytkowania, wysoka skuteczność), a jednocześnie mieć zastosowanie przy wykrywaniu min niemetalicznych. Termografia podczerwona wykorzystywana do lokalizacji pól minowych oraz wykrywania min na ich terenie była badana przez ośrodki w kraju i na świecie [4–9]. Pasywna obserwacja dużych obszarów pozwala na identyfikację pól minowych, ale wymaga bardzo długiego czasu badania. Zastosowanie termografii aktywnej do lokalizacji poszczególnych obiektów zakopanych pod powierzchnią ziemi poprawia wydajność metody, przyspieszając jej działanie. Użycie mikrofal jako źródła energii, ze względu na objętościowy charakter grzania, minimalizuje czas potrzebny na lokalizację obiektu. W metodzie termograficznej efektywność uzależniona jest jednak od szeregu czynników. Warunki atmosferyczne (zachmurzenie, opady, wiatr), wilgotność gleby, poszycie oraz duże zanieczyszczenie badanego obszaru w znacznym stopniu ograniczają możliwości wykrycia zakopanej miny lądowej. Z tego powodu najlepszym rozwiązaniem wydaje się być stworzenie systemu wieloczułnikowego, którego elementem byłby system grzewczo – detekcyjny oparty na aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym.

Na podstawie analizy dotychczasowych osiągnięć w rozważanym temacie oraz swojej własnej pracy autorka stawia następującą tezę:

Aktywna termografia podczerwona ze wzbudzeniem mikrofalowym umożliwia wykrycie niemetalicznych min lądowych niewykrywalnych za pomocą wykrywacza metali. Zastosowanie metod optymalizacji do projektowania urządzenia grzewczo – detekcyjnego pozwala na poprawienie efektywności metody. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla problemu aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym umożliwia estymację niektórych parametrów zakopanych min.

Dla udowodnienia tak sformułowanej tezy, pracę podzielono na następujące etapy:

- teoretyczny opis zjawisk związanych z podgrzewaniem mikrofalowym oraz przepływem ciepła powstającego w wyniku tego podgrzewania,

- wykorzystanie metody elementów skończonych (ang. FEM finite element method) do sporządzenia dwu- i trójwymiarowych modeli obliczeniowych,
- opracowanie algorytmu optymalizacji do zaprojektowania ulepszonego układu pomiarowego,
- budowę układu pomiarowego na bazie systemu grzewczego opartego na generatorze mikrofal dużej mocy i detektorze podczerwieni,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych z zastosowaniem techniki impulsowo-fazowej w celu określenia jej przydatności do wykrywania niemetalicznych min lądowych
- zastosowanie analizy fourierowskiej w celu poprawy jakości obrazów otrzymywanych z zapisanych sekwencji termogramów,
- wykorzystanie opracowanych modeli numerycznych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla badanego problemu w celu estymacji niektórych parametrów układu na podstawie rozkładu temperatury na powierzchni ogrzewanego gruntu,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych weryfikujących działanie zarówno algorytmu optymalizacji układu, jak i procedury wykorzystywanej do rozwiązania zagadnienia odwrotnego.

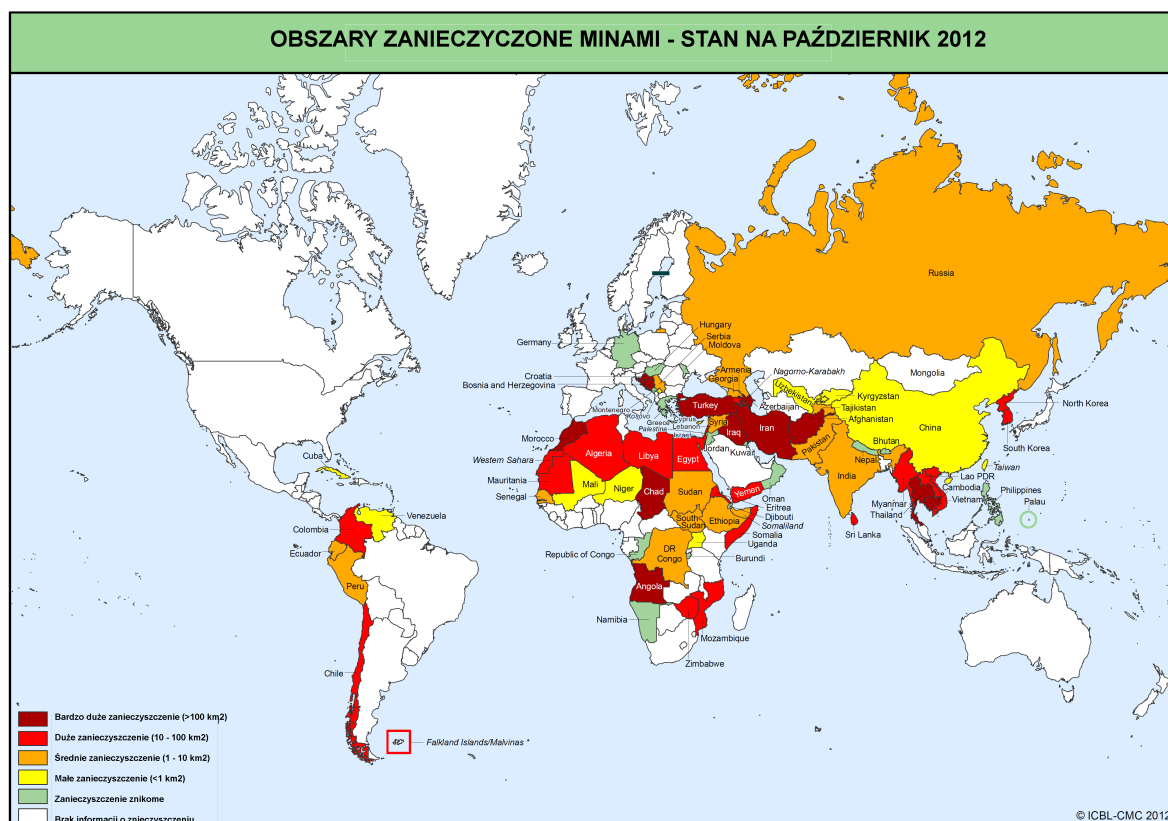
1.2. Problem min lądowych na świecie

Miny lądowe to broń, która sprawia, że pomimo zawierania umów międzynarodowych i traktatów pokojowych, państwa biorące udział w konfliktach zbrojnych jeszcze długo po ustaniu działań wojennych odczuwają ich zgubne skutki. Zaprojektowane po to, aby ranić i zabijać zarówno wojskowych, jak i cywilów w trakcie konfliktu oraz po jego zakończeniu, miny nie pozwalają na normalną egzystencję ludziom żyjącym na terenach objętych kiedyś wojną. Można je znaleźć we wszystkich tych miejscach, gdzie ludzie zwykli się gromadzić: na drogach prowadzących do szkół i fabryk, w otoczeniu wiosek i miasteczek, na polach uprawnych. Blokują dostęp do wody pitnej bądź pożywienia i są barierą (również ekonomiczną) dla rozwoju państwa próbującego podnieść się po konflikcie zbrojnym. Rysunek 1.1 przedstawia stan zanieczyszczenia minami na świecie.

Obecnie 161 krajów (w tym, w 2013 roku, Polska) ratyfikowało traktat ottawski – konwencję o zakazie użycia, składowania, produkcji i przekazywania min przeciwpiechotnych oraz o ich zniszczeniu (ang. Convention on the Prohibition of the Use, Stockpiling, Production and Transfer of Anti-Personnel Mines and on their Destruction). Zgodnie z zapisami tego traktatu ¹ każde Państwo Strona zobowiązuje się, że nigdy, w żadnej sytuacji:

- nie będzie konstruować, produkować, nabywać w jakikolwiek sposób, składować, konserwować lub przekazywać komukolwiek, bezpośrednio lub pośrednio, min przeciwpiechotnych,

¹ Konwencja o zakazie użycia, składowania, produkcji i przekazywania min przeciwpiechotnych oraz o ich zniszczeniu, Artykuł 1, Ottawa, 3 grudnia 1997



Rysunek 1.1: Aktualny stan zanieczyszczenia minami na świecie. Źródło: [1]

- nie będzie wspierać, zachęcać ani nakłaniać w jakikolwiek sposób nikogo do podejmowania działalności zabronionej Państwu Stronie z mocy niniejszej konwencji,
- każde Państwo Strona zobowiązuje się do zniszczenia wszystkich min przeciwpiechotnych oraz do dopilnowania ich zniszczenia, stosownie do postanowień konwencji.

Traktat ten należy uznać za znaczącą próbę ograniczenia niebezpieczeństwa jakie stanowią miny lądowe. Należy jednak pamiętać, że nie jest on wystarczającym rozwiązaniem. Po pierwsze mówi on jedynie o minach przeciwpiechotnych, nie wspomina natomiast o minach przeciwpancernych, minach pułapkach, zdalnie sterowanych minach typu claymore (miny odłamkowe o działaniu kierunkowym) i innych, które również niosą zagrożenie dla ludności. Ponadto, niektóre kraje, które nie ratyfikowały traktatu, są obecnie znaczącymi producentami min lądowych lub mają duże ich zasoby. Do krajów, które wciąż nie są zainteresowane ratyfikacją traktatu należą między innymi: Stany Zjednoczone, Rosja, Chiny, Mjanma (Birma), Zjednoczone Emiraty Arabskie, Kuba, Egipt, Indie, Izrael i Iran.

Zaznaczyć należy, że nie tylko miny lądowe stanowią zagrożenie. Również pozostałe po wojnie niewybuchy i niewypały (ang. ERW – explosive remnants of war, UXO – unexploded ordnance, oraz AXO – abandoned explosive ordnance) stwarzają ciągłe zagrożenie dla ludności krajów, które

wydawać by się mogło wojnę dawno mają za sobą. Ocenia się, że obecnie na terenie około 85 krajów na świecie można wciąż odnaleźć ERW. Przykładem przemawiającym do wyobraźni czytelnika może być Polska, gdzie w 2011 roku w okolicach plaży w Kołobrzegu odnaleziono i wydobyto około 900 przedmiotów niebezpiecznych pochodzenia wojskowego, głównie niewybuchów i niewypałów.²

1.2.1. Rodzaje min lądowych

Miną lądową nazywamy ładunek materiału wybuchowego zwykle umieszczony w kadłubie (obudowie) przeznaczony do niszczenia lub uszkodzenia pojazdów oraz do niszczenia i ranienia siły żywej. Detonacja miny następuje pod wpływem oddziaływania sprzętu bojowego lub siły żywej po upływie określonego czasu lub w sposób kierowany. Każda mina lądowa, niezależnie od jej przeznaczenia składa się z czterech podstawowych elementów. Zaliczamy do nich:

- kadłub – obudowa, w której umieszczony jest materiał wybuchowy wraz z zapalnikiem,
- materiał wybuchowy (kruszący) – związek chemiczny lub mieszanina takich związków (najczęściej spotykane w minach lądowych to trotyl – TNT lub heksogen – RDX) zdolna do reakcji chemicznej o charakterze egzotermicznym,
- zapalnik – urządzenie przeznaczone do inicjowania lub zapalania ładunku kruszącego w minie; zawiera inicjujący materiał wybuchowy, np. piorunian rtęci lub azydek ołowiu,
- urządzenie zabezpieczające minę przed przypadkowym wybuchem.

Najczęściej stosowaną klasyfikacją min lądowych jest ta, dzieląca je według ich przeznaczenia. Mamy:

- miny przeciwpiechotne,
- miny przeciwpancerne,
- miny przeciwtransportowe,
- miny sygnalizacyjno-oświetleniowe.

Miną przeciwpiechotną (ang. anti personnel mine, AP-mine) nazywamy urządzenie przeznaczone do zwalczania lub uczynienia siły żywej przeciwnika niezdolną do działania. Rażenie ofiary następuje wskutek działania fali uderzeniowej powstałej podczas detonacji materiału wybuchowego lub poprzez rażenie odłamkami powstałymi wskutek defragmentacji kadłuba miny. Konstrukcja min przeciwpiechotnych umożliwia umieszczenie ich na powierzchni gruntu lub płytko pod nim (na głębokości kilku centymetrów). Urządzenia te są niewielkich rozmiarów (ok kilku do kilkudziesięciu centymetrów średnicy), a zawartość kruszącego materiału wybuchowego nie przekracza w nich kilkuset gramów. Miny te można podzielić ze względu na sposób rażenia ofiar:

² Dane uzyskane dzięki uprzejmości firmy Eko-Min S.c., która wykonała rozminowanie części plaży na zlecenie firmy MOEBIUS BAU - Polska, spółka z o. o. w ramach zadania inwestycyjnego *Odbudowa plaży w Kołobrzegu na odcinku od km 330.4 do km 333.4*

- miny fugasowe – rażące falą uderzeniową,
- miny odłamkowe – rażące odłamkami korpusu lub umieszczonymi w korpusie metalowymi kulkami,
- miny kierunkowe – również rażą odłamkami, ale rażenie jest ukierunkowane dzięki odpowiedniemu uformowaniu korpusu miny, warstwy odłamkowej i materiału wybuchowego.

Miną przeciwpancerną (anti tank mine, AT-mine) nazywa się urządzenie przeznaczone do niszczenia czołgów, dział pancernych i innych wozów bojowych. Miny takie są dużo większe niż przeciwpiechotne. Ich średnica to zazwyczaj kilkadziesiąt centymetrów, a zawartość materiału wybuchowego dochodzi w nich do kilku kilogramów. Ze względu na sposób działania, miny takie dzielimy na:

- miny przeciwgąsienicowe – wyposażone w zapalnik naciskowy, powodujący detonację miny w momencie najechania na nią,
- miny denne – wyposażone w zapalniki prętowe lub niekontaktowe, zaprojektowane tak, aby detonacja uszkadzała dno pojazdu,
- miny przeciwburtowe – wyposażone w zapalniki niekontaktowe lub kontaktowe wykorzystujące światłowodowy, zaprojektowane tak, aby detonacja uszkadzała burtę pojazdu.

Mina przeciwtransportowa ma za zadanie niszczyć transportery nieopancerzone. Wykorzystywana jest również do niszczenia transportów kolejowych.

1.3. Metody wykrywania min lądowych

Rozróżnić można dwa podstawowe typy rozminowania: rozminowanie przeprowadzane podczas trwania działań zbrojnych oraz rozminowanie humanitarne. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z działaniem ukierunkowanym na jak najszybsze przeprowadzenie akcji, skupiającym się na usunięciu niebezpiecznych obiektów z określonego wąskiego obszaru, umożliwiającego przejście wojsk przez teren zaminowany (w zależności od rodzaju wojsk, wyznacza się ścieżki od 0.3 m do 12 m szerokości). W przypadku rozminowania humanitarnego celem jest usunięcie wszystkich obiektów niebezpiecznych na określonym obszarze do pewnej głębokości, ustalonej w zależności od tego, jak dany teren ma być użytkowany po jego oczyszczeniu.

Ze względu na swoją specyfikę, rozminowanie przeprowadzane podczas prowadzenia zadań bojowych musi być bardzo szybkie. Stosowane metody nie gwarantują stuprocentowej skuteczności, a niektóre z nich mogą być wykorzystane tylko na niewielkich obszarach. Do metod tych zaliczamy:

- rozminowanie mechaniczne za pomocą różnego rodzaju trałów przeciwmynowych,
- rozminowanie metodą wybuchową za pomocą ładunków wydłużonych bądź rur Bangalore,

- bombardowanie dywanowe,
- stosowane w wyjątkowych wypadkach rozminowanie ręczne.

W przypadku rozminowania humanitarnego priorytetem jest jakość oczyszczenia terenu. Rozminowanie humanitarne przeprowadzane jest zarówno przez organizacje 'non-profit', finansowane przez niektóre rządy oraz przy pomocy osób prywatnych, jak również przez komercyjne firmy, zajmujące się oczyszczaniem terenów z obiektów niebezpiecznych. Organizacja Narodów Zjednoczonych w 2001 roku wprowadziła międzynarodowe standardy (IMAS – The International Mine Action Standards) obowiązujące przy przeprowadzaniu akcji związanych z rozminowywaniem terenów. Obejmują one zarówno metodykę rozminowania, sposoby kontroli pól minowych po rozminowaniu, sposoby składowania i przewożenia materiałów niebezpiecznych, jak i metodykę przeprowadzania szkoleń. Z założenia, najwięcej miejsca poświęca się wykrywaniu min lądowych za pomocą wykrywacza metalu, ale standardy obejmują również szczegółowy opis przeprowadzania szkoleń psów wykrywających materiały wybuchowe i wspominają o możliwości wykorzystania alternatywnych do wykrywacza metalu metod [10].

Najpopularniejszą metodą wykrywania min przy rozminowaniu humanitarnym pozostaje rozminowanie ręczne, z użyciem wykrywaczy metalu. Współczesne wykrywacze metalu mają zasięg do kilku metrów włąb ziemi [11]. Dodatkowo często używa się magnetometrów, służących do wykrywania obiektów ferromagnetycznych [12, 13]. Stosowanie wyłącznie metod, które wykrywają metal stwarza ryzyko niewykrycia i pozostawienia na polu min z małą zawartością metalu. Dlatego coraz częściej używa się specjalnie szkolonych psów, wykrywających materiał wybuchowy oraz radaru ziemnego (ang. GPR – Ground Penetrating Radar) do wyszukiwania ładunków w obudowach plastikowych [14]. Inne metody alternatywne do wykrywacza metalu, nad którymi trwają intensywne prace badawcze to:

- rezonans magnetyczny używany do detekcji związków chemicznych zawartych w materiałach wybuchowych [15],
- zjawisko fluorescencji – pozwala na lokalizację niektórych związków chemicznych [16],
- inne czujniki chemiczne, w tym żywe czujniki – specjalnie trenowane zwierzęta [17],
- obrazowanie podczerwone, obserwacja rozkładu temperatury na powierzchni gruntu pozwala na lokalizację zakopanych obiektów – rozróżniamy tu metody pasywne i aktywne [2]
- sensory akustyczne – pozwalają na detekcję obiektów poprzez analizę odbitych od nich fal akustycznych [18].

Każda z tych metod jest obecnie w fazie testów. Analiza wymienionych alternatyw wykrywacza metalu pozwala na wskazanie ich zalet oraz wad – nie wydaje się jednak, aby którakolwiek z tych metod mogła być uważana za optymalną do wykrywania min lądowych.

1.4. Badania nad wykrywaniem min lądowych metodą termowizyjną

Dotychczasowe badania nad zastosowaniem termowizji do wykrywania min lądowych można podzielić na dwie grupy: metody opierające się na termowizji pasywnej i te, opierające się na termowizji aktywnej. W termowizji pasywnej nie używa się zewnętrznych źródeł energii do podgrzania badanego obszaru w celu ułatwienia wykrycia zakopanego obiektu. Termografia aktywna zakłada użycie zewnętrznych źródeł energii w celu przyspieszenia i ułatwienia wykrycia miny.

Termografia pasywna zakłada obserwację zdalną dużego obszaru, na którym istnieje prawdopodobieństwo obecności min lądowych. Obecność zakopanej miny jest rejestrowana za pomocą kamery termowizyjnej jako plama o innej temperaturze niż tło. Oczywiście, choć używamy terminu "termografia pasywna", gdyż żadne zewnętrzne źródło energii nie jest sztucznie wprowadzane w celu poprawienia efektywności metody, należy pamiętać o tym, że pole minowe jest narażone na czynniki zewnętrzne, przede wszystkim oddziałuje na nie energia słoneczna. W termografii pasywnej obserwujemy zatem silną zależność wyników, jakie daje ta metoda od warunków pogodowych oraz od pory dnia, podczas której jest rejestrowany obraz, co szczegółowo zostało opisane w pracy [7]. We wczesnych pracach [19, 20] przedstawiono wyniki obserwacji pól minowych za pomocą kamery termowizyjnej w różnych porach dnia oraz porach roku. Autorzy wskazują na istotny wpływ warunków zewnętrznych na wynik pomiaru. Przeciętna obserwacja pola trwa w termografii pasywnej kilkadziesiąt godzin, podczas których obrazy są rejestrowane i poddawane odpowiedniej obróbce.

Termografią pasywną w zastosowaniu do wykrywania min zajmowano się również w Polsce. W projektach [21, 22] skupiono się na zbadaniu zależności obserwowanych sygnatu termicznych min i innych niejednorodności znajdujących się pod powierzchnią ziemi od czasu obserwacji, typu gruntu i jego poszycia oraz od warunków pogodowych. W konkluzji badacze zwracają uwagę na fakt, że użycie zewnętrznego źródła energii w postaci promiennika podczerwieni lub mikrofal mogłoby poprawić efektywność metody [23]. Badania nad użyciem zewnętrznego źródła energii w postaci mikrofal zostały rozpoczęte przez badaczy z tej grupy w 2012 roku. W artykule [9] opisują oni wstępne testy wykonane przy użyciu techniki aktywnej termografii ze wzbudzeniem mikrofalowym. Używane jest urządzenie generujące mikrofae stosunkowo małej mocy (180 W). We wnioskach badacze wskazują na potrzebę użycia większej mocy mikrofal (do 2 kW) oraz prezentują termogramy pozwalające stwierdzić, że obiekty mogą zostać wykryte za pomocą tej techniki.

Światowe badania nad aktywną termografią podczerwoną z wymuszeniem mikrofalowym rozpoczęły się w latach 90-tych XX wieku. Grupa badawcza – działająca w projekcie kanadyjskiej instytucji rządowej Defence Research and Development Canada – rozpoczęła projekt, którego celem było zbudowanie i przetestowanie prototypu urządzenia grzewczego, którego działanie oparte było na mikrofalach dużej mocy połączonego z kamerą termowizyjną służącą do obserwacji nagrzanego obszaru. Urządzenie zostało opatentowane [24]. Prace [6, 25] opisują badania przeprowadzone za

pomocą skonstruowanego prototypu, wykonane dla szeregu min ćwiczebnych zakopanych w piasku. Autorzy zaznaczają, że ich prace należy uznać za wstępne i wskazują kierunki dalszych badań. Podobne prace nad tą metodą wykrywania min lądowych prowadzone były we Francji [4, 26], gdzie zastosowano metodę EMIR (ang. electromagnetic – infrared) używaną dotychczas raczej w badaniach nieniszczących materiałów. W metodzie tej oprócz generatora mikrofal stosunkowo małej mocy (150 W) oraz kamery termowizyjnej, stosuje się cienki film z tworzywa o takich właściwościach, że obserwowany wzrost temperatury materiału był wprost proporcjonalny do natężenia pola elektrycznego. Film taki należy umieścić nad obserwowanym obszarem, co powoduje trudności w aplikacji metody. Prezentowane wyniki obejmowały próby wykrycia min metalowych oraz takich, gdzie ilość metalu była stosunkowo duża. Grupa badaczy ze Stanów Zjednoczonych podjęła próbę stworzenia systemu złożonego z dwóch źródeł mikrofal, generujących fale o różnych częstotliwościach [8, 27]. Podejście takie, według badaczy, powinno poprawić wykrywalność obiektów, gdy mamy do czynienia z silnie nierówną powierzchnią gruntu. Idea została opatentowana [5], jednak badania nie wykroczyły poza analizy numeryczne.

2. Teoretyczny opis mikrofalowo wzbudzanej termografii podczerwonej

Aktywna termografia podczerwona z wymuszeniem mikrofalowym bazuje na połączeniu dwóch technik: podgrzewania mikrofalowego oraz obrazowania w podczerwieni. Mikrofałe dużej mocy są wykorzystywane do objętościowego podgrzania badanego terenu, którego powierzchnia jest obserwowana (w trakcie podgrzewania i/lub chłodzenia) przy użyciu czułej kamery termowizyjnej. Niejednorodności pod powierzchnią terenu mają wpływ na jego lokalne właściwości termiczne i elektryczne, a co za tym idzie zarówno na wymuszony, jak i swobodny przepływ ciepła. W efekcie wszelkie niejednorodności w strukturze badanego obszaru są widoczne jako miejsca mocniej lub słabiej nagrzane niż tło. Metoda aktywnej termografii podczerwonej ze wzbudzeniem mikrofalowym może mieć zatem bardzo szerokie zastosowanie, nie tylko do wykrywania min lądowych, na czym skupia się niniejsza praca, ale również w szeroko pojętych badaniach nieniszczących (ang. NDT – Non Destructive Testing) materiałów dielektrycznych, między innymi bardzo popularnych kompozytów [28–34].

2.1. Promieniowanie podczerwone i jego detekcja

Każdy obiekt, którego temperatura przekracza zero bezwzględne, emituje promieniowanie termiczne. Promieniowanie termiczne (zwane również cieplnym lub temperaturowym) jest falą elektromagnetyczną o długości mieszczącej się pomiędzy światłem widzialnym a falami radiowymi, tj. od 780 nm do 1 mm (patrz rysunek 2.1). Zakres widmowy używany w praktyce do obrazowania w podczerwieni mieści się w przedziale od 0.9 do 14 μm i dzieli się na trzy podstawowe zakresy: daleka podczerwień od 7 do 14 μm , średnia podczerwień od 3 do 5 μm oraz bliska podczerwień od 0.9 do 1.7 μm . [35]

Gdy strumień cieplny Φ , definiowany jako energia niesiona przez promieniowanie przechodzące w jednostce czasu przez określoną powierzchnię, natrafia na obiekt o określonej grubości, pewna jego część zostaje odbita Φ_R , część zostaje przez obiekt zaabsorbowana Φ_A , a część przechodzi przez obiekt Φ_T . Używając powyższych oznaczeń można zdefiniować następujące współczynniki określające obiekt:

— współczynnik odbicia

$$R = \frac{\Phi_R}{\Phi} \quad (2.1)$$

— współczynnik absorpcji

$$A = \frac{\Phi_A}{\Phi} \quad (2.2)$$

— współczynnik transmisji

$$T = \frac{\Phi_T}{\Phi} \quad (2.3)$$

Suma tych trzech współczynników musi wynosić jeden dla każdej długości fali, a zatem musi być spełniona zależność:

$$R + A + T = 1 \quad (2.4)$$

zwana prawem Kirchoffa. Jeżeli współczynnik absorpcji danego ciała wynosi jeden, a pozostałe współczynniki zero, to takie ciało nazywamy doskonale czarnym. Oznacza to, że ciało doskonale czarne absorbuje każde padające nań promieniowanie, niezależnie od jego długości fali i kierunku. Ponadto, dla pewnej temperatury i długości fali, ciało doskonale czarne emituje maksymalną ilość energii. Właściwości ciała doskonale czarnego są dobrze znane, dlatego wnęki stanowiące praktyczną realizację tego pojęcia fizycznego stosowane są do kalibracji matryc detekcyjnych kamer termowizyjnych.

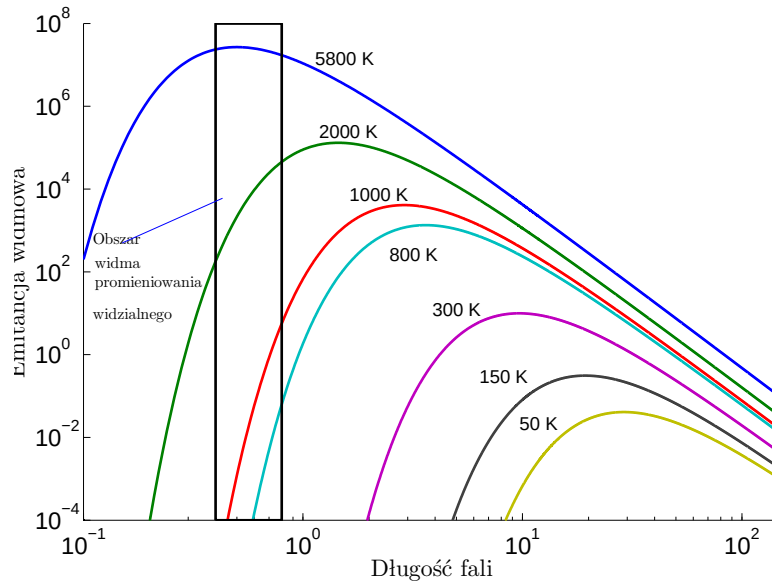
Zdefiniujmy emitancję promieniowania jako stosunek emitowanego strumienia cieplnego $d\Phi$ do elementu powierzchni dS , z której jest wypromieniowany. W postaci różniczkowej emitancję zapisujemy następująco [28]:

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2.5)$$

Emitancja widmowa promieniowania dla ciała doskonale czarnego opisana jest wzorem Plancka:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (2.6)$$

gdzie h – stała Plancka, c – prędkość światła, λ – długość fali promieniowania, k_B – stała Boltzmanna, a T to bezwzględna wartość temperatury ciała doskonale czarnego. Na rysunku 2.1 przedstawiono rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego dla kilku temperatur. Dla każdej z krzywych z rodziny prezentowanej na wykresie można zauważyć następującą prawidłowość: dla długości fali $\lambda = 0$ emitancja widmowa wynosi zero. Następnie szybko wzrasta, aż do maksimum przypadającego na określoną długość fali λ_{max} , różną dla różnych temperatur ciała doskonale czarnego. Po przejściu przez maksimum wartość emitancji stopniowo maleje do zera dla dużych wartości długości fali. Łatwo widać, że im wyższa temperatura, tym mniejsza długość fali na którą przypada maksimum emitancji



Rysunek 2.1: Widmowa emitancja ciała doskonale czarnego. Źródło: własne na podstawie:[28]

widmowej ciała doskonale czarnego.

Różniczkując równanie (2.6) po długości fali i przyrównując otrzymane wyrażenie do zera,

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1} \right] = 0 \quad (2.7)$$

otrzymujemy prawo przesunięć Wiena:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (2.8)$$

Prawo przesunięć Wiena pozwala wyliczyć długość fali przypadającej na maksimum emitancji dla ciała doskonale czarnego o określonej temperaturze. Na przykład dla Słońca w temperaturze 6000 K maksimum promieniowania przypada na $0.5 \mu\text{m}$, co daje barwę żółtą. Natomiast obiekty znajdujące się w temperaturze pokojowej (w przybliżeniu 300 K) emitują promieniowanie o maksimum emitancji w dalekiej podczerwieni.

Jeżeli wzór Plancka (2.6) scałkujemy w przedziale od 0 do ∞ , otrzymamy całkowitą emitancję promieniowania ciała doskonale czarnego

$$M = \sigma_{sb} T^4, \quad (2.9)$$

gdzie σ_{sb} to stała Stefana-Boltzmann. Powyższe wyrażenie to prawo Stefana-Boltzmann. Graficznie M to oczywiście powierzchnia zawarta pod jedną z krzywych z rysunku 2.1.

Ciała, dla których współczynnik absorpcji nie jest równy jedności nazywamy ciałami szarymi.

Aby opisać ciało szare, należy posłużyć się dodatkową wielkością – emisyjnością. Emisyjność oznaczana jako ε jest definiowana jako stosunek emitancji danego ciała do emitancji ciała doskonale czarnego w danej temperaturze [36]. Wyróżniamy zatem:

- ciała, dla których $\varepsilon = 1$, czyli ciała doskonale czarne,
- ciała szare, dla których $\varepsilon < 1$,
- radiatory selektywne, dla których wartość emisyjności zmienia się ze zmianą długości fali.

Dla ciała szarego, prawo Stefana-Boltzmann'a zapisujemy następująco

$$M = \varepsilon \sigma_{sb} T^4. \quad (2.10)$$

Fala cieplna wytwarzana przez ciało o temperaturze mieszczącej się w zakresie od -40 do 3000 stopni Celsjusza może być rejestrowana przez urządzenia nazywane detektorami podczerwieni. Urządzenia te działają na zasadzie przetworników zamieniających promieniowanie podczerwone na sygnały elektryczne.

Detektory podczerwieni dzielimy na detektory fotonowe (kwantowe) i detektory termiczne. W przypadku detektorów fotonowych, absorbowane promieniowanie podczerwone zmienia koncentrację wolnych nośników w elemencie matrycy detektora, co powoduje zmianę rezystancji tego elementu, bądź powstanie w nim dodatkowego fotoprądu. W przypadku detektorów termicznych, element matrycy nagrzewa się pod wpływem padającego promieniowania podczerwonego. Zmiana temperatury elementu powoduje zmianę jakiegoś jego parametru fizycznego (np. rezystancji) [37–40].

2.2. Wybrane zagadnienia przepływu ciepła

W niniejszym rozdziale zostanie opisany przepływ ciepła poprzez przewodzenie. Założyliśmy później, że zjawisko to jest głównym czynnikiem wpływającym na dynamikę zmian temperatury w układzie, co zostało uwzględnione w modelu matematycznym. Słuszność założenia potwierdziły obserwacje dokonane podczas eksperymentów. Z mikroskopowego punktu widzenia, ten rodzaj przepływu ciepła jest konsekwencją oddziaływania molekuł gorętszych z tymi o niższej energii. W zależności od rodzaju medium, przekazywanie energii wiąże z transportem fononów (dla idealnych izolatorów) oraz z ruchem ładunków elektrycznych (dla przewodników).

Ogólna postać równania przepływu ciepła w wyniku przewodzenia może być zapisana następująco [28, 41]:

$$\nabla(k\nabla T) + Q = \rho_m C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.11)$$

gdzie T to temperatura, Q to dostarczana do danej objętości energia cieplna, k to przewodność cieplna materiału, natomiast ρ_m oraz C_p to odpowiednio jego gęstość oraz ciepło właściwe. Aby opisać

przepływ ciepła w danym materiale musimy znać powyższe właściwości materiałowe. W tabeli 2.1 zebrano wartości gęstości, ciepła właściwego oraz przewodności cieplnej dla wybranych materiałów, ze szczególnym uwzględnieniem tych materiałów, które wykorzystuje się do budowy min lądowych.

Tablica 2.1: Parametry cieplne dla wybranych materiałów [42, 43]

Materiał	Gęstość ρ_m [kg/m³]	Ciepło właściwe C_p [J / (kg·K)]	Przewodność cieplna k [W/(m·K)]
Suchy piasek	1800	800	1.5
Bakelit	1340	1480	0.23
Guma	1200	1600	0.19
Materiał wybuchowy (TNT)	1140	1480	0.25
Powietrze	1.29	1010	0.022

2.3. Przegląd wybranych zagadnień elektromagnetyzmu

2.3.1. Równania Maxwella

Równania Maxwella są zwartym opisem pól elektrycznego i magnetycznego oraz istniejących między nimi powiązań. Składają się na nie cztery równania różniczkowe [44–47]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.15)$$

gdzie

$\mathbf{E}$ – wektor natężenia pola elektrycznego,

$\mathbf{H}$ – wektor natężenia pola magnetycznego,

$\mathbf{B}$ – wektor indukcji magnetycznej,

$\mathbf{D}$ – wektor przesunięcia dielektrycznego,

$\mathbf{J}$ – wektor gęstości prądu,

ρ – objętościowa gęstość ładunku elektrycznego,

t – czas.

W przypadku opisu zachowania pola w liniowych środowiskach niejednorodnych, do powyższych równań dodajemy zależności materiałowe:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.17)$$

gdzie:

ϵ – przenikalność elektryczna,

μ – przenikalność magnetyczna,

ϵ_r – względna przenikalność elektryczna,

μ_r – względna przenikalność magnetyczna.

