

DETEKCJA MIN LĄDOWYCH Z WYKORZYSTANIEM WIZUALIZACJI IR W ŚWIETLE BADAŃ ŚWIATOWEJ LITERATURY PATENTOWEJ

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań światowej literatury patentowej w zakresie metod, urządzeń oraz systemów wykrywania min lądowych, zwłaszcza min ukrytych w gruncie, nie zawierających metalu albo zawierających jego minimalną ilość, z wykorzystaniem mikrofalowych układów stymulacji termicznej oraz systemów detekcji i wizualizacji w podczerwieni (IR). W wyniku poszukiwań patentowych, do dalszych badań i analiz wytypowano wiele dokumentów wynalazczych, z których większość została opublikowana po roku 2000. Były to opisy, rysunki, zastrzeżenia i skróty opisów wynalazków zgłoszonych z datą pierwszeństwa w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, Wielkiej Brytanii, Niemczech, Japonii, Chinach, Korei Południowej, Republice Południowej Afryki, Kanadzie i Włoszech. Najbardziej przydatne okazały się wynalazki poparte wynikami badań doświadczalnych i zawierające modele matematyczne opisujące zjawiska termiczne w obszarach poddanych działaniu promieniowania mikrofalowego, obejmujących miny i środowisko je otaczające (grunt). Badania literatury patentowej pomogły określić wyjściowe warunki prowadzenia procedur (algorytmów) wykrywania min, opracowywanych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia z wykorzystaniem mikrofalowego wymuszenia termicznego oraz detekcji i wizualizacji IR.

Słowa kluczowe: elektronika, promieniowanie mikrofalowe, miny lądowe, detekcja IR, badania patentowe

LAND MINE DETECTION USING IR THERMAL VISUALIZATION IN LIGHT OF SEARCH AND ANALYSIS OF WORLDWIDE PATENT LITERATURE

Abstract: Results of search and analysis of worldwide patent literature dealing with methods, devices and systems for land mine detection, esp. the mines not containing metal or containing its minimum amount, buried in the ground, using microwave thermal stimulation and infrared (IR) thermal detection and visualisation systems, are presented in this paper. Due to above patent search and analysis, several patent applications were selected for further, more detailed analysis. Majority of these applications were published after 2000 year. They included descriptions, claims, figures, abstracts of inventions applied with date of priority in the USA, UK, Germany, France, Italy, Japan, China, South Korea, Republic of South Africa, Canada. The most suitable inventions were supported by results of experimental tests and/or mathematical models describing thermal phenomena going on in environments (grounds) containing buried mines, exposed to microwave radiation in order to obtain temperature contrasts of soil and the mines. Search and analysis of patent literature helped to determine initial circumstances to realise procedures (algorithms) for land mines detection, which were developed in Military Institute of Armament Technology in Poland, and which included microwave thermal stimulation and IR thermal detection and visualization.

Keywords: electronics, microwave radiation, land mines, IR thermal detection and visualisation, patent search and analysis

1. Wstęp

Metody i urządzenia do wykrywania i/lub neutralizacji (unieszkodliwiania) min lądowych, zwłaszcza min zawierających minimalną ilość metalu lub nie zawierających metalu ciągle wzbudzają szerokie zainteresowanie na świecie ze względu na nierozwiązany w skali globalnej problem zagrożenia, jakie stwarzają, zwłaszcza dla dużych populacji ludności cywilnej w wielu krajach objętych konfliktami zbrojnymi, wojnami albo, w których konflikty i wojny niedawno się zakończyły. Zainteresowanie to ma odzwierciedlenie w postaci wielu zgłaszanych wynalazków, dotyczących wykrywania i neutralizacji min lądowych oraz innych urządzeń wybuchowych ukrytych w gruncie, za pomocą metod i układów wykorzystujących promieniowanie mikrofalowe do wzbudzania termicznego (wymuszone aktywne ogrzewanie) obszarów obejmujących ukryte miny (urządzenia wybuchowe) w celu wygenerowania sygnatur/obrazów w podczerwieni (IR) na powierzchni gruntu, nad minami (urządzeniami wybuchowymi), charakteryzującymi się wystarczająco dużymi kontrastami temperaturowymi umożliwiającymi ich wykrycie za pomocą metod i układów detekcji oraz wizualizacji (IR).

