

dr inż. Zenon R. SZCZEPANIAK  
mgr inż. Mariusz ŁUSZCZYK  
mgr inż. Piotr SAMCZYŃSKI  
mgr inż. Andrzej ARVANITI  
mgr inż. Jarosław POPKOWSKI  
Przemysłowy Instytut Telekomunikacji S.A.

## **KONCEPCJA SZEROKOPASMOWEGO RADARU PRACUJĄCEGO NA PLATFORMIE MOBILNEJ PRZEZNACZONEGO DO WYKRYWANIA ŁADUNKÓW WYBUCHOWYCH UKRYTYCH W ZIEMI**

**Streszczenie:** Jednym z kierunków rozwoju radarów – lub ogólnie rzecz ujmując sensorów mikrofalowych - są urządzenia przeznaczone do zobrazowania struktury geologicznej ziemi bądź do wykrywania obiektów w niej ukrytych. W zastosowaniach wojskowych radary typu GPR (ang. Ground Penetrating Radar) wykorzystywane są do wykrywania min oraz obiektów szczególnie niebezpiecznych ukrytych w przypowierzchniowych warstwach ziemi. Szczególnym wyzwaniem dla układów wykrywania są ładunki wybuchowe bez obudowy metalicznej. W artykule zaprezentowano koncepcję demonstratora radaru wraz z omówieniem najistotniejszych zagadnień projektowych, tj. dobór sygnału sondującego ze względu na rozdzielczość, struktura układu nadwczno-odbiorczego oraz metody przetwarzania sygnału.

## **CONCEPT OF ULTRA-WIDEBAND RADAR ON MOBILE PLATFORM FOR LANDMINE AND DANGEROUS OBJECTS BURIED IN GROUND DETECTION**

**Abstract:** One of rapidly growing field of modern radar technique and technology - or generally microwave sensors - are ground penetrating radars (GPR). They are suitable for applications of variety of areas such geology and archeology as well as unknown object detection buried in ground. In military application GPR are used for landmine, unexploded ordnance (UXO) or improvised explosive device (IED) detection. The great challenge for GRP devices is detection of explosive charges without metal case. This paper comprises the concept of ultra-wideband radar on mobile platform for landmines detection. Aspects of radar signal synthesis and resolution as well as radar signal processing are considered.

### **1. Wprowadzenie**

Radary do penetracji gruntu stanowią obszar badawczy rozwijany od ponad dziesięciolecia, zarówno w aspekcie teoretycznym, techniczno-technologicznym jak i aplikacyjnym [1]. Urządzenia typu GPR dzięki swoim właściwościom są cennym narzędziem badawczym wykorzystywanym przez naukowców i inżynierów reprezentujących wiele różnych specjalności naukowych. Radary te stosowane są w inżynierii geotechnicznej, w badaniu stopnia zanieczyszczenia wód podpowierzchniowych, w glaciologii, budownictwie oraz archeologii. Doświadczeni uzyskane podczas eksploatacji urządzeń typu GPR pozwalają

zakładać, iż bezinwazyjne techniki radarowej penetracji gruntu mogą być niezwykle użyteczne z punktu widzenia bezpieczeństwa narodowego i obronności. Jest to bowiem niemal jedyna technika detekcji min niemetalicznych oraz innych niebezpiecznych obiektów znajdujących się w ziemi, a także pustek i sztucznych nieciągłości gleby.

Jak wynika z dokonanego przeglądu stanu techniki - przeprowadzonego na potrzeby projektu - do chwili obecnej opanowano większość podstawowych zagadnień związanych z radarową techniką penetracji gruntu, a w szczególności z:

- konstrukcją mikrofalowych urządzeń nadawczo-odbiorczych przeznaczonych do pracy w pasmie od 300 MHz do 3 GHz,
- konstrukcją pojedynczych szerokopasmowych anten i układów antenowych,
- algorytmami obróbki sygnałów radarowych,
- zobrazowaniem informacji pomiarowej.