W niniejszej pracy analizowane jest zjawisko podgrzewania mikrofalowego, powstające wskutek oddziaływania fali elektromagnetycznej o odpowiedniej częstotliwości z materią. Równania fali elektromagnetycznej można wyprowadzić bezpośrednio z równań Maxwella. Działając z obu stron operatorem rotacji na równania (2.12) oraz (2.13) otrzymujemy:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla \times \mathbf{J}_s - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu \frac{\partial \mathbf{J}_s}{\partial t} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

gdzie $\mathbf{J}_s$ oznacza wektor gęstości prądu źródłowego, w odróżnieniu do wspomnianej wcześniej całkowitej gęstości prądu $\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_c$, gdzie $\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E}$ (σ – konduktywność środowiska) oznacza prąd indukowany.

Jeżeli zakłada się, że zależność czasowa ma charakter sinusoidalny o założonej pulsacji ω , powyższe równania falowe można wyrazić w prostszej, zespolonej postaci.

$$\nabla \times (\nabla \times \underline{\mathbf{H}}) = \nabla \times \underline{\mathbf{J}}_s + \omega^2 \mu \epsilon_0 \underline{\epsilon} \underline{\mathbf{H}} \quad (2.20)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \underline{\mathbf{E}}) = -j\omega \mu \underline{\mathbf{J}}_s + \omega^2 \mu \epsilon_0 \underline{\epsilon} \underline{\mathbf{E}} \quad (2.21)$$

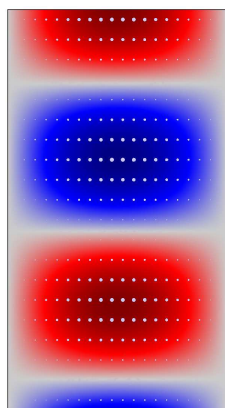
gdzie $\underline{\mathbf{H}}, \underline{\mathbf{E}}, \underline{\mathbf{J}}_s$ – wektory zespolone, natomiast $\underline{\epsilon} = \epsilon - j\sigma/(\omega\epsilon_0)$.

2.3.2. Falowody i ich podstawowe parametry

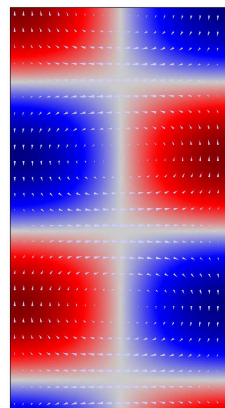
Falowodem nazywamy strukturę (kanał) służącą do przesyłania fali elektromagnetycznej wzdłuż określonej drogi. Wyróżniamy dwa rodzaje fal, które mogą być przesyłane w ten sposób:

- fala typu TE (z ang. Transverse Electric), nie posiadająca składowej pola elektrycznego wzdłuż kierunku propagacji, natomiast pole magnetyczne ma w tym przypadku składową wzdłużną,
- fala typu TM (z ang. Transverse Magnetic), posiadająca składową wzdłużną pola elektrycznego.

Rozkład fali w falowodzie opisywany jest poprzez określenie jej modu charakterystycznego. Numer modu jest oznaczany za pomocą dwóch liczb naturalnych m, n , gdzie m oznacza ilość połówek długości fali odkładanych na całej szerokości falowodu, natomiast n oznacza ilość połówek długości fali odkładanych na jego wysokości. Najprostszym modem jest mod TE_{10} . Rysunki 2.2a oraz 2.2b prezentują rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w rzucie poziomym falowodu prostokątnego, natomiast rysunki 2.3 oraz 2.4 przedstawiają rozkłady natężenia pól w rzutach bocznych falowodu dla tego modu.



(a) Rozkład natężenia pola elektrycznego



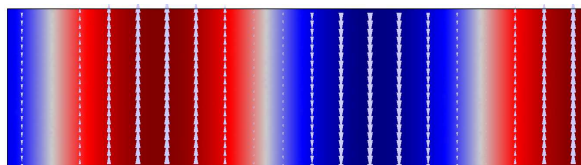
(b) Rozkład natężenia pola magnetycznego

Rysunek 2.2: Rozkład natężenia pól w falowodzie w płaszczyźnie x-y

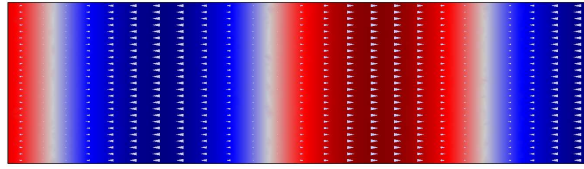
Jednym z podstawowych parametrów opisujących falowody jest częstotliwość graniczna, która określa minimalną częstotliwość fali jaka może rozchodzić się w danym falowodzie. Parametr ten jest ściśle związany z wymiarami geometrycznymi falowodu. Dla falowodu prostokątnego w którym propagowana jest fala rodzaju TE_{mn} , częstotliwość graniczna obliczana jest ze wzoru

$$f_{gr} = \frac{c}{2\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.22)$$

gdzie a, b to, odpowiednio, szerokość i wysokość falowodu. Jak widać wymiary falowodu determinują jaki mod może być w nim propagowany. Aby uniknąć generacji modów innych rodzajów należy



Rysunek 2.3: Rozkład natężenia pola elektrycznego w falowodzie w płaszczyźnie z-y



Rysunek 2.4: Rozkład natężenia pola magnetycznego w falowodzie w płaszczyźnie z-y

precyzyjnie dobrać szerokość oraz wysokość prowadnicy falowej. Dla częstotliwości mniejszej od f_{gr} falowód zachowuje się jak tłumik (jest więc filtrem górnoprzepustowym). W praktyce typowy zakres pracy falowodu mieści się w przedziale od $1.25f_{gr}$ do f_{gr2} , gdzie f_{gr2} oznacza częstotliwość graniczną dla kolejnego modu. Powyżej f_{gr2} w falowodzie oprócz modu podstawowego mogą rozchodzić się mody wyższych rzędów, co powoduje zniekształcenie sygnału.

Drugim parametrem ważnym z praktycznego punktu widzenia jest długość fali w falowodzie, którą oblicza się ze wzoru

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (2.23)$$

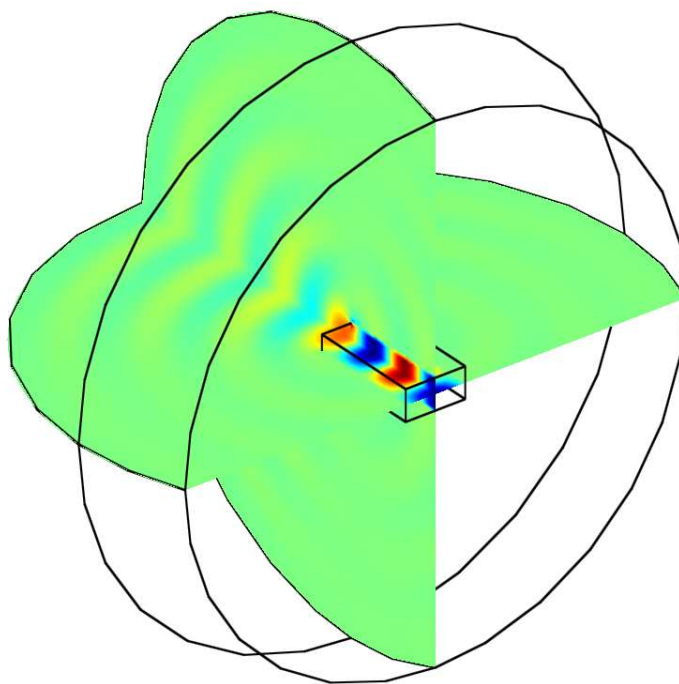
gdzie λ to długość fali o danej częstotliwości w wolnej przestrzeni, o parametrach takich jak wewnątrz falowodu, natomiast a to szerokość falowodu. Wyraźnie widać, że długość fali w falowodzie jest zawsze większa od tej, którą ma ona w wolnej przestrzeni [48–52].

2.3.3. Anteny mikrofalowe

Aby fala prowadzona w falowodzie łagodnie przeszła w falę propagowaną w przestrzeni stosowane są anteny mikrofalowe. W niniejszym rozdziale nie będziemy omawiać wszystkich rodzajów anten, jakie wykorzystywane są technice mikrofalowej. Skupimy się na wykorzystywanych w tej pracy antenach tubowych. Omówimy również podstawowy parametr opisujący anteny – charakterystykę promieniowania [50, 53].

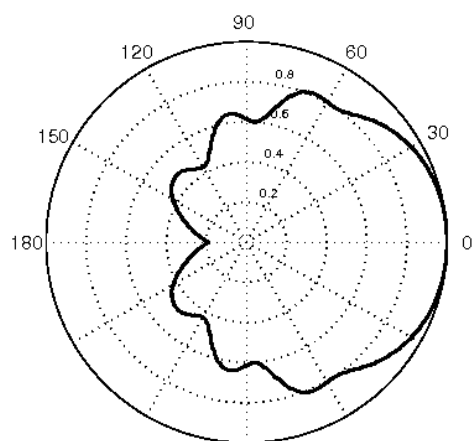
Charakterystykę promieniowania anteny definiujemy jako rozkład natężenia pola elektrycznego na powierzchni kuli o dużym promieniu, której środek znajduje się w środku badanej anteny. Charakterystyka taka jest oczywiście trójwymiarowa, ale przedstawiana jest zwykle na dwóch płaszczyznach, tak zwanych E i H (rysunek 2.5). Charakterystyka w płaszczyźnie E zdejmowana jest z płaszczyzny równoległej do wektora natężenia pola elektrycznego, natomiast charakterystyka w płaszczyźnie H jest zdejmowana z płaszczyzny zawierającej wektor natężenia pola magnetycznego. Rysunki 2.6a i 2.7a przedstawia unormowaną charakterystykę promieniowania otrzymywaną dla otwartego falowodu we współrzędnych biegunowych, natomiast rysunki 2.6b oraz 2.7b przedstawiają analogiczną charakterystykę we współrzędnych kartezjańskich.

Oczywiście najprostszą anteną falowodową jest otwarty koniec falowodu, z którego fala jest

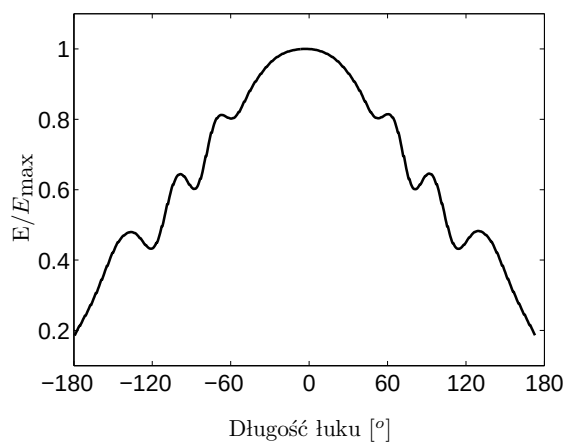


Rysunek 2.5: Rozkład pola elektrycznego propagowanego z falowodu otwartego w płaszczyznach E oraz H

wypromieniowana w przestrzeń. Otwarty koniec falowodu nie jest jednak optymalnym rozwiązaniem ze względu na dużą falę odbitą pojawiającą się na końcu falowodu. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest odpowiednia modyfikacja konstrukcji falowodu, przekształcająca otwarty koniec w antenę tubową. Rozszerzenie ścianek następuje albo tylko w płaszczyźnie E lub H (otrzymujemy wtedy antenę tubową sektorową) lub w obu płaszczyznach jednocześnie (tzw. antena piramidalna). Tuby koncentrują energię w tej płaszczyźnie, w której nastąpił wzrost apertury. Koncentracja energii oznacza zwężenie głównej wiązki charakterystyki promieniowania. W niektórych przypadkach żądamy jednak aby charakterystyka promieniowania była poszerzona w obu płaszczyznach. W tym wypadku stosuje się pewną modyfikację anteny tubowej polegającą na tym, że rozszerzenie apertury nie następuje stopniowo – ramiona tuby są prostopadłe do falowodu i zaginają się tworząc pudełko (z ang. box-horn antenna) [54]. Takie właśnie rozwiązanie rozważane jest w niniejszej pracy w kolejnych rozdziałach.

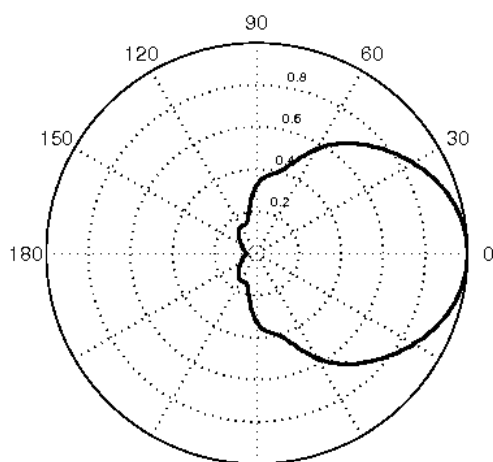


(a) We współrzędnych biegunowych

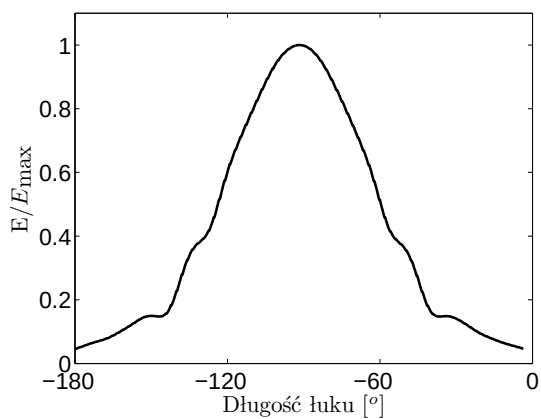


(b) We współrzędnych kartezjańskich

Rysunek 2.6: Charakterystyka promieniowania otwartego falowodu prostokątnego w płaszczyźnie E (falowód WR430, $f = 2.45$ GHz)



(a) We współrzędnych biegunowych



(b) We współrzędnych kartezjańskich

Rysunek 2.7: Charakterystyka promieniowania otwartego falowodu prostokątnego w płaszczyźnie H (falowód WR430, $f = 2.45$ GHz)

2.4. Podgrzewanie mikrofalowe

Podgrzewanie dielektryków mikrofalami, opisane w wielu publikacjach [42, 55, 56], oparte jest na dwóch zjawiskach: po pierwsze, dielektryki są materiałami mającymi pewną skończoną wartość oporności – zachodzi więc możliwość grzania oporowego. Po drugie, część dielektryków charakteryzuje się polarną budową molekularną – cecha ta powoduje, że cząsteczki dipolowe w materiale drgają, starając się ułożyć wzdłuż linii zmiennego pola elektrycznego. Ten mechanizm podgrzewania w dużym stopniu jest zależny od częstotliwości pola.

Indukcja ciepła w dielektryku związana jest z zachodzącym w nim pod wpływem pola zjawiskiem polaryzacji dielektrycznej, które może mieć różne mechanizmy [55]. Polaryzacja dielektryczna wywołuje straty mocy, gdyż szybkozmienne pole wykonuje pracę nad materiałem, z którym oddziałuje. Zgodnie z twierdzeniem Poytinga:

$$-\oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dS = \frac{\partial W_{em}}{\partial t} + \int_V (\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) dV \quad (2.24)$$

strumień wektora Poytinga $(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$ wypływający z powierzchni zamkniętej jest sumą dwóch czynników: zmiany energii elektromagnetycznej w objętości otoczonej rozpatrywaną powierzchnią $(\frac{\partial W_{em}}{\partial t})$ oraz mocy strat cieplnych. Rozważmy całkę opisującą moc strat cieplnych:

$$\int_V (\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) dV \quad (2.25)$$

gdzie $\mathbf{J}$ to gęstość prądu elektrycznego. Gęstość mocy rozproszonej można wyrazić zatem prostym równaniem:

$$p = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon' \frac{d\mathbf{E}}{dt} \cdot \mathbf{E} \quad (2.26)$$

Jeżeli do dielektryka przyłożymy pole zmienne sinusoidalnie – $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}$, to po wydzieleniu części rzeczywistej prądu przesunięcia powodującej straty ciepła, otrzymujemy ostatecznie

$$p = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2. \quad (2.27)$$

gdzie ϵ'' to urojona część zespolonej przenikalności dielektrycznej. Równanie (2.27) opisuje gęstość mocy rozpraszanej w dielektryku. Można łatwo zauważyć, że gęstość mocy rozpraszanej jest wprost proporcjonalna do współczynnika strat dielektrycznych, który jest jednym z najważniejszych parametrów materiałowych określających podatność danego dielektryka na podgrzewanie mikrofalowe. Współczynnik ten, nazywany również tangensem kąta stratności definiujemy następująco

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \quad (2.28)$$

gdzie ϵ' to rzeczywista część zespolonej przenikalności dielektrycznej. Część urojona przenikalności dielektrycznej jest funkcją częstotliwości przykładanego pola. W tabeli 2.2 zebrano wartości

Tablica 2.2: Wartości tangensa kąta stratności $\text{tg}\delta$ dla wybranych dielektryków [6, 42, 56]

Materiał	$\text{tg}\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ dla częstotliwości 2.45 GHz
Suchy piasek	0.007/2.55
Bakelit	0.23/3.7
Guma	0.05/2.7
Materiał wybuchowy (TNT)	0.04/3.02

tangensa kąta stratności dla wybranych materiałów (ze szczególnym uwzględnieniem tych materiałów, z których wytwarzane są korpusy niemetalicznych min lądowych) dla częstotliwości 2.45 GHz.

Parametrem istotnym w podgrzewaniu mikrofalowym jest głębokość wnikania fali elektromagnetycznej w badany materiał. W związku z cieplnym rozpraszaniem energii pola, jego amplituda maleje eksponencjalnie wraz z odległością od powierzchni materiału, a co za tym idzie, w takim samym stopniu maleje również ilość mocy rozpraszanej. Głębokość wnikania definiujemy jako odległość od powierzchni materiału, na której strumień wektora Poytinga zmniejsza swoją wartość początkową $1/e = 0.368$ razy (należy pamiętać, że wielkość ta nie jest równoważna z głębokością wnikania pola elektromagnetycznego definiowaną dla przewodników). Opisać można ją wzorem [42]

$$D_w = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2\epsilon'}} \frac{1}{\sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1}} \quad (2.29)$$

co dla materiałów dla których $\epsilon'' \ll \epsilon'$ upraszcza się do

$$D_w \approx \frac{\lambda\sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (2.30)$$

Łatwo obliczyć, że dla częstotliwości 2.45 GHz ($\lambda = 0.12$ m) i suchego piasku ($\epsilon'' = 0.007$, $\epsilon' = 2.55$) otrzymujemy głębokość wnikania fali elektromagnetycznej o wartości $D_w = 0.47$ m. Co jest wystarczające dla naszych zastosowań.

Grzanie mikrofalowe ma charakter objętościowy co sprawia, że ma ono znaczącą przewagę nad grzaniem konwencjonalnym. W przypadku grzania mikrofalowego w danym momencie jest podgrzewana cała objętość (jedynym ograniczeniem jest głębokość wnikania) danego materiału, a nie jak w przypadku grzania konwencjonalnego – tylko jego powierzchnia. Efektywnie przyspiesza to podgrzewanie, co jest szczególnie ważne w naszym przypadku.

Fala elektromagnetyczna o częstotliwości zawierającej się w przedziale odpowiadającym mikrofalom, podgrzewająca badany materiał może być generowana na wiele sposobów. Najczęściej jako generatora fal używa się magnetronu. Magnetron jest rodzajem elektronowej lampy próżniowej, której zasada działania jest oparta na zjawisku rezonansu. Głównym elementem magnetronu jest blok

anodowy w kształcie pierścienia, posiadający specjalne wnęki rezonansowe. Jego kształt dopasowany jest tak, aby generowana fala miała określoną częstotliwość. Elektrony emitowane są ze znajdującej się wewnątrz komory anodowej katody, podgrzewanej elementem oporowym żarzenia. Przyłożone do komory anodowej magnesy wytwarzają pole magnetyczne, zakrzywiające tor elektronów. Między anodą a katodą przyłożone jest wysokie napięcie prądu stałego, wymuszające przepływ elektronów z katody i przyspieszające je. Wyjście wysokiej częstotliwości wyprowadzane jest z jednego z rezonatorów. Podczas pracy magnetronu wytwarzana jest duża ilość ciepła, dlatego komora anodowa otoczona jest kołnierzem radiacyjnym, a urządzenie musi być chłodzone powietrzem lub wodą.

3. Model matematyczny mikrofalowo wzbudzonej termografii podczerwonej

Przy budowie systemu pomiarowego wykorzystano wyniki obliczeń numerycznych zaprezentowane w niniejszym rozdziale. Najważniejszym zagadnieniem związanym z projektowanym układem była optymalizacja kształtu kołnierza falowodu mikrofalowego. Do optymalizacji użyto dedykowanych modeli numerycznych, które pozwalają na iteracyjne otrzymywanie wyników w zagadnieniu prostym. Wyniki te stosowano następnie do obliczania wartości minimalizowanej funkcji celu w zagadnieniu optymalizacyjnym. Wyniki optymalizacji zostały wykorzystane do stworzenia modeli dwu- i trójwymiarowych symulujących zjawisko mikrofalowego podgrzewania piasku wraz z miną.

3.1. Optymalizacja kołnierza falowodu mikrofalowego

W niniejszym rozdziale zostanie zaprezentowany jeden z najważniejszych etapów prac nad projektem urządzenia grzewczo-detekcyjnego – optymalizacja wymiarów kołnierza falowodu w celu uzyskania odpowiednich parametrów grzania mikrofalowego. Prezentowane tutaj analizy oraz ich wyniki zostały częściowo opublikowane w [57, 58]. Założono, że w wyniku zastosowania zoptymalizowanego urządzenia grzewczego podgrzany obszar na powierzchni piasku będzie miał następujące parametry:

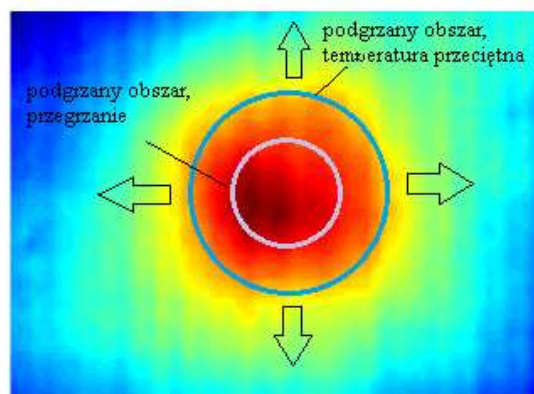
— możliwie największą powierzchnię,

Umożliwi to detekcję nie tylko tych obiektów, które znajdują się bezpośrednio pod falowodem, ale również tych znajdujących się w jego otoczeniu, co pomoże skrócić czas potrzebny na analizę danego pola minowego,

— możliwie jednorodny rozkład temperatury,

W wyniku grzania mikrofalowego przy użyciu generatora podłączonego bezpośrednio do otwartego falowodu, otrzymywany jest zwykle w przybliżeniu gaussowski rozkład temperatury na powierzchni piasku. Oznacza to, że w centralnej części podgrzanego obszaru obserwuje się przegrzanie, które może, w niektórych przypadkach, być rozpoznane jako obiekt. Aby tego uniknąć potrzebne jest zmniejszenie temperatury w centralnej części podgrzewanego obszaru.

Na rysunku 3.1 przedstawiono typowy termogram podgrzanej powierzchni piasku wraz z zaznaczonymi obszarami branyymi pod uwagę w procesie optymalizacji. Strzałkami zaznaczono kierunki oczekiwanego rozszerzenia cieplejszej plamy otrzymywanej na powierzchni piasku. Założono również zmniejszenie temperatury w centralnej części plamy – zaznaczonej jako 'przegrzanie'.

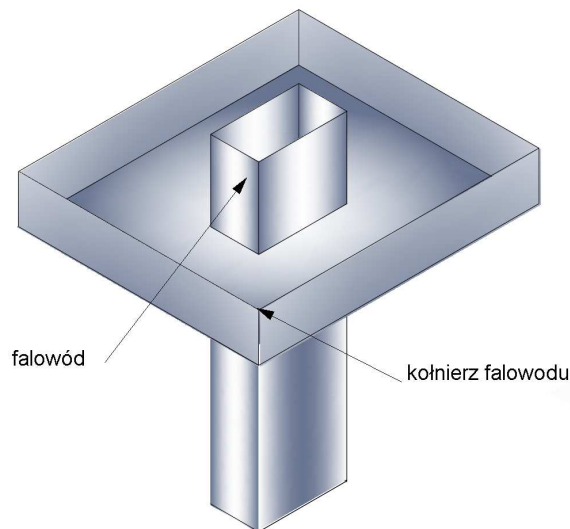


Rysunek 3.1: Termogram otrzymany po nagrzaniu piasku. Zaznaczono obszary brane pod uwagę przy optymalizacji

Przy projektowaniu kołnierza wzięto pod uwagę możliwość jego praktycznej realizacji – stąd bazowe założenie jego kształtu jako kołnierza typu *box*. Tego typu kołnierz powinien zapewnić poszerzenie charakterystyki promieniowania anteny w obu płaszczyznach: H oraz E, jak wyjaśniono w rozdziale 2.3.3. Przy założeniu bazowego kształtu kołnierza falowodu zagadnieniem optymalizacyjnym staje się określenie jego rozmiarów oraz odległości kołnierza od końca falowodu. Projekt kołnierza przedstawiony jest na rysunku 3.2.

Procedura optymalizacji dla przypadku dwu- i trójwymiarowego została przeprowadzona za pomocą komercyjnego oprogramowania COMSOL oraz Matlab z *Optimization Toolbox*. W programie COMSOL z wykorzystaniem metody elementów skończonych (ang. FEM – *f*inite *e*lement *m*ethod) otrzymywano charakterystykę promieniowania dla danej geometrii anteny. Matlab z *Optimization Toolbox* został użyty do ustalenia optymalnych rozmiarów kołnierza falowodu. Optymalizację przeprowadzono przy użyciu metody hybrydowej łączącej dwie standardowe metody: algorytmy genetyczne (jedna z metod stochastycznych) oraz metodę *pattern search* (zaliczaną do technik wyszukiwania bezpośredniego) [59, 60].

W algorytmie genetycznym *populacja* ciągów znaków (nazywanych *chromosomami*), w których zakodowane są rozwiązania (zwane *osobnikami*) problemu optymalizacyjnego, ewoluuje w coraz to lepsze rozwiązania danego problemu. Chromosomy mogą być podane w różnych formach, w naszym



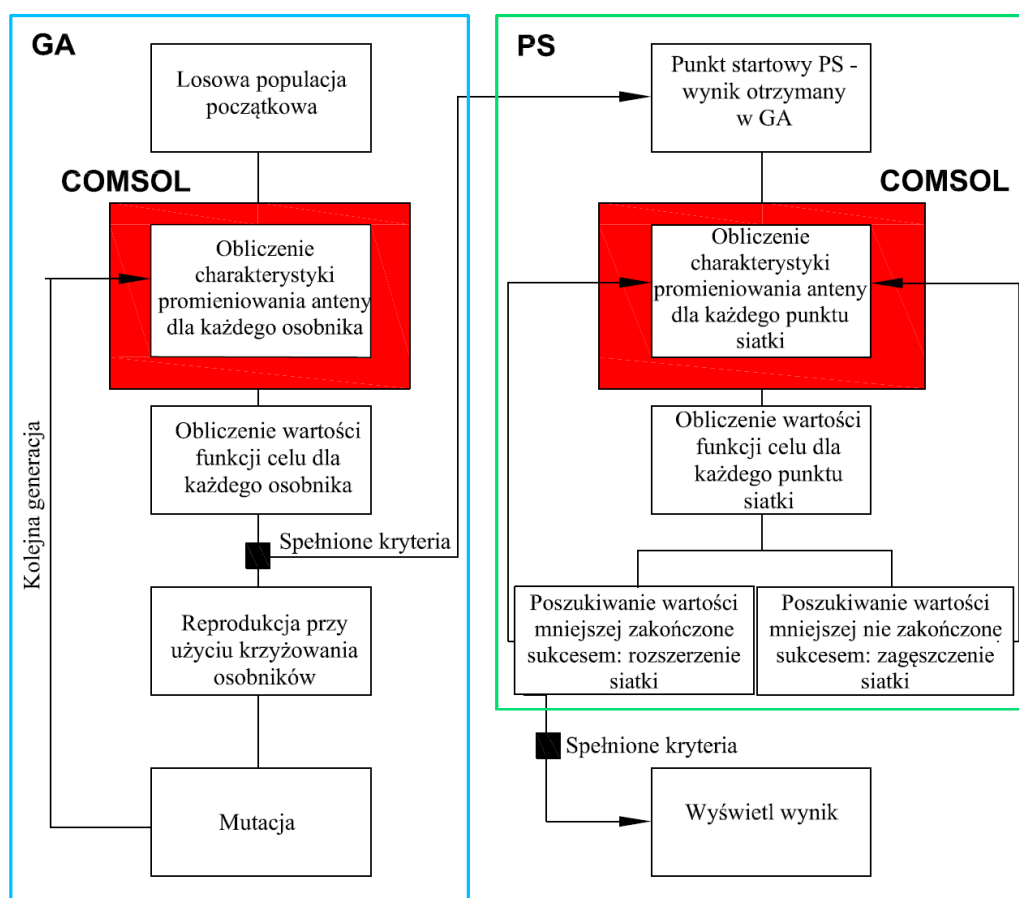
Rysunek 3.2: Projekt kołnierza falowodu prostokątnego

przypadku dobrym rozwiązaniem okazało się użycie liczb rzeczywistych, odpowiadających fizycznym rozmiarom kołnierza. Algorytm rozpoczyna się od losowego obrania populacji początkowej, która w kolejnych generacjach zmienia swoją postać. W każdej generacji obliczana jest wartość funkcji celu dla wszystkich osobników, następnie wybrane osobniki krzyżuje się ze sobą (*reprodukcja*) oraz modyfikuje (*mutacja*), aby otrzymać nową populację. Otrzymane potomstwo używane jest w kolejnej iteracji algorytmu. Algorytm kończy się w momencie przekroczenia założonej liczby generacji lub otrzymania założonej wartości funkcji celu.

Algorytm poszukiwania wzorca (*pattern search*) rozpoczyna się od wybrania przez użytkownika wektora startowego. Wzorcem nazywamy ciąg wektorów, za pomocą którego ustala się kierunek poszukiwania minimum funkcji celu. Na przykład dla zagadnienia optymalizacyjnego z dwoma zmiennymi otrzymujemy następujący wzorec składający się z czterech wektorów: $v_1 = [0, 1]$, $v_2 = [0, -1]$, $v_3 = [1, 0]$, $v_4 = [-1, 0]$. Do wybranego wektora początkowego dodawane są kolejno wektory wzorca przemnożone przez rozmiar siatki (*siatką* nazywamy zbiór otrzymanych w wyniku tej operacji wektorów, natomiast *rozmiarem siatki* – dowolny skalar określający rozmiar kroku). W każdym z punktów otrzymanej w ten sposób siatki obliczana jest wartość funkcji celu. Jeżeli w którymś z punktów wartość funkcji celu okaże się mniejsza niż aktualna, ten punkt obierany jest do następnej iteracji, a rozmiar siatki się zwiększa. W przeciwnym przypadku, punkt pozostaje bez zmian, natomiast rozmiar siatki się zmniejsza. Algorytm kończy się, gdy zostanie osiągnięta: planowana liczba iteracji, założony rozmiar siatki, bądź ustalona wartość funkcji celu.

Zaletą metod stochastycznych jest mniejsza wrażliwość na minima lokalne oraz brak potrzeby

podawania punktu początkowego (wiedza a priori o problemie nie jest więc tutaj wymagana). Wiąże się to jednak z długim czasem potrzebnym na obliczenia. Metody wyszukiwania bezpośredniego z drugiej strony charakteryzują się szybkim działaniem, jednakże wymagane jest podanie początkowego punktu poszukiwań, od którego zależy efektywność całego algorytmu. Użycie metody hybrydowej pozwala na połączenie zalet obu algorytmów. Działanie algorytmu hybrydowego składa się z dwóch etapów. W pierwszym etapie jest stosowany algorytm genetyczny, przy czym aby zminimalizować czas obliczeń liczba generacji zostaje ograniczona. Otrzymany wynik jest stosowany w drugim etapie jako punkt startowy dla algorytmu *pattern search*. Schemat proponowanego algorytmu hybrydowego jest przedstawiony na rysunku 3.3.

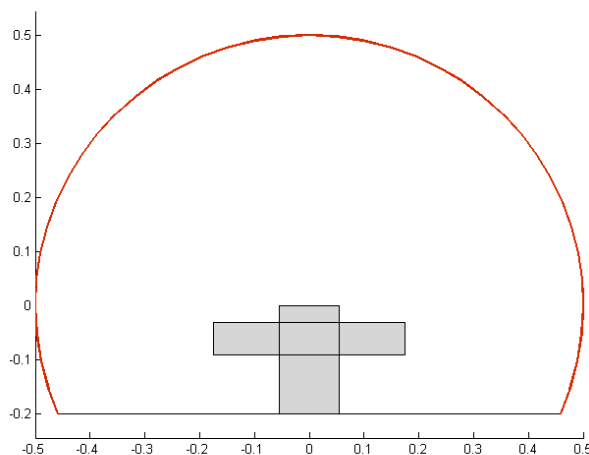


Rysunek 3.3: Schemat blokowy proponowanego algorytmu hybrydowego optymalizacji

3.1.1. Optymalizacja w modelu dwuwymiarowym – zdefiniowanie problemu

Problem rozwiązano najpierw dla modelu dwuwymiarowego w celu sprawdzenia skuteczności metody optymalizacyjnej i ustalenia założeń dla modelu trójwymiarowego. Rysunek 3.4 przedstawia geometrię, która została użyta w programie COMSOL do rozwiązywania zagadnienia prostego.

Rozkład znormalizowanego wektora pola elektrycznego E_z był odczytywany z krzywej



Rysunek 3.4: Geometria używana przy rozwiązywaniu zagadnienia prostego w programie COMSOL dla przypadku dwuwymiarowego

zaznaczonej kolorem czerwonym i posłużył do sporządzenia charakterystyki promieniowania falowodu. W związku ze specyfiką problemu krzywa nie stanowi pełnego okręgu, ale jego wycinek o długości około 2 m. Celem optymalizacji było zminimalizowanie różnicy między otrzymywaną w wyniku rozwiązania zagadnienia prostego charakterystyką promieniowania anteny, a funkcją dzwonową o ustalonych parametrach. Funkcja dzwonowa jest opisana wzorem

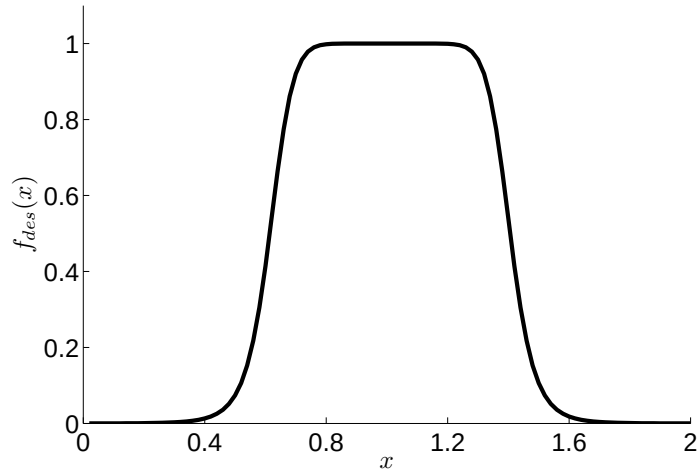
$$f_{bell}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-p_1}{p_2} \right|^{2p_3}}, \quad (3.1)$$

gdzie p_1 , p_2 oraz p_3 to parametry funkcji odpowiadające za jej kształt. Na rysunku 3.5 przedstawiono funkcję dzwonową wybraną do optymalizacji (parametry krzywej: $p_1 = 1$, $p_2 = 0.4$, $p_3 = 5$).