2. Badania patentowe w zakresie wykrywania min lądowych z wykorzystaniem mikrofalowego pobudzenia termicznego i detekcji IR

2.1. Zakres badań patentowych

Poszukiwaniami patentowymi w ww. zakresie przedmiotowym objęto dokumentację wynalazczą zgłoszoną na świecie w ciągu ostatnich 25 lat, tj. od początku 1987 roku do końca 2011 roku. W wyniku tych poszukiwań znaleziono kilkadziesiąt wynalazków opublikowanych w większości po roku 2000, zgłoszonych z datami pierwszeństwa w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, Wielkiej Brytanii, Niemczech, Japonii, Chinach, Korei Południowej, Republice Południowej Afryki, Kanadzie i we Włoszech. Po wnikliwej analizie ich treści, zwłaszcza stanu techniki, przykładów realizacji wynalazków i zastrzeżeń patentowych, wytypowano dziesięć publikacji patentowych [1-10] zawierających najbardziej istotne informacje, przydatne z punktu widzenia realizacji prac badawczych – laboratoryjnych i poligonowych - prowadzonych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, w zakresie wykrywania min lądowych zawierających niewielką ilość metalu, ukrytych pod warstwami gruntu o różnej grubości, strukturze i wilgotności. Istotne informacje obejmowały charakterystyki materiałowe i strukturalne min lądowych, gruntów, warunki pracy generatorów promieniowania mikrofalowego, modelowanie zjawisk termicznych zachodzących w obrębie min i ich otoczeniu (w gruncie i na jego powierzchni) wywołanych promieniowaniem mikrofalowym oraz warunki detekcji i wizualizacji promieniowania (IR) emitowanego z powierzchni gruntu przykrywającego miny.

2.2. Charakterystyki materiałowe i konstrukcyjne min lądowych

Najbardziej istotnymi parametrami min lądowych z punktu widzenia ich wykrywania i neutralizacji za pomocą mikrofal są ich charakterystyki:

- termofizyczne, takie jak pojemność cieplna, dyfuzyjność cieplna, przewodność cieplna,
- termochemiczne, takie jak temperatura topnienia, rozkładu termicznego, zapłonu materiałów wybuchowych, temperatura mięknięcia, degradacji tworzyw sztucznych,

- dielektryczne informujące m.in. o zdolności pochłaniania mikrofal, nagrzewania i rozkładu fizykochemicznego materiałów wybuchowych, mogące prowadzić do zapłonu i dalej do ewentualnego wybuchu, oraz

- strukturalno-materiałowe, takie jak kształt i wymiary min, masa i rodzaj materiału wybuchowego oraz obudowy go mieszczącej, zwłaszcza części stanowiącej pokrywę miny oraz usytuowanie zapalnika.

Poniżej, w tabeli 1 przedstawiono charakterystyki geometryczno-materiałowe niektórych typów min powszechnie stosowanych, mieszczących się w kategorii układów materiałowych o bardzo niskiej zawartości metalu [11], podane w opisie wynalazku US 6799499 (B2) [6], zaś na fotografiach 1-3 pokazano niektóre typy min podanych w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki geometryczne i materiałowe niektórych rodzajów powszechnie stosowanych min lądowych – przeciwpiechotnych i przeciwpancernych, zawierających minimalną zawartość metalu

Typ miny	Kształt	Średnica (mm)	Wysokość (mm)	Materiał wybuchowy	Masa materiału wybuchowego
PMA-2	cylicyryczny	68	61	TNT/RDX 70/30	100 g
PMA-3	cylicyryczny	111	40	TNT	35 g
TMA-4	cylicyryczny	208	65	TNT	ok. 1370 g
TMA-3	cylicyryczny	265	80	TNT	ok. 1900g
PT-Mi-BA-III	cylicyryczny	320	112	TNT	6 kg - masa brutto miny