Choć jak się wydaje niezbędne zagadnienia techniczne zostały już opanowane, to jednak wciąż poszukuje się nowych rozwiązań urządzeń nadawczo-odbiorczych oraz ich konfiguracji zdolnych do dostarczania większej ilości informacji o obiektach znajdujących się pod ziemią. Potencjalne możliwości rozwoju tkwią w rodzaju sygnału sondującego i sposobach jego modulacji [1]. Poszukuje się też nowych układów antenowych pracujących w szerokim paśmie częstotliwości i charakteryzujących się wąską wiązką antenową. Intensywne prace trwają też w dziedzinie algorytmów obróbki sygnałów umożliwiających maksymalną ekstrakcję danych z pozyskanych ech z jednoczesnym wytlumieniem zakłóceń [3].

W niniejszym artykule przedstawiona jest koncepcja ultraszerokopasmowego radaru na platformie mobilnej zaprojektowanego pod kątem wykorzystania w detekcji min oraz obiektów niebezpiecznych o niewielkich wymiarach zagrzebanych w ziemi na relatywnie niewielkich głębokościach.

## 2. Problematyka wykrywania obiektów niemetalicznych ukrytych w ziemi

Z punktu widzenia detekcji min przez radar typu GPR miny można podzielić na kilka grup: miny metalowe, miny z minimalną zawartością metalu i miny niemetaliczne. Ostatni rodzaj min nie może być wykryty przez detektory metalu. Kilka przykładowych rodzajów min, które mogą być wykryte przez detektory metalu zostały pokazane na rys. rys.1a i 1b oraz rys. rys 2a i 2b.



**Rys. 1 Przykłady min przeciwpiechotnych: a) PFM-1 (długość: 120 mm, szerokość: 20 mm, wysokość: 61 mm , b) PMD-6 (długość: 190 mm, wysokość: 65 mm, szerokość: 90 mm)**

Niestety inne rodzaje min, które nie zawierają elementów metalowych (takie jak na przykład francuska mina przeciwpancerna z 1947 wykonana z bakelitu wykorzystująca detonator chemiczny (ang. glass based chemical detonator). Ładunki tego typu mogą być

wykryte tylko z wykorzystaniem radarów GPR. Przy detekcji min duże znaczenie ma konstrukcja zapalnika. W niektórych przypadkach zapalnik znajduje się nad powierzchnią gruntu i jest uruchamiany poprzez zerwanie zawlecзки (podobnie jak w granacie) - rys.2a. W takich przypadkach osoba realizująca poszukiwanie min powinna mieć możliwość wykrycia ładunku z większej odległości.



**Rys. 2 Przykłady min: a) mina przeciwpiechotna PMA2 AP (średnica - 68mm, wysokość - 61 mm) oraz b) mina przeciwpancerna TM-62 P3 z minimalną zawartością metalu (średnica: 320 mm, wysokość: 120 mm)**

Duże znaczenie w wykrywaniu min ma również konstrukcja mechaniczna miny, która w dużym stopniu odpowiada za zawartość skutecznej powierzchni odbicia RCS (ang. Radar Cross Section) takiej miny. Niektóre miny posiadają znaczące szczeliny powietrzne, co poprawia ich RCS. Miny takie jak PMD-6 i PFM-1 są minami asymetrycznymi, co może ułatwiać ich detekcję przy zmianie polaryzacji fal elektromagnetycznych. Cecha ta może pozwolić również na identyfikację takiej miny przez polarymetryczny radar GPR.

Materiały wybuchowe wykorzystywane do produkcji min różnego przeznaczenia charakteryzują się różnymi wartościami względnej przenikalności elektrycznej. Wartości te decydują o możliwości detekcji miny zagrzebanej w ziemi, którą również można opisać wartością przenikalności elektrycznej. Dla składu mineralnego gleby dającego w efekcie zbliżone wartości przenikalności elektrycznej oraz w przypadku miny zakopanej na pewnej głębokości, wykrycie stanowi poważny problem, obciążony dużym prawdopodobieństwem pomyłki. Przykładowe wartości względnej przenikalności elektrycznej materiałów wybuchowych to od 2,7 (TNT) do 7,1 (azotanu amonu), podczas gdy dla suchego piasku współczynnik ten wynosi od 4 do 6.

### **3. Radary GPR – cechy wyróżniające**

Zasada pracy sensorów typu GPR polega na wysyłaniu w kierunku ziemi fali elektromagnetycznej i analizie sygnału odbitego (echa). Na podstawie analizy amplitudy i fazy fali odbitej uzyskuje się informacje o strukturze gruntu. Fala elektromagnetyczna odbija się od warstw granicznych między ośrodkami charakteryzowanymi różnymi wartościami przenikalności elektrycznej. Radar GPR zazwyczaj wyposażony jest w dwie anteny (nadawczą i odbiorczą). Sygnał odbity wzmacniany jest w odbiorniku, a następnie jest analizowany w układach przetwarzania sygnałów. Ze względu na rodzaj sygnału urządzenia typu GPR dzieli się na dwie kategorie: radary impulsowe i radary z falą ciągłą.