Za funkcję celu obrano błąd średniokwadratowy definiowany następująco:

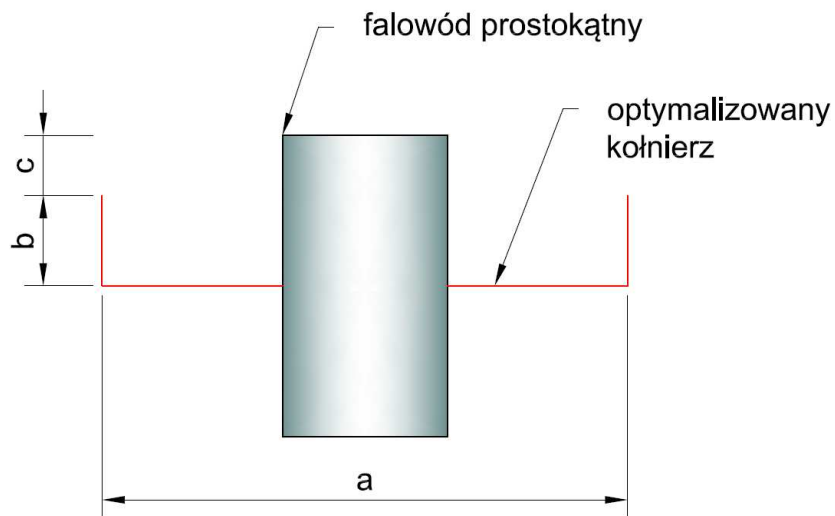
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_{des}(x_k) - f(x_k))^2, \quad (3.2)$$

gdzie $f_{des}(x)$ oraz $f(x)$ to odpowiednio wartości żądanej funkcji dzwonowej i wartości wektora pola elektrycznego E_z odniesione do jego wartości maksymalnej dla danego punktu krzywej



Rysunek 3.5: Wykres funkcji dzwonowej używanej w procesie optymalizacji

zaznaczonej na rysunku 3.4, natomiast N to obrana liczba argumentów funkcji branych pod uwagę przy optymalizacji. Parametry optymalizacji dla przypadku dwuwymiarowego to: szerokość, wysokość kołnierza w płaszczyźnie E oraz odległość kołnierza od końca falowodu. Parametry wraz z ich oznaczeniami prezentuje rysunek 3.6



Rysunek 3.6: Parametry optymalizacji w modelu dwuwymiarowym

3.1.2. Optymalizacja w modelu dwuwymiarowym – wyniki

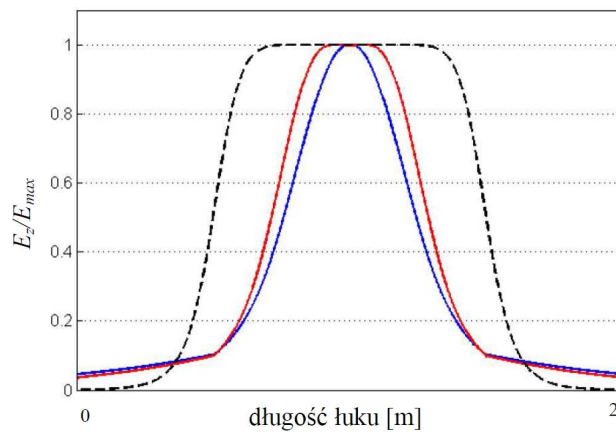
Optymalizacja w modelu dwuwymiarowym pozwala na szybkie uzyskanie wyniku i może posłużyć do oceny ogólnej efektywności metody optymalizacyjnej. Jej wynik jednakże, w związku z analizą tylko jednej płaszczyzny, w której rozchodzi się fala elektromagnetyczna, nie może być wykorzystany do budowy kołnierza.

Jak wspomniano wcześniej, proponowana hybrydowa metoda optymalizacyjna zakłada użycie algorytmu genetycznego do ustalenia punktu startowego dla algorytmu wyszukiwania wzorca. W przypadku modelu 2D przeprowadzono analizę wpływu liczby generacji w algorytmie genetycznym na ostateczny efekt optymalizacji. W tym celu proces przeprowadzono kilkakrotnie dla dwóch założonych liczebności populacji początkowej i pięciu różnych wartości liczby generacji. W tablicy 3.1 zebrano wyniki optymalizacji dla różnej liczby generacji.

Tablica 3.1: Wyniki optymalizacji kołnierza falowodu w modelu dwuwymiarowym

Liczba iteracji w algorytmie PS	Liczebność populacji w GA	Liczba generacji w GA	a [m]	b [m]	c [m]	Wartość funkcji celu
100	30	30	0.35	0.13	0.03	0.1058
		40	0.35	0.13	0.03	0.1059
		50	0.23	0.15	0.0001	0.0977
	40	10	0.23	0.15	0.0001	0.0977
		20	0.23	0.15	0.0001	0.0977

Przeprowadzona analiza wskazuje, że mniejsza liczebność populacji oraz generacji sprzyja błędnemu określeniu punktu początkowego dla algorytmu poszukiwania wzorca, którego efektem jest osiągnięcie minimum lokalnego, zamiast globalnego. Przy zwiększonej liczbie osobników lepszy wynik otrzymujemy już przy 10 generacjach. Minimum zostało osiągnięte również przy zastosowaniu populacji złożonej z 30 osobników i 50 generacji. Zauważmy jednak, iż wiąże się to z wywołaniem funkcji celu 1500 razy, natomiast dla populacji liczącej 40 osobników i w 10 generacjach funkcja ta wywoływana jest tylko 400 razy, co znacznie skraca czas obliczeń. Zastosowanie kołnierza o wymiarach podanych w tabeli dla najmniejszej wartości funkcji celu pozwala na poszerzenie charakterystyki promieniowania anteny w płaszczyźnie E, co prezentuje rysunek 3.7. Przedstawiono porównanie charakterystyki promieniowania otrzymywanej dla falowodu bez kołnierza z otrzymywaną poprzez zastosowanie zoptymalizowanego kołnierza. Na wykres naniesiono również wykres żądanej funkcji dzwonowej.

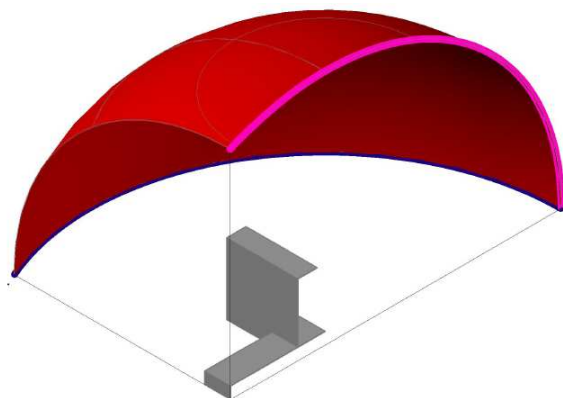


Rysunek 3.7: Porównanie charakterystyk promieniowania otrzymanych dla falowodu ze zoptymalizowanym kołnierzem (linia czerwona) oraz dla falowodu bez kołnierza (linia niebieska). Naniesiono również wykres funkcji dzwonowej (czarna przerywana linia)

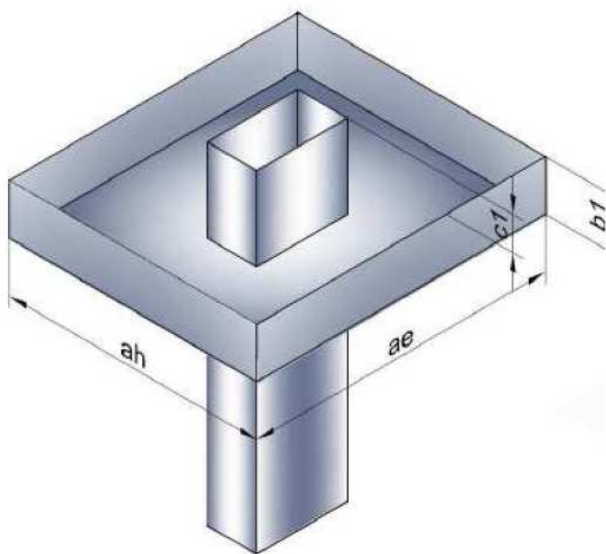
3.1.3. Optymalizacja w modelu trójwymiarowym – zdefiniowanie problemu

W przypadku optymalizacji przeprowadzonej dla układu trójwymiarowego podstawowym utrudnieniem były długotrwałe obliczenia, związane z rozwiązywaniem zagadnienia prostego za pomocą pakietu COMSOL. Przeprowadzenie obliczeń dla pełnego modelu trójwymiarowego wymaga dużej mocy obliczeniowej komputera i jest praktycznie niewykonywalne za pomocą sprzętu jakim dysponowano. Analizowany układ został więc ograniczony do 1/4 objętości. Było to możliwe ze względu na symetrię. Rysunek 3.8 przedstawia geometrię zastosowaną w trójwymiarowym zagadnieniu optymalizacyjnym. Pogrubione linie (różowa i niebieska) wskazują łuki, na których zbierane były wartości natężenia pola elektrycznego w strefie dalekiej, na których podstawie sporządzono charakterystyki promieniowania falowodu dla różnych rozmiarów kołnierza. Rysunek 3.9 przedstawia parametry optymalizacji dla pełnego kołnierza. Rozważane były cztery parametry: szerokość kołnierza w płaszczyźnie E – ae , szerokość kołnierza w płaszczyźnie H – ah , wysokość kołnierza – $b1$ oraz odległość kołnierza od końca falowodu – $c1$.

W przypadku modelu trójwymiarowego mamy możliwość przeprowadzenia optymalizacji wymiarów kołnierza poprzez analizę charakterystyki promieniowania w płaszczyźnie E oraz H. Efektem optymalizacji będzie więc poszerzenie charakterystyki w obu płaszczyznach. W związku z faktem, iż używana jest uproszczona geometria, zawężająca układ do 1/4 oryginalnego jego rozmiaru, również otrzymywana charakterystyka będzie okrojona. Dla obu płaszczyzn otrzymamy połowę charakterystyki, co jest wystarczające ze względu na symetrię układu. Tak jak w przypadku optymalizacji w problemie dwuwymiarowym za cel obrano zminimalizowanie różnicy między otrzymywaną charakterystyką, a funkcją dzwonową. Takie same funkcje dzwonowe zostały użyte do

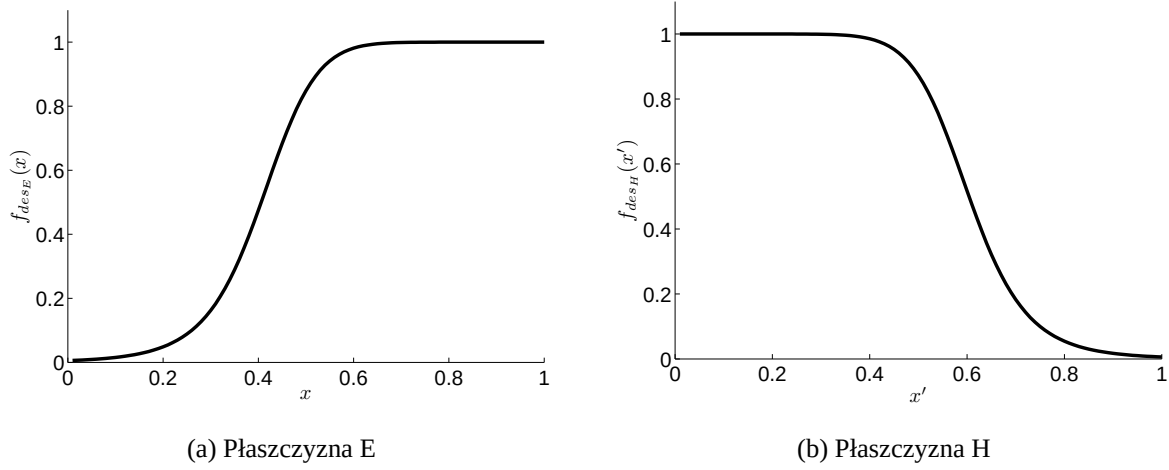


Rysunek 3.8: Geometria trójwymiarowa używana do rozwiązywania zagadnienia prostego w programie COMSOL. Pogrubione linie, to krzywe z których zbierane były wartości pola do wykreślenia charakterystyki promieniowania. Linia różowa jest położona w płaszczyźnie wektora $\mathbf{E}$, natomiast niebieska w płaszczyźnie wektora $\mathbf{H}$.



Rysunek 3.9: Parametry optymalizacji dla przypadku trójwymiarowego

optymalizacji w obu płaszczyznach. Rysunki 3.10a oraz 3.10b przedstawiają proponowane funkcje dzwonowe obcięte tak, aby pasowały do rozważanego problemu (parametry krzywych to: dla krzywej z rysunku 3.10a – $p_1 = 1$, $p_2 = 0.6$, $p_3 = 5$, dla krzywej z rysunku 3.10b – $p_1 = 0$, $p_2 = 0.6$, $p_3 = 5$).



Rysunek 3.10: Obcięty wykres krzywej dzwonowej używany przy optymalizacji zagadnienia trójwymiarowego

Dla problemu trójwymiarowego obliczane są dwa błędy średniokwadratowe, definiowane równaniem (3.2) – oddzielnie dla płaszczyzny E i H. Jako funkcję celu przyjęto zatem sumę dwóch błędów średniokwadratowych:

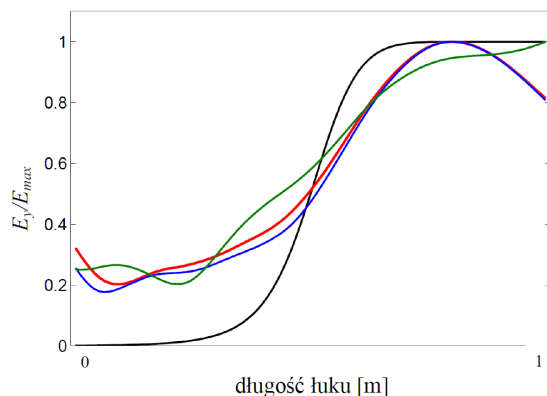
$$MSE_E + MSE_H = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_{des_E}(x_k) - f_E(x_k))^2 + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_{des_H}(x'_k) - f_H(x'_k))^2, \quad (3.3)$$

3.1.4. Optymalizacja w modelu trójwymiarowym – wyniki

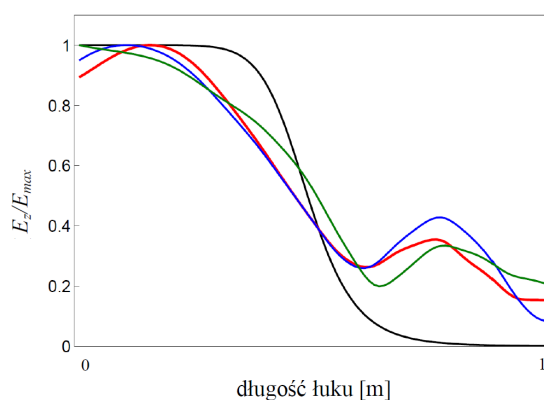
Optymalizacja w modelu trójwymiarowym, ze względu na jego złożoność obliczeniową, zajmuje dużo czasu. Ważne było zatem dobranie odpowiedniej liczby generacji w algorytmie genetycznym, tak, aby przy jak najmniejszej ich liczbie osiągnąć wynik najbliższy minimum globalnemu. W tabelicy 3.2 zebrano wyniki optymalizacji i wartości funkcji celu dla dwóch liczebności generacji. Jak widać zwiększenie liczebności populacji oraz podniesienie liczby generacji powoduje zmniejszenie ostatecznej wartości funkcji celu. Wykresy 3.11a oraz 3.11b przedstawiają porównanie charakterystyk otrzymanych poprzez zastosowanie kołnierza o zoptymalizowanych wymiarach, podanych w tabeli 3.2. Poniżej (rysunki 3.12 oraz 3.13) przedstawiono wykresy charakterystyk wybranej, optymalnej anteny. Najlepszy wynik osiągnięto w procesie optymalizacji wykorzystującym 50 osobników w 20 generacjach do ustalenia punktu początkowego dla algorytmu poszukiwania wzorca.

Tablica 3.2: Wyniki optymalizacji kołnierza falowodu dla przypadku trójwymiarowego

Liczba iteracji w algorytmie PS	Liczebność populacji w GA	Liczba generacji w GA	ae [m]	ah [m]	b1 [m]	c1 [m]	Wartość funkcji celu
100	40	20	0.23	0.27	0.027	0.008	0.708
	50	10	0.39	0.15	0.017	0.003	0.672
		20	0.30	0.28	0.037	0.019	0.649

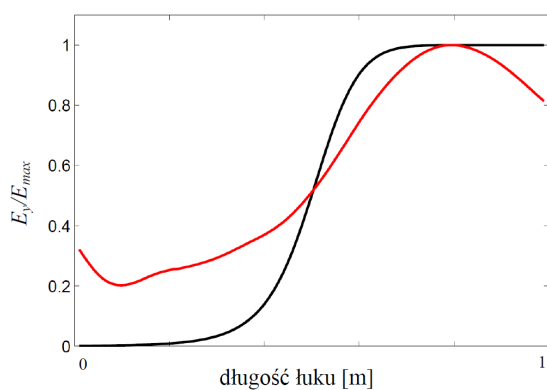


(a) Wynik dla płaszczyzny E

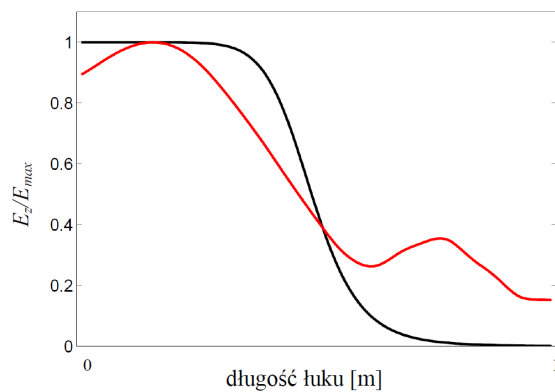


(b) Wynik dla płaszczyzny H

Rysunek 3.11: Porównanie wyników optymalizacji dla różnej ilości generacji. Krzywa niebieska – wynik dla 40 osobników i 20 generacji, krzywa zielona – wynik dla 50 osobników i 10 generacji, krzywa zielona – wynik dla 50 osobników i 20 generacji. Czarna linia – wykres krzywej dzwonowej



Rysunek 3.12: Wynik dla płaszczyzny E



Rysunek 3.13: Wynik dla płaszczyzny H

Rysunek 3.14: Charakterystyka optymalna. Krzywa czerwona – wynik dla 50 osobników i 20 generacji. Czarna linia – wykres krzywej dzwonowej

3.2. Symulacja numeryczna zjawiska podgrzewania mikrofalowego w oparciu o modele dwuwymiarowe

Modele dwuwymiarowe zostały sporządzone w taki sposób, aby jak najdokładniej zobrazować dynamikę podgrzewania mikrofalowego podczas etapu grzania, jak również dynamikę swobodnego, konwekcyjnego przepływu ciepła na etapie chłodzenia układu [61–63]. Zastosowanie układu dwuwymiarowego pozwala na przeprowadzenie obliczeń w krótkim czasie, a jednocześnie umożliwia prawidłową ocenę dynamiki zmian temperatury w układzie. Obliczenia przeprowadzone zostały ponownie przy użyciu komercyjnego oprogramowania COMSOL *Multiphysics*. Do symulacji grzania mikrofalowego wybrano moduł RF – Electro-Thermal Interaction – In-Plane Microwave Heating – TE Microwave Heating – Transient analysis. Moduł ten umożliwia jednoczesne modelowanie powstającej w układzie fali o ustalonej częstotliwości przy założeniu jej harmonicznej propagacji oraz przepływu ciepła w dziedzinie czasu.

Aby stworzyć model prawidłowo odwzorowujący rzeczywistą dynamikę układu, ważne jest dokładne określenie właściwości materiałowych badanych elementów oraz nałożenie odpowiednich warunków brzegowych. W przypadku grzania mikrofalowego należy określić właściwości termiczne (w szczególności przewodność cieplną – k , ciepło właściwe – C_p oraz gęstość – ρ_m) jak i elektryczne (zespoloną przenikalność elektryczną – ϵ) modelowanych materiałów.

Warunek brzegowy na granicy układu dla zagadnienia przepływu ciepła został określony przy założeniu dostatecznie dużej odległości brzegu od grzanego obiektu. Nałożony warunek ma wówczas postać:

$$T = T_0, \quad (3.4)$$

gdzie T_0 to stała temperatura równa założonej temperaturze otoczenia. W zagadnieniach falowych konieczne jest takie określenie warunku brzegowego, aby granica układu była przezroczysta z punktu widzenia rozchodzącej się fali. W tym celu stosowanych jest kilka technik, jak na przykład dodanie niewielkich (zwykle szerokości jednej długości fali) domen na krańcach układu, w których określa się warunek pochłaniania fali. Technika ta, w literaturze określana jako PML (ang. perfectly matched layers) [64], powoduje zwiększenie ilości elementów skończonych w układzie. Jest to niekorzystne z punktu widzenia czasu potrzebnego na obliczenia oraz wymaga większej mocy obliczeniowej komputera. Można tego jednakże uniknąć stosując warunek ABC (ang. absorbing boundary condition), który można wyprowadzić z ogólnego rozwiązania równania Helmholtza. Dla uproszczenia, rozważmy dwuwymiarowe równanie falowe we współrzędnych polarnych. W tym przypadku asymptotyczne wyrażenie na $\underline{E}_z(r, \phi)$, gdzie r oraz ϕ to odpowiednio współrzędna radialna i kątowa w układzie biegunowym, przyjmuje w dostatecznie dużej odległości od źródła postać

[65, 66]:

$$\underline{E}_z(r, \phi) \approx \frac{e^{-jk_f r}}{\sqrt{r}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\underline{A}_n(\phi)}{r^n}, \quad (3.5)$$

gdzie $k_f = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$, a $\underline{A}_n(\phi)$ to funkcja współrzędnej ϕ . Dzięki prostym przekształceniom równania (3.5) otrzymujemy następującą postać warunku brzegowego na wirtualnym okręgu o promieniu r :

$$\frac{\partial \underline{E}_z}{\partial r} + jk_f \underline{E}_z + \frac{\underline{E}_z}{2r} = O(r^{-5/2}). \quad (3.6)$$

Warunek ten określany jest jako ABC pierwszego rzędu. Podobnie otrzymać można również warunki ABC wyższych rzędów, jednak ze względów praktycznych w niniejszej pracy ograniczamy się do wykorzystania odpowiednio przekształconego równania (3.6) jako warunku brzegowego na wirtualnych krawędziach układu. Proponowany warunek brzegowy może zostać wprowadzony w komercyjnym oprogramowaniu COMSOL, jeżeli na krawędziach układu zastosuje się jeden z dostępnych warunków: "óklad prądowy" (ang. surface current) w postaci: $-\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s$. Przekształcając równanie (3.6) do współrzędnych kartezjańskich, otrzymujemy ostatecznie gotowe do wprowadzenia warunki brzegowe:

— dla $x = \text{const}$

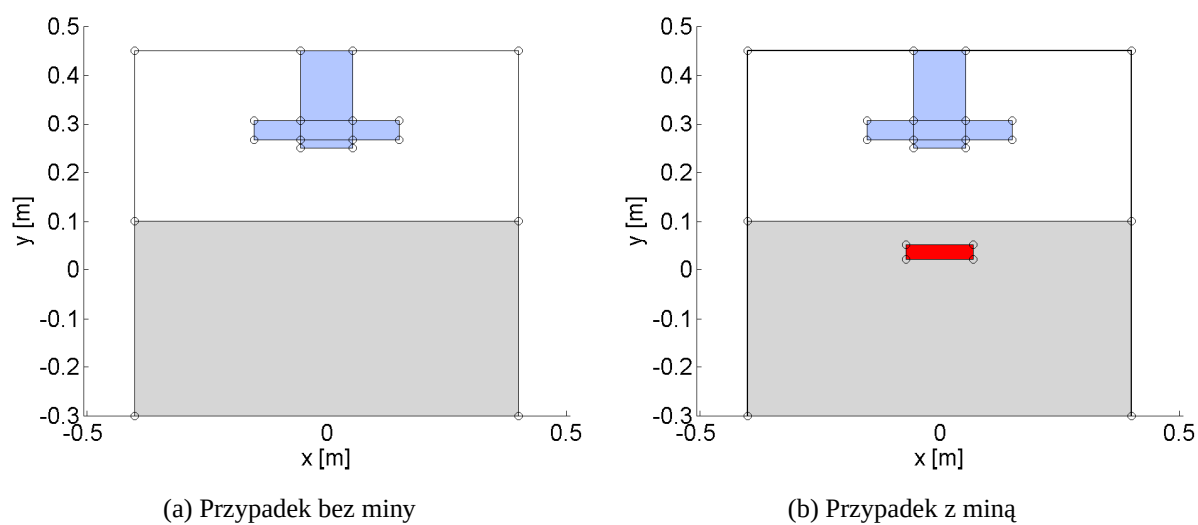
$$-\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \frac{1}{j\omega\mu} \left[\frac{x}{y} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} + \left(jk_f \sqrt{1 + (x/y)^2} + \frac{1}{2x} \right) \underline{E}_z \right] \mathbf{1}_z, \quad (3.7)$$

— dla $y = \text{const}$

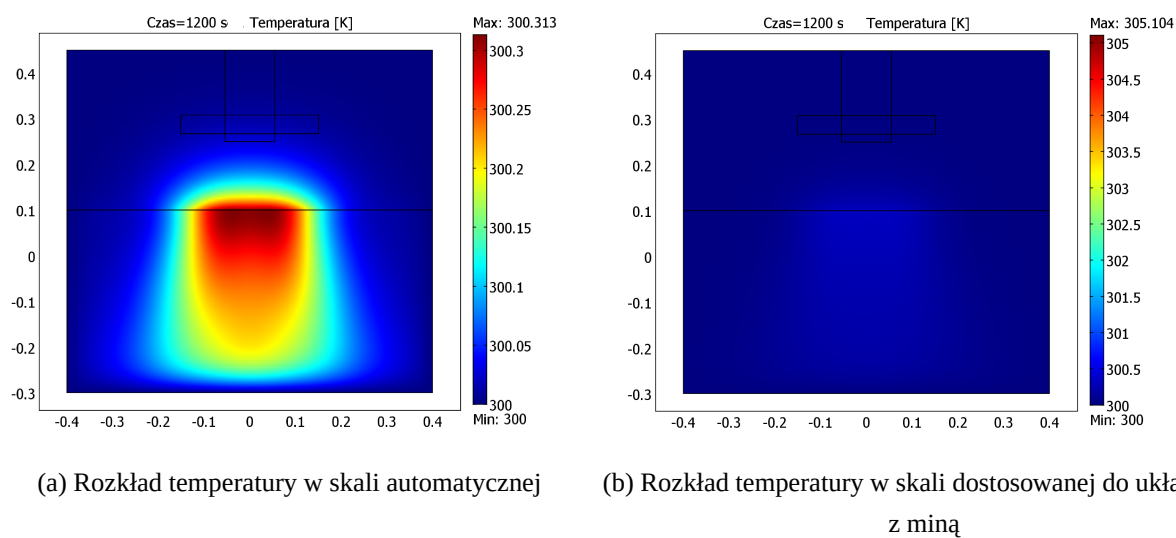
$$-\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \frac{1}{j\omega\mu} \left[\frac{y}{x} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} + \left(jk_f \sqrt{1 + (y/x)^2} + \frac{1}{2y} \right) \underline{E}_z \right] \mathbf{1}_z, \quad (3.8)$$

Fala elektromagnetyczna o częstotliwości 2.45 GHz, generowana była w modelu przy pomocy warunku brzegowego "port" dostępnego w oprogramowaniu COMSOL. Moc promieniowania ustalono na 1000 W, co odpowiada mocy magnetronów – szeroko dostępnych generatorów mikrofal. Rysunki 3.15a oraz 3.15b przedstawia geometrię układu, przygotowaną w programie COMSOL, dla przypadku odpowiednio bez miny i z miną.

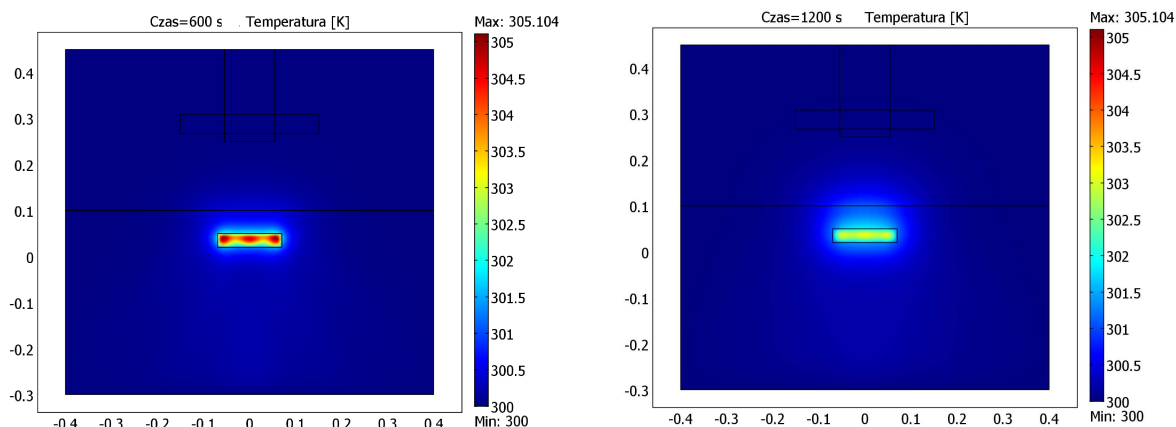
Poniżej zaprezentowane zostały rysunki przedstawiające rozkład temperatury w układzie dla wybranego czasu nagrzewania i naturalnego (konwekcyjnego) chłodzenia układu (odpowiednio – 600 sekund i 600 sekund). Rysunek 3.16a przedstawia rozkład temperatury w układzie bez miny, po 600 sekundach chłodzenia poprzedzonych 600 sekundami mikrofalowego nagrzewania piasku w skali automatycznej. Na rysunku 3.16b zmieniono skalę tak, aby możliwe było porównanie rozkładu temperatury dla samego piasku z podobnym rozkładem otrzymanym po nagrzaniu układu z zakopaną miną. Rysunek 3.17a przedstawia rozkład temperatury w układzie z miną po 600 sekundach nagrzewania. Dla porównania na rysunku 3.17b przedstawiono rozkład temperatury po dalszym, 600 sekundowym chłodzeniu układu. Łatwo zaobserwować, że mina w modelu, ze



Rysunek 3.15: Geometria dwuwymiarowa używana do rozwiązywania zagadnienia prostego w programie COMSOL



Rysunek 3.16: Rozkład temperatury w układzie bez miny



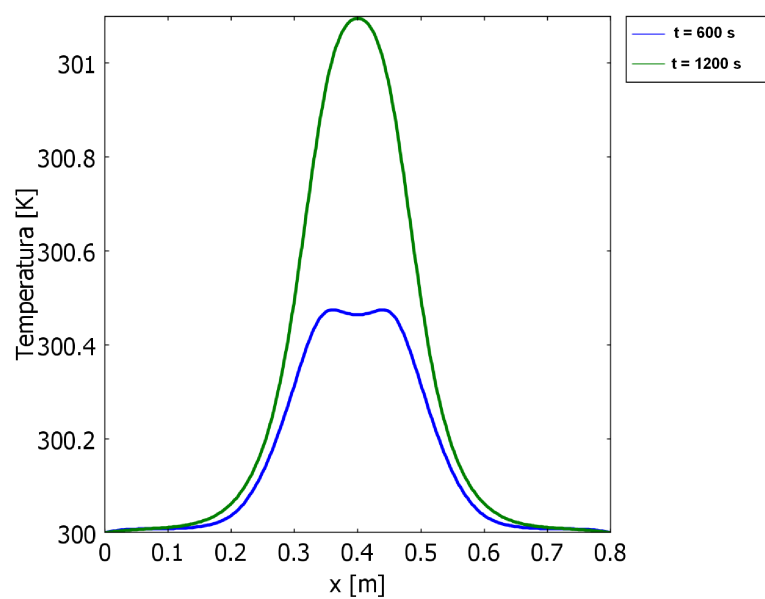
(a) Po 600 sekundach nagrzewania

(b) Po 600 sekundach chłodzenia poprzedzonych 600 sekundowym nagrzewaniem

Rysunek 3.17: Rozkład temperatury w modelu z miną

względem na swoje właściwości termiczne i elektryczne, nagrzewa się w większym stopniu niż piasek. Aby jednak różnica temperatur stała się widoczna dla kamery termowizyjnej, rejestrującej rozkład ciepła na powierzchni piasku, potrzebny jest dodatkowy czas chłodzenia układu, w którym następuje przepływ ciepła od miny ku powierzchni gruntu. Rysunek 3.18 prezentuje porównanie rozkładu temperatury obserwowanej na powierzchni piasku po samym procesie nagrzewania (linia niebieska) i po grzaniu wraz z chłodzeniem (linia zielona). Wyraźnie widać wzrost obserwowanej temperatury po dodatkowym chłodzeniu. Jak widać obserwacja uproszczonego układu przynosi nam istotne informacje na temat dynamiki zjawisk fizycznych w nim zachodzących, tym samym dając wskazówki do projektowania znacznie bardziej złożonych modeli 3D oraz pozwala na opracowanie techniki pomiarowej. Modele 3D pozwolą na analizę pełnego rozkładu temperatury na powierzchni symulowanego gruntu, który może zostać porównany bezpośrednio z otrzymywanym obrazem z kamery termowizyjnej.

Dwuwymiarowe modele są znacznym uproszczeniem rzeczywistego układu, stanowią jednak wystarczająco dobre narzędzie, które może zostać wykorzystane tam, gdzie istotny jest krótki czas obliczeń. Jednym z etapów niniejszej pracy jest rozwiązanie zagadnienia odwrotnego, polegającego na estymacji niektórych parametrów obiektu na podstawie rozkładów temperatury odczytywanych z powierzchni gruntu. Zastosowanie modelu 3D w tym przypadku wiązałoby się z bardzo długimi obliczeniami i byłoby praktycznie niemożliwe w rozsądnych granicach czasu. W związku z tym do rozwiązania zagadnienia odwrotnego wykorzystane będą zaprezentowane w tym rozdziale układy dwuwymiarowe.