Spośród tworzyw sztucznych stanowiących często elementy górnych części obudowy (pokryw) min (np. przeciwpiechotnych PMA-2, PMA-3) wykorzystywany jest bakelit oraz guma, które silnie pochłaniają promieniowanie mikrofalowe. Inne tworzywa sztuczne tworzące boczne ściany i części denne min są stosunkowo słabymi absorberami mikrofal. Słabo pochłaniają mikrofałe również materiały wybuchowe. A zatem, podczas napromieniowywania mikrofalami najbardziej podgrzewane są kolejno górne elementy obudowy min oraz górne powierzchnie i warstwy materiału wybuchowego, usytuowane najbliżej silnie absorbujących promieniowanie mikrofalowe elementów obudowy. Badania poligonowe w zakresie neutralizacji min PMA-2, PMA-3 przykrytych warstwą gruntu o grubości 3 mm, za pomocą promieniowania mikrofalowego o mocy ok. 25,5 kW zapewniającego dostarczenie do powierzchni gruntu gęstość mocy wynoszącą ok. 100 W/cm² wykazały, że zapłon a następnie spalanie i/lub wybuch materiału wybuchowego miny zachodziły w ciągu 6-7 minut działania promieniowania.

2.3. Charakterystyki materiałowe środowiska otaczającego miny – gruntów

Podstawowymi właściwościami gruntów stanowiących środowisko min lądowych silnie wpływającymi na skuteczność ich wykrywania jest zawartość wilgoci w gruncie, jego właściwości dielektryczne, zwłaszcza przenikalność dielektryczna oraz współczynnik tłumienia energii promieniowania mikrofalowego, zależne od częstotliwości tego promieniowania i zawartości wilgoci w gruncie. Współczynnik tłumienia energii

mikrofalowej wyrażony jest stosunkiem skutecznej, tzw. efektywnej wielkości składowej urojonej i składowej rzeczywistej zespolonej przenikalności dielektrycznej.



Fot. 1. Mina przeciwpiechotna PMA-2 (wg www.lexpev.nl)



Fot. 2. Mina przeciwpancerna TMA-4 (wg www.krusik.rs)

Innymi istotnymi parametrami gruntów są wielkości termofizyczne, zwłaszcza przewodność cieplna, pojemność cieplna i współczynnik dyfuzyjności cieplnej. Poniżej, w tabeli 2 przedstawiono zdolności tłumienia energii promieniowania mikrofalowego przez niektóre, podstawowe rodzaje gruntów w zależności od zawartości wilgoci i częstotliwości promieniowania mikrofalowego, podane w zgłoszeniu wynalazczym WO 2007/099054 (A1) [8].

W tabeli 2 podano częstotliwości promieniowania mikrofalowego, wynoszące 3 GHz oraz 10 GHz, często stosowane do wykrywania min a także zawartości wilgoci w gruntach piaszczystych, piaszczysto-gliniastych oraz gliniastych dosyć powszechnie występujące w warunkach naturalnych.

Tabela 2. Zmiany współczynnika tłumienia energii promieniowania mikrofalowego przez różne rodzaje gruntów w zależności od częstotliwości mikrofal i zawartości wilgoci w gruncie

Rodzaj gruntu (zawartość masowa wilgoci) (%)	Współczynnik tłumienia energii promieniowania mikrofalowego w zależności od częstotliwości promieniowania	
	3 GHz	10 GHz
Piaszczysty, suchy	0,0062	0,0036
Piaszczysty (2,2 % wilgoci)	0,03	0,065
Piaszczysty (3,9 % wilgoci)	0,046	0,12
Piaszczysty (16,9 % wilgoci)	0,13	0,29
Piaszczysto - gliniasty, sucha	0,0011	0,0014
Piaszczysto - gliniasty (2,2% wilgoci)	0,04	0,03
Piaszczysto - gliniasty (13,8% wilgoci)	0,12	0,18
Gliniasty, suchy	0,015	0,013
Gliniasty (20,1% wilgoci)	0,25	-