Radar impulsowy wykorzystuje bardzo wąskie impulsy elektromagnetyczne o czasie trwania od 0,2 ns do 10 ns. Pasma pracy radaru zawiera się zwykle w przedziale od 10 MHz do 2 GHz, przy czym dobór pasma zależy od rodzaju gleby i wymaganej głębokości

sondowania. Częstotliwość sondowania ograniczona jest czasem propagacji sygnału w danym ośrodku. Dla radarów o relatywnie małej głębokości wnikania (do 100 m w warunkach wolnej przestrzeni) można zastosować częstotliwość powtarzania około 1 MHz. Do uzyskania wysokiej rozdzielczości konieczne jest zastosowanie szerokopasmowych układów próbkujących, z częstotliwością próbkowania rzędu 2 GS/s. W wyróżniku radarów z krótkim impulsem sondującym jest konieczność emisji stosunkowo dużej mocy, tak aby zachować odpowiedni poziom energii sygnału niezbędnej do uzyskania dobrej jakości zobrazowania.

Radar z falą ciągłą umożliwia uproszczenie układów próbkujących i zmniejszenie częstotliwości próbkowania. Jednocześnie możliwa jest praca ze znacznie mniejszą mocą średnią niż w przypadku radaru impulsowego, gdyż czas trwania sondowania w radarze z falą ciągłą jest o kilka rzędów wielkości dłuższy. Zwykle w radarze takim stosuje się czas trwania impulsu rzędu pojedynczych milisekund, co oznacza zwiększenie czasu trwania impulsu o około sześciu rzędów wielkości. Dlatego też radary takie mogą pracować z mocami średnimi na poziomie od kilku do kilkuset miliwatów. Radary GPR z falą ciągłą zwykle pracują w jednym z dwóch trybów:

- z liniową modulacją częstotliwości – w trybie tym liniowo moduluje się częstotliwość sygnału emitowanego i miesza się sygnał emitowany z sygnałem odbieranym. W wyniku mieszania powstaje sygnał dudnieniowy, którego częstotliwość przenosi informację o odległości (głębokości) obiektu od radaru. Zwykle częstotliwości dudnieniowe są w zakresie od 10 Hz do 100 kHz, tak więc do przetwarzania sygnału dudnieniowego można zastosować przetworniki analogowo-cyfrowe z niską częstotliwością próbkowania. Wynikiem pracy radaru GPR jest falogram, czyli dwuwymiarowy wykres odbitej energii w funkcji czasu propagacji (związanej z głębokością) i przemieszczenia radaru.
- z krokową zmianą częstotliwości – w tym trybie mierzy się amplitudę i fazę sygnału odbitego dla szeregu częstotliwości, zmieniających się ze stałym krokiem. Czas trwania sondowania dla każdej z częstotliwości jest rzędu kilku-kilkudziesięciu mikrosekund, a liczba częstotliwości zależy od rozdzielczości i głębokości penetracji i zwykle zawiera się od 100 do 1000. Całkowity czas skanowania wynosi od kilku do kilkunastu milisekund. Wartości amplitud i faz wykonanych pomiarów tworzą liniowy układ równań, po rozwiązaniu którego otrzymuje się falogram podobny jak w radarze impulsowym.

## **4. Koncepcja budowy demonstratora radaru**

### **4.1. Założenia wstępne**

Założenia wstępne dla demonstrator technologii radaru GPR uwzględniają następujące uwarunkowania:

- detekcja i lokalizacja obiektów zakopanych na stosunkowo małej głębokości (do 1 m),
- wysoka rozróżnialność odległościowa zapewniająca detekcję obiektów wielkości min przeciwpiechotnych,
- wykorzystanie polarymetrii jako dodatkowego źródła informacji o obserwowanych obiektach,
- konstrukcja układów nadawczo-odbiorczych powinna być jak najprostsza w celu zwiększenia mobilności oraz zmniejszenia kosztów systemu,
- uzyskanie wysokiej dynamiki sygnału na wyjściu przetwornika analogowo-cyfrowego,
- wykorzystanie transformaty Hough oraz technik syntetycznej apertury SAR w celu zwiększenia rozróżnialności w kierunku azymutalnym.