Rysunek 3.18: Porównanie rozkładu temperatury na powierzchni piasku obserwowanego po 600 sekundach nagrzewania (linia niebieska) z tym otrzymanym po 600 sekundach dalszego chłodzenia układu (zielona linia)

3.3. Symulacja numeryczna zjawiska podgrzewania mikrofalowego w oparciu o modele trójwymiarowe

Modele trójwymiarowe, podobnie jak opisane poprzednio modele dwuwymiarowe, przygotowane zostały w oprogramowaniu COMSOL *Multiphysics*. Obliczenia wykonane zostały za pomocą metody elementów skończonych. Z założenia, model ma jak najlepiej odzwierciedlać rzeczywistą dynamikę rozważanego układu. W wypadku numerycznej analizy podgrzewania mikrofalowego piasku, należało stworzyć geometrię obejmującą pojemnik z piaskiem (objętość modelowanego pojemnika zmniejszono względem rzeczywistego układu laboratoryjnego), falowód oraz powietrze otaczające układ. Otrzymany model ma wymiary 80 x 80 x 55 cm. Zastosowano siatkę składającą się z 975 147 elementów, a liczba stopni swobody wynosiła 2 493 148. Ze względu na tak dużą złożoność problemu do obliczeń użyto serwera z czterema procesorami Intel Xeon E7450 (razem 24 rdzenie) i 96 GB pamięci RAM. Podobnie jak w przypadku modeli dwuwymiarowych i tutaj stosujemy asymptotyczne warunki brzegowe na sztucznym brzegu. Analogicznie jak w przypadku warunków dla zagadnienia 2D, wyprowadzamy warunki ABC dla zagadnienia trójwymiarowego. Rozważmy najpierw równanie falowe, które można wyprowadzić bezpośrednio z równań Maxwella (2.18). Przy założeniu, że spełniony jest warunek wypromieniowania Sommerfelda, pole może być zapisane w formie następującego szeregu nieskończonego[66]:

$$\underline{\mathbf{E}}(r) = \frac{e^{-jk_f r}}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\underline{\mathbf{A}}_n(\theta, \phi)}{r^n} \quad (3.9)$$

gdzie (r, θ, ϕ) to współrzędne sferyczne, a $\underline{\mathbf{A}}_n(\theta, \phi)$ - wektorowa funkcja współrzędnych (θ, ϕ) . Z równania (3.9) można otrzymać następujący warunek ABC pierwszego rzędu:

$$\frac{\partial \underline{\mathbf{E}}}{\partial r} + jk_f \underline{\mathbf{E}} + \frac{1}{r} \underline{\mathbf{E}} = 0. \quad (3.10)$$

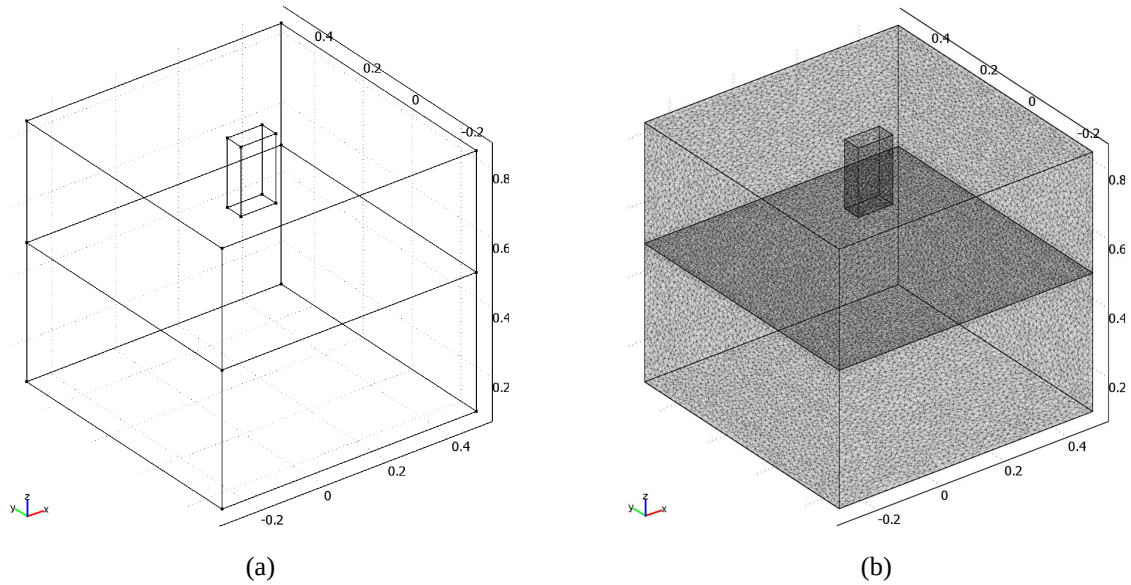
Podobnie jak w przypadku modelowania w dwóch wymiarach i tutaj warunek (3.10) może być wprowadzony w komercyjnym oprogramowaniu COMSOL, jeżeli zastosuje się jeden z dostępnych warunków: "ókład prądowy" (ang. surface current) w postaci: $-\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s$. Przekształcając równanie (3.10) do współrzędnych kartezjańskich otrzymujemy ostatecznie gotowe do wprowadzenia warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{H}} \times (\mp \mathbf{1}_x) = & \mp \frac{j}{\omega \mu} \left[\left(\frac{y}{x} \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial y} + \frac{z}{x} \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial z} + \frac{jk_f \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + 1}{x} \underline{E}_y + \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial y} \right) \mathbf{1}_y + \right. \\ & \left. + \left(\frac{y}{x} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} + \frac{z}{x} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial z} + \frac{jk_f \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + 1}{x} \underline{E}_z + \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial z} \right) \mathbf{1}_z \right], \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{H}} \times (\mp \mathbf{1}_y) = & \mp \frac{j}{\omega\mu} \left[\left(\frac{x}{y} \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial x} + \frac{z}{y} \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial z} + \frac{jk_f \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + 1}{y} \underline{E}_y + \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial x} \right) \mathbf{1}_x + \right. \\ & \left. + \left(\frac{x}{y} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} + \frac{z}{y} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial z} + \frac{jk_f \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + 1}{y} \underline{E}_z + \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial z} \right) \mathbf{1}_z \right], \quad (3.12) \end{aligned}$$

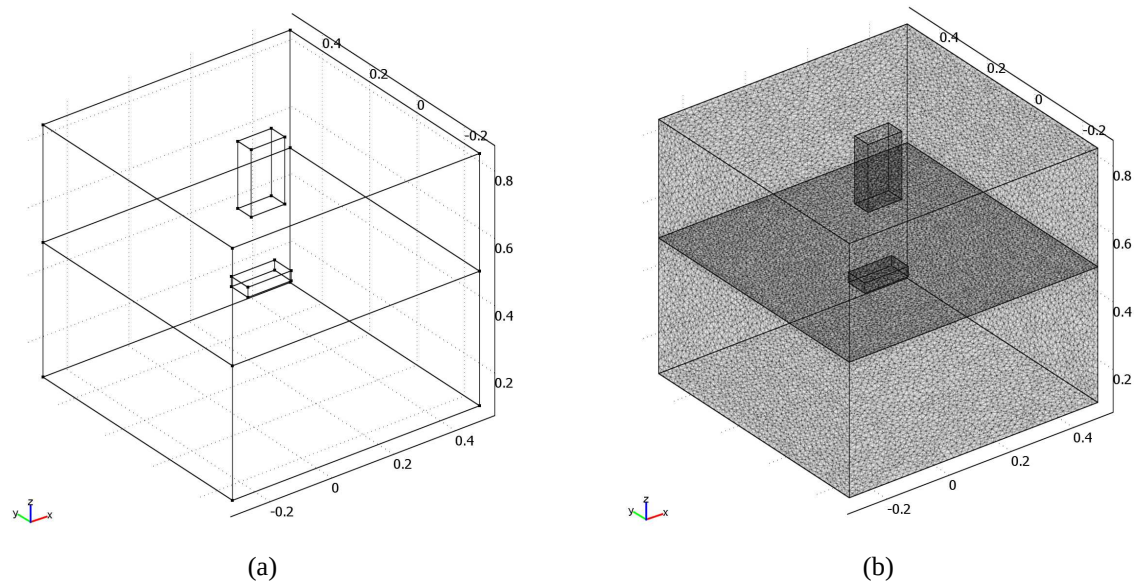
$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{H}} \times (\mp \mathbf{1}_z) = & \mp \frac{j}{\omega\mu} \left[\left(\frac{x}{z} \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial x} + \frac{y}{z} \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial y} + \frac{jk_f \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + 1}{z} \underline{E}_x + \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} \right) \mathbf{1}_x + \right. \\ & \left. + \left(\frac{x}{z} \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial x} + \frac{y}{z} \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial y} + \frac{jk_f \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + 1}{z} \underline{E}_y + \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} \right) \mathbf{1}_y \right]. \quad (3.13) \end{aligned}$$

Rysunki 3.19a, 3.20a oraz 3.19b i 3.20b przedstawiają geometrię modelu trójwymiarowego dla przypadku z zakopaną miną oraz bez miny wraz ze stosowaną siatką.

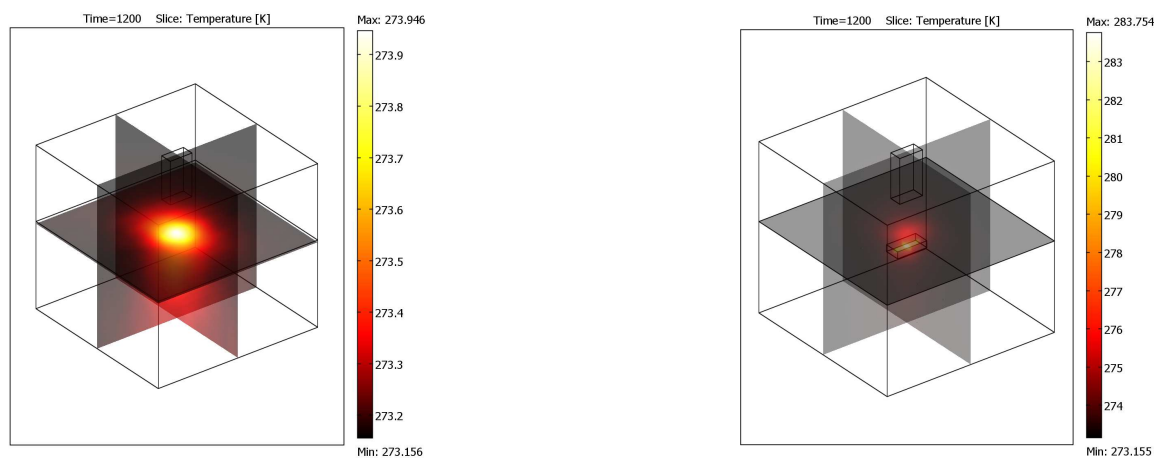


Rysunek 3.19: Geometria (a) oraz siatka (b) stosowana w programie COMSOL do analizy modelu bez zakopanego obiektu

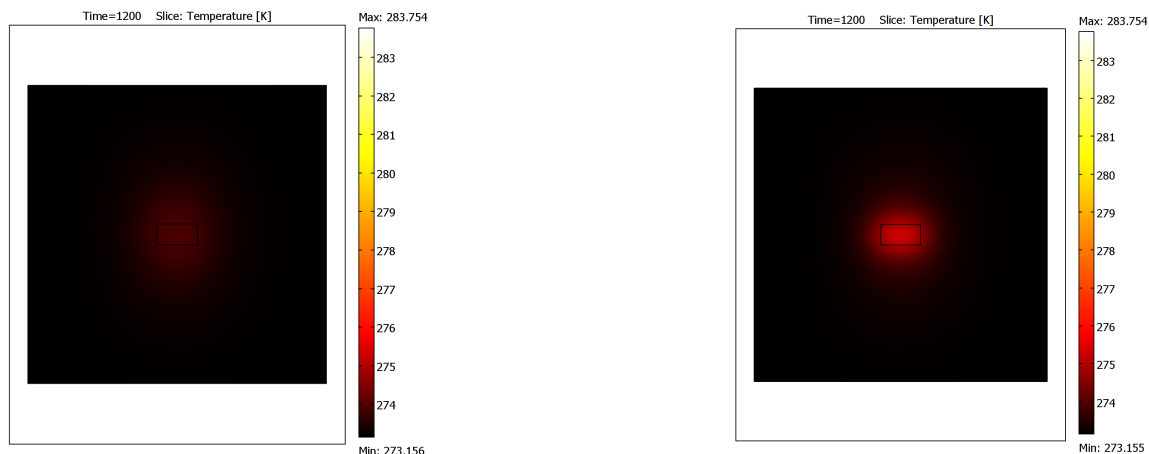
Rysunki 3.21a oraz 3.21b przedstawiają objętościowy rozkład temperatury otrzymywany po mikrofalowym nagrzaniu piasku. Na rysunkach 3.22a i 3.22b zobrazowane jest porównanie rozkładów temperatury obserwowanej na powierzchni piasku dla przypadku bez miny oraz z zakopaną miną. Można zauważyć, że skala temperaturowa na dwóch ostatnich rysunkach jest taka sama, co pozwala zauważyć różnicę między temperaturą otrzymywaną w układzie z samym piaskiem, a tą otrzymywaną w układzie z zakopaną miną.



Rysunek 3.20: Geometria (a) oraz siatka (b) stosowana w programie COMSOL do analizy modelu z zakopanyym obiektem



Rysunek 3.21: Objętościowy rozkład temperatury otrzymany dla modelu trójwymiarowego



(a) Przypadek bez zakopanego obiektu

(b) Przypadek z zakopanym obiektem

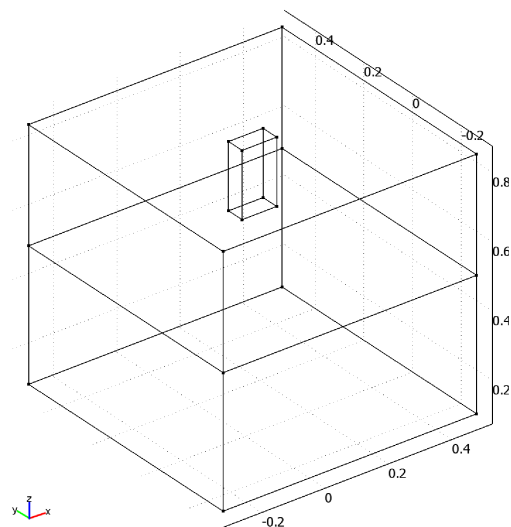
Rysunek 3.22: Powierzchniowy rozkład temperatury otrzymany dla modelu trójwymiarowego

3.3.1. Analiza wpływu kołnierza falowodu na rozkład temperatury

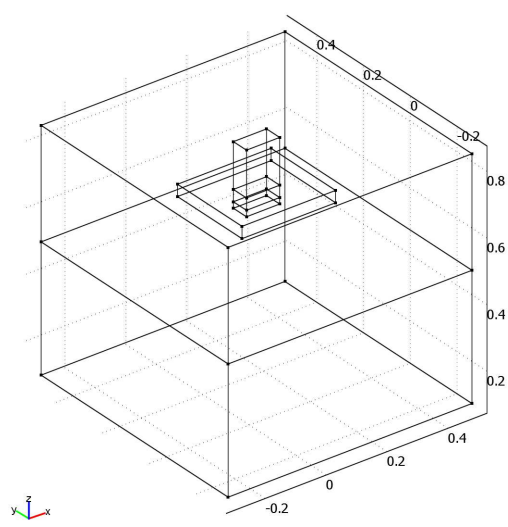
Prezentowane w tym rozdziale modele trójwymiarowe użyte zostały do analizy wyników optymalizacji kołnierza falowodu. Zastosowanie kołnierza o wymiarach otrzymanych w wyniku optymalizacji powoduje zmianę charakterystyki promieniowania anteny mikrofalowej, w wyniku czego następuje modyfikacja rozkładu temperatury obserwowanego na powierzchni piasku. Celem optymalizacji, jak opisano w rozdziale (3.1), było przede wszystkim zwiększenie obszaru jednorazowo podgrzewanego mikrofalami. Dodatkowym założeniem było uzyskanie bardziej jednorodnego rozkładu temperatury. Modele trójwymiarowe umożliwiają analizę rozkładu temperatury na powierzchni piasku, co pozwala na potwierdzenie skuteczności działania kołnierza. Rysunki 3.23a, 3.23b przedstawiają geometrie przygotowane w programie COMSOL do modelowania wpływu optymalnego kołnierza na finalny rozkład temperatury. Przygotowano modele bez kołnierza oraz z kołnierzem, które posłużą do porównania rozkładów temperatury otrzymanych w obu przypadkach. Zmianę rozkładu temperatury, wynikającą z zastosowania kołnierza, zaobserwować można na rysunkach 3.24a oraz 3.24b.

Wyraźnie można zaobserwować poszerzenie obszaru podgrzanego, szczególnie w płaszczyźnie wektora $\mathbf{H}$. Obniżona została również temperatura w centrum obszaru, co świadczy o zwiększeniu jednorodności podgrzewania mikrofalowego.

Aby potwierdzić tezę, że zastosowanie optymalnego kołnierza falowodu powoduje wzrost efektywności metody przygotowano również modele numeryczne, w których symulowana mina jest zakopana centralnie pod falowodem oraz 0.2 m od centrum falowodu.

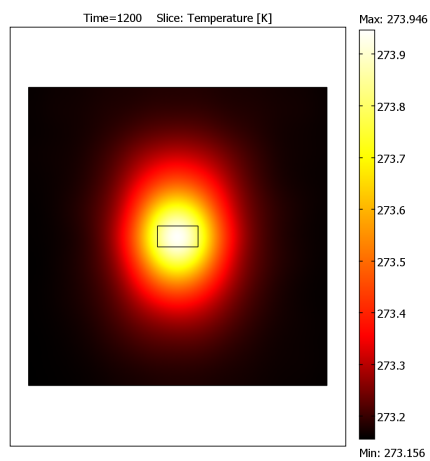


(a) Przypadek falowodu bez zoptymalizowanego kołnierza

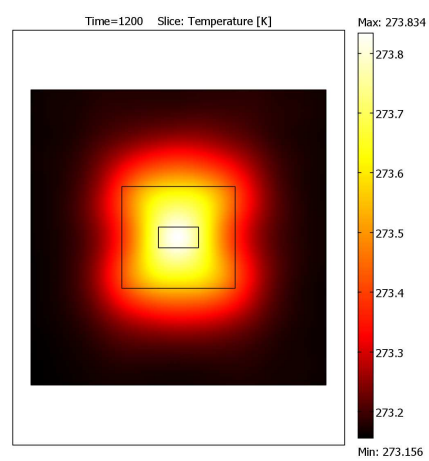


(b) Przypadek falowodu ze zoptymalizowanym kołnierzem

Rysunek 3.23: Geometria używana w programie COMSOL do modelowania zjawiska podgrzewania mikrofalowego piasku

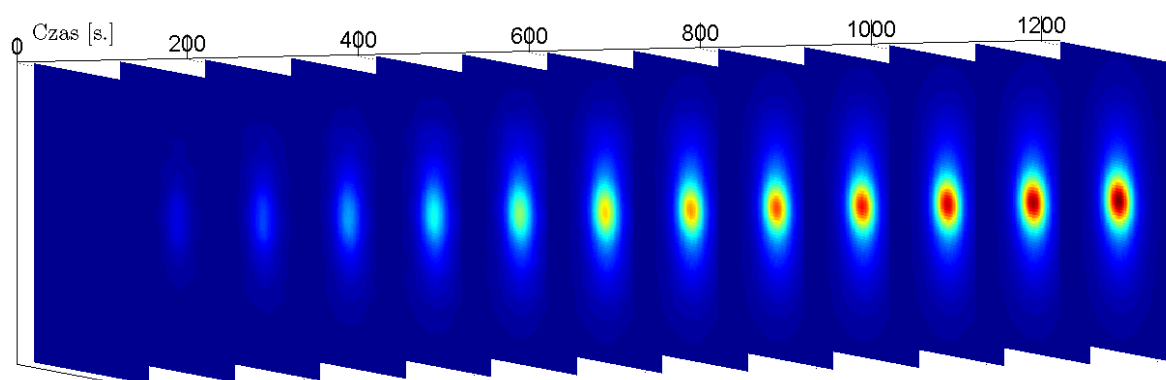


(a) Przypadek falowodu bez zoptymalizowanego kołnierza

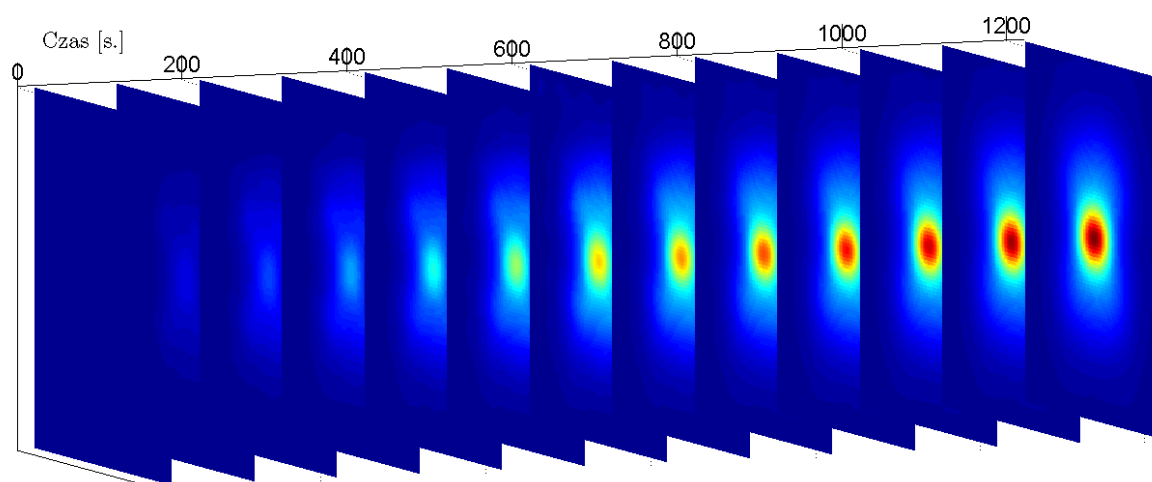


(b) Przypadek falowodu ze zoptymalizowanym kołnierzem

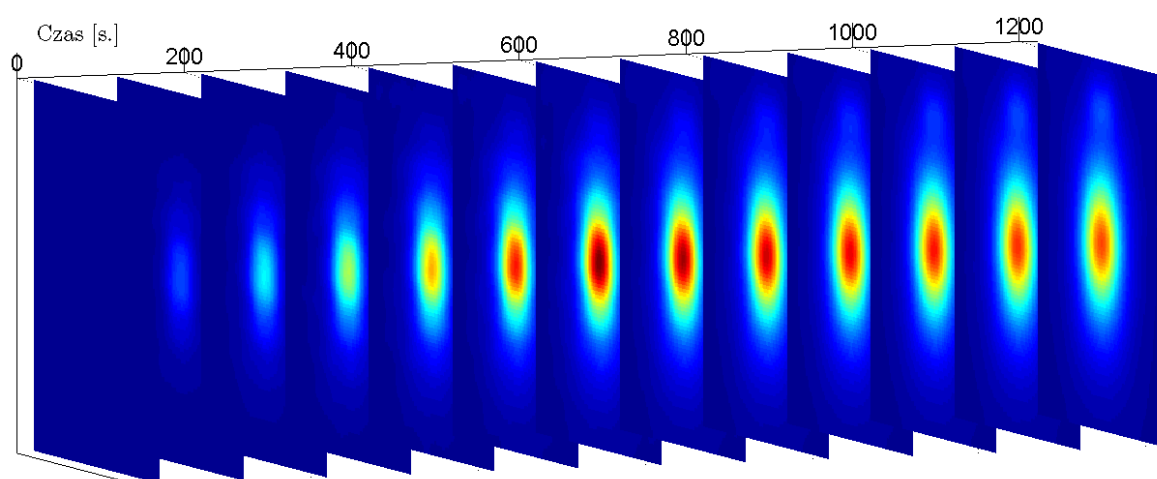
Rysunek 3.24: Podgrzany obszar otrzymany po mikrofalowym nagraniu piasku



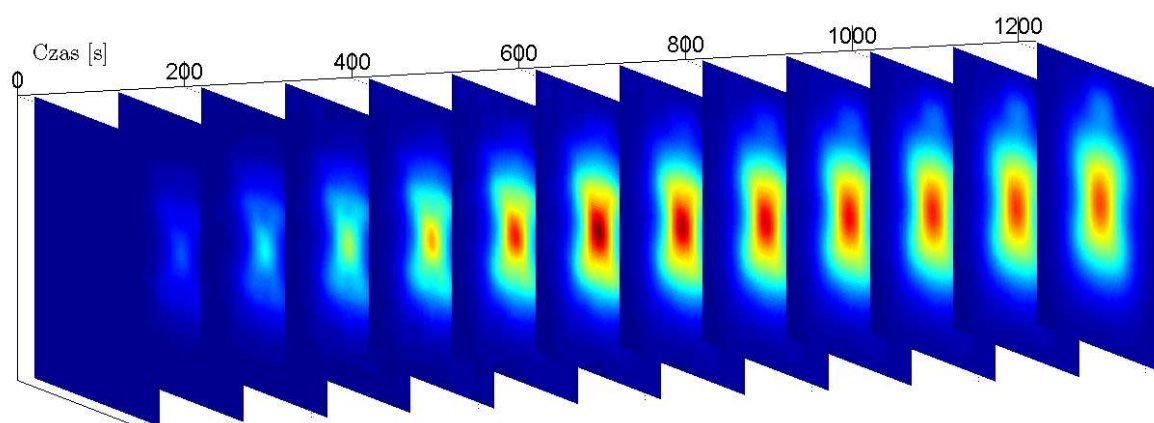
Rysunek 3.25: Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu bez kołnierza. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm centralnie pod falowodem



Rysunek 3.26: Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu z kołnierzem. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm centralnie pod falowodem



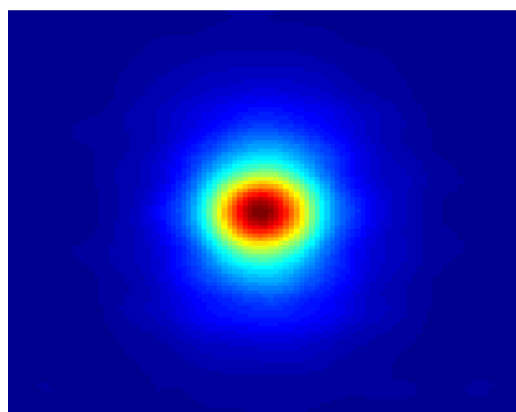
Rysunek 3.27: Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu bez kołnierza. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm, której środek położony jest 0.2 m od centrum falowodu



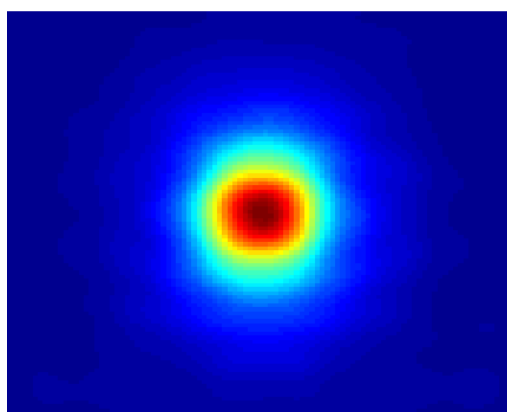
Rysunek 3.28: Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu z kołnierzem. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm, której środek położony jest 0.2 m od centrum falowodu

Podgrzewanie piasku trwało 600 sekund po czym następował 600 sekundowy okres ochładzania układu poprzez konwekcję. Po przeanalizowaniu otrzymanych sekwencji obrazów dla przypadków gdy mina znajdowała się niecentralnie pod falowodem stwierdzono, że podczas grzania mikrofalowego na powierzchni piasku widoczny jest obszar podgrzany powstający bezpośrednio pod falowodem. Mina znajdująca się na pewnej głębokości jest również podgrzewana ale jej sygnatura termiczna nie jest jeszcze widoczna na powierzchni gruntu. Przez 600 sekund chłodzenia układu obszar bezpośrednio nad miną staje się cieplejszy, podczas gdy podgrzany piasek ochładza się.

W pierwszym etapie dla każdego przypadku uśredniamy sekwencję obrazów otrzymaną podczas nagrzewania w rezultacie otrzymując obraz przedstawiający nagrany piasek. Obraz ten odejmujemy od każdego kolejnego w sekwencji rejestrowanej podczas okresu ochładzania się układu. Takie postępowanie pozwala na częściowe usunięcie z obrazów tła, a co za tym idzie wyeksponowanie sygnatury termicznej miny. Rysunki 3.29a – 3.30b przedstawiają uśrednione obrazy otrzymane z sekwencji rejestrowanej podczas nagrzewania dla każdego przypadku. Specyficzny kształt podgrzanego obszaru w modelu, gdzie stosowany jest kołnierz jest znacząco różny od sygnatury termicznej miny. Ułatwia to dalszą obróbkę obrazu i wyodrębnienie poszukiwanego obiektu.



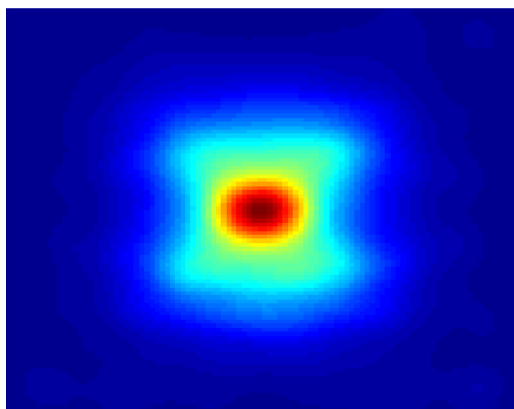
(a) Falowód bez kołnierza. Obiekt znajdował się centralnie pod falowodem



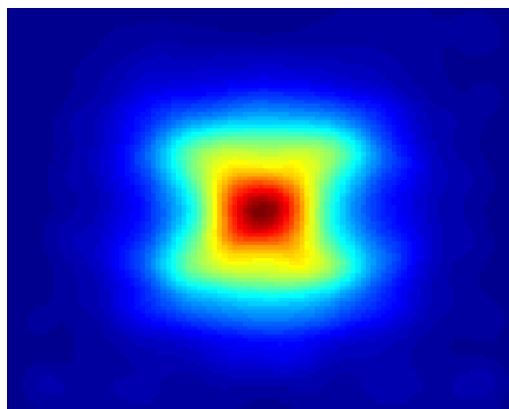
(b) Falowód bez kołnierza. Obiekt znajdował się 20 cm od centrum falowodu

Rysunek 3.29: Rozkład temperatury otrzymany po uśrednieniu obrazów z sekwencji nagrzewania układu

Poniżej prezentowane są rysunki przedstawiające rozkład temperatury dla każdego z przypadków i dla wybranych kroków czasowych, otrzymane po odjęciu od wyjściowego obrazu uśrednionego rozkładu temperatury z sekwencji nagrzewania. Rysunki 3.31a – 3.32c przedstawiają rozkłady temperatury dla modelu, w którym mina znajdowała się centralnie pod falowodem, dla wybranych momentów czasowych. Porównując rysunki 3.31a – 3.31c (modelowano falowód bez kołnierza) z rysunkami 3.32a – 3.32c (falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem) nie zauważamy znacznych



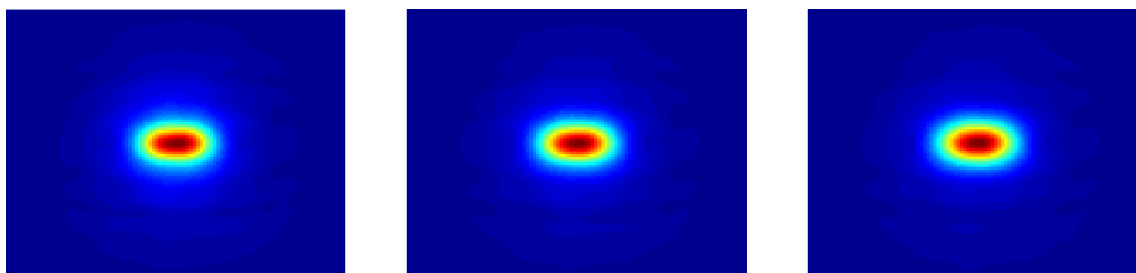
(a) Falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem.
Obiekt znajdował się centralnie pod falowodem



(b) Falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem.
Obiekt znajdował się 20 cm od centrum falowodu

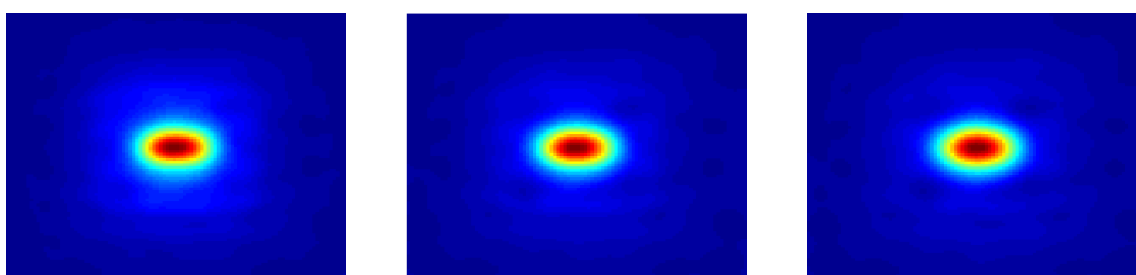
Rysunek 3.30: Rozkład temperatury otrzymany po uśrednieniu obrazów z sekwencji nagrzewania układu

różnic. Podgrzanie w części centralnej w obu przypadkach wskazuje na obecność zakopanego obiektu. Odjęcie uśrednionego obrazu tła pozwala założyć, że podgrzanie obszaru wynika głównie z obecności miny. Na rysunkach 3.33a – 3.34c zaobserwować można rozkład temperatury dla przypadku, gdy mina jest przesunięta względem falowodu o 20 cm. Rysunki 3.33a – 3.33c przedstawiają rozkład temperatury otrzymany w przypadku zastosowania falowodu bez kołnierza dla wybranych momentów czasowych, natomiast na rysunkach 3.34a – 3.34c obserwujemy rozkład otrzymywany dla układu z falowodem z kołnierzem. Specyficzny kształt obszaru podgrzanego otrzymywany gdy stosuje się falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem pozwala na bardziej efektywne usunięcie tła przy zastosowaniu odjęcia obrazu otrzymanego z uśrednionej sekwencji podgrzewania. Widać to szczególnie przy porównaniu rysunków 3.33c oraz 3.34c. Sygnatura termiczna miny jest lepiej widoczna, a obraz łatwiejszy do dalszej obróbki przy użyciu na przykład filtracji medianowej, co pokazują rysunki 3.35a i 3.35b. Obrazy 3.33c i 3.34c poddano filtracji medianą o dużej masce, otrzymując w ten sposób uśredniony obraz tła. Następnie, otrzymany obraz odjęto od obrazu wyjściowego.