Z tabeli 2 wynika, że wraz ze wzrostem wilgotności gruntu silnie wzrasta współczynnik tłumienia energii mikrofalowej. Oznacza to, że wraz ze wzrostem wartości tego współczynnika maleje głębokość penetracji promieniowania mikrofalowego. Potwierdzają to badania doświadczalne w zakresie neutralizacji min za pomocą promieniowania mikrofalowego [6], według których w suchych gruntach głębokość penetracji mikrofal jest rzędu metrów, zaś w gruntach wilgotnych mieści się zazwyczaj w przedziale 5-10 cm. W tym miejscu warto zauważyć, że podczas napromieniowywania wilgotnych gruntów promieniowaniem mikrofalowym, zwłaszcza dużej mocy, temperatura gruntów stosunkowo szybko rośnie (woda odparowuje – grunt jest osuszany) ze względu na objętościowy mechanizm ogrzewania, w wyniku czego głębokość penetracji promieniowania mikrofalowego szybko rośnie. Nawet „minimalny” zakres głębokości penetracji gleb mikrofalami, wynoszący 5-10 cm wydaje się być wystarczający, biorąc pod uwagę obserwacje podane w Porozumieniu Standaryzacyjnym NATO Nr 4587 [11], z których wynika, że miny lądowe zazwyczaj są przykrywane warstwą gruntu o grubości od 4 cm do 7 cm.

2.4. Warunki pracy generatorów promieniowania mikrofalowego

Do stymulacji termicznej obszarów gruntów zawierających ukryte miny za pomocą promieniowania mikrofalowego dużej mocy stosowane są generatory w postaci magnetronów, girotronów, klistronów oraz giro-klistronów. Promieniowanie mikrofalowe kierowane jest poprzez falowody do układów antenowych/reflektorowych, najczęściej parabolicznych, cylindrycznych, paraboliczno-cylindrycznych, tubowych (stożkowych) kierujących wiązki mikrofal. Podstawowymi, często zastrzeżenymi (podanymi w częściach znamiennych zastrzeżeń patentowych) parametrami pracy generatorów promieniowania mikrofalowego są zakresy częstotliwości i moc emitowanego promieniowania oraz gęstość mocy promieniowania dochodzącego do powierzchni gruntu. Niekiedy zastrzeżony jest czas pracy generatora (czas napromieniowywania), zakres kątowy

kierunku padania wiązki promieniowania mikrofalowego względem powierzchni gruntu (zakres kątowy Brewstera) w jakim zachodzi maksymalne przekazywanie energii mikrofalowej do gruntu oraz układ sterowania wiązką promieniowania z określoną polaryzacją (zazwyczaj poprzeczną), z uwzględnieniem kształtu/rodzaju reflektorów/anten, tworzących określony „quasi-optyczny” układ sterowania wiązką mikrofalową.

Zastrzegane częstotliwości generowanego promieniowania mikrofalowego mieszczą się zazwyczaj w zakresie od 2,45 GHz do 30 GHz, przy czym często wykorzystywane są częstotliwości wynoszące 3 GHz, 10 GHz, 18 GHz, ok. 25 GHz. Wybór niniejszych zakresów częstotliwości wynika często z dostępności na rynku określonych generatorów promieniowania mikrofalowego. Aby skutecznie ogrzać badany obszar, w którym może znajdować się ukryta mina, minimalna moc promieniowania mikrofalowego powinna wynosić 1 kW, przy czym preferowane są zakresy mocy wynoszące kilka kW, np. 2-5 kW, 3-6 kW. Do neutralizacji min zalecane jest promieniowanie mikrofalowe o mocy 30 kW, które powinno zapewnić gęstość mocy napromieniowania gruntu, wynoszącą, co najmniej 100 W/cm². Dla uzyskania kontrastów temperaturowych umożliwiających wykrycie miny, wystarczy gęstość powierzchniowa mocy mieszcząca się w zakresie 0,1-0,5 W/cm², przy czym w celu skrócenia czasu napromieniowania, korzystne jest, aby zakres gęstości mocy wynosił 1-3 W/cm². Umożliwia to powstanie kontrastów termicznych w czasie nie przekraczającym 20 minut, często mieszczącym się w zakresie 5-10 minut. Oprócz ww. parametrów pracy generatorów mikrofalowych istotny jest tryb pracy: ciągły, przerywany, w tym impulsowy – z wykorzystaniem jednej, dwóch lub więcej częstotliwości.