- Demonstrator technologii w części sprzętowej składa się z:
- zespołu anten,
  - bloków nadawczo-odbiorczych,
  - układu wyznaczania pozycji,
  - układów konwersji analogowo-cyfrowej,
  - układów akwizycji danych pomiarowych, obróbki i wizualizacji,
  - układu zasilania.

## 4.2 Platforma mobilna dla demonstratora technologii

Projektowane urządzenie GPR zostanie zainstalowana na mobilnej platformie kołowej. Platforma ta powinna spełniać następujące wymagania:

- możliwość zamocowania części analogowej radaru wraz z antenami,
- zamocowanie anten na ruchomym wysięgniku – możliwość zmiany wysokości i kąta nachylenia względem powierzchni ziemi,
- możliwości manewrowe – skręt oraz przemieszczenie: przód i tył
- możliwość zamocowania części cyfrowej radaru, dodatkowo wraz ze stanowiskiem obróbki (komputer przemysłowy),
- możliwość poruszania się z prędkością do 10 km/h,
- własne źródło zasilania,
- zdalne sterowanie.

Zgodnie z opracowanym planem badań demonstrator ma umożliwić przetestowanie zaprojektowanego radaru w warunkach poszukiwania min ukrytych w różnych warunkach terenowych. Pozwoli to na sprawdzenie poprawności działania wszystkich bloków urządzenia. Na podstawie wyników testów możliwe będzie opracowanie wymagań technicznych docelowej wersji radaru.

Na potrzeby demonstratora w niniejszym projekcie zaadaptowano dostępne na rynku podwozie pojazdu typu ATV (ang. all-terrain vehicle - quad) o napędzie elektrycznym. Pojazd poddany został niezbędnym przeróbkom, takim jak usunięcie obudowy maskującej wykonanej z tworzywa sztucznego oraz dostosowanie podwozia do montażu podzespołów elektronicznych demonstratora radaru. Podwozie ATV posiada konstrukcję ramową, co umożliwi dołączenie zespołu anten radaru z wysięgnikiem. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że zastosowanie gotowego podwozia pojazdu pozwala uzyskać bardzo dobre właściwości trakcyjne w terenie nieutwardzonym. Podwozie posiada zawieszenie amortyzowane. Pojazd wyposażony jest w szerokie opony o odpowiednim profilu bieżnika ułatwiającym poruszanie się w terenie piaszczystym. Manualny system kierowania został zastąpiony przez system zdalnego sterowania składający się z siłowników elektrycznych oraz odbiornika sygnałów sterujących.

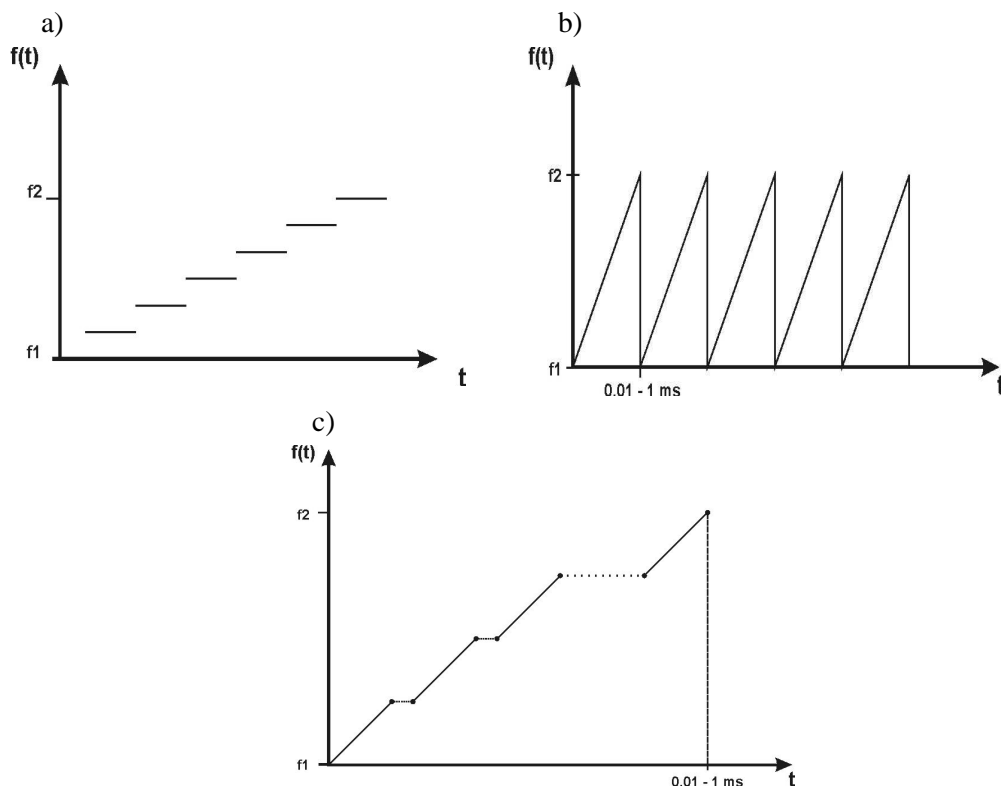
Należy podkreślić, że postać zaproponowanej platformy do demonstratora radaru nie jest rozwiązaniem optymalnym z wielu względów. Niemniej jednak biorąc pod uwagę ograniczone środki finansowe przeznaczone na projekt oraz niezwykle krótki czas realizacji projektu przedstawione rozwiązanie spełnia oczekiwania konstruktorów w zakresie możliwości realizacji programu testów i badań.