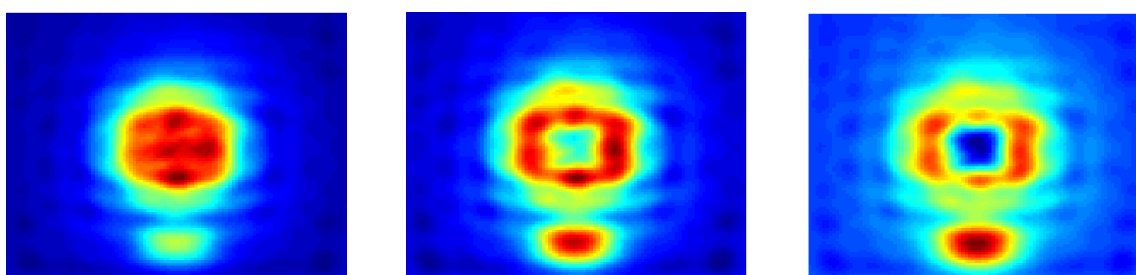
(a) Czas chłodzenia = 200 sekund (b) Czas chłodzenia = 400 sekund (c) Czas chłodzenia = 600 sekund

Rysunek 3.31: Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód bez kołnierza, a obiekt znajdował się centralnie pod falowodem



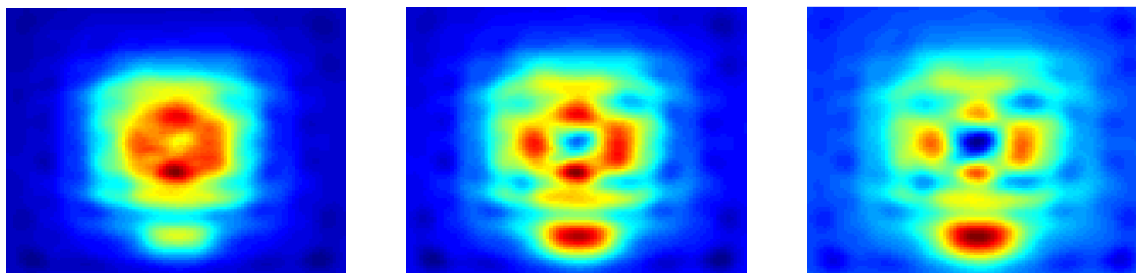
(a) Czas chłodzenia = 200 sekund (b) Czas chłodzenia = 400 sekund (c) Czas chłodzenia = 600 sekund

Rysunek 3.32: Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem, a obiekt znajdował się centralnie pod falowodem



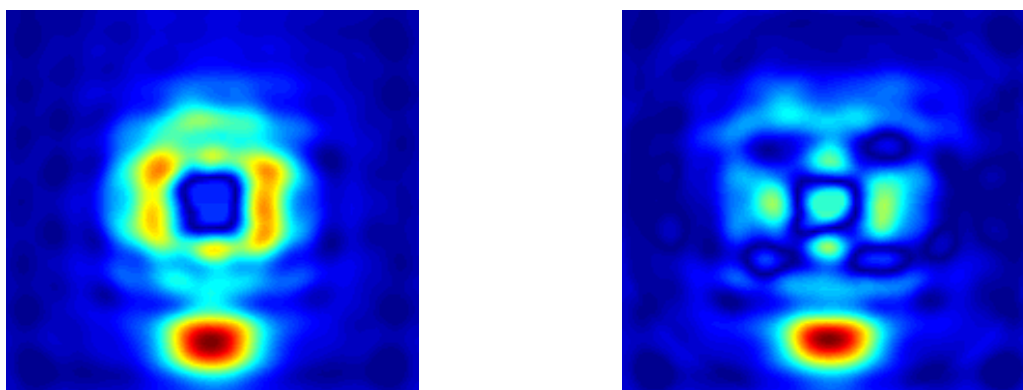
(a) Czas chłodzenia = 200 sekund (b) Czas chłodzenia = 400 sekund (c) Czas chłodzenia = 600 sekund

Rysunek 3.33: Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód bez kołnierza, a obiekt znajdował 20 cm od centrum falowodu



(a) Czas chłodzenia = 200 sekund (b) Czas chłodzenia = 400 sekund (c) Czas chłodzenia = 600 sekund

Rysunek 3.34: Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem, a obiekt znajdował 20 cm od centrum falowodu



(a) Przypadek bez kołnierza

(b) Przypadek z kołnierzem

Rysunek 3.35: Obraz otrzymany w wyniku filtracji medianowej termogramów (czas chłodzenia=600 sekund) prezentujących rozkład temperatury w układzie, gdzie zakopana mina była przesunięta względem centrum falowodu o 20cm

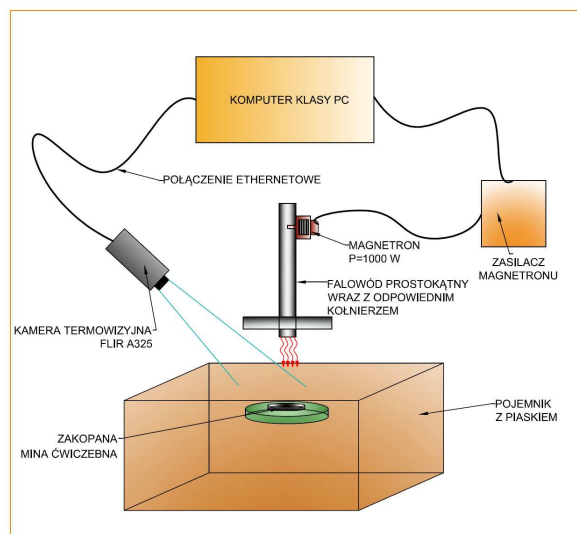
4. Badania eksperymentalne

Jednym z podstawowych celów niniejszej pracy była budowa prototypu urządzenia, składającego się z dwóch modułów: grzewczego i detekcyjnego. Urządzenie grzewcze to układ bazujący na generatorze mikrofal dużej mocy, magnetronie, którego ogólna zasada działania została opisana w rozdziale 2.4. Generowane mikrofałe prowadzone są w falowodzie prostokątnym i kierowane bezpośrednio na powierzchnię piasku znajdującego się w odpowiednim pojemniku. Część detekcyjna urządzenia to kamera termowizyjna wraz z odpowiednim oprogramowaniem umożliwiającym rejestrowanie sekwencji obrazów termograficznych (termogramów).

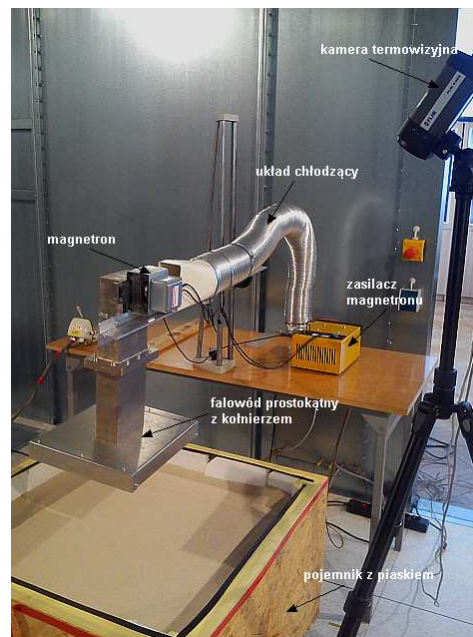
Ćwiczebne miny lądowe nie zawierające materiałów wybuchowych umieszczane były pod powierzchnią piasku, a następnie całość była podgrzewana mikrofalami. Nagrywaną sekwencję obrazów poddawano dalszej analizie. W niniejszym rozdziale opisana zostanie budowa układu pomiarowego, którego projekt częściowo opisano w rozdziale 3.1, następnie omówiona zostanie metodyka wykonywania pomiarów wraz z opisem wykorzystywanych min ćwiczebnych oraz sposobem dalszego przetwarzania otrzymanych sekwencji obrazów. Na koniec przedstawione zostaną wyniki pomiarów dla wybranych konfiguracji zakopanych obiektów. Zawarte w tym rozdziale analizy i badania eksperymentalne zostały częściowo opublikowane w [67–69].

4.1. Budowa układu pomiarowego

Schemat ideowy układu pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 4.1. Głównym jego elementem jest magnetron Panasonic 2M261 M22, generujący mikrofałe o częstotliwości 2.45 GHz oraz mocy 1 kW. Zasilanie magnetronu realizowane jest przy pomocy komercyjnego zasilacza Magdrive1000 firmy Dipolar, umożliwiającego sterowanie mocą magnetronu poczynając od 100 watów a kończąc na 1000 watów, przy minimalnym kroku 10 watów. Sterowanie zasilaczem prowadzone jest z poziomu komputera klasy PC. Magnetron jest podłączony do standardowego falowodu prostokątnego WR430 (wymiary – 109.2 mm x 54.6 mm, częstotliwość odcięcia – 1.7 GHz) poprzez RF coupler, zapewniający minimalizację fali odbitej wchodzącej do falowodu, której powstawanie mogłoby uszkodzić magnetron, powodować jego silniejsze grzanie przy pracy oraz straty mocy. Chłodzenie magnetronu odbywa się przy pomocy wymuszonego przepływu powietrza z dmuchawy. Na rysunku 4.2 przedstawiono zdjęcie zbudowanego układu grzewczo – detekcyjnego.



Rysunek 4.1: Schemat ideowy układu pomiarowego



Rysunek 4.2: Zdjęcie układu pomiarowego

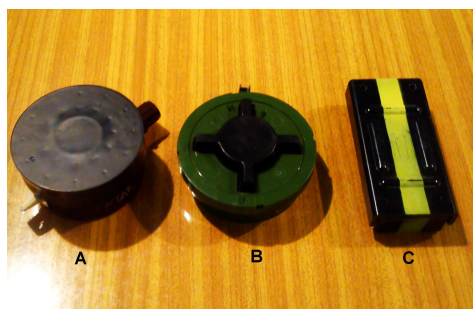
4.2. Ćwiczebne miny lądowe używane podczas pomiarów

Do pomiarów użyto trzech różnych ćwiczebnych min lądowych – PMN-2 produkcji radzieckiej, PMA-1 produkcji jugosłowiańskiej oraz węgierskiej GYATA-64. Na rysunku 4.3 przedstawiono zdjęcie wszystkich trzech testowanych min. Rysunki przedstawiają widok z góry i z boku dla każdej z nich. Podstawowe informacje na temat każdej z min przedstawiono w tablicy 4.1. Miny ćwiczebne z definicji pozbawione są materiałów niebezpiecznych. Usunięto z nich materiał wybuchowy kruszący oraz materiał inicjujący z zapalnika. Pozostałe elementy (w szczególności obudowa) pozostają identyczne z oryginałem.

Jak wspomniano wcześniej badane miny mają obudowy wykonane z plastiku i zawierają tylko

Tablica 4.1: Podstawowe parametry min ćwiczebnych używanych w badaniach eksperymentalnych

Mina	Szerokość/średnica	Wysokość	Rodzaj materiału wybuchowego	Ilość materiału wybuchowego
GYATA-64	106 mm	61 mm	trotyl (TNT)	300 g
PMN-2	120 mm	53 mm	trotyl/hexogen (TNT/RDX)	100 g
PMA-1	140 mm	30 mm	trotyl (TNT)	200 g



Rysunek 4.3: Miny ćwiczebne używane podczas pomiarów. A – GYATA-64, B – PMN-2, C – PMA-1

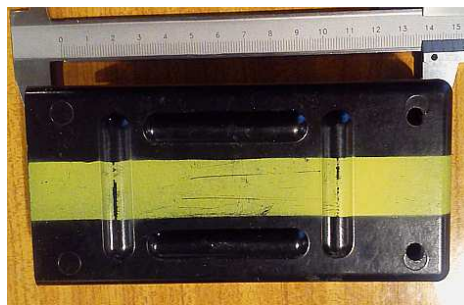
niewielką zawartość metalu, co czyni je praktycznie niewykrywalnymi metodami standardowymi, czyli wykrywaczem metali bądź magnetometrem. Aby potwierdzić to założenie, na wstępie została wykonana próba wykrycia trzech badanych min ćwiczebnych za pomocą wykrywaczy metali Spektrol VLF oraz Fisher 1280-X Aquanaut. Oba wykrywacze są stosowane w rozminowaniu cywilnym. Oznacza to, że ich zasięg i czułość są większe niż podobne parametry w wykrywaczach wojskowych. Wykrywacze te umożliwiają wykrycie obiektu metalowego na głębokości do 80 cm. Miny zostały zakopane w terenie na głębokość 5 cm, co obrazują rysunki 4.6a, 4.6b oraz 4.6c. Żadna z badanych min nie dała wskazania na tej głębokości (rysunek 4.7 pokazuje przykładowy odczyt dla jednej z min z wykrywacza Spektrol). Ponadto mina PMA-1 nie dała wskazania nawet gdy leżała na powierzchni



(a) Mina GYATA-64



(b) Mina PMN-2



(c) Mina PMA-1

Rysunek 4.4: Ćwiczebne miny lądowe używane w trakcie pomiarów. Widok z góry



(a) Mina GYATA-64



(b) Mina PMN-2



(c) Mina PMA-1

Rysunek 4.5: Ćwiczebne miny lądowe używane w trakcie pomiarów. Widok z boku

gruntu, a mina GYATA-64 nie była wykrywalna na głębokości 2 cm. Należy zaznaczyć również, że wskazania dla miny PMN-2 leżącej 2 cm pod powierzchnią gruntu były słabe, co w praktyce oznacza, że i ta mina nie zostałaby wykryta w warunkach polowych.



(a) Mina GYATA-64

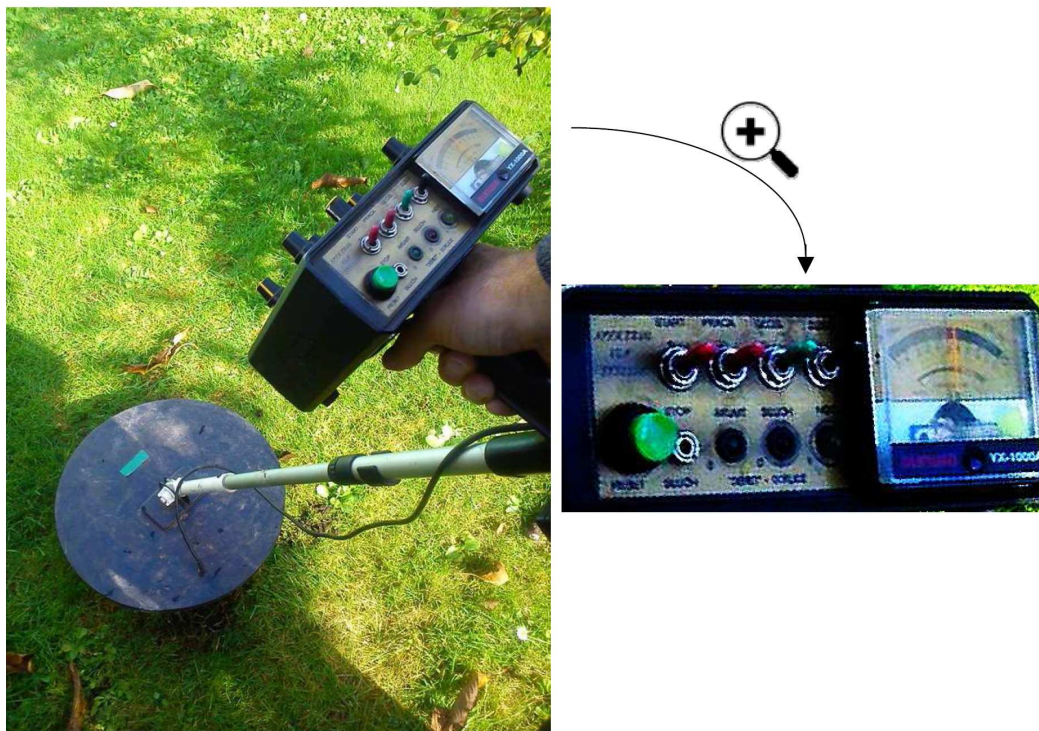


(b) Mina PMN-2



(c) Mina PMA-1

Rysunek 4.6: Pozycja min lądowych przed zakopaniem w celu próby wykrycia ich za pomocą wykrywacza metalu



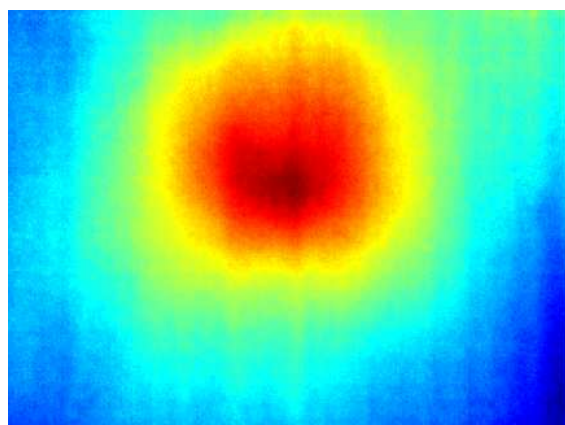
Rysunek 4.7: Przykładowy odczyt dla jednej z min z wykrywacza Spektrol VLF

4.3. Eksperymentalna weryfikacja wyników optymalizacji kołnierza falowodu

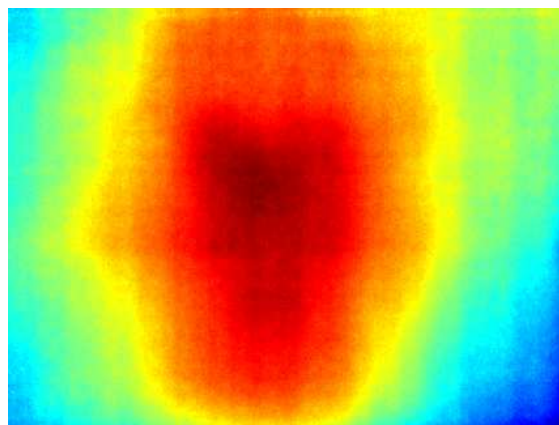
W celu potwierdzenia zasadności użycia kołnierza zaprojektowanego w rozdziale 3.1 oraz eksperymentalnej walidacji wyników uzyskanych w procesie modelowania numerycznego, zaprezentowanych w rozdziale 3.3.1, przeprowadzono eksperyment przy użyciu miny ćwiczebnej PMA-1.

W pierwszym etapie eksperymentu nagrzewano sam piasek bez zakopanej miny za pomocą układu grzewczego, w którym falowód nie był wyposażony w kołnierz a następnie za pomocą układu z kołnierzem. Celem było określenie różnicy między rozkładami temperatury otrzymywanymi na powierzchni piasku. Piasek podgrzewano przez 10 minut, następnie przez kolejne 10 minut rejestrowano sekwencję obrazów, nagrywając jeden obraz na sekundę. W celu otrzymania ostatecznego obrazu, sekwencję uśredniono. Obrazy otrzymane w wyniku tego eksperymentu przedstawiono na rysunkach 4.8a oraz 4.8b. Wynik eksperymentu odpowiada wynikom modelowania – można wyraźnie zauważyć, że obszar podgrzany otrzymywany w wyniku zastosowania systemu wyposażonego w falowód z kołnierzem jest szerszy, a rozkład temperatury w jego obrębie jest bardziej jednorodny od tego otrzymywanego przy pomocy systemu bez kołnierza.

W drugim etapie eksperymentu mina zakopywana była 5 cm pod powierzchnią gruntu, centralnie



(a) Stosowany układ nie był wyposażony w kołnierz



(b) Stosowany układ był wyposażony w kołnierz

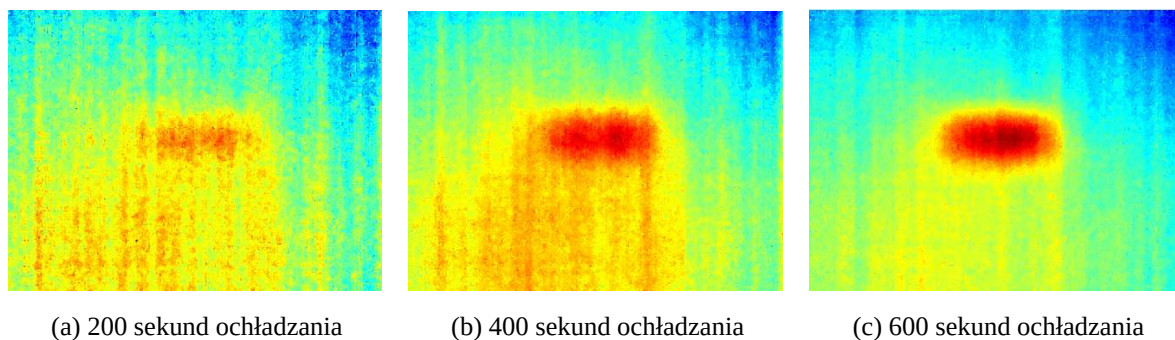
Rysunek 4.8: Obszar podgrzany obserwowany na powierzchni piasku powstały w wyniku 10 minutowego nagrzewania samego piasku

pod falowodem (na rysunku 4.9 położenie miny przed zakopaniem w piasku). Podobnie jak poprzednio piasek wraz z zakopaną miną podgrzewano przez 10 minut, następnie przez kolejne 10 minut rejestrowano sekwencję obrazów, nagrywając jeden obraz na sekundę. W celu uzyskania obrazu wynikowego od każdego obrazu z sekwencji odejmowano obraz zarejestrowany jako pierwszy (w



Rysunek 4.9: Położenie miny przed zakopaniem. Mina znajduje się centralnie pod falowodem

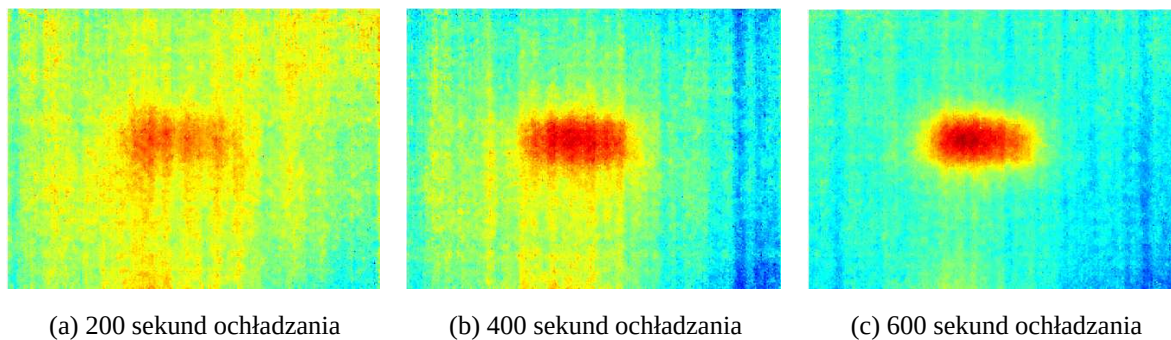
celu usunięcia tła). Celem eksperymentu było wykazanie, że zastosowanie kołnierza w przypadku, gdy chcemy wykryć minę ukrytą centralnie pod falowodem da co najmniej tak dobre wyniki, jak w przypadku zastosowania układu bez kołnierza. Wybrane obrazy z sekwencji dla układu bez kołnierza prezentowane są na rysunku 4.10, natomiast dla układu z kołnierzem na rysunku 4.11.



Rysunek 4.10: Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu bez kołnierza. Mina zakopana centralnie pod falowodem

Łatwo można stwierdzić, że wyniki otrzymane dla układu z kołnierzem są porównywalne do tych, otrzymanych dla układu bez kołnierza. W obu przypadkach mina jest wyraźnie widoczna 400 sekund po zakończeniu nagrzewania. Słabsza (ale widoczna) sygnatura miny jest obserwowalna już w 200 sekundzie naturalnego ochładzania układu.

Ostatnim etapem eksperymentu była próba wykrycia miny zakopanej na głębokości 5 cm, ale przesuniętej 20 cm od centrum falowodu (rysunek 4.12 prezentuje położenie miny przed zakopaniem w piasku). W tym celu wykonano pomiary stosując podobną procedurę jak poprzednio. Celem



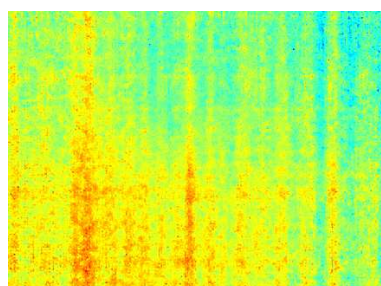
Rysunek 4.11: Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu z kołnierzem. Mina zakopana centralnie pod falowodem

eksperymentu było wykazanie, że zastosowanie kołnierza w przypadku, gdy chcemy wykryć minę ukrytą w pewnej odległości od centrum falowodu da lepsze wyniki, niż w przypadku zastosowania układu bez kołnierza. Wybrane obrazy z sekwencji dla układu bez kołnierza prezentowane są na rysunku 4.13, natomiast dla układu z kołnierzem na rysunku 4.14. Porównując odpowiednie obrazy z sekwencji można stwierdzić, że wyniki otrzymane dla układu z kołnierzem są lepsze od tych, otrzymanych dla układu bez kołnierza. W układzie z kołnierzem słaba sygnatura miny jest widoczna już w 400 sekund po zakończeniu nagrzewania. W układzie bez optymalnego kołnierza mina nie jest wykrywalna nawet w 600 sekundzie ochładzania układu. Sygnatura miny w 600 sekund po zakończeniu nagrzewania jest natomiast dobrze widoczna w przypadku, gdy stosowany jest układ z kołnierzem.

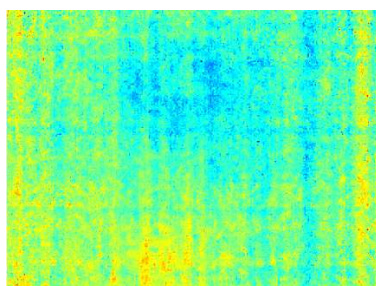
Eksperyment potwierdził zasadność stosowania optymalnego kołnierza falowodu. Układ z odpowiednim kołnierzem zwiększa efektywność metody, umożliwiając wykrycie tych obiektów, które znajdują się w pewnym oddaleniu od centrum nagrzewanego obszaru. Takie rozwiązanie skraca rzeczywisty czas badania pola minowego, zmniejszając liczbę potrzebnych nagrzewów gruntu.



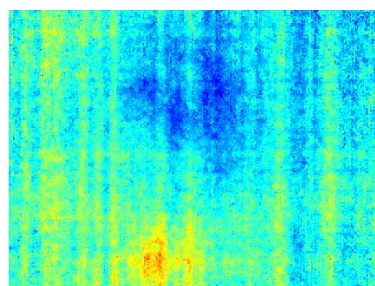
Rysunek 4.12: Położenie miny przed zakopaniem. Mina znajduje się 20 cm od środka falowodu



(a) 200 sekund ochładzania

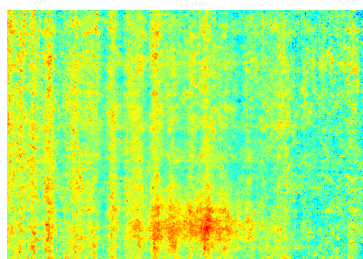


(b) 400 sekund ochładzania

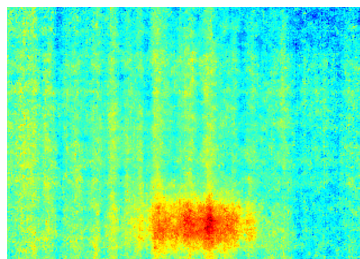


(c) 600 sekund ochładzania

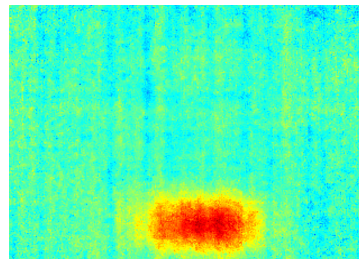
Rysunek 4.13: Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu bez kołnierza. Mina zakopana w odległości 20 cm od centrum falowodu



(a) 200 sekund ochładzania



(b) 400 sekund ochładzania



(c) 600 sekund ochładzania

Rysunek 4.14: Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu z kołnierzem. Mina zakopana w odległości 20 cm od centrum falowodu

4.4. Wykrywanie min lądowych metodą termografii impulsowo-fazowej

W celu skrócenia czasu obserwacji układu oraz poprawienia jakości otrzymywanych obrazów wynikowych, zastosowano technikę termografii impulsowo-fazowej [70–73]. Technika ta może być wykorzystywana, jeżeli ma się do dyspozycji sekwencję termogramów, gdzie odstęp czasowy między kolejnymi obrazami jest stały. W naszym przypadku układ był nagrzewany przez 10 minut. Następnie przez 10 minut naturalnego ochładzania się układu była nagrywana sekwencja termogramów. Odstęp czasowy między kolejnymi nagrzanymi obrazami w sekwencji wynosił 1 sekundę. Otrzymano zatem sekwencję składającą się z 600 termogramów. Technikę tę przetestowano z użyciem wszystkich badanych min – PMN-2, PMA-2 oraz Gyata-64. Miny zakopywane były na głębokość 5 cm w centralnej części pojemnika z piaskiem.

Otrzymane sekwencje obrazów poddajemy analizie fourierowskiej, według schematu zaprezentowanego na rysunku 4.15. Dla każdego piksela obrazu w sekwencji liczona jest dyskretna transformata Fouriera, zgodnie ze wzorem:

$$F_f = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{(-2j\pi kf)/N} = \text{Re}_f + j\text{Im}_f \quad (4.1)$$

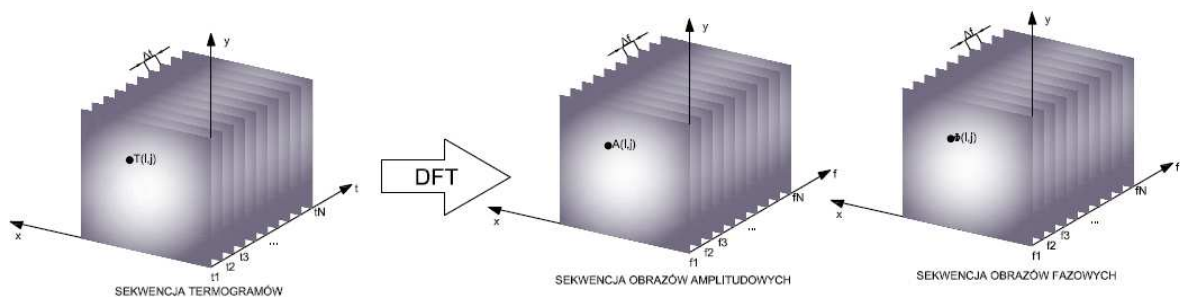
gdzie N – ilość termogramów w sekwencji, $T(k)$ – temperatura odczytana dla danego piksela k –tego obrazu, a Re_f oraz Im_f to część rzeczywista i urojona transformaty. Amplituda A_f oraz faza Φ_f obliczane są ze wzorów:

$$A_f = \sqrt{\text{Re}_f^2 + \text{Im}_f^2} \quad (4.2)$$

$$\Phi_f = \arctg \frac{\text{Re}_f}{\text{Im}_f} \quad (4.3)$$

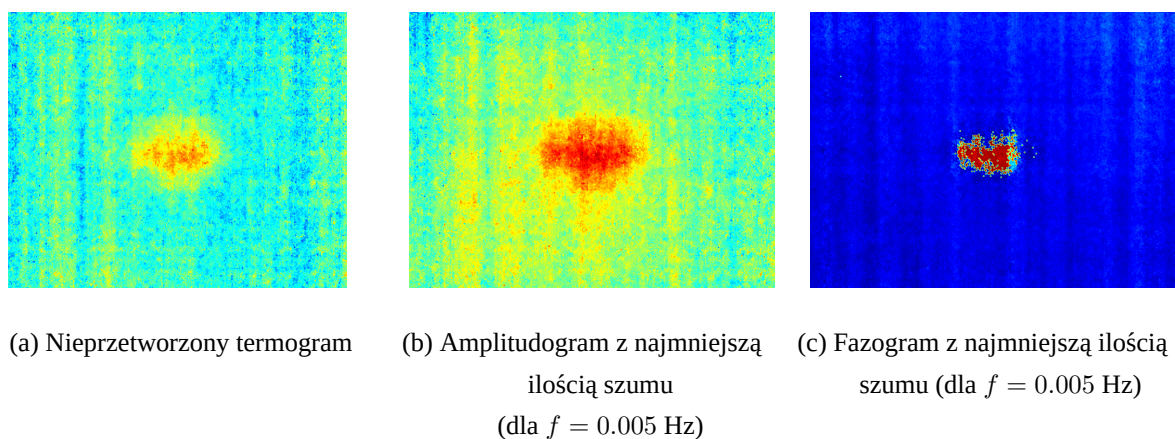
W wyniku tej procedury otrzymujemy sekwencję obrazów amplitudowych oraz sekwencję obrazów prezentujących rozkład fazy. Obrazy możemy teraz analizować w dziedzinie częstotliwości, której zakres mieści się w granicach od 0 do $1/(\Delta t)$, gdzie Δt to odstęp czasu między dwoma obrazami z sekwencji termogramów. W naszym przypadku $\Delta t = 1$ s, a zatem dziedzina częstotliwości mieści się w przedziale od 0 do 1 Hz. Natomiast przyrost częstotliwości uzależniony jest również od ilości termogramów w sekwencji: $\Delta f = 1/(N\Delta t)$. W naszym przypadku $\Delta f = 1/(600) = 0.0017$ Hz.

Dzięki zastosowaniu transformaty Fouriera do sekwencji obrazów, możliwe było poprawienie jakości wyników jak również skrócenie czasu potrzebnego do wykrycia miny. Na podstawie amplitudogramów oraz fazogramów możliwa była lokalizacja zakopanego obiektu już po dwóch minutach obserwacji. Rysunek 4.16 przedstawia wyniki dla miny Gyata-64 zakopanej na głębokości 5 cm centralnie pod falowodem. Rysunek 4.16a przedstawia oryginalny termogram z sekwencji, zarejestrowany po dwóch minutach obserwacji układu, od którego odjęto pierwszy termogram z sekwencji w celu zniwelowania wpływu tła na obraz wynikowy. Rysunek 4.16b przedstawia najlepszy



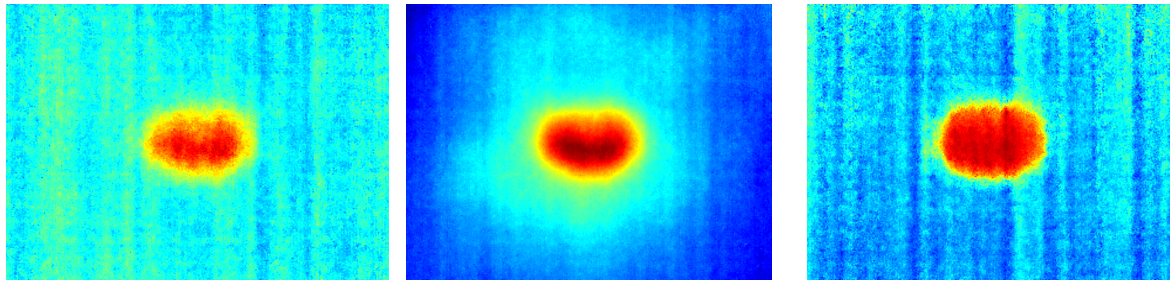
Rysunek 4.15: Transformata Fouriera dla sekwencji obrazów

(czyli taki, który posiada najmniejszą ilość szumów) obraz amplitudowy wybrany z sekwencji amplitudogramów otrzymywanych po zastosowaniu transformaty Fouriera, podobnie rysunek 4.16c przedstawia najlepszy z obrazów fazowych. Obraz oryginalny ma dużą ilość szumów, analiza amplituogramu oraz fazogramu pozwala jednak na lokalizację zakopanej miny lądowej. W dalszej części przeprowadzono analogiczną operację dla dłuższych sekwencji – 5 minutowej i 10 minutowej. Wyniki przedstawiono na rysunkach 4.17 i 4.18.