2.5. Modelowanie zjawisk termicznych zachodzących w minach i ich otoczeniu – gruncie

Przy modelowaniu zjawisk termicznych wywołanych promieniowaniem mikrofalowym, zachodzących w obszarze obejmującym minę i jej najbliższe otoczenie – grunt wykorzystuje się równanie przewodnictwa cieplnego dwóch zmiennych: czasu i zmiennej geometrycznej, której oś zaczyna się na granicy ośrodków powietrze - grunt i jest skierowana w głąb gruntu. Funkcja źródła ciepła powodującego nagrzanie rozpatrywanego obszaru może występować, jako element równania przewodnictwa cieplnego, albo w warunkach brzegowych. Obszar ten dzieli się często na trzy następujące podobszary: warstwę gruntu nad miną („kolumna” gruntu usytuowana nad miną, posiadająca poziomy przekrój poprzeczny równy poziomemu przekrojowi poprzecznemu miny), objętość zajęta przez minę oraz warstwę gruntu otaczającą minę wokół jej powierzchni bocznej. Bardzo istotne jest określenie warunków brzegowych i początkowych każdego podobszaru oraz postać funkcji źródła ciepła. Pod wpływem działania promieniowania mikrofalowego, każdy z ww. podobszarów nagrzewa się z różną szybkością, co znajduje odzwierciedlenie na powierzchni gruntu w postaci różnic temperaturowych. Rozróżnia się dwa podstawowe okresy zachodzących zjawisk termicznych tj. okres ogrzewania mikrofalami, powodującego dosyć szybkie, prawie natychmiastowe objętościowe/masowe nagrzewanie podobszarów – modelowane, jako proces adiabatyczny oraz okres stosunkowo powolnego stygnięcia występującego praktycznie zaraz po wyłączeniu generatora promieniowania mikrofalowego. Podczas procesu stygnięcia przepływ i wymiana energii zachodzą na zasadzie konwekcji i przewodzenia ciepła. Różne szybkości ogrzewania zależą od natężenia promieniowania mikrofalowego penetrującego poszczególne podobszary, przebiegu zjawisk odbijania, załamania się mikrofal na granicy ośrodków powietrze-grunt oraz grunt-mina, rozpraszania energii promieniowania mikrofalowego i nakładania się mikrofal w rozpatrywanych podobszarach. Ponadto, zależą od różnic w zakresie właściwości dielektrycznych i termofizycznych podobszarów, zwłaszcza ich przenikalności dielektrycznej, współczynników stratności dielektrycznej, przewodności cieplnej, pojemności cieplnej oraz współczynników dyfuzyjności cieplnej.

Modelując zjawiska termiczne w przypadku wykorzystania metod i układów do neutralizacji/niszczenia min, oprócz temperatury zapłonu/inicjacji materiału wybuchowego oraz właściwości absorbowania mikrofal przez materiał obudowy miny, zwłaszcza materiał jej pokrywy, bardzo istotne jest przewidywanie, jaka część energii mikrofalowej jest przekazywana do wnętrza miny, zwłaszcza do jej ładunku wybuchowego. W tym celu ocenia się straty mocy promieniowania mikrofalowego w gruncie do głębokości, na której znajduje się górna powierzchnia miny oraz na odcinku równym wysokości miny. Straty te rosną eksponentalnie wraz ze wzrostem grubości warstwy gruntu przykrywającego minę i wzrostem jej wysokości.