## 4.3 Dobór sygnału sondującego

Na podstawie analizy problemu, który został sformułowany w założeniach wstępnych przyjęto, że radar będzie pracował na fali ciągłej modulowanej częstotliwościowo FMCW

(ang. Frequency Modulated Continuous Wave). Sygnał tego typu może być realizowany w jednym z trzech trybów:

- FMCW z krokowo zmienianą częstotliwością (rys. 4a),
- FMCW z liniową modulacją częstotliwości LFM (ang. Linear Frequency Modulation) (rys. 4b),
- FMCW z odcinkowo liniową modulacją częstotliwości (rys. 4c).



**Rys. 3 Tryb pracy radaru GPR: a) krokowo zmienna częstotliwość, b) liniowo zmienna częstotliwość, c) odcinkowo liniowa modulacja częstotliwości (subimpuls LFM).**

W trybie FMCW z liniową modulacją częstotliwości sygnał najczęściej generowany jest w układzie bezpośredniej syntezy cyfrowej DDS (ang. Direct Digital Synthesis). Komercyjnie dostępne układy DDS generują sygnały proste bądź modulowane w zakresie do 400 MHz. Uwzględniając wymagania na szerokość pasma stawiane radarom GPR (1-2 GHz) należy dodatkowo generowany sygnał powielić odpowiednią ilość razy lub zastosować układ konwertera sygnału „w górę” (tzw. up-converter) pracujący w trybie schodkowym. Wadą stosowania techniki powielania w celu konwersji sygnału w zakres wyższych częstotliwości jest znaczne zwiększenie szumów fazowych sygnału, co z kolei negatywnie wpływa na warunki dalszego przetwarzania sygnału echa. Rozwiązaniem problemu jest zastosowanie konwertera pracującego w trybie schodkowym pozwalającego na generację sygnału ciągłego z odcinkowo liniową modulacją częstotliwości.

Tryb syntezy sygnału szerokopasmowego złożonego z segmentów (subimpulsów) LFM polega na syntezie paczki  $N$  sygnałów wąskopasmowych o paśmie  $B_o$  przesuniętych względem siebie o częstotliwość  $B_o$ . Zakładając, że sygnał wąskopasmowy syntetyzowany jest przez układ DDS, którego maksymalne pasmo wynosi 400 MHz, to wymagany sygnał o paśmie 2 GHz wymaga syntezy paczki pięciu subimpulsów ( $N=5$ ). Zależność 1 pozwala na

obliczenie rozdzielczości odległościowej z wykorzystaniem odcinkowo liniowej modulacji częstotliwości [1].

$$\Delta r = \frac{c}{2B_o N \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta r$  - rozdzielczość odległościowa,  $c$  - prędkość światła w próżni,  $N$  - liczba segmentów (subimpulsów),  $\epsilon_r$  - względna przenikalność elektryczna ośrodka.