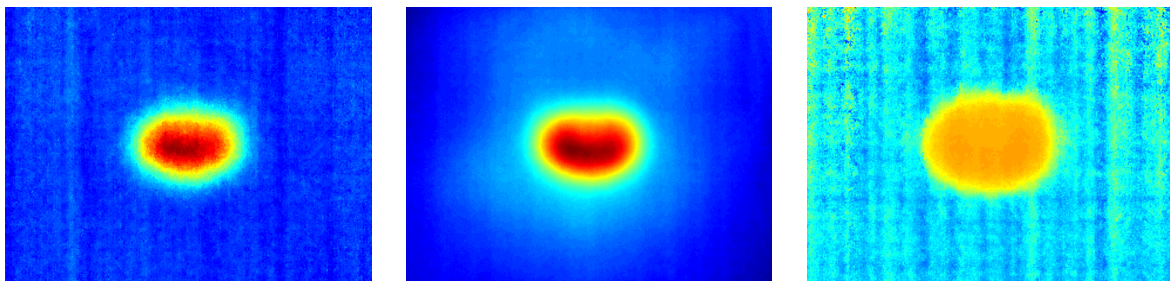
Rysunek 4.16: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina Gyata-64

Podobną analizę przeprowadzono dla pozostałych min ćwiczebnych. Rysunki 4.19 – 4.21 przedstawiają oryginalne termogramy, najlepsze amplitudogramy oraz fazogramy otrzymane przy obróbce sekwencji termogramów dla miny PMN-2. W przypadku miny ćwiczebnej PMA-2 termogram otrzymany po dwuminutowej obserwacji układu (rys. 4.22a) oraz obraz przedstawiający rozkład fazy otrzymany po analizie sekwencji 120 termogramów zarejestrowanych w tym czasie (rys. 4.22c) nie pozwalają na określenie położenia miny. Jednakże obecność obiektu widać na amplitudogramie (rys. 4.22b). Pozostałe obrazy – te otrzymane po analizie sekwencji nagranej



(a) Nieprzetworzony termogram (b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu
(dla $f = 0.005$ Hz) (c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

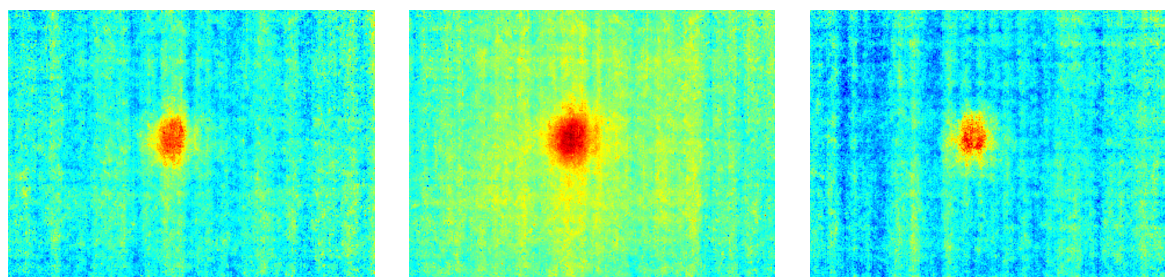
Rysunek 4.17: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina Gyata-64



(a) Nieprzetworzony termogram (b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu
(dla $f = 0.005$ Hz) (c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

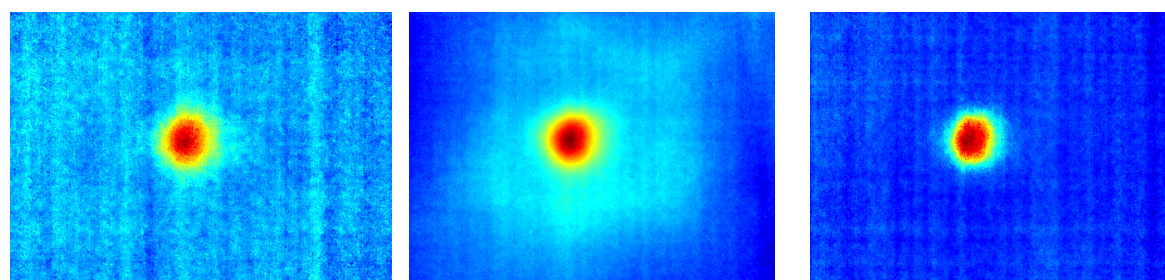
Rysunek 4.18: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina Gyata-64

w ciągu pięciu minut obserwacji układu (rysunki 4.23) oraz te otrzymane po analizie sekwencji termogramów rejestrowanych w ciągu 10 minut (rysunki 4.24) pozwalają na łatwą detekcję obiektu. Obiekt widoczny jest najlepiej na amplitudogramach (rysunki 4.23b oraz 4.24b).



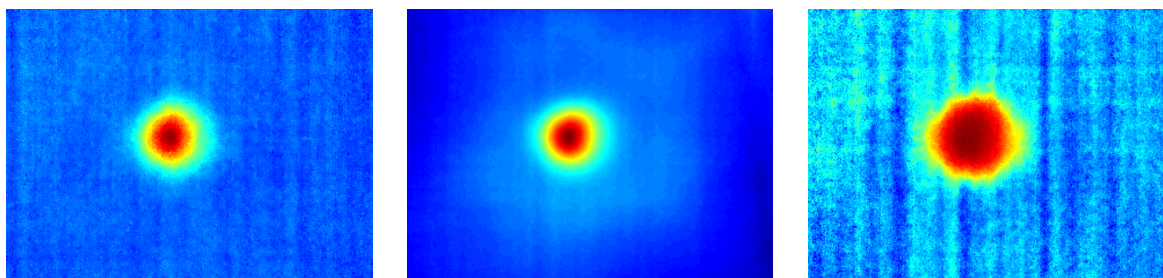
(a) Nieprzetworzony termogram (b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz) (c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

Rysunek 4.19: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMN-2



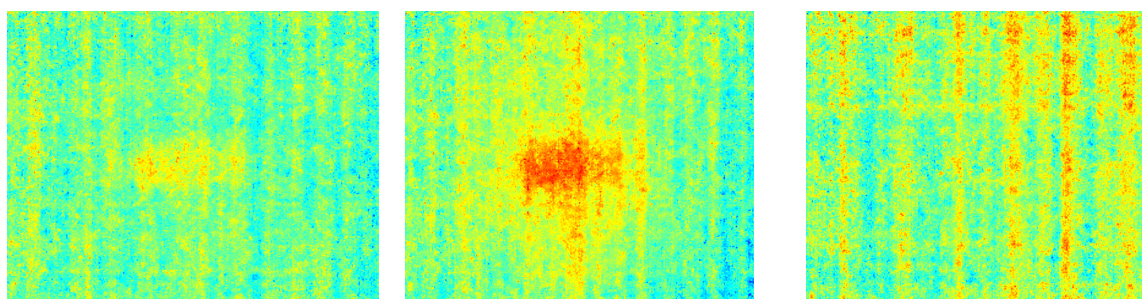
(a) Nieprzetworzony termogram (b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz) (c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

Rysunek 4.20: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMN-2



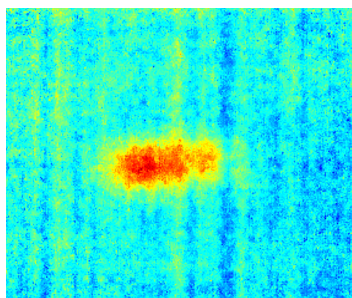
(a) Nieprzetworzony termogram (b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz) (c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

Rysunek 4.21: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMN-2

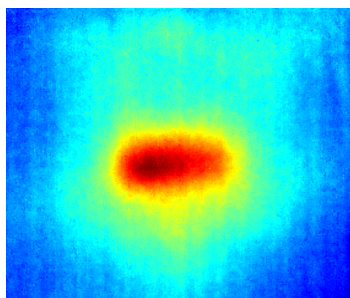


(a) Nieprzetworzony termogram (b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz) (c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

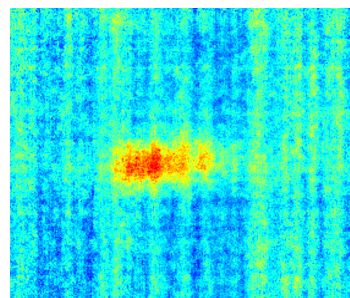
Rysunek 4.22: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMA-2



(a) Nieprzetworzony termogram

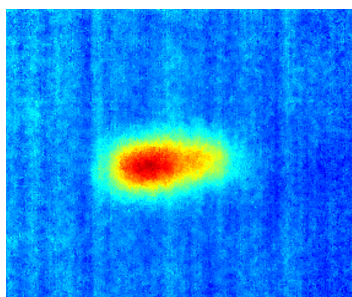


(b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu
(dla $f = 0.005$ Hz)

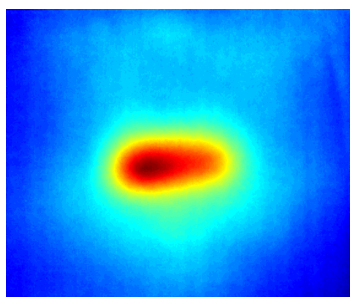


(c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

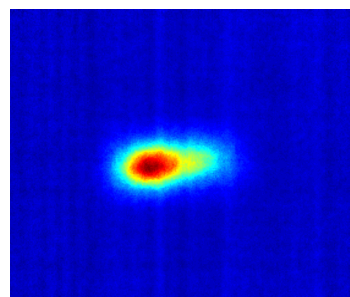
Rysunek 4.23: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMA-2



(a) Nieprzetworzony termogram



(b) Amplitudogram z najmniejszą ilością szumu
(dla $f = 0.005$ Hz)



(c) Fazogram z najmniejszą ilością szumu (dla $f = 0.005$ Hz)

Rysunek 4.24: Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMA-2

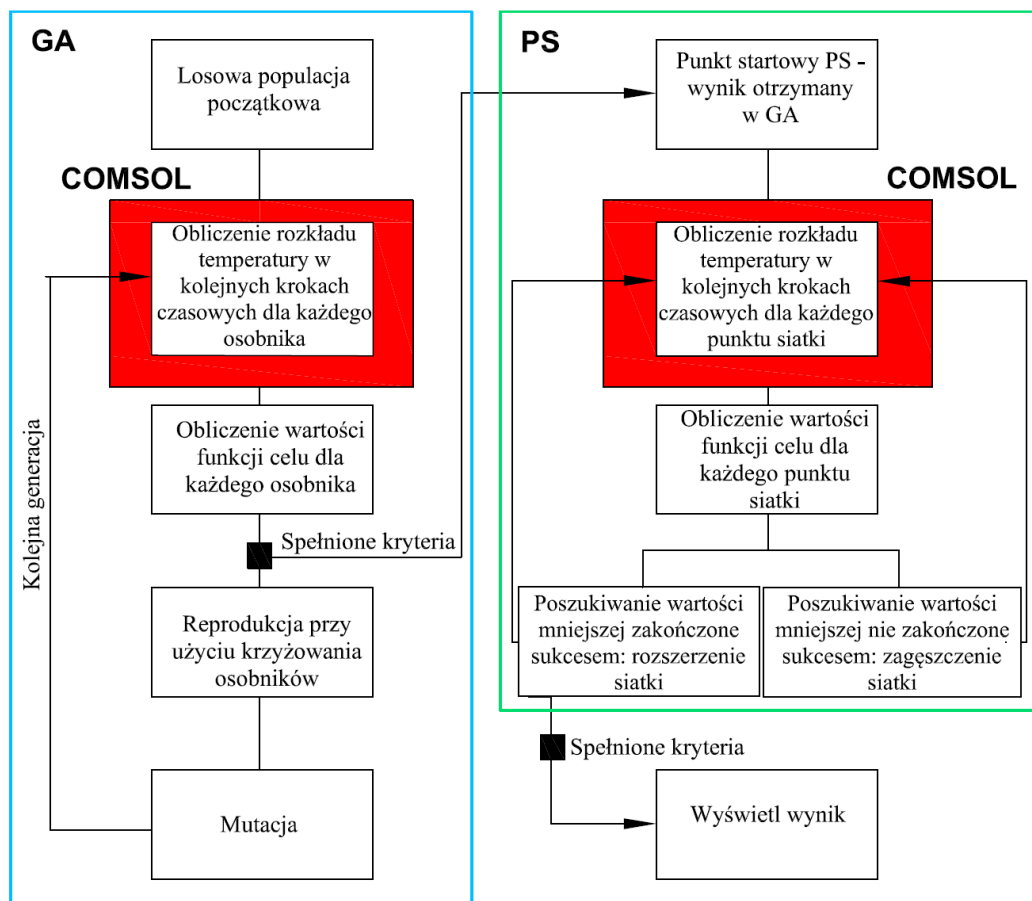
5. Identyfikacja wybranych parametrów min lądowych na podstawie termogramów

Metoda aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym umożliwia wykrycie zakopanego obiektu niezależnie od tego, z jakiego materiału jest on zbudowany. Jest to niewątpliwie podstawowa zaleta opisywanej metody. Pojawia się jednak pytanie, czy technika ta pozwala na określenie z jakim obiektem mamy do czynienia. Zakopane kamienie, gałęzie oraz różnego rodzaju odpady mogą w wyniku podgrzewania mikrofalowego produkować podobny rozkład temperatury na powierzchni gruntu, jak mina przeciwpiechotna. Istotne jest zatem nie tylko wykrycie obiektu, który może być miną lądową, ale również określenie niektórych jego parametrów pozwalających na zaklasyfikowanie go do grupy obiektów potencjalnie niebezpiecznych.

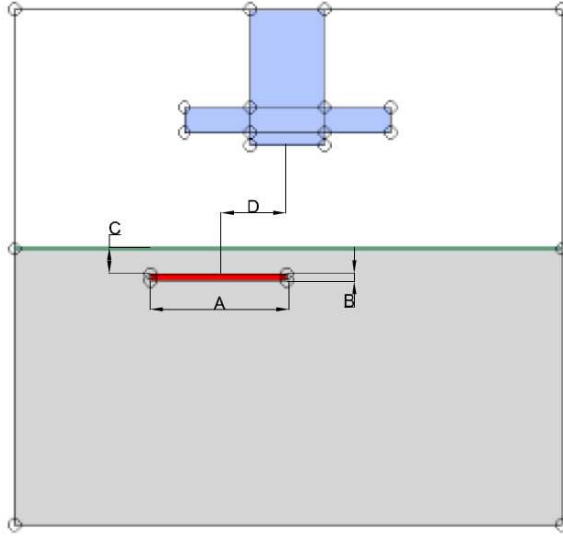
Parametry wykrywanejminy lądowej mogą być odtworzone poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego. W naszym przypadku zagadnienie odwrotne polega na określeniu parametrów obiektu (zakopanej w piaskuminy) na podstawie rozkładu temperatury na powierzchni piasku odczytywanej z sekwencji termogramów. Poszukiwane parametry to rozmiaryminy (szerokość i wysokość), głębokość na jakiejmina jest zakopana oraz jej pozycja względem środka apertury falowodu (rysunek 5.2) oraz wybrane parametry materiałowe.

Do rozwiązania zagadnienia odwrotnego zastosowano technikę bazującą na wykorzystaniu algorytmów optymalizacji, która jest używana w wielu aplikacjach [74–77]. Skorzystano ze zmodyfikowanego algorytmu hybrydowego, stosowanego wcześniej do optymalizacji kołnierza falowodu, opisanego w rozdziale 3.1. Aby skrócić czas obliczeń, w proponowanym algorytmie wykorzystano model dwuwymiarowy, zaprezentowany w rozdziale 3.2. Czas nagrzewania ustalono na 600 sekund, całkowity czas obserwacji na 1200 sekund. Przez cały czas obserwacji układu temperatura była odczytywana na powierzchni piasku co 40 sekund. Otrzymano w ten sposób 30 rozkładów temperatury. Zagadnienie odwrotne rozwiązano dla danych otrzymanych za pomocą modelowania (użyto rozkładów temperatury bez oraz z dodanym sztucznie szumem) oraz dla danych pomiarowych. Rysunek 5.1 przedstawia schemat blokowy algorytmu optymalizacji używanego do rozwiązania zagadnienia odwrotnego.

Minimalizowana funkcja to zsumowane po czasie różnice średniokadratowe liczone między żądanym rozkładem temperatury, a rozkładami otrzymywanymi w kolejnych iteracjach algorytmu,



Rysunek 5.1: Schemat blokowy rozwiązywania zagadnienia odwrotnego przy użyciu algorytmu optymalizacji hybrydowej



Rysunek 5.2: Parametry geometryczne estymowane w zagadnieniu odwrotnym: A – szerokość miny, B – wysokość miny, C – głębokość na jakiej jest zakopana, D – pozycja miny względem środka apertury falowodu

definiowana wzorem:

$$MSE_T = \sum_{l=1}^{30} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_{des_T}(x_k, l \cdot \Delta t) - f_T(x_k, l \cdot \Delta t))^2, \quad (5.1)$$

gdzie $f_{des_T}(x, \Delta t)$ to żądany rozkład temperatury (funkcja położenia i kroku czasowego), $f_T(x, \Delta t)$ – rozkład otrzymywany w kolejnej iteracji, Δt – krok czasowy, x – współrzędna punktu w którym odczytywana jest temperatura, a N to liczba punktów pomiarowych.

5.1. Badanie wrażliwości układu na zmiany poszczególnych parametrów

Zgodnie z założeniami modelu (opisanymi w rozdziale 3), na temperaturę układu i dynamikę jej zmian wpływa szereg parametrów. Zaliczamy do nich: geometrię układu, czyli szerokość oraz grubość obiektu symulującego minę, przesunięcie środka obiektu względem apertury falowodu oraz głębokość na jakiej zakopany jest obiekt, a także własności fizyczne obiektu, czyli jego gęstość, ciepło właściwe, przewodność cieplną oraz zespoloną przenikalność elektryczną. Nie ma wątpliwości, że geometria i położenie miny znacząco wpłyną na ostateczny rozkład temperatury na powierzchni ziemi, jednakże nie każdy z wymienionych parametrów fizycznych jednakowo wpływa na przepływ ciepła w układzie. Zasadne jest zatem przeprowadzenie analizy wrażliwości układu na zmiany poszczególnych parametrów fizycznych. Wrażliwość badana była dla każdego z parametrów oddzielnie, przy założeniu stałości pozostałych. Badany parametr przyjmował dziesięć

wartości przy stałym kroku w ustalonym zakresie. Zakresy zmian dla poszczególnych parametrów fizycznych zostały zebrane w tablicy 5.1. Założono, że obiekt symulujący minę położony jest 0.05 m pod powierzchnią gruntu, a jego rozmiary to 0.2 x 0.03 m. Zakres zmian w każdym wypadku został dobrany tak, aby wartości poszczególnych parametrów odpowiadały typowym właściwościom materiałowym dielektryków.

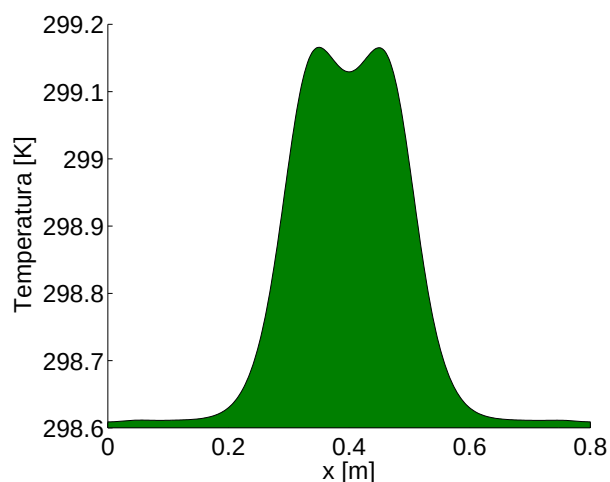
Tablica 5.1: Zakres zmian poszczególnych parametrów fizycznych podczas badania wrażliwości układu

Parametr	Wartość początkowa	Wartość końcowa	Wartość kroku
Przenikalność elektryczna (część rzeczywista) ϵ'	2	5	0.3
Przenikalność elektryczna (część urojona) ϵ''	0.01	0.3	0.03
Gęstość ρ_m [kg/m ³]	1100	2000	90
Przewodność cieplna k [W/(m·K)]	0.1	2.5	0.24
Ciepło właściwe C_p [J/(kg·K)]	800	1600	80

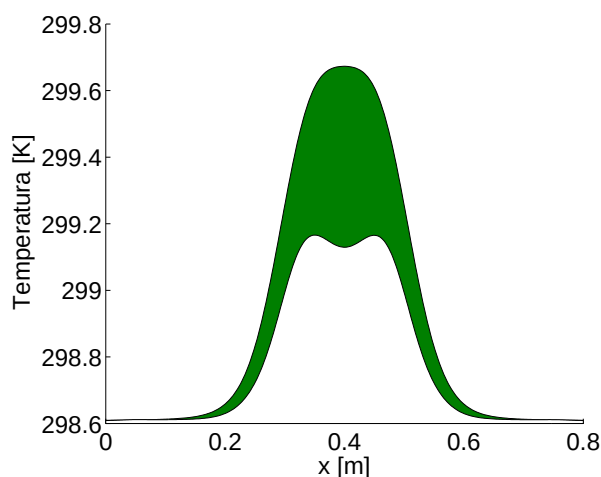
Przeprowadzono analizę numeryczną, a następnie oceniono jaki wpływ na zmianę temperatury układu ma zmiana poszczególnych parametrów. Ocenę wpływu dokonywano na podstawie analizy krzywych przedstawiających rozkład temperatury w fazie ochładzania układu (przez 600 sekund od zakończenia nagrzewania). Aby określić wrażliwość układu na zmianę każdego z parametrów dokonano analizy dwóch wskaźników:

- pola pod krzywą otrzymaną w procesie podgrzewania (krzywa typu $T1$),
 - pola zawartego między krzywą otrzymaną w procesie nagrzewania, a krzywą przedstawiającą rozkład temperatury po 600 sekundowym, naturalnym ochładzaniem się układu (krzywa typu $T2$).
- Wskaźniki te (dla jednej z wartości wybranego parametru) prezentowane są na rysunku 5.3. Pole pod krzywą obrazuje jaki wpływ ma badany parametr na nagrzewanie się obiektu w wyniku interakcji z padającym nań promieniowaniem mikrofalowym. Pole zawarte między wymienionymi wcześniej krzywymi pokazuje jaki wpływ ma rozważany parametr na swobodny przepływ ciepła w układzie (a co za tym idzie – dynamikę ochładzania się układu).

Wartości pola pod krzywymi uzyskanymi w wyniku ogrzewania układu (przykład takiej krzywej, wraz z zaznaczonym obliczanym polem obrazuje rysunek 5.3a) dla każdego z parametrów dla wszystkich ich wartości (vide tablica 5.1) zostały wykreślone na rysunku 5.4. Jak widać wpływ parametru ϵ'' znacznie przewyższa wpływ pozostałych parametrów na nagrzewanie się układu w wyniku oddziaływania z mikrofalami. Aby zobrazować zmiany pozostałych parametrów wykreślono je oddzielnie na rysunku 5.4b. Podobnie, rysunek 5.5 obrazuje zmiany wartości pola pomiędzy krzywą otrzymaną w wyniku nagrzewania a krzywą obserwowaną po 10 minutowym, naturalnym ochładzaniu



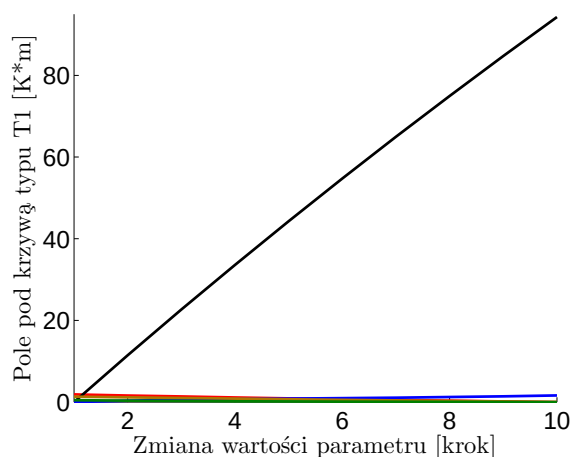
(a) Pole pod krzywą otrzymaną w wyniku nagrzewania układu mikrofalami



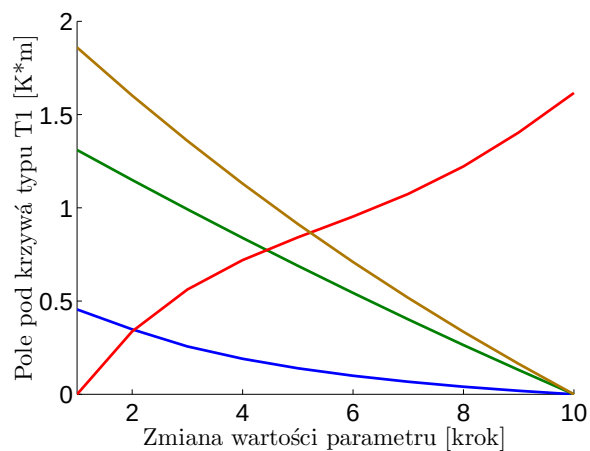
(b) Pole pomiędzy krzywą otrzymaną w wyniku nagrzewania, a obserwowaną po ochłodzeniu układu

Rysunek 5.3: Pola brane pod uwagę przy analizie wrażliwości układu na zmianę wartości poszczególnych parametrów

układu (takie pole obrazuje rysunek 5.3b). Ponownie to parametr ϵ'' wykazuje największy wpływ na dynamikę ochładzania się układu, co widać na rysunku 5.5a. Wpływ pozostałych parametrów przedstawiono na rysunku 5.5b.

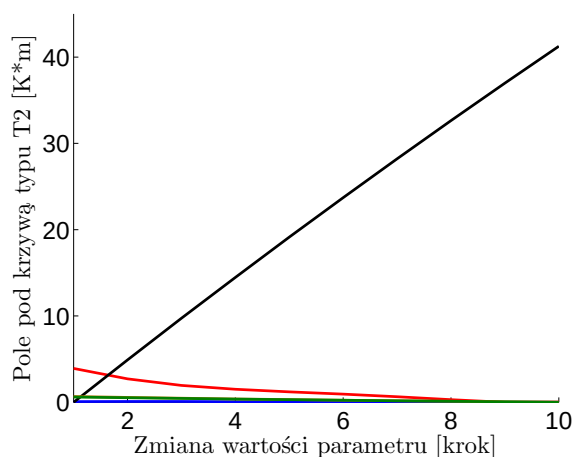


(a) Linia brązowa – C_p , linia zielona – ρ , linia niebieska – k , linia czerwona – ϵ' , linia czarna – ϵ''

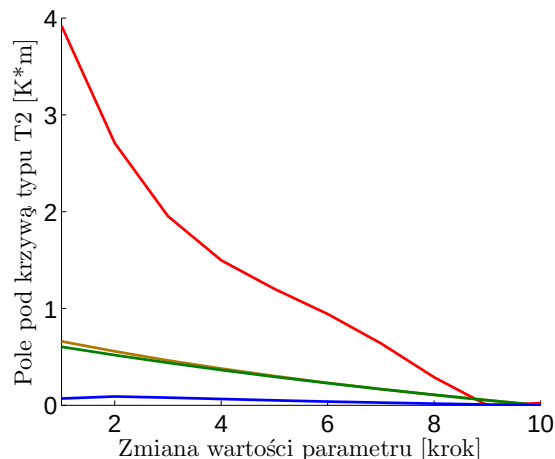


(b) Linia brązowa – C_p , linia zielona – ρ , linia niebieska – k , linia czerwona – ϵ'

Rysunek 5.4: Krzywe obrazujące zmianę wartości pola pod krzywą otrzymaną w wyniku nagrzewania: a) dla wszystkich parametrów, b) bez parametru ϵ''



(a) Linia brązowa – C_p , linia zielona – ρ_m , linia niebieska – k , linia czerwona – ϵ' , linia czarna – ϵ''



(b) Linia brązowa – C_p , linia zielona – ρ_m , linia niebieska – k , linia czerwona – ϵ'

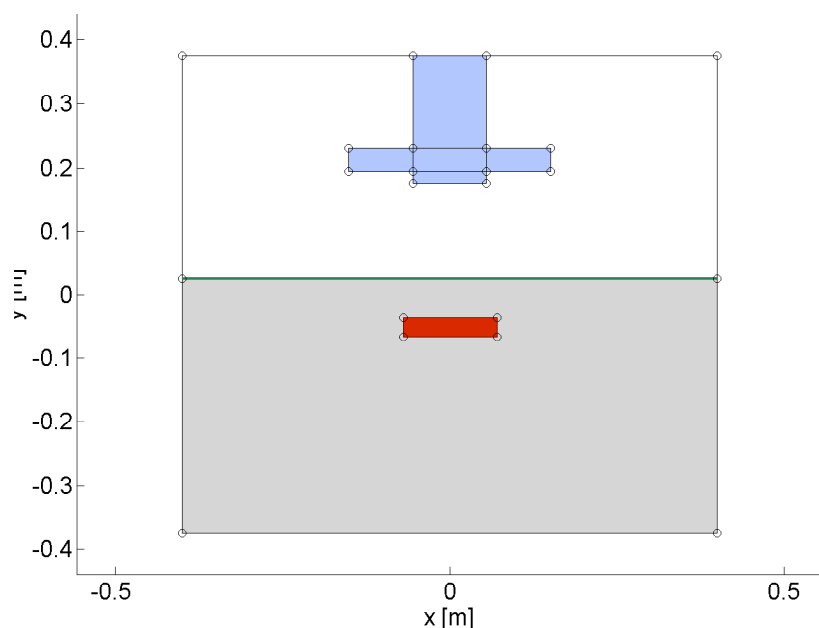
Rysunek 5.5: Krzywe obrazujące zmianę wartości pola pomiędzy krzywymi: otrzymaną w wyniku nagrzewania a obserwowaną po ochłodzeniu układu: a) dla wszystkich parametrów, b) bez parametru ϵ''

5.2. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla danych numerycznych

W celu sprawdzenia skuteczności proponowanej metody rozwiązywania zagadnienia odwrotnego, przeprowadzono analizę przy użyciu zestawu danych numerycznych zakładającego, że poszukiwany obiekt znajduje się na głębokości 0.05 m. Jego rozmiary ustalono na 0.14 m szerokości i 0.03 m wysokości – co odpowiada rzeczywistym wymiarom miny PMA-1. Założono również, że środek obiektu nie jest przesunięty względem środka apertury anteny. Rysunek 5.6 przedstawia geometrię rozważanego przypadku.

Dla proponowanej konfiguracji układu rozwiązano zagadnienie proste w programie COMSOL. Otrzymane liniowe rozkłady temperatury, zebrane z domeny oznaczonej na rysunku kolorem zielonym przedstawione są na rysunku 5.7a. Dane te, zapisane w postaci macierzowej, zostały użyte w procesie identyfikacji. Minimalizowana była różnica między rozkładami temperatury otrzymywanymi w każdej iteracji algorytmu, a żądanymi. Dodatkowo przeprowadzono analizę przy użyciu danych zaszumionych. Rysunek 5.7b przedstawia otrzymane rozkłady temperatury po dodaniu szumu na poziomie 5%.

W algorytmie genetycznym zastosowano populację składającą się z 10 osobników. Algorytm przebiegał w dziesięciu iteracjach. Otrzymane rozwiązanie wykorzystane zostało jako punkt startowy w algorytmie poszukiwania wzorca przebiegającym w 50 iteracjach. Wynikiem procesu optymalizacji było otrzymanie odtworzonych parametrów geometrycznych obiektu wraz z jego położeniem.

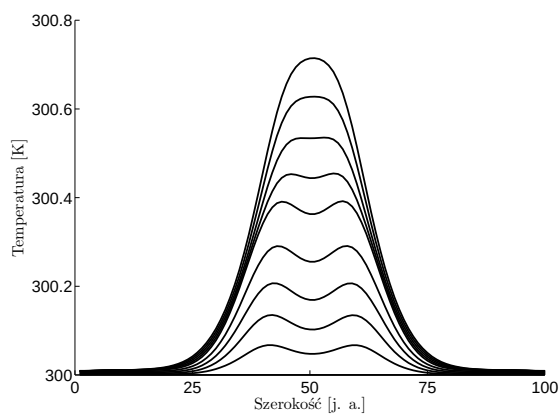


Rysunek 5.6: Geometria używana do rozwiązania zagadnienia prostego dla przypadku miny o parametrach szerokość – 0.14 m, wysokość 0.03m, głębokość 0.05m, przesunięcie względem apertury 0 m

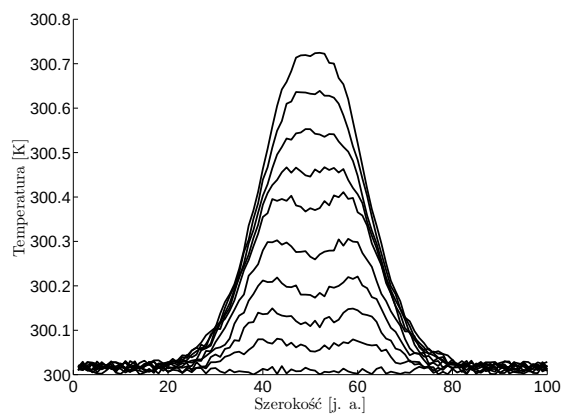
W tabelicy 5.2 zebrano otrzymane w wyniku identyfikacji parametry dla układu w przypadku danych z dodanym szumem oraz bez szumu. Rysunki 5.10a oraz 5.10b przedstawiają odtworzoną na podstawie rozkładów temperatury geometrię układu. W przypadku danych z dodanym szumem estymowana wysokość otrzymanej miny jest zbyt duża w stosunku do żądanej. Dobrze estymowane są położenie miny względem apertury falowodu oraz głębokość na jakiej jest zakopana. Rysunki 5.11a oraz 5.11b przedstawiają porównanie rozkładów temperatury dla geometrii otrzymanych w wyniku rozwiązania zagadnienia odwrotnego, a rozkładami żądanymi.

Estymacja parametrów geometrycznych układu z rozkładów temperatury odczytywanych z powierzchni piasku daje dobre rezultaty dla parametrów takich jak: głębokość na jakiej obiekt jest zakopany oraz położenie centrum obiektu względem środka apertury anteny. Dla tak dużych obiektów, do jakich można zaliczyć miny lądowe, błędna estymacja szerokości czy wysokości nie ma większego znaczenia przy ich lokalizacji.