Do oceny strat mocy promieniowania mikrofalowego, czyli znacznej części mocy powodującej ogrzewanie rozpatrywanego obszaru konieczna jest znajomość mocy wyjściowej promieniowania mikrofalowego, przenikalności dielektrycznej gruntu i materiałów, z jakich wykonano minę a także współczynników strat mocy promieniowania mikrofalowego, spowodowanych obecnością gruntu, obudowy miny i jej ładunku wybuchowego. Ponadto należy znać grubość warstwy gruntu nad miną oraz jej wysokość.



Fot. 3. Mina przeciwpancerna PT-Mi-BA-III (wg www.lexpev.nl)

2.6. Detekcja i wizualizacja promieniowania cieplnego emitowanego z powierzchni gruntu przykrywającego miny w celu ich wykrycia i/lub neutralizacji

Sposób postępowania w zakresie detekcji i wizualizacji promieniowania cieplnego z zakresu IR emitowanego z powierzchni gruntu nad ukrytą miną często w istotnym stopniu zdeterminowany jest trybem pracy źródła promieniowania mikrofalowego, zwłaszcza w kontekście pracy detektora promieniowania IR, którą zazwyczaj jest kamera termowizyjna wykonująca sekwencje zdjęć badanej powierzchni gruntu w różnych etapach jego ogrzewania i stygnięcia.

Zawsze, bezpośrednio przed włączeniem oraz zaraz po wyłączeniu promieniowania mikrofalowego, wykonywane są w celach porównawczych zdjęcia (sygnatury) termiczne badanej powierzchni za pomocą kamery termowizyjnej pracującej zazwyczaj w dwóch zakresach długości fal tj. wynoszących 3-5 μm albo 8-12 μm , co uwarunkowane jest występowaniem tzw. „okien transmisyjnych atmosfery”. Współczesne kamery termowizyjne

posiadają zdolność wizualizacji pól temperaturowych (powierzchniowego rozkładu temperatury) i określania kontrastów temperaturowych z dokładnością 0,02-0,10 K.

W zależności od czułości mierzonego parametru określającego rozkład temperaturowy na badanej powierzchni wykorzystuje się jeden z ww. zakresów promieniowania IR [10]. Gdy parametrem zmian temperaturowych powierzchni jest zmiana emisyjności w funkcji zmian temperatury (pochodna emisyjności względem temperatury), korzystne jest zastosowanie długości fali IR wynoszącej 8 μm , czyli zakresu transmisyjnego 8-12 μm dla początkowej temperatury wynoszącej 300 K. Natomiast gdy do detekcji pól temperaturowych ma być zastosowana zmiana energii promieniowania w funkcji długości fali (całka energii po długości fali), to preferowany jest zakres 3-5 μm , w którym całka energii w ww. zakresie długości fal zmienia się szybciej niż w zakresie 8-12 μm . Oba parametry umożliwiają uzyskanie korzystnych – dosyć wysokich stosunków wielkości użytecznych sygnałów detekcyjnych do wielkości szumów.

Najprostszy algorytm postępowania podczas detekcji i wizualizacji pól temperaturowych na powierzchni gruntu przykrywającego minę opisany jest w zgłoszeniu wynalazku [4].