Typowe wymiary min zawierają się w granicach od 5 cm do 30 cm. W celu poprawnego ich wykrywania konieczna jest rozróżnialność odległościowa dwukrotnie lepsza od minimalnego wymiaru, tzn. około 2,5 cm. Rozróżnialność tego rzędu uzyskuje się przy szerokości pasma 3 GHz w warunkach suchego piasku. W przypadku piasku wilgotnego wystarczające jest pasmo 2 GHz, zaś dla mokrych gruntów gliniastych pasmo około 1,2 GHz [1,2].

## 5. Koncepcja torów nadawczo-odbiorczych

Prowadzona praca badawcza dotyczy projektu urządzenia o ściśle określonym przeznaczeniu - wykrywania niemetalicznych min oraz innych niebezpiecznych obiektów ukrytych w ziemi. Przeznaczenie determinuje zasięg radaru „w głąb ziemi”, który jest niewielki i nie przekracza kilkudziesięciu centymetrów. Jak wynika z przedstawionej powyżej analizy różnego rodzaju min rozmiary poszukiwanych obiektów są bardzo małe i zawierają się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu centymetrów. Obiekty te odróżnia od otoczenia jedynie inny (na ogół zespolony) współczynnik przenikalności elektrycznej. Dodatkowo warunki pracy radaru określane są przez czynniki zewnętrzne. Powierzchniowa struktura gleby jest z reguły niejednorodna, a jej parametry elektryczne zmieniają się w szerokich granicach. Zmiany te zachodzą zarówno w funkcji typu gleby, jej wilgotności, głębokości zagrzebania obiektu oraz jego położenia. Dodatkowo w glebie występują elementy obce (np. kamienie), które mogą łudząco przypominać miny niemetaliczne. Jest rzeczą oczywistą, że w tak różnorodnym środowisku metody radiolokacyjne stanowić mogą tylko jeden z elementów wielosensorowego detektora min.

Jednym z celów prezentowanej pracy badawczej jest zoptymalizowanie parametrów radaru tak, aby uzyskać możliwie wysokie prawdopodobieństwo detekcji obiektów (różnego rodzaju min i innych niebezpiecznych ładunków improwizowanych). W celu osiągnięcia pożądanej rozróżnialności radaru, należy wykorzystać ultraszerokopasmowy sygnał złożony z dewiacją sygnału rzędu kilku gigaherców. Synteza sygnału o takich parametrach jest niezwykle złożonym problemem, który wynika z dużej wartości stosunku dewiacji (szerokości widma amplitudowego) sygnału do częstotliwości środkowej modulowanego sygnału. Ponadto sygnały z dewiacją poniżej 1 GHz, nawet po uwzględnieniu skrócenia długości fali o pierwiastek kwadratowy w wartości względnej przenikalności elektrycznej ośrodka, mogą nie zapewnić rozróżnialności na poziomie wymiarów większości min przeciwpiechotnych (około 10 cm). Zakres częstotliwości możliwych do wykorzystania ograniczony jest także od góry - sygnały o częstotliwości powyżej 3 GHz w wielu glebach są bardzo silnie tłumione, zatem uzyskane echa będą bardzo słabe, co znacznie utrudni lub wręcz uniemożliwi detekcję obiektów. Przedstawiony powyżej zarys analizy problemu doboru rodzaju sygnału i jego parametrów pozwolił określić minimalne wartości szerokości widma sygnału oraz częstotliwości graniczne.

Ultraszerokopasmowa synteza sygnału sondującego wymaga znacznej komplikacji toru nadawczego. Między innymi ze względu na wspomniane wcześniej właściwości układów

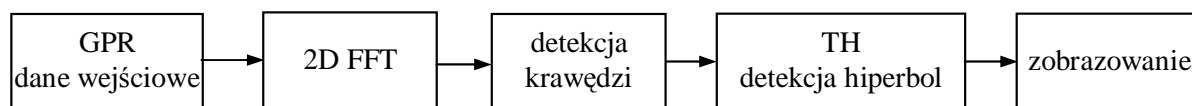
syntezy cyfrowej sygnał sondujący generowany jest metodą składania podpasm [4]. Poszczególne podpasma (segmenty) wytwarzane są metodami cyfrowymi, natomiast sygnał docelowy powstaje jako wynik składania wielu sygnałów przesuniętych względem siebie w dziedzinie częstotliwości o wartość szerokości pasma segmentu. Proces musi być zrealizowany z uwzględnieniem zależności fazowych w poszczególnych segmentach, tak aby zachować ciągłość fazy sygnału wypadkowego.