Na podstawie rozkładu temperatury, oprócz parametrów geometrycznych, można również estymować niektóre parametry materiałowe obiektu. W prezentowanym modelu można estymować wybrane parametry związane z właściwościami cieplnymi danego materiału (takie jak jego przewodność cieplna, gęstość oraz ciepło właściwe) oraz parametr elektryczny, jakim jest zespolona przenikalność dielektryczna. Zbyt duża liczba parametrów w modelu powoduje spowolnienie



(a) Przypadek danych bez dodanych szumów

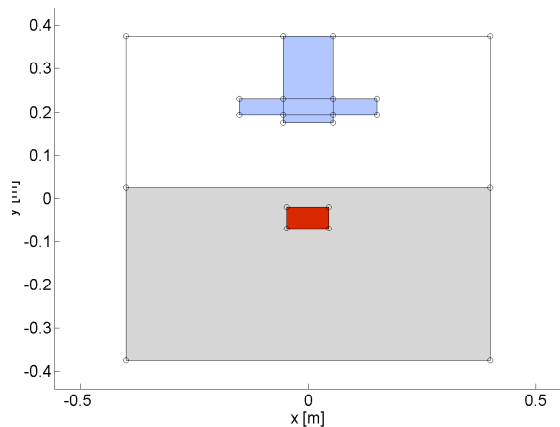


(b) Przypadek danych zaszumionych

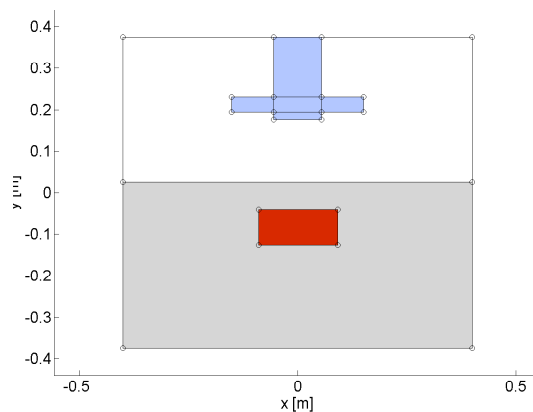
Rysunek 5.7: Zebrane z oznaczonej domeny rozkłady temperatury dla 10 kroków czasowych

Tablica 5.2: Parametry geometryczne obiektu odtworzone w procesie identyfikacji przeprowadzonej dla danych numerycznych

Parametr	Wartość prawidłowa	Wartość otrzymana dla danych bez szumu	Błąd	Wartość otrzymana dla danych z szumem	Błąd
Szerokość [m]	0.14	0.092	34 %	0.18	29%
Wysokość [m]	0.03	0.05	67 %	0.09	200 %
Przesunięcie względem środka apertury [m]	0	0		0	
Głębokość [m]	0.05	0.033	-34 %	0.05	0 %

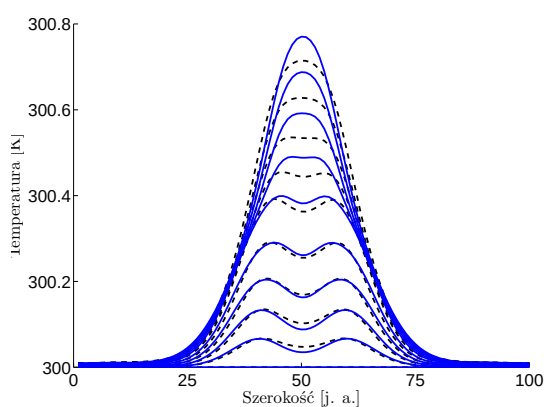


(a) Przypadek dla danych niezaszumionych

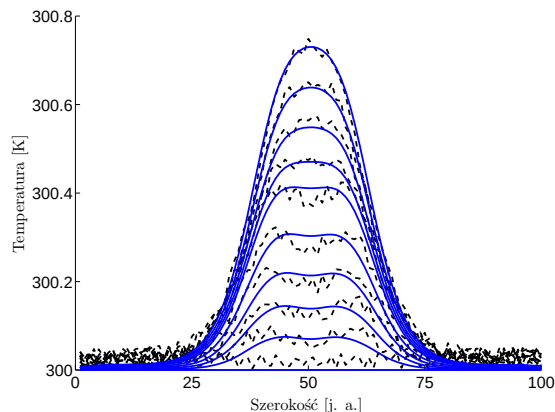


(b) Przypadek dla danych zaszumionych

Rysunek 5.8: Odtworzona w procesie identyfikacji geometria układu



(a) Przypadek danych niezaszumionych



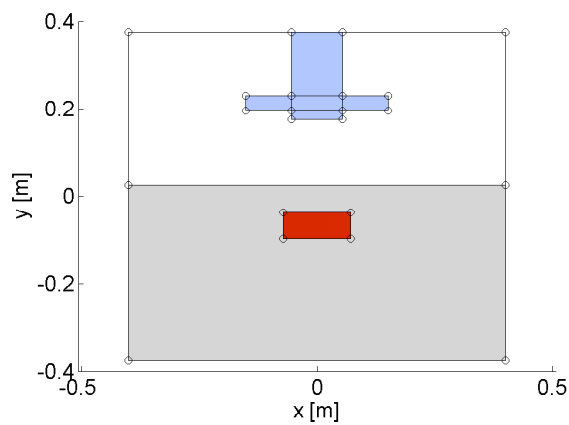
(b) Przypadek danych zaszumionych

Rysunek 5.9: Porównanie rozkładów temperatury otrzymywanych dla geometrii odtworzonej (niebieska linia) z rozkładami żądanymi (czarna, przerywana linia)

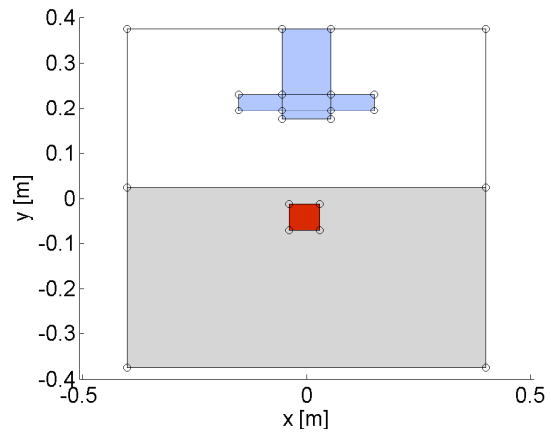
obliczeń oraz zmniejszenie dokładności identyfikacji, a co za tym idzie narastanie błędu. Pamiętając o tym, że na rozkład temperatury otrzymywany na powierzchni piasku wpływają zarówno parametry materiałowe jak i geometryczne badanego obiektu, estymacja parametrów materiałowych musi być jednoczesna z estymacją parametrów geometrycznych. Aby nie powiększać wektora parametrów optymalizacji postanowiono wybrać jeden z parametrów materiałowych i dodać go do proponowanej wcześniej optymalizacji używanej w problemie ekstrakcji parametrów geometrycznych obiektu. W ten sposób otrzymano wektor parametrów składający się z poszukiwanych właściwości geometrycznych obiektu (wysokości, szerokości, odległości od centrum falowodu oraz głębokości zakopania), uzupełniony o dodatkowy parametr – część urojona zespolonej przenikalności elektrycznej (ϵ'') badanego materiału. Wybór ten został uzasadniony w rozdziale 5.1

Ustalono, że obiekt będzie miał takie same parametry geometryczne jak w poprzednim przykładzie. Przenikalność dielektryczna została ustalona tak, aby odpowiadać tej mierzonej dla bakelitu (materiał często spotykany w obudowach min lądowych) i wynosiła $\epsilon = 3.7 - j0.23$. Dla tak skonstruowanego modelu otrzymujemy ponownie krzywe zaprezentowane na rysunkach. Wykonano dwie próby: za pierwszym razem użyto danych bez szumu, następnie danych zaszumionych. Wyniki estymacji parametrów zebrano w tablicy 5.3.

Wyniki analizy numerycznej jasno pokazują, że na duży błąd estymacji parametrów – w przypadku szacowania tylko parametrów geometrycznych maksymalny błąd wyniósł aż 200% – ma wpływ zaszumienie otrzymywanego sygnału. Również w przypadku szacowania parametrów geometrycznych uzupełnionych o urojoną wartość przenikalności dielektrycznej większy błąd może być obserwowany dla danych z dodanym szumem. Widać zatem, że kluczową rolę w

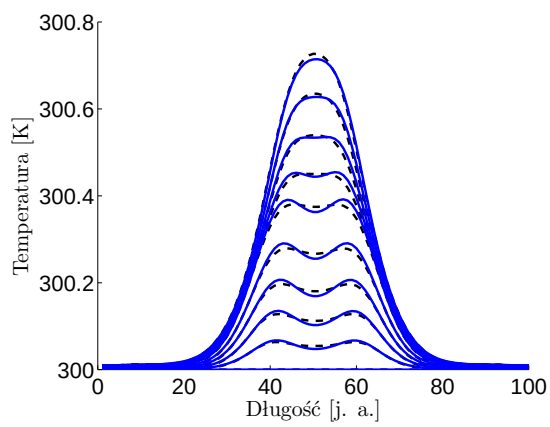


(a) Przypadek dla danych niezasumionych

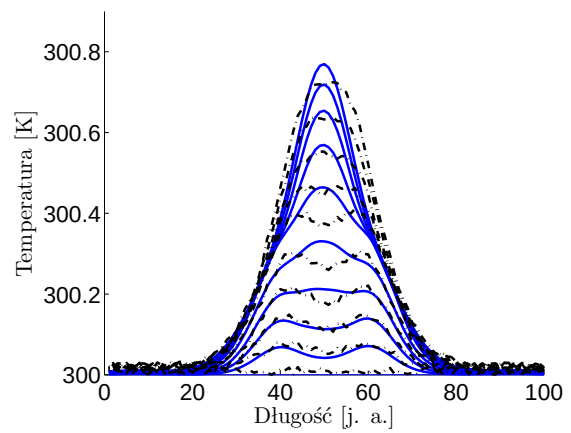


(b) Przypadek dla danych zaszumionych

Rysunek 5.10: Odtworzona w procesie identyfikacji geometria układu



(a) Przypadek danych niezasumionych



(b) Przypadek danych zaszumionych

Rysunek 5.11: Porównanie rozkładów temperatury otrzymywanych dla geometrii odtworzonej (niebieska linia) z rozkładami żądanymi (czarna, przerywana linia)

Tablica 5.3: Parametry geometryczne oraz wartość ϵ'' obiektu odtworzone w procesie identyfikacji przeprowadzonej dla danych numerycznych

Parametr	Wartość prawidłowa	Wartość otrzymana dla danych bez szumu	Błąd	Wartość otrzymana dla danych z szumem	Błąd
Szerokość [m]	0.14	0.14	0 %	0.07	-50%
Wysokość [m]	0.03	0.06	100 %	0.06	100 %
Przesunięcie względem środka apertury [m]	0	0		0	
Głębokość [m]	0.05	0.06	20 %	0.04	-20 %
ϵ''	0.23	0.24	4 %	0.19	17 %

otrzymaniu dobrych wyników estymacji wybranych parametrów wykrywanego obiektu dla danych eksperymentalnych będzie miała odpowiednie przetworzenie wyników pomiarów.

5.3. Eksperymentalna weryfikacja wyników numerycznych

Kolejnym etapem pracy była ocena efektywności działania algorytmu estymującego wybrane parametry obiektu dla przypadku rzeczywistych danych pomiarowych. Do eksperymentu wykorzystano minę ćwiczebną PMA-1, którą zakopano na głębokość pięciu centymetrów (układ był zatem taki sam, jak ten prezentowany na rysunku 5.6) a następnie poddano dziesięciominutowemu nagrzewaniu, po czym obserwowano układ przez kolejne dziesięć minut ochładzania. Nagrano sekwencję 600 termogramów obrazujących rozkład temperatury na powierzchni piasku. Z każdego termogramu zebrano wartości temperatury wzdłuż jednej linii przechodzącej przez centralną część najbardziej nagrzanego miejsca. Linia przedstawiona jest na rysunku 5.12.

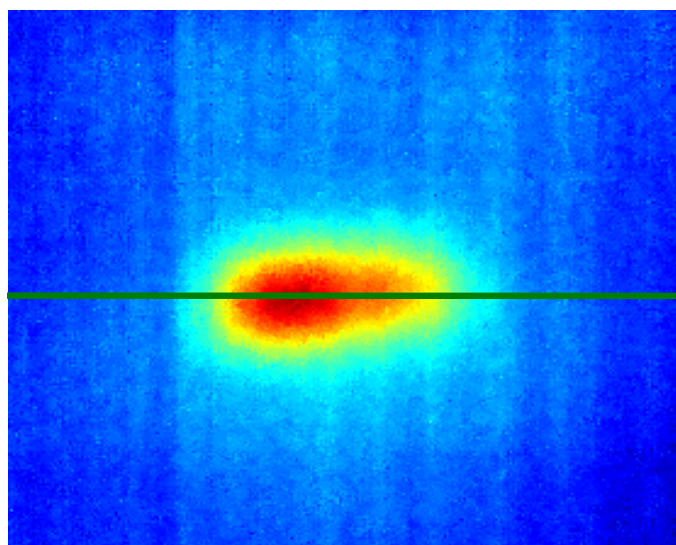
W wyniku odczytania wartości temperatury na zaznaczonej linii z każdego termogramu z sekwencji otrzymujemy 600 rozkładów temperatury, co przedstawia rysunek 5.13.

Jak widać na rysunku 5.13 otrzymane liniowe rozkłady są dość mocno zaszumione. Dodatkowo obszar obserwowany przez kamerę, z przyczyn technicznych nie obejmuje całego obszaru pojemnika z piachem. Dlatego w pierwszym etapie wykorzystano Matlab Curve Fitting toolbox do aproksymacji rozkładów temperatury za pomocą krzywych opisanych równaniem

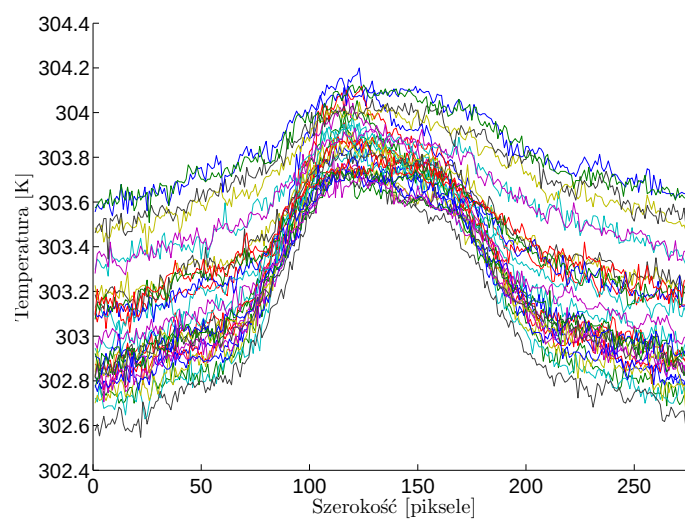
$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) + \dots + a_5 \cdot \cos(5 \cdot x \cdot w) + b_5 \cdot \sin(5 \cdot x \cdot w) \quad (5.2)$$

gdzie $a_0, \dots, a_5, b_1, \dots, b_5, w$ to parametry dopasowania dobierane przy pomocy nieliniowej metody najmniejszych kwadratów. Dobór rodzaju krzywej oraz ilości parametrów aproksymacji przeprowadzono na podstawie empirycznej analizy kształtu otrzymywanych krzywych. Na rysunku 5.14a widać rezultat dopasowania na przykładzie danych pomiarowych dla wybranego kroku czasowego. Duża liczba parametrów pozwoliła na precyzyjne dopasowanie krzywych i otrzymanie współczynnika determinacji bliskiego jedynce (na przykład dla krzywej przedstawionej na rysunku 5.14a, $R^2 = 0.996$). Precyzyjne dopasowanie krzywych ma w naszym wypadku duże znaczenie, gdyż kształt krzywych determinuje wynik estymacji parametrów. Po wykonaniu aproksymacji krzywe zostały uzupełnione poprzez dodanie do nich wartości odpowiadających wartościom temperatury na brzegach pojemnika. Po odjęciu wartości minimalnej, w celu sprowadzenia krzywych do jednego poziomu, a zatem usunięcia wpływu rosnącej temperatury otoczenia na wyniki pomiaru otrzymano 600 krzywych, które mogą zostać użyte jako dane wejściowe do procedury optymalizacyjnej. Krzywe te przedstawiono na rysunku 5.14b.

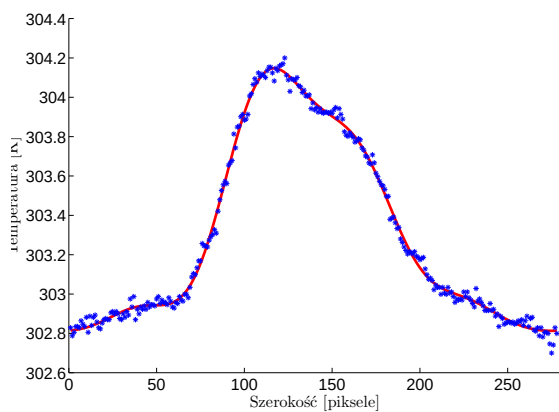
Procedura estymacji parametrów geometrycznych miny na podstawie rozkładów temperatury została przeprowadzona analogicznie jak w przypadku danych numerycznych, co opisano w poprzednim podrozdziale. W algorytmie genetycznym użyto populacji składającej się z 10 osobników, a liczba generacji została ustalona na 10. Algorytm poszukiwania wzorca przebiegał w 50 iteracjach. Na rysunku 5.15a pokazano dopasowanie rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku



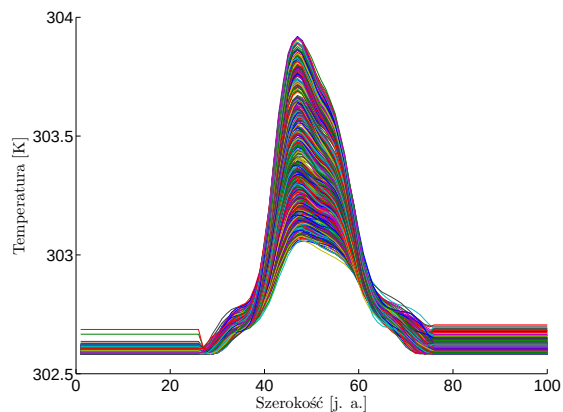
Rysunek 5.12: Przykładowy termogram z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania układu.
Wartości temperatury odczytywane były z linii zaznaczonej kolorem zielonym



Rysunek 5.13: Wybrane rozkłady temperatury odczytane z zaznaczonej na termogramie linii



(a) Dopasowanie krzywej (linia czerwona) do danych pomiarowych (niebieskie znaczniki) dla wybranego kroku czasowego

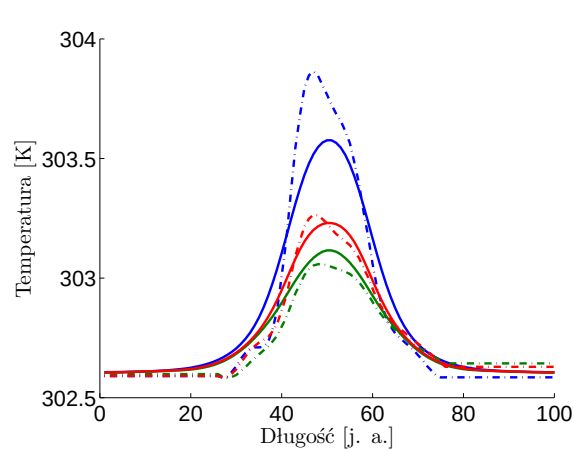


(b) Krzywe obrazujące rozkład temperatury otrzymane w wyniku aproksymacji

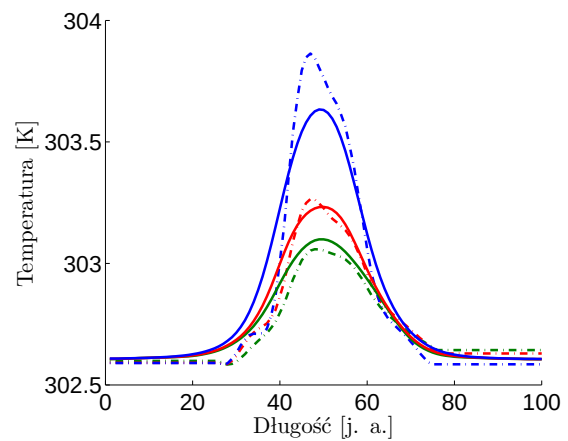
Rysunek 5.14: Wyniki procedury aproksymacji danych pomiarowych

działania algorytmu, do tych otrzymanych eksperymentalnie. Jak widać dopasowanie nie jest tak dobre jak w przypadku danych numerycznych, co nie jest jednak niepokojące w świetle tego jak złożone jest obserwowane zjawisko i jak liczne są czynniki wpływające na wynik. Niemniej pomimo rozbieżności między rozkładem temperatury obserwowanym podczas eksperymentu, a tym otrzymanym numerycznie, wyniki estymacji parametrów można uznać za dobre. W tablicy 5.4 można znaleźć estymowane oraz rzeczywiste parametry obiektu. Jedynym parametrem estymowanym z dużym błędem względnym jest wysokość miny, która powinna wynosić 3 cm, a wartość otrzymana w wyniku estymacji wynosi 8 cm. Pozostałe parametry, czyli szerokość, przesunięcie względem apertury oraz głębokość na jakiej zakopany był obiekt estymowane zostały poprawnie, a maksymalny błąd wyniósł 20 % (dla głębokości). Rysunek 5.16a przedstawia odtworzoną geometrię układu. Taka estymacja parametrów geometrycznych pozwala na trafną ocenę zakopanego obiektu i jego precyzyjną lokalizację.

W kolejnym etapie, oprócz parametrów geometrycznych (szerokości, wysokości miny, przesunięcia miny względem faliowodu oraz głębokości jej zakopania), estymowano również urojoną część zespolonej przenikalności elektrycznej ϵ'' , której wartość może posłużyć do określenia typu materiału z jakiego zbudowany jest wykrywany obiekt. Podobnie jak w poprzednim wypadku użyto hybrydowego algorytmu bazującego na procedurach optymalizacyjnych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego. W algorytmie genetycznym użyto populacji z 10 osobnikami oraz 10 generacji. Algorytm poszukiwania wzorca przebiegał w 50 iteracjach. Ponownie prezentujemy dopasowanie przykładowych liniowych rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku działania algorytmu, do



(a) Przypadek estymacji parametrów geometrycznych

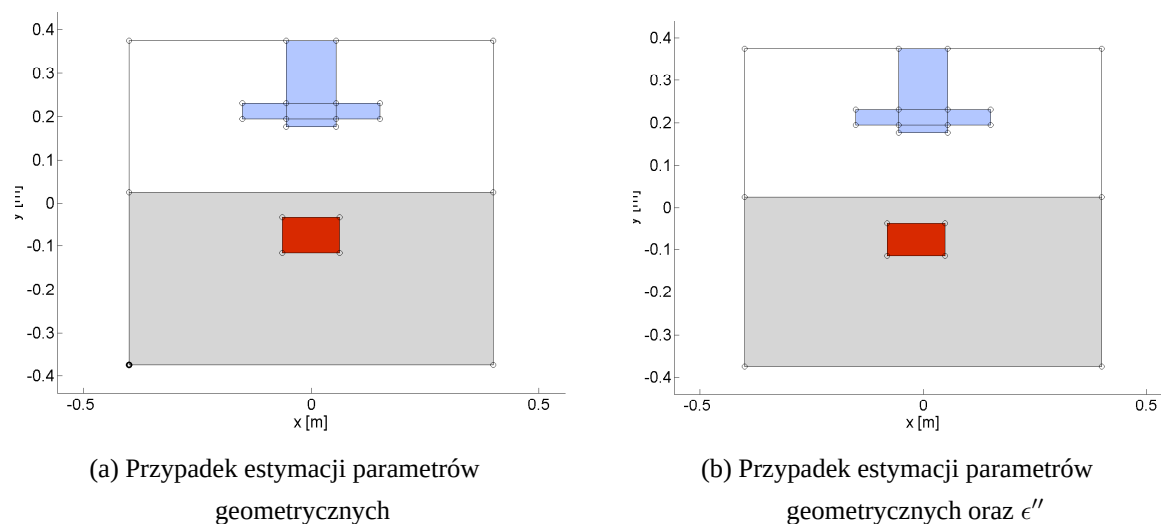


(b) Przypadek estymacji parametrów geometrycznych oraz ϵ''

Rysunek 5.15: Dopasowanie liniowych rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku działania algorytmu (linie ciągłe), do tych otrzymanych eksperymentalnie (linie przerywane). Linie zielone – $t=300$ s., linie czerwone – $t=400$ s., linie niebieskie – $t=600$ s.

Tablica 5.4: Parametry obiektu odtworzone w procesie optymalizacji w przypadku estymowania parametrów geometrycznych dla danych pomiarowych

Parametr	Wartość rzeczywista	Wartość estymowana	Błąd
Szerokość [m]	0.14	0.13	-7 %
Wysokość [m]	0.03	0.08	167 %
Przesunięcie względem środka apertury [m]	0	0	
Głębokość [m]	0.05	0.06	20 %



Rysunek 5.16: Odtworzona geometria układu. Mina zaznaczona jest kolorem czerwonym

tych, otrzymanych eksperymentalnie (rys. 5.15b) oraz odtworzoną geometrię układu, na której widać zaznaczoną czerwonym kolorem minę (rys. 5.16b). W tablicy 5.5 porównano parametry estymowane z rzeczywistymi. I w tym przypadku obserwujemy dużą zgodność wyników estymacji z rzeczywistymi parametrami wykrywanego obiektu. W przypadku parametrów geometrycznych, znów największy błąd pojawia się w estymacji wysokościminy, natomiast szerokość oraz głębokość zakopania oszacowane zostały identycznie jak w poprzedniej analizie. Zaobserwować można również, że na podstawie rozkładów temperatury estymowano 2 cm przesunięcieminy względem faliowodu, wartość taka jest oczywiście zaniedbywalna. Część urojona zespolonej przenikalności elektrycznej została oszacowana na 0.28 (w porównaniu do, właściwego bakelitowi, $\epsilon'' = 0.23$), co pozwala w przybliżeniu określić rodzaj materiału.

Tablica 5.5: Parametry obiektu odtworzone w procesie optymalizacji w przypadku estymowania parametrów geometrycznych oraz ϵ'' dla danych pomiarowych

Parametr	Wartość rzeczywista	Wartość estymowana	Błąd
Szerokość [m]	0.14	0.13	-7 %
Wysokość [m]	0.03	0.08	167 %
Przesunięcie względem środka apertury [m]	0	0.02	5% ^a
Głębokość [m]	0.05	0.06	20 %
ϵ''	0.23	0.28	22 %

^a Błąd policzony w stosunku do całkowitego możliwego przesunięcia względem środka apertury

5.4. Wnioski

Zarówno wyniki analiz numerycznych dla danych bez dodanego szumu jak i dla danych uzyskanych z eksperymentu, po odpowiedniej ich aproksymacji pokazały, że proponowane rozwiązanie może być zastosowane do estymacji niektórych parametrów min lądowych. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego pozwoliło na estymację parametrów geometrycznych oraz jednego parametru materiałowego obiektu. Wykazano małą wrażliwość układu na zmiany pozostałych parametrów materiałowych, co uniemożliwia zastosowanie takiej procedury do ich oszacowania. Jednakże urojona wartość zespolonej przenikalności elektrycznej ϵ'' przy znanej częstotliwości pola pozwala na przybliżone określenie rodzaju materiału. Określenie wielkości obiektu oraz jego lokalizacji pozwala na ustalenie z jakim obiektem mamy do czynienia i wstępną klasyfikację jako obiekt niebezpieczny. Szczególnie istotna wydaje się estymacja głębokości na jakiej zakopany jest obiekt, informacja ta może mieć duże znaczenie dla bezpieczeństwa ludzi zajmujących się oczyszczaniem pola minowego.

Wyniki analizy numerycznej z użyciem danych z dodanym szumem wykazały potrzebę odpowiedniej filtracji danych pomiarowych. Szum na poziomie 5% powodował zwiększenie się błędu estymacji. Do mocno zaszumionych danych pomiarowych zastosowano więc procedurę aproksymacyjną umożliwiającą zastąpienie krzywych pomiarowych uzyskanymi funkcjami. To rozwiązanie pozwoliło na dobre dopasowanie krzywych uzyskiwanych iteracyjnie do danych pomiarowych.

Proponowany algorytm ma charakter hybrydowy – składa się z dwóch metod używanych w optymalizacji (algorytmu genetycznego oraz poszukiwania wzorca), co pozwala połączyć zalety obu metod przy jednoczesnej minimalizacji ich wad. Niestety podstawową wadą takiego rozwiązania jest długi czas oczekiwania na wynik. Przy zastosowaniu 10 osobniczej populacji i 10 generacji w algorytmie genetycznym, a następnie 50 iteracji algorytmu poszukiwania wzorca czas działania wyniósł około 24 godziny na komputerze z procesorem Intel Core2 Quad, 2.83 GHz. Ilość potrzebnej pamięci operacyjnej to około 5 GB. Algorytm jest zatem dość wolny i wymaga dużej mocy obliczeniowej.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Niniejsza rozprawa obejmuje swoim zakresem analizę przydatności metody aktywnej termografii podczerwonej ze wzbudzeniem mikrofalowym do wykrywania niemetalicznych min lądowych. Po wstępnym przeglądzie literatury, wykonano szereg badań numerycznych oraz eksperymentalnych. Badania numeryczne, przeprowadzone za pomocą komercyjnego oprogramowania COMSOL ver. 3.5a oraz Matlab, zostały oparte na autorskich modelach 2D i 3D. Modele 2D wykorzystano do wstępnej analizy przydatności optymalizacji systemu pomiarowego oraz jako narzędzie do rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Modele 3D posłużyły do optymalizacji systemu pomiarowego oraz do numerycznej weryfikacji jej efektywności. Wyniki badań eksperymentalnych, wykonanych na autorskim urządzeniu grzewczym połączonym z kamerą termowizyjną FLIR 325A, zostały między innymi wykorzystane do weryfikacji wykonanych analiz numerycznych oraz do sprawdzenia efektywności termografii impulsowo-fazowej w zastosowaniu do wykrywania min lądowych.

We wstępie pracy dokonano analizy literatury, skupiając się na:

- aktualnym stanie zagrożenia minami lądowymi na świecie,
- rodzajach min lądowych,
- stosowanych metodach wykrywania min lądowych oraz takich nad którymi wciąż trwają prace, wraz z analizą ich zalet oraz wad,
- aktualnym stanie badań nad wykorzystaniem termografii do wykrywania min lądowych.

Na podstawie literatury stwierdzono, że problem zagrożenia minami lądowymi jest wciąż bardzo aktualny. Metody dziś stosowane nie są wystarczająco efektywne zwłaszcza, jeżeli chodzi o bardzo popularne miny z minimalną zawartością metalu. Analiza prowadzonych badań nad alternatywnymi metodami wykrywania min wskazuje, że termografia może stać się techniką używaną powszechnie, o ile zostaną rozwiązane niektóre problemy z nią związane. Efektywność termografii pasywnej jest silnie uzależniona od warunków pogodowych oraz pory dnia i roku w jakiej prowadzona jest obserwacja, dlatego lepszym rozwiązaniem wydaje się być termografia aktywna, pozwalająca na zmniejszenie wpływu warunków zewnętrznych na możliwość wykrycia obiektu. Możliwe źródła energii takie jak promienniki podczerwone czy lampy halogenowe nie są zbyt efektywne ani ekonomiczne, ze względu na fakt, iż dyfuzja ciepła od źródła do obiektu, a następnie od obiektu do detektora jest zbyt czasochłonna i wymaga zastosowania źródeł o dużej gęstości mocy. Na tej podstawie uznano, że zastosowanie mikrofal jako źródła energii jest zasadne, ze

względem na objętościowy charakter grzania mikrofalowego, pozwalający skrócić czas potrzebny do odpowiedniego nagrzanie się obiektu.

Termografia mikrofalowa wymaga użycia generatora mikrofal dużej mocy, a wygenerowana fala jest kierowana w kierunku gruntu za pomocą falowodu. W celu polepszenia efektywności metody zdecydowano się na zastosowanie anteny, której zadaniem była odpowiednia modyfikacja charakterystyki promieniowania, tak aby obszar podgrzewany miał jak największą powierzchnię oraz był możliwie najbardziej jednorodny jeżeli chodzi o rozkład temperatury. W tym celu:

- na podstawie analizy literatury wybrano rodzaj anteny – zmodyfikowaną antenę tubową o konstrukcji prostopadłościowej (ang. box-horn antenna),
- na podstawie wstępnej analizy dwuwymiarowych modeli numerycznych stwierdzono, że zmiana wymiarów anteny znacząco wpływa na kształt jej charakterystyki promieniowania, a to z kolei pozwala na rozszerzenie obszaru podgrzewanego mikrofalami,
- w celu doboru odpowiednich wymiarów anteny zaproponowano użycie optymalizacji hybrydowej, złożonej z algorytmu genetycznego oraz algorytmu poszukiwania wzorca,
- w celu implementacji algorytmu optymalizacji w połączonych programach COMSOL oraz Matlab wykonano dwuwymiarowy model anteny, w którym możliwa była zmiana wymiarów anteny oraz analiza charakterystyki jej promieniowania; na tej podstawie dokonano analizy efektywności tej techniki optymalizacji,
- po potwierdzeniu zasadności zastosowania zaproponowanej techniki optymalizacji, w połączonych programach COMSOL oraz Matlab wykonano symetryczny model trójwymiarowy w celu optymalizacji wszystkich wymiarów anteny,
- po ustaleniu optymalnych wymiarów anteny, efektywność optymalizacji została potwierdzona numerycznie poprzez wykonanie i porównanie wyników symulacji wykrycia miny zakopanej w różnych konfiguracjach w układzie bez oraz z optymalną anteną (kołnierzem falowodu).

Opisana technika, wedle wiedzy autorki, nie była wcześniej stosowana do optymalizacji rozkładu temperatury w grzaniu mikrofalowym.

Używając dwuwymiarowych modeli numerycznych rozwiązano również zagadnienie odwrotne, polegające na odtworzeniu parametrów geometrycznych oraz jednego z parametrów materiałowych zakopanej miny lądowej na podstawie rozkładów temperatury odczytywanych na powierzchni modelowanego gruntu. W tym celu wykonano następujące zadania:

- opracowano dwuwymiarowy model numeryczny za pomocą połączonych programów COMSOL i Matlab, który umożliwiał zmianę parametrów obiektu takich jak: jego szerokość, wysokość, głębokość na jakiej jest zakopany, jego położenie względem centrum układu oraz jeden z parametrów materiałowych – urojoną część przenikalności elektrycznej,

- zaimplementowano wspomniany wcześniej hybrydowy algorytm optymalizacyjny, modyfikując go tak aby możliwe było rozwiązanie zagadnienia odwrotnego,
- przetestowano proponowany algorytm na zestawach danych numerycznych oraz dokonano analizy otrzymanych wyników.