W ramach niniejszego algorytmu kolejno wykonane są obrazy (sygnatury) cieplne badanej powierzchni za pomocą kamery termowizyjnej pracującej w paśmie 8-12 μm (początkowe pole temperaturowe). Następnie powierzchnia jest ogrzewana w czasie od 1 do 3 minut promieniowaniem mikrofalowym o częstotliwości 2,45 GHz emitowanym przez generator o mocy 1-5 kW, korzystnie 5 kW, przy zapewnieniu gęstości powierzchniowej mocy promieniowania mikrofalowego dochodzącego do powierzchni, wynoszącej 1-3 W/cm^2 , po czym zaraz po zakończeniu naświetlania mikrofalami wykonywana jest przez 20 minut seria zdjęć powierzchni kamerą termowizyjną. W opisie niniejszego wynalazku [4] podano przykłady realizacji ww. algorytmu m.in. dla min PMA-2 i PMA-3 zakopanych w piaszczystej glebie o różnej zawartości wilgoci na głębokości w zakresie 1-3 cm. W wyniku ogrzewania mikrofalami uzyskiwano, w zależności od czasu napromieniowywania, czasu stygnięcia i wilgotności gleby oraz głębokości zakopaniaminy, zróżnicowane kontrasty temperaturowe na powierzchni gruntu, tj. maksymalne przyrosty temperaturowe stanowiące ułamek stopnia K do ok. 8 K.

Bardziej rozwinięty algorytm detekcji i wizualizacji powierzchniowych pól temperaturowych gleby zakrywającej minę przedstawiono w zgłoszeniu wynalazku [5]. Algorytm ten polega na wykonaniu zdjęcia w podczerwieni badanej powierzchni gruntu kamerą termowizyjną (początkowy obraz termiczny) a następnie ogrzaniu powierzchni promieniowaniem mikrofalowym o określonej (pierwszej) częstotliwości oraz wykonaniu zdjęcia IR. Kolejny krok algorytmu polega na „odjęciu” obrazu temperaturowego początkowego (przed ogrzewaniem) od obrazu IR po pierwszym cyklu ogrzewania, w wyniku, czego powstaje pierwszy obraz wzrostu temperaturowego na powierzchni gruntu spowodowanego pierwszym cyklem ogrzewania. Następny krok algorytmu obejmuje drugi cykl ogrzewania powierzchni za pomocą mikrofal o drugiej częstotliwości (innej niż pierwsza częstotliwość) oraz wykonanie drugiego zdjęcia IR. Zaleca się, aby drugi cykl ogrzewania nastąpił bezzwłocznie po pierwszym. Wówczas, drugi obraz wzrostu temperaturowego powierzchni jest uzyskany jako różnica obrazu termicznego po drugim ogrzewaniu oraz obrazu po pierwszym ogrzewaniu.

W ramach kolejnego etapu realizacji algorytmu, zdjęcie pierwszego wzrostu temperaturowego jest odejmowane od zdjęcia drugiego wzrostu temperaturowego, po czym takie wynikowe zdjęcie różnicowe jest poddawane analizie w ramach końcowego etapu realizacji algorytmu, w celu identyfikacji ewentualnej obecnościminy w przeszukiwanym obszarze gruntu, pod jego powierzchnią. Aby uzyskać wysoki stosunek wielkości sygnału użytecznego do sygnału zakłócającego, na zdjęciu wynikowym (różnicowym) różnica częstotliwości promieniowania mikrofalowego dla różnych cykli ogrzewania powinna być jak największa w celu maksymalizacji przesunięć fazowych, czyli

obrazów interferencyjnych ww. dwóch cykli ogrzewania. Jednocześnie różnica częstotliwości mikrofal w ramach poszczególnych cykli ogrzewania nie powinna być zbyt duża, ponieważ mogłoby to być sprzeczne z podstawowym założeniami modelowymi mówiącymi o występowaniu jednakowego natężenia mikrofal (pola mikrofalowego) w pobliżu powierzchni w ramach każdego cyklu ogrzewania oraz o stałych właściwościach mikrofal podczas ich propagacji w badanych ośrodkach i odbicia na ich granicy. Właściwy dobór częstotliwości można wykonać na podstawie znajomości ww. charakterystyk gruntu, zwłaszcza dielektrycznych i termofizycznych, przyjętej (założonej) głębokości zakopania miny i jej wielkości, biorąc pod uwagę nierówności powierzchni gruntu. Ostatnia cecha stanowi jeden z elementów zakłóceń biernych poważnie utrudniających wykrywanie min, do których zalicza się również pokrycie powierzchni gruntu roślinnością, występowanie korzeni, kawałków metali magnetycznych i niemagnetycznych, innych materiałów obcych np. w postaci kawałków drewna, tworzyw sztucznych, skał, wgłębień, podziemnych wnęk, nieciągłości, niejednorodności i rozwarstwienia gruntu, uwarunkowanych geologicznie [11].

3. Wnioski

Na podstawie dokonanych poszukiwań i analizy literatury patentowej można określić podstawowe, korzystne warunki i parametry realizacji procedur (metod) pracy urządzeń w zakresie wykrywania min lądowych ukrytych w gruncie z wykorzystaniem ogrzewania za pomocą promieniowania mikrofalowego oraz detekcji i wizualizacji w podczerwieni.

3.1. Warunki realizacji stymulacji termicznej obszaru gruntu obejmującego minę za pomocą promieniowania mikrofalowego

1. Moc promieniowania mikrofalowego generatora co najmniej 1 kW.
2. Częstotliwość pracy generatora promieniowania mikrofalowego od 2,45 GHz do 30 GHz.
3. Zakres kątowy (Brewstera) padania wiązki promieniowania mikrofalowego na powierzchnię gruntu: 60°-80°.
4. Gęstość mocy promieniowania mikrofalowego dochodzącego do powierzchni gruntu 1-3 W/m².

3.2. Warunki detekcji i wizualizacji w podczerwieni pól temperaturowych powierzchni gruntu przykrywającego minę

1. Zakres detekcji promieniowania IR kamery termowizyjnej: 3-5 μm lub 8-12 μm.
2. Pole temperaturowe określone za pomocą powierzchniowego rozkładu zmian emisyjności IR powierzchni gruntu.
3. Tryb pracy w zakresie wizualizacji (przetwarzania cyfrowego) - porównywanie zmian stosunków sygnałów obrazów (sygnatur) IR powierzchni gruntu.
4. Rozdzielczość temperaturowa detektora kamery termowizyjnej: 0,02-0,10K.

Literatura

- [1] Kazuya H., Sei M., Koichiro N., Hisashi M., *Mine surveying device*, Zgł. Pat. JP 6235599(A), 1994
- [2] Samland T., *Method and apparatus to clear minefields*, Pat. US 6487950 (B2), 2002

- [3] Newman A., *Apparatus and method for detecting heterogeneities by thermal imaging of microwave irradiated terrain*, Zgł. Pat. WO 01/37000 (A2), 2001
- [4] Khanna S. M., Pacquet R., Apps G., Seregelyi J. S., *Landmine detector with high-power microwave illumination and an infrared detector*, Pat. US 6343534 (B1), 2002
- [5] Dimarzio C. A., Rappaport C. M., Oktar T., Sauermann G. O., *Multiple wavelength microwave-enhanced infrared thermography*, Pat. US 6753529 (B2), 2004
- [6] Seregelyi J. S., Bergeron D. M., Kashyap S., *Landmine neutralizer using a high-power microwave device*, Pat. US 6799499 (B2), 2004
- [7] Kilkis S., *Method and apparatus for remotely piloted landmine clearing platform with multiple sensing means*, Zgł. Pat. US 2005/0262995(A1), 2005
- [8] Sciortino A., Moggia E., *Method for infrared detection of buried unexploded objects in humanitarian demining operations*, Zgł. Pat. WO 2007/099054 (A1), 2007
- [9] Moore D. S., *Method and apparatus for detecting explosives*, Zgł. Pat. US 2009/0107758 (A1), 2009
- [10] Hubbard R., Fliflet A.W., Bowles J.H., Kidwell D.A., Horstein M.K., Smiths G.B., *Long range active thermal imaging system and method*, Pat. US 7795583 (B1), 2010
- [11] NATO STANAG 4587 (Ed.1), *Close-in landmine detector test procedures*, 2007.