## 6. Koncepcja przetwarzania sygnałów

### 6.1 Transformata Hough'a

Do przetwarzania obrazów uzyskanych przez radar GPR wykorzystywana będzie Transformata Hough (TH). Złożoność obliczeniowa algorytmu TH nie jest duża, co pozwala na implementację algorytmów opartych na TH w systemach czasu rzeczywistego.

Algorytm przetwarzania z wykorzystaniem transformaty Hough'a może być zrealizowany według schematu blokowego przedstawionego na rys.4 Na początku zgromadzone dane po przetworniku analogowo-cyfrowym poddawane są dwuwymiarowej filtracji z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera – FFT. Następnie zastosowany jest algorytm służący do detekcji krawędzi. W kolejnym kroku detekcja obiektu z wykorzystaniem transformaty Hough'a i finalnie tworzone jest zobrazowanie obiektów wykrytych pod powierzchnią Ziemi [3].



Rys. 4 Schemat blokowy przetwarzania dla radaru GPR z zastosowaniem TH.

### 6.2 Technika radaru z syntetyczną aperturą

Technika radarów z syntetyczną aperturą SAR (ang. Synthetic Aperture Radar) jest powszechnie stosowana do tworzenia wysokorozdzielczych zobrazowań powierzchni Ziemi. Wykorzystuje ona zjawisko tworzenie się tak zwanej syntetycznej apertury anteny w trakcie ruchu platformy z radarem, co pozwala na uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości. Najczęściej nośnikiem radaru są statki powietrzne. W ostatnich latach trwają także intensywne prace nad zastosowaniem radarów SAR do tworzenia wysokorozdzielczych zobrazowań radaru GPR. Technika SAR jest techniką koherentną i pozwala na uzyskanie zobrazowań o rozdzielczości kilka razy większej w porównaniu do radarów GPR wykorzystujących w celu zogniskowania obrazu w kierunku azymutalnym niekoherentne metody obróbki obrazu takie jak na przykład transformaty Hough'a. Niestety ze względu na złożoność modelu sygnału odbieranego przez radar GPR, wynikającego głównie ze zróżnicowania różnych typów gleb i różnej ilości występujących w niej zróżnicowanych warstw, jak również szeregu czynników zakłócających, technika SAR napotyka na szereg problemów z tym związanych. Znane są opracowania radarów GPR - SAR świetnie działające dla ośrodków jednorodnych (takich jak na przykład zamrożone jezioro, czy jednorodna gleba o stałej przenikalności elektrycznej), a niestety niepozwalających na uzyskanie zogniskowanego obrazu dla danych pochodzących z ośrodków charakteryzujących się dużym zróżnicowaniem [3].



## 7. Podsumowanie

W artykule została zaprezentowana koncepcja mobilnego radaru do wykrywania min i niebezpiecznych ładunków umieszczonych pod powierzchnią ziemi. Przedstawiono wybrane problemy związane z projektowaniem tego typu urządzenia, których rozwiązanie pozwoliło na kompleksową wizję całego systemu radaru polarymetrycznego obejmującą syntezę ultraszerokopasmowego sygnału sondującego typu FMCW oraz koncepcję cyfrowego przetwarzania sygnału. Założenia projektu przyjęte przez zespół projektantów pozwolił na stworzenie urządzenia zaawansowanego technicznie i konkurencyjnego w stosunku do rozwiązań proponowanych przez światowych producentów.

## Literatura

- [1] Daniels D.J.: Ground Penetrating Radar for Buried Landmine and IED Detection, NATO Advanced Study Institute - Unexploded Ordnance Detection and Mitigation, 2008.
- [2] Pochanin G.: *Some Advances in UWB GPR*, NATO Advanced Study Institute - Unexploded Ordnance Detection and Mitigation, 2008, Il Ciocco, Włochy.
- [3] Franceschetti G., Lanari R.: *Synthetic Aperture Radar Processing*, 1999, CRC.
- [4] Griffiths H.D., Bradford W.J.: Digital generation of high time-bandwidth product linear FM waveforms for radar altimeters. IEE Proceedings-F Vol. 139, 2, April 1992.