Po wykonaniu analiz numerycznych możliwa była budowa urządzenia grzewczego. Projekt urządzenia oparty został w pewnej mierze na pracach cytowanych we wstępie niniejszej pracy. Jako generator mikrofal zastosowany został magnetron, a za jego zasilanie odpowiedzialny był komercyjny zasilacz MAGDRIVE1000, umożliwiający kontrolę mocy magnetronu oraz obsługę z poziomu komputera klasy PC. Magnetron został bezpośrednio połączony z falowodem prostokątnym wyposażonym w kołnierz opracowany w wyniku procedury optymalizacyjnej opisanej wcześniej. Do obserwacji rozkładu temperatury na powierzchni piasku posłużyła kamera termowizyjna FLIR A325, która obsługiwana była z poziomu komputera PC za pomocą dedykowanego oprogramowania napisanego w środowisku LabView. Za budowę stanowiska pomiarowego w całości odpowiedzialna była autorka. Układ pomiarowy posłużył do wykonania pomiarów w zakresie:

- eksperymentalnej weryfikacji zwiększenia efektywności działania systemu po zastosowaniu optymalnego kołnierza falowodu, poprzez potwierdzenie powiększenia się obszaru jednorazowo nagrzanego mikrofalami i umożliwienie wykrycia miny znajdującej się poza centralną częścią pojemnika,
- wykonania badań eksperymentalnych polegających na wykryciu różnych min niemelicznych,
- zastosowania termografii impulsowo-fazowej do poprawienia jakości otrzymywanych termogramów oraz skrócenia czasu potrzebnego na detekcję miny,
- eksperymentalnej weryfikacji działania algorytmu wykorzystywanego do rozwiązania zagadnienia odwrotnego w problemie estymacji parametrów geometrycznych oraz jednego z parametrów materiałowych obiektu na podstawie rozkładów temperatury odczytywanych na powierzchni piasku.

Wyniki wyżej opisanych badań prezentowane były na konferencjach krajowych oraz światowych zajmujących się zagadnieniami związanymi z elektrotechniką teoretyczną, optymalizacją i zagadnieniami odwrotnymi w elektromagnetyzmie oraz techniką uzbrojenia takimi jak:

- International Symposium on Theoretical Electrical Engineering(ISTET),
- Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa na temat: Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa,
- International Workshop On Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE),
- International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE),
- International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW),
- Warsztaty Doktoranckie WD oraz OWD,

— Międzynarodowa konferencja naukowa IPOEX, Materiały Wybuchowe Badania – Zastosowanie – Bezpieczeństwo.

Analiza otrzymanych wyników badań numerycznych oraz eksperymentalnych wskazuje, że technika aktywnej termografii podczerwonej może być wykorzystana do wykrywania niemetalicznych min lądowych niewykrywalnych standardowymi metodami. Próby wykrycia badanych min wykrywaczem metalu nie powiodły się, natomiast otrzymane eksperymentalnie termogramy pozwalają na stwierdzenie obecności oraz lokalizację obiektu. Wskazuje to jednoznacznie przewagę omawianej metody nad metodą standardową. Analizy pozwoliły również stwierdzić, iż zastosowanie optymalizacji do projektowania urządzenia grzewczo – detekcyjnego pozwala na poprawienie skuteczności metody w zakresie rozszerzenia obszaru wykrywania. Za pomocą dedykowanych modeli numerycznych oraz odpowiednio zaplanowanych badań eksperymentalnych udowodniono także, że zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych pozwala na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego, co znacznie poprawia efektywność systemu. Na podstawie tych wniosków autorka stwierdza, że teza pracy została udowodniona.

6.1. Problemy wymagające dalszej analizy

Jak wspomniano na wstępie wykrywanie min lądowych metodą aktywnej termowizji z wymuszeniem mikrofalowym ma szansę stać się powszechnie używaną metodą. W niniejszej pracy skupiono się na głównie nad ulepszeniem systemu pomiarowego oraz opracowaniu algorytmu, który może służyć do rozwiązania zagadnienia odwrotnego, co znacznie poprawia efektywność metody. Pozostaje jeszcze wiele zagadnień, które powinny zostać poddane dalszej analizie.

Podstawową wadą metody jest długi czas pomiaru. W celu poprawienia efektywności metody w tym zakresie, autorka proponuje zastosowanie większej liczby urządzeń grzewczych, ułożonych w szereg antenowy. Należałoby wykonać odpowiednią analizę optymalizacyjną, podobną do tej zaproponowanej w niniejszej pracy w celu uzyskania możliwie jednorodnie nagrzanego obszaru, który mógłby być obserwowany jedną kamerą termowizyjną odpowiednio oddaloną. Takie rozwiązanie nie przyspieszyłoby oczywiście samego procesu nagrzewania, ale pozwoliłoby na jednoczesne nagrzanie i ocenę znaczenie większych obszarów.

Kolejne zagadnienie związane jest z mobilnością urządzenia. Mikrofały tak dużej mocy są oczywiście bardzo niebezpieczne dla organizmów żywych, zatem urządzenie musi być zdalnie sterowane. Konstrukcja odpowiedniego robota nie była przedmiotem tej rozprawy, tak samo jak techniczne zagadnienia związane z zasilaniem urządzenia grzewczego dużej mocy.

Niezbędne będzie przeprowadzenie badań sprawdzających efektywność zaproponowanych w

rozprawie algorytmów w naturalnym terenie, a docelowo na testowym polu minowym .

Zaproponowany algorytm rozwiązujący zagadnienie odwrotne został zaprezentowany i przetestowany na kilku zestawach danych numerycznych i pomiarowych, jest oczywiste, że w celu sprawdzenia jego stabilności i niezawodności jego praca powinna być sprawdzona na dużej bazie danych zebranych z rzeczywistych pól minowych.

Najważniejszym zadaniem do rozwiązania pozostaje budowa systemu wieloczułnikowego. Termowizja, choć niewątpliwie przydatna do wykrywania min lądowych, co wykazano między innymi w tej pracy, może okazać się nieskuteczna, gdy rozminowanie obejmie obszary mocno zawilgocone. Warto byłoby opracować system, który oprócz termowizji mógłby używać również radaru ziemnego oraz wykrywacza metali. System taki powinien być wyposażony w oprogramowanie, które wykorzystywałoby algorytmy fuzji danych.

Spis rysunków

1.1	Aktualny stan zanieczyszczenia minami na świecie. Źródło: [1]	11
2.1	Widmowa emitancja ciała doskonale czarnego. Źródło: własne na podstawie:[28]	19
2.2	Rozkład natężenia pól w falowodzie w płaszczyźnie x-y	23
2.3	Rozkład natężenia pola elektrycznego w falowodzie w płaszczyźnie z-y	23
2.4	Rozkład natężenia pola magnetycznego w falowodzie w płaszczyźnie z-y	24
2.5	Rozkład pola elektrycznego propagowanego z falowodu otwartego w płaszczyznach E oraz H	25
2.6	Charakterystyka promieniowania otwartego falowodu prostokątnego w płaszczyźnie E (falowód WR430, $f = 2.45$ GHz)	26
2.7	Charakterystyka promieniowania otwartego falowodu prostokątnego w płaszczyźnie H (falowód WR430, $f = 2.45$ GHz)	26
3.1	Termogram otrzymany po nagraniu piasku. Zaznaczono obszary brane pod uwagę przy optymalizacji	31
3.2	Projekt kołnierza falowodu prostokątnego	32
3.3	Schemat blokowy proponowanego algorytmu hybrydowego optymalizacji	33
3.4	Geometria używana przy rozwiązywaniu zagadnienia prostego w programie COMSOL dla przypadku dwuwymiarowego	34
3.5	Wykres funkcji dzwonowej używanej w procesie optymalizacji	35
3.6	Parametry optymalizacji w modelu dwuwymiarowym	35
3.7	Porównanie charakterystyk promieniowania otrzymanych dla falowodu ze zoptymalizowanym kołnierzem (linia czerwona) oraz dla falowodu bez kołnierza (linia niebieska). Naniesiono również wykres funkcji dzwonowej (czarna przerywana linia)	37
3.8	Geometria trójwymiarowa używana do rozwiązywania zagadnienia prostego w programie COMSOL. Pogrubione linie, to krzywe z których zbierane były wartości pola do wykreślenia charakterystyki promieniowania. Linia różowa jest położona w płaszczyźnie wektora $\mathbf{E}$, natomiast niebieska w płaszczyźnie wektora $\mathbf{H}$	38
3.9	Parametry optymalizacji dla przypadku trójwymiarowego	38
3.10	Obcięty wykres krzywej dzwonowej używany przy optymalizacji zagadnienia trójwymiarowego . .	39
3.11	Porównanie wyników optymalizacji dla różnej ilości generacji. Krzywa niebieska – wynik dla 40 osobników i 20 generacji, krzywa zielona – wynik dla 50 osobników i 10 generacji, krzywa zielona – wynik dla 50 osobników i 20 generacji. Czarna linia – wykres krzywej dzwonowej	40
3.12	Wynik dla płaszczyzny E	40
3.13	Wynik dla płaszczyzny H	40

3.14	Charakterystyka optymalna. Krzywa czerwona – wynik dla 50 osobników i 20 generacji. Czarna linia – wykres krzywej dzwonowej	40
3.15	Geometria dwuwymiarowa używana do rozwiązywania zagadnienia prostego w programie COMSOL	43
3.16	Rozkład temperatury w układzie bez miny	43
3.17	Rozkład temperatury w modelu z miną	44
3.18	Porównanie rozkładu temperatury na powierzchni piasku obserwowanego po 600 sekundach nagrzewania (linia niebieska) z tym otrzymanym po 600 sekundach dalszego chłodzenia układu (zielona linia)	45
3.19	Geometria (a) oraz siatka (b) stosowana w programie COMSOL do analizy modelu bez zakopanego obiektu	47
3.20	Geometria (a) oraz siatka (b) stosowana w programie COMSOL do analizy modelu z zakopanym obiektem	48
3.21	Objęściowy rozkład temperatury otrzymany dla modelu trójwymiarowego	48
3.22	Powierzchniowy rozkład temperatury otrzymany dla modelu trójwymiarowego	49
3.23	Geometria używana w programie COMSOL do modelowania zjawiska podgrzewania mikrofalowego piasku	50
3.24	Podgrzany obszar otrzymany po mikrofalowym nagrzaniu piasku	50
3.25	Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu bez kołnierza. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm centralnie pod falowodem	51
3.26	Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu falowodu z kołnierzem. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm centralnie pod falowodem	51
3.27	Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu bez kołnierza. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm, której środek położony jest 0.2 m od centrum falowodu	52
3.28	Sekwencja rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku podgrzewania mikrofalowego dla wybranych kroków czasowych. Przypadek falowodu z kołnierzem. Modelowana mina jest zakopana na głębokości 5 cm, której środek położony jest 0.2 m od centrum falowodu	52
3.29	Rozkład temperatury otrzymany po uśrednieniu obrazów z sekwencji nagrzewania układu	53
3.30	Rozkład temperatury otrzymany po uśrednieniu obrazów z sekwencji nagrzewania układu	54
3.31	Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód bez kołnierza, a obiekt znajdował się centralnie pod falowodem	55
3.32	Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem, a obiekt znajdował się centralnie pod falowodem	55

3.33	Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód bez kołnierza, a obiekt znajdował 20 cm od centrum falowodu	55
3.34	Rozkład temperatury na powierzchni piasku otrzymywany po odjęciu uśrednionego obrazu sekwencji nagrzewania, przedstawiony dla wybranych momentów czasowych. Rozważany był falowód ze zoptymalizowanym kołnierzem, a obiekt znajdował 20 cm od centrum falowodu	56
3.35	Obraz otrzymany w wyniku filtracji medianowej termogramów (czas chłodzenia=600 sekund) prezentujących rozkład temperatury w układzie, gdzie zakopana mina była przesunięta względem centrum falowodu o 20cm	56
4.1	Schemat ideowy układu pomiarowego	58
4.2	Zdjęcie układu pomiarowego	58
4.3	Miny ćwiczebne używane podczas pomiarów. A – GYATA-64, B – PMN-2, C – PMA-1	59
4.4	Ćwiczebne miny lądowe używane w trakcie pomiarów. Widok z góry	60
4.5	Ćwiczebne miny lądowe używane w trakcie pomiarów. Widok z boku	60
4.6	Pozycja min lądowych przed zakopaniem w celu próby wykrycia ich za pomocą wykrywacza metalu	61
4.7	Przykładowy odczyt dla jednej z min z wykrywacza Spektrol VLF	61
4.8	Obszar podgrzany obserwowany na powierzchni piasku powstały w wyniku 10 minutowego nagrzewania samego piasku	62
4.9	Położenie miny przed zakopaniem. Mina znajduje się centralnie pod falowodem	63
4.10	Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu bez kołnierza. Mina zakopana centralnie pod falowodem	63
4.11	Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu z kołnierzem. Mina zakopana centralnie pod falowodem	64
4.12	Położenie miny przed zakopaniem. Mina znajduje się 20 cm od środka falowodu	65
4.13	Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu bez kołnierza. Mina zakopana w odległości 20 cm od centrum falowodu	65
4.14	Wybrane obrazy z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania dla układu z kołnierzem. Mina zakopana w odległości 20 cm od centrum falowodu	65
4.15	Transformata Fouriera dla sekwencji obrazów	67
4.16	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina Gyata-64	67
4.17	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina Gyata-64	68
4.18	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina Gyata-64	68
4.19	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMN-2	69
4.20	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMN-2	69

4.21	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMN-2	70
4.22	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMA-2	70
4.23	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMA-2	71
4.24	Obrazy otrzymane po zastosowaniu transformaty Fouriera dla sekwencji obejmującej dwie minuty obserwacji układu. Mina PMA-2	71
5.1	Schemat blokowy rozwiązywania zagadnienia odwrotnego przy użyciu algorytmu optymalizacji hybrydowej	73
5.2	Parametry geometryczne estymowane w zagadnieniu odwrotnym: A – szerokość miny, B – wysokość miny, C – głębokość na jakiej jest zakopana, D – pozycja miny względem środka apertury falowodu	74
5.3	Pola brane pod uwagę przy analizie wrażliwości układu na zmianę wartości poszczególnych parametrów	76
5.4	Krzywe obrazujące zmianę wartości pola pod krzywą otrzymaną w wyniku nagrzewania: a) dla wszystkich parametrów, b) bez parametru ϵ''	76
5.5	Krzywe obrazujące zmianę wartości pola pomiędzy krzywymi: otrzymaną w wyniku nagrzewania a obserwowaną po ochłodzeniu układu: a) dla wszystkich parametrów, b) bez parametru ϵ''	77
5.6	Geometria używana do rozwiązania zagadnienia prostego dla przypadku miny o parametrach szerokość – 0.14 m, wysokość 0.03m, głębokość 0.05m, przesunięcie względem apertury 0 m	78
5.7	Zebrałe z oznaczonej domeny rozkłady temperatury dla 10 kroków czasowych	79
5.8	Odtworzona w procesie identyfikacji geometria układu	79
5.9	Porównanie rozkładów temperatury otrzymywanych dla geometrii odtworzonej (niebieska linia) z rozkładami żądanymi (czarna, przerywana linia)	80
5.10	Odtworzona w procesie identyfikacji geometria układu	81
5.11	Porównanie rozkładów temperatury otrzymywanych dla geometrii odtworzonej (niebieska linia) z rozkładami żądanymi (czarna, przerywana linia)	81
5.12	Przykładowy termogram z sekwencji nagranej podczas 10 minutowego ochładzania układu. Wartości temperatury odczytywane były z linii zaznaczonej kolorem zielonym	84
5.13	Wybrane rozkłady temperatury odczytane z zaznaczonej na termogramie linii	84
5.14	Wyniki procedury aproksymacji danych pomiarowych	85
5.15	Dopasowanie liniowych rozkładów temperatury otrzymanych w wyniku działania algorytmu (linie ciągłe), do tych otrzymanych eksperymentalnie (linie przerywane). Linie zielone – $t=300$ s., linie czerwone – $t=400$ s., linie niebieskie – $t=600$ s.	86
5.16	Odtworzona geometria układu. Mina zaznaczona jest kolorem czerwonym	87

Spis tablic

2.1	Parametry cieplne dla wybranych materiałów [42, 43]	21
2.2	Wartości tangensa kąta stratności $\tan \delta$ dla wybranych dielektryków [6, 42, 56]	28
3.1	Wyniki optymalizacji kołnierza falowodu w modelu dwuwymiarowym	36
3.2	Wyniki optymalizacji kołnierza falowodu dla przypadku trójwymiarowego	40
4.1	Podstawowe parametry min ćwiczebnych używanych w badaniach eksperymentalnych	59
5.1	Zakres zmian poszczególnych parametrów fizycznych podczas badania wrażliwości układu	75
5.2	Parametry geometryczne obiektu odtworzone w procesie identyfikacji przeprowadzonej dla danych numerycznych	79
5.3	Parametry geometryczne oraz wartość ϵ'' obiektu odtworzone w procesie identyfikacji przeprowadzonej dla danych numerycznych	82
5.4	Parametry obiektu odtworzone w procesie optymalizacji w przypadku estymowania parametrów geometrycznych dla danych pomiarowych	86
5.5	Parametry obiektu odtworzone w procesie optymalizacji w przypadku estymowania parametrów geometrycznych oraz ϵ'' dla danych pomiarowych	87

Bibliografia

- [1] The International Campaign to Ban Landmines. Landmine monitor 2012. (Ottawa: Mines Action Canada: 2012), 2012.
- [2] J. MacDonald, J. Loockwood, T. Altshuler, T. Broach, L. Carin, R. Harmon, C. Rappaport, W. Scott, and Weaver R. *Alternatives for landmine detection*. RAND, 2003.
- [3] James Madison University Center for International Stabilization & Recovery. Ordata online, 2006. <http://ordatamines.maic.jmu.edu/default.aspx>.
- [4] D. Balageas, M. Lemistre, and P. Levesque. Mine detection using the EMIR method. Improved configuration using a mobile detection system. In *Proc. QIRT*, pages E.2.1–E.2.6, 2004.
- [5] C. A. DiMarzio, C. M. Rappaport, T. Oktar, and G. O. Sauermann. Multiple wavelength microwave – enhanced infrared thermography. US Patent, US 6753592 B2, 2004.
- [6] H. Mende, B. Dej, S. Khanna, R. Apps, M. Boyle, and F. Addison. Microwave enhanced ir detection of landmines using 915 mhz and 2450 mhz. Technical report, Defence R & D Canada – Ottawa, 2004.
- [7] T. T. Nguyen. *Infrared thermography for the detection and characterization of buried objects*. Rozprawa doktorska, Vrije Univeriteit Brussel, 2007.
- [8] T. Shi, G. O. Sauermann, C. M. Rappaport, and C. A. DiMarzio. Dual-frequency microwave-enhanced infrared thermography. In *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*, volume 4394, pages 379–386, 2001.
- [9] Waldemar Swiderski, Pawel Hlost, and Maciej Miszczak. Ir thermography methods in detection of buried mines. volume 8541, pages 85410S–85410S–18, 2012.
- [10] United Nations Mine Action Service. International mine action standards, 2013. www.mineactionstandards.org/.
- [11] D. Guelle, A. Smith, A. Lewis, and T. Bloodworth. *Metal detector handbook for humanitarian demining*. European Communities, 2003.
- [12] M. Wołoszyn. *Detekcja, lokalizacja i identyfikacja obiektów ferromagnetycznych z wykorzystaniem magnetometrów skalarnych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2012.
- [13] J. Lenz and A. S. Edelstein. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensor Journal*, 6 (3):631–649, 2006.

- [14] O. Lopera. *An integrated detection and identification methodology applied to ground-penetrating radar data for humanitarian demining applications*. Rozprawa doktorska, École Royale Militaire, Belgium, 2008.
- [15] M. Nolte, A. Privalov, J. Altmann, V. Anferov, and F. Fujara. ^1H - ^{14}N cross-relaxation in trinitrotoluene – a step toward improved landmine detection. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35(6):939–942, 2002.
- [16] M. J. Grone, C. C. Cumming, M. E. Fisher, M. J. Fox, S. Jacob, D. Dennis Reust, M. G. Rockley, and E. Towers. Detection of land mines by amplified fluorescence quenching of polymer films: a man-portable chemical sniffer for detection of ultratrace concentrations of explosives emanating from land mines. In *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*, volume 4038, pages 553–562.
- [17] A. Poling, B. Weetjens, C. Cox, N. Beyene, and A. Sully. Using giant african pouched rats (*cricketomys gambianus*) to detect landmines. *The Psychological Record*, 60:715–728, 2010.
- [18] R. W. Haupt and K. D. Rol. Standoff acoustic laser technique to locate buried land mines. *Lincoln Laboratory Journal*, 16(1):3–22, 2005.
- [19] J. Simard. Improved landmine detection capability (ildc): systematic approach to the detection of buried mines using passive ir imaging. In *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*, volume 2765, pages 489–500, 1996.
- [20] K. Russell, J. McFee, and W. Sirovyak. Remote performance prediction for infrared imaging of buried mines. In *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*, volume 3079, pages 762–769, 1997.
- [21] W. Świdorski. Wpływ warunków środowiskowych na wykrywanie pod warstwą gleby obiektów metodą termograficzną. Sprawozdanie 4186/C D-03, WITU, 1996.
- [22] W. Świdorski. Adaptacja przemysłowych metod dynamicznej, aktywnej termografii dla potrzeb wykrywania niejednorodności struktur podziemnych, a zwłaszcza pól minowych, w warunkach naturalnych wymuszeń przepływów ciepła. Raport końcowy projektu badawczego 0 T00A 015 14, WITU, 1999.
- [23] W. Świdorski. Główne kierunki prac naukowo-badawczych z zastosowaniem termografii w podczerwieni prowadzonych w WITU. *Problemy Techniki Uzbrojenia*, Z. 117(nr 2):17–27, 2011.
- [24] S. M. Khanna, F. Paquet, R. Apps, and J. Seregelyi. Landmine detector with a high-power microwave illuminator and an infrared detector. US Patent, US 6343534 B1, 2002.
- [25] S. M. Khanna, F. Paquet, R. Apps, and J. Seregelyi. A new remote-sensing method for mine detection using HPM irradiation and ir detection. Technical report, Defence R & D Canada – Ottawa, 1999.

- [26] D. Balageas and M. Lemistre. Mine detection using the EMIR method. In *Proc. QIRT*, pages 71–76, 2002.
- [27] C. A. DiMarzio, D. O. Hogenboom, C. M. Rappaport, G. O. Sauermann, and H. E. Scott. Microwave-enhanced infrared thermography. In *Proc. SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*, volume 3392, pages 1103–1110, 1998.
- [28] X. Maladegue. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. John Wiley and Sons, 2001.
- [29] T. Chady, P. Łopato, and B. Szymanik. Terahertz and thermal testing of glass-fiber reinforced composites with impact damages. *Journal of Sensors*, 2012, 2012. 14 pages.
- [30] L. Napierała and B. Szymanik. Algorytmy progowania w zastosowaniach nieniszczących badań termograficznych. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 249:155–165, 2011.
- [31] S. Marintetti, Y. A. Plotnikov, W. Winfree, and A. Braggiotti. Pulse phase thermography for defect detection and visualization. In *Proc. SPIE, Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware III*, volume 3586, pages 230–238, 1999.
- [32] Sikora S., T. Chady, and B. Szymanik. Infrared thermographic testing of composite materials with adhesive joints. In *Proc. WCNDT*, 2012. paper no. 156.
- [33] B. Szymanik and L. Napierała. Algorytmy przetwarzania obrazów w zastosowaniu do analizy termogramów. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 248:147–159, 2011.
- [34] L. Cheng, G. Y. Tian, and B. Szymanik. Feasibility studies on microwave heating for non-destructive evaluation of glass fibre reinforced plastic composites. In *Proc. I2MTC*, pages 47–52, 2011.
- [35] M Vollmer and K. P. Möllmann. *Infrared thermal imaging. Fundamentals, research and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2010.
- [36] W. Minkina. *Infrared thermography: errors and uncertainties*. John Wiley and Sons, 2009.
- [37] H. Budzier and G. Gerlach. *Thermal infrared sensors: theory, optimisation and practice*. John Wiley and Sons, 2011.
- [38] A. Rogalski. *Infrared detectors*. Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
- [39] M. A. Kinch. *Fundamentals of infrared detector materials*. SPIE Press, 2007.
- [40] H. Schneider and H. C. Liu. *Quantum well infrared photodetectors*. Springer-Verlag, 2007.
- [41] C. Borgnakke and R. E. Sonntag. *Fundamentals of thermodynamics*. John Wiley and Sons, 2009.
- [42] R. J. Meredith. *Engineers’ handbook of industrial microwave heating*. The Institution of Engineering and Technology, 1998.
- [43] F. Moukalled, Z. Fawaz, N. Ghaddar, H. Kabbani, and N. Khalid. Numerical and experimental investigation of thermal signatures of buried landmines in dry soil. *Journal of Heat Transfer*, 128(5):484–494, 2005.

- [44] J. A. Kong. *Electromagnetic wave theory*. EMW Publishing, 2000.
- [45] R. Sikora. *Teoria pola elektromagnetycznego*. WNT, 1997.
- [46] S. Gratkowski. *Asymptotyczne warunki brzegowe dla stacjonarnych zagadnień elektromagnetycznych w obszarach nieograniczonych – algorytmy metody elementów skończonych*. Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2009.
- [47] Z. Piątek and P. Jabłoński. *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*. WNT, 2010.
- [48] J. F. White. *High frequency techniques: an introduction to RF and microwave engineering*. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [49] J. Szóstka. *Mikrofałe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2008.
- [50] J. Szóstka. *Fale i anteny*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2006.
- [51] H. E. Thomas. *Techniki i urządzenia mikrofalowe – poradnik*. WNT, 1978.
- [52] D. M. Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley and Sons, 2005.
- [53] Y. Huang and K. Boyle. *Antennas: from theory to practice*. John Wiley and Sons, 2008.
- [54] S. Silver. *Microwave antenna theory and design*. The Institution of Engineering and Technology, 1984.
- [55] A. Von Hippel. *Dielectrics and waves*. Artech House Print on Demand, 1995.
- [56] A. C. Metaxas and R. J. Meredith. *Industrial microwave heating*. The Institution of Engineering and Technology, 1983.
- [57] S. Gratkowski B. Szymanik. Studies on the effectiveness of optimized, thermovision system for landmines detection. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 3:6–12, 2011.
- [58] B. Szymanik and S. Gratkowski. Waveguide flange’s shape optimization in microwave enhanced infrared landmines’ detection. In *Proc. ISTET*, pages 210–215, 2011.
- [59] D. E. Goldberg. *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. WNT, 1998.
- [60] C. Audet and Dennis J. E. Analysis of generalized pattern searches. *SIAM Journal on Optimization*, 13(3):889—903, 2003.
- [61] B. Szymanik and S. Gratkowski. Numerical modelling of microwave heating in landmines detection. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 37:215—229, 2011.
- [62] B. Szymanik. Influence of ground surface roughness on effectiveness of landmine detection using active infrared thermography. In *Proc. XII International PhD Workshop OWD*, pages 253–257, 2010.
- [63] B. Szymanik and P. Lesiecki. Termografia podczerwona z wymuszeniem mikrofalowym w zastosowaniu do wykrywania niemetalicznych min lądowych. *Prace Instytutu Elektrotechniki*,

241:47–69, 2009.

- [64] J. P. Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of computational physics*, 114:185–200, 1994.
- [65] J. M. Jin and D. J. Riley. *Finite element analysis of antennas and arrays*. John Wiley and Sons, 2009.
- [66] J. M. Jin. *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley and Sons, 2002.
- [67] A. Maranda, T. Sałaciński, and A. Lewandowska, editors. *Materiały wysokoenergetyczne*, chapter Detection of nonmetallic landmines using microwave-enhanced infrared thermography. Instytut Przemysłu Organicznego, 2010.
- [68] J. Sikora and S. Wójtowicz, editors. *Industrial and biological tomography. Theoretical basis and applications*, chapter Microwave Enhanced Infrared Thermography Applied to Nonmetallic Landmines Detection. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, 2010.
- [69] B. Szymanik. Zastosowanie aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym do wykrywania min lądowych typu pmn, pmn-2 oraz pmf-1. *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, 3:54–63, 2011.
- [70] X. Maldague, F. Galmiche, and A. Ziadi. Advances in pulsed phase thermograph. *Infrared Physics & Technology*, 43:175–181, 2002.
- [71] M. Ishikawa, H. Hatta, Y. Habuka, R. Fukui, and S. Utsunomiya. Detecting deeper defects using pulse phase thermography. *Infrared Physics & Technology*, 57:42–49, 2013.
- [72] L. L. Cantini, M. Cucchi, G. Fava, and C. Poggi. Fourier analysis applied to infrared thermography of fiber composites used for the strengthening of structural elements. In *Proc. QIRT*, pages 1–9, 2012.
- [73] X. Maldague, J. P. Couturier, S. Marinetti, A. Salerno, and D. Wu. Advances in pulsed phase thermography. In *Proc. QIRT*, pages 377–382, 1996.
- [74] J. Skaar and K.M. Risvik. A genetic algorithm for the inverse problem in synthesis of fiber gratings. *Lightwave Technology, Journal of*, 16(10):1928–1932, 1998.
- [75] S. Sarikaya, G.-W. Weber, and Y.S. Dogrusoz. Combination of conventional regularization methods and genetic algorithm for solving the inverse problem of electrocardiography. In *Health Informatics and Bioinformatics (HIBIT), 2010 5th International Symposium on*, pages 13–20, 2010.
- [76] L. Satyanarayan, K. Bharath Kumaran, C. V. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam. Inverse method for detection and sizing of cracks in thin sections using a hybrid genetic algorithm based signal parametrisation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 49:185–198, 2008.
- [77] J. Vishnuvardhan, C. V. Krishnamurthy, and K. Balasubramaniam. Determination of material symmetries from ultrasonic velocity measurements: A genetic algorithm based blind inversion

method. *Composites Science and Technology*, 68:862—871, 2008.

Publikacje z udziałem autorki

Publikacje z udziałem autorki związane bezpośrednio z tematem pracy:

1. B. Szymanik, S. Gratkowski. Numerical modelling of microwave heating in landmines detection. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, volume 37, number 2-3 / 2011, pages 215–229
2. B. Szymanik, P. Lesiecki. Termografia podczerwona z wymuszeniem mikrofalowym w zastosowaniu do wykrywania niemetalicznych min lądowych. Prace Instytutu Elektrotechniki, volume 241, 2009, pages 67–79
3. B. Szymanik, L. Napierała. Algorytmy przetwarzania obrazów w zastosowaniu do analizy termogramów. Prace Instytutu Elektrotechniki, volume 248, 2010, pages 147–159
4. L. Napierała, B. Szymanik. Algorytmy progowania w zastosowaniach nieniszczących badań termograficznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, volume 249, 2011, pages 155–165
5. B. Szymanik. Zastosowanie aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym do wykrywania min lądowych typu PMN, PMN-2 oraz PMF-1. Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa, volume 3, 2011, pages 54–63
6. B. Szymanik, S. Gratkowski. Studies on the effectiveness of optimized, thermovision system for landmines detection. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, volume 3, 2011, pages 6–12
7. B. Szymanik, S. Gratkowski. Microwave enhanced infrared thermography applied to nonmetallic landmines detection. J. Sikora, S. Wójtowicz: Industrial and Biological Tomography. Theoretical Basis and Applications, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2010, pages 149–161
8. B. Szymanik. Detection of nonmetallic landmines using microwave-enhanced infrared thermography. Materiały Wysokoenergetyczne – Tom II, praca zbiorowa pod redakcją: Andrzeja Marandy, Tomasza Sałacińskiego oraz Agnieszki Lewandowskiej, Instytut Przemysłu Organicznego, Warszawa 2010, pages 49–57
9. B. Szymanik, S. Gratkowski. Waveguide flange's shape optimization in microwave enhanced infrared landmines' detection. ISTET 2011, 25-27 July, Klagenfurt, Austria

10. B. Szymanik, S. Gratkowski. Studies on the effectiveness of optimized, thermovision system for landmines detection. I2PhD Workshop 2011, 28-31 sierpień, Zielona Góra
11. B. Szymanik. Influence of ground surface roughness on effectiveness of landmine detection using active infrared thermography. XII International PhD Workshop OWD'2010, 23-26 październik, Wisła

Pozostałe publikacje z udziałem autorki:

1. P. Lesiecki, B. Szymanik. Detection of concealed, graphite containing frescos, using microwave enhanced infrared thermography. Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV), Editors: T. Chady, S. Gratkowski, T. Takagi, S. S. Udpa, IOS Press 2011, pages 402–409
2. E. Wunsch, B. Szymanik, M. Post, W. M. Marlicz, P. Milkiewicz. Minimal Hepatic Encephalopathy Does Not Impair Quality of Life in Patients with Liver Cirrhosis: a Single Centre, Prospective Study. Gastroenterology, volume 136, issue 5, supplement 1, 2009, pages A–417
3. J. Raszeja-Wyszomirska, M. P. Wasilewicz, E. Wunsch, B. Szymanik, K. Jarosz, M. Wójcicki, P. Milkiewicz. Assessment of a modified Child-Pugh-Turcotte score to predict early mortality after liver transplantation. Transplantation Proceedings, volume 41, issue 8, 2009, pages 3114–3116
4. E. Wunsch, M. Post, K. Gutkowski, W. Marlicz, B. Szymanik, M. Hartleb, P. Milkiewicz. Critical flicker frequency fails to disclose brain dysfunction in patients with primary biliary cirrhosis, Digestive and Liver Disease. volume 42 (11), 2010, pages 818–821
5. J. Raszeja-Wyszomirska, B. Szymanik, M. Lawniczak, M. Kajor, A. Chwist, P. Milkiewicz and M. Hartleb. Validation of the BARD scoring system in Polish patients with nonalcoholic fatty liver disease (NAFLD). BMC Gastroenterology 2010, 10:67
6. E. Wunsch, B. Szymanik, M. Post, W. Marlicz, M. Mydlowska, P. Milkiewicz. Minimal hepatic encephalopathy does not impair health-related quality of life in patients with cirrhosis: a prospective study. Liver International, volume 31, issue 7, 2011, pages 980–984
7. L. Cheng, G. Y. Tian, B. Szymanik. Feasibility studies on microwave heating for non-destructive evaluation of glass fibre reinforced plastic composites. I2MTC, 10-12 May, Binjiang, Hangzhou, China
8. T. Chady, P. Lopato, B. Szymanik: Terahertz and thermal testing of glass-fiber reinforced composites with impact damages. Journal of Sensors, Volume 2012 (2012), article ID 954867
9. S. Gratkowski, B. Szymanik. Clausen's integral, Catalan's constant and the resistance of thin disk. Recent Advances in Numerical Modelling, Edited by: Sikora J., Wójcik W., and Wójtowicz S., Electrotechnical Institute Publishing House, Warsaw – Lublin 2009, pages 105–109

10. R. Sikora, T. Chady , B. Szymanik. Infrared thermographic testing of composite materials with adhesive joints. 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa