



Szerokopasmowy radar obserwacji podpowierzchniowej*

Bogdan OLECH, Andrzej GODZIUK, Mariusz KAPRUZIAK

Autocomp Management Sp. z o.o., ul. Władysława IV/1, 70-651 Szczecin

Streszczenie. Publikacja przedstawia bieżące rezultaty prac realizowanych w ramach projektu rozwojowego nr 0R00009112, w zakresie wykonania prototypu radaru obserwacji podpowierzchniowej. Radar ma umożliwić wykrywanie oraz klasyfikowanie wykrywanych obiektów (miny i ładunki minowe). W związku z tym, w projekcie kładziony jest szczególny nacisk na badania przemysłowe i prace rozwojowe, aby efektywnie wykorzystać dostępne już na świecie metody i technologie radarowe do wytworzenia prototypu. Efekty naukowe są spodziewane zasadniczo w zakresie poszerzenia efektywności wykorzystywanych metod rekonstrukcji obrazu w połączeniu z warstwą fizyczną (anteny, modulacja itp.). Możliwość klasyfikowania wykrywanych obiektów stanowi nadal istotne wyzwanie naukowe, ponieważ niewiele metod klasyfikacji obiektów zostało wypracowanych w ośrodkach światowych, zaś skuteczność tych istniejących jest bardzo ograniczona. Generalnie, w projekcie zakłada się (w sposób oczywisty), że im lepszej jakości uzyskiwany jest obraz (po rekonstrukcji), tym lepszych efektów klasyfikacji obiektów należy się spodziewać – zarówno wykonywanej przez człowieka, jak i automatycznej. Z tego względu budowany jest radar z falą ciągłą i modulacją skokową (SFCW), pracujący w dużym przedziale częstotliwości (do 18 GHz). Elastyczność parametrów pracy tego typu radaru umożliwi właściwy kompromis pomiędzy głębokością penetracji fali a rozdzielczością obrazu, w zależności od specyfiki zadania.

Słowa kluczowe: technologie informacyjne, sensor radarowy, wykrywanie min

* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

1. WSTĘP

Publikacja przedstawia bieżące rezultaty prac realizowanych zgodnie z umową nr 0091/R/TOO/2010/12, o wykonanie projektu rozwojowego nr 0 R00 0091 12 z dn. 30.11.2010, zawartą z Ministrem Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w zakresie opracowania metody GPR (*Ground Penetration Radar*).

Planowany efekt końcowy realizacji badań przemysłowych i prac rozwojowych, całości projektu, dotyczy możliwości uzyskania technologii pozwalającej na budowanie urządzeń do szybkiego wykrywania min lądowych (np. w czasie typowego ruchu pojazdu specjalnego), z dużą wiarygodnością (dochodzącą do 99,6%). W projekcie proponuje się połączenie kilku metod wykrywania min, opartych na różnych zjawiskach fizycznych, pozwalające na fuzję informacji.

Radar obserwacji podpowierzchniowej (GPR) realizuje zadanie wizualizacji podpowierzchniowej objętości gruntu (również innych struktur umiarkowanie tłumiących falę elektromagnetyczną). Niejednorodność właściwości fizycznych gruntu powodowana obecnością obiektów zainteresowania (w tym przypadku min i ładunków improwizowanych) stanowi podstawę fizyczną zasady pracy urządzenia. Fala elektromagnetyczna podlega rozproszeniu w gruncie zależnie od tej niejednorodności, rozproszenie fali daje się odtworzyć i zwizualizować za pośrednictwem metod radarowej rekonstrukcji obrazu.

Część wstępna publikacji przybliży genezę tematu oraz odnosi go, za pośrednictwem krótkiego zarysu literaturowego, do rozwiązań światowych. Przedstawia także rozważany zakres przydatności proponowanego rozwiązania. Część druga omawia sposób realizacji radaru obserwacji podpowierzchniowej; dobór metody kompresji impulsu, dobór anten oraz zagadnienia syntezy częstotliwości. W części trzeciej przedstawiona została, aktualnie wykorzystywana w projekcie, technika zobrazowania radarowego. W części końcowej, podsumowującej, oprócz zbiorczego omówienia wyników zasygnalizowane zostały planowane, kolejne etapy prac.

1.1. Zarys literaturowy

Ostatnie 20 lat przyniosło zasadniczy postęp metod wizualizacji i konstrukcji sprzętu obserwacji podpowierzchniowej. Metody wizualizacji opierają się na różnych modelach inwersji i rozpraszania fali oraz uproszczeniach obliczeniowych (*Stripmap Synthetic Aperture Radar* – SAR, *Kirchhoff Migration* – KM, *Frequency-Wavenumber Migration* – F-K i inne), w zależności od definicji celu i możliwej do wykorzystania mocy obliczeniowej [1].

Uzyskiwana jakość zobrazowania ograniczana jest zarówno dostępnym pasmem radaru (również z powodu tłumienia fali w gruncie, tym silniejszego dla wyższych częstotliwości), nieregularnością struktury gruntu, jak i trudnością w określaniu prędkości rozchodzenia się fali w gruncie. Metody rekonstrukcji obrazu nie osiągnęły jeszcze jednak granicznych możliwości, choćby pod kątem możliwości kalibracyjnych w połączeniu z systemem anten.

Jeśli chodzi o sprzęt, to postęp w dziedzinie konstrukcji radarów obserwacji podpowierzchniowej wynika głównie z dostępności podzespołów składowych. Dzisiaj można dosyć swobodnie operować w zakresie częstotliwości do 18 GHz, opierając się na komercyjnie dostępnych podzespołach. Kluczowym problemem konstrukcyjnym radaru jest zbudowanie odpowiedniego systemu anten, pozwalającego na właściwe oświetlenie obiektu po stronie nadawczej oraz dokonanie skutecznego odtworzenia (skupienia) obrazu po stronie odbiorczej. Specyficzne dla wykrywania min jest to, że anteny muszą unosić się ponad gruntem na tyle wysoko, aby nie spowodować uruchomienia zapalników. Ta dodatkowa przerwa pomiędzy antenami a powierzchnią gruntu utrudnia wprowadzenie odpowiedniej mocy promieniowania pod powierzchnię gruntu oraz powoduje silne odbicie od tej powierzchni. Silne odbicie potrafi zamaskować miny znajdujące się na granicy powierzchni gruntu.

Do formowania impulsu sondującego grunt stosowane są dwa podejścia, z uwagi na sposób przetwarzania sygnału; przetwarzanie w domenie czasowej oraz przetwarzanie w domenie częstotliwościowej. W pierwszym przypadku generowany jest krótki impuls – dostatecznie krótki, by zapewnić rozdzielczość, tworzący zakres UWB generowanej fali. W drugim przypadku ostateczny impuls znakujący w czasie pozycję obiektu powstaje syntetycznie, na drodze odpowiedniego składowania składowych spektralnych, generowanych w rozciągniętym (względem szerokości syntezywanego impulsu) przedziale czasowym.

Wykorzystanie krótkiego impulsu UWB implikuje ograniczenia związane z możliwością wyemitowania odpowiedniej mocy przez antenę nadawczą. Ogranicza to głębokość penetracji radaru. Istnieje też ograniczenie związane z możliwą do uzyskania rozdzielczością, gdyż impulsu nadawanego nie da się skracać, nie zmniejszając tym bardziej nadawanej, średniej mocy. Innym problemem jest próbkowanie odbieranych, szybkich impulsów.

Jednakże z uwagi na kompromis pomiędzy prostotą, kosztem a jakością pracy w porównaniu z innymi rodzajami radarów, radary impulsowe UWB zdominowały technologicznie rozwiązania komercyjne.

Problem wykrywania min, jak również ładunków minowych realizowanych w sposób niestandardowy – improwizowany, narzuca coraz to kolejne wymagania. Ładunki minowe muszą być wykrywane i rozróżniane również na znacznych głębokościach (ponad 1,5 m). Wiele z nich zasadniczo nie zawiera elementów metalowych, utrudnia to uzyskanie kontrastu z gruntem.

Pojawiają się też inne zapotrzebowania, związane z możliwością wykrywania min w znacznej odległości przed pojazdem lub z użyciem bezzałogowego obiektu latającego. Aby spełnić te wszystkie wymagania, potrzebny jest radar „widzący” głębiej i dokładniej. Radar z falą ciągłą o skokowej modulacji (*Stepped Frequency Continuous Radar* – SFCW), pracujący w domenie częstotliwości, pozwala uzyskiwać znacząco większą dynamikę sygnału niż impulsowy UWB (o ok. 50 dB). Radar SFCW jest jednak trudniejszy i droższy w budowie. Posiada większe gabaryty i zużywa więcej energii, w przypadku zasilania bateryjnego ma to istotne znaczenie. Z uwagi na sekwencyjne składanie spektrum impulsu, czas akwizycji impulsu może być nawet setki razy dłuższy niż dla radaru impulsowego UWB.

Obszerne omówienie problematyki radaru obserwacji podpowierzchniowej można znaleźć w klasycznej publikacji książkowej Davida Danielsa [2]. Bardzo aktualny opis możliwych scenariuszy stosowania radaru podczas wykrywania min, z obszernym odniesieniem do literatury, można znaleźć w monografii, którą sporządził Harry Jol [3] (w szczególności rozdział 14, Alexander Yarovoy). W tym drugim przypadku warto podkreślić wniosek autora, że obecnie podstawowym problemem jest raczej klasyfikacja wykrywanych obiektów niż jedynie ich wykrywanie.

W ramach projektu realizowany jest radar typu SFCW, z zamiarem wdrożenia wyników oraz ich komercjalizacji. Obecnie dostępne komercyjnie podzespoły pozwalają na zbudowanie dostatecznie małego i lekkiego radaru tego typu. Istnieją także metody sprzętowe [4] i algorytmiczne [5] pozwalające na znaczne skrócenie czasu akwizycji sygnału.

1.2. Rozważany zakres przydatności

Kluczowym efektem prac (w zakresie opracowania metody GPR) będzie możliwość wizualizacji przestrzennej ukrytego, potencjalnego zagrożenia.

Podobnie jak dla obserwacji pod powierzchnią gruntu, zasada penetracji radarowej zostanie użyta dodatkowo przy ocenie struktury betonu, w poszukiwaniu ładunków terrorystycznych i obserwacji poprzez ściany budynków. Metody radarowe tego typu mogą okazać się skuteczne również w ocenie prawdopodobieństwa misji samobójczych.

Wynikiem końcowym projektu będzie demonstrator technologii, zbudowany w formie urządzeń pozwalających na próby terenowe. Wyniki prób wyznaczą perspektywę uzyskania rozwiązań docelowych. Demonstrator ten będzie uwzględniał trzy możliwe formy: forma przenośna – indywidualna, forma mobilna – pojazd w ruchu oraz forma mobilna zrobotyzowana.

Forma przenośna jest to urządzenie, którym operuje indywidualny żołnierz w procesie wyszukiwania min. Waga urządzenia nie powinna przekraczać 6-8 kilogramów, czas pracy (wymiana baterii) powinien sięgać 8 godzin.

Urządzenie powinno posiadać możliwie największą wiarygodność wykrywania, z tego względu będzie dostępna również trójwymiarowa wizualizacja w czasie rzeczywistym.

Forma mobilna ukierunkowana jest na ochronę patroli i transportów samochodowych (również sprzęt opancerzony), istotna tutaj jest ochrona przed minami przeciwczołgowymi oraz ładunkami odpalnymi zdalnie. Masa aparatury może być większa (kilkadziesiąt kilogramów), kluczowa jest szybkość działania oraz zdolność widzenia przed siebie. Formą mobilną zrobotyzowaną jest urządzenie sterowane zdalnie bądź pracujące autonomicznie. Wzięte pod uwagę zostały kolejne dwa przypadki. Pierwszy to urządzenie bazujące na pojeździe wolnobieżnym, zapewniana jest maksymalnie wysoka wykrywalność, nie istnieją praktycznie ograniczenia co do masy aparatury. Drugi przypadek, to maksymalnie lekka aparatura wykrywania min umieszczana na miniaturowych pojazdach zrobotyzowanych zarówno naziemnych, jak i latających.

2. TECHNOLOGIA REALIZACJI

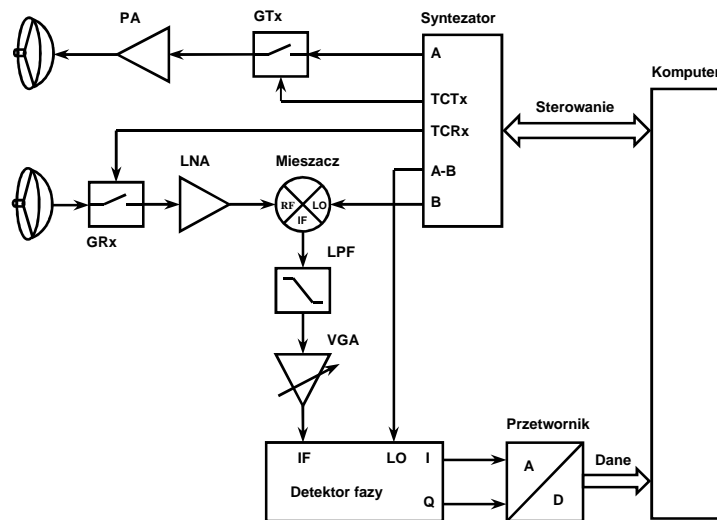
W wyniku realizacji projektu powstanie prototyp radaru obserwacji podpowierzchniowej, świadczący o możliwości późniejszego wdrożenia rezultatów projektu do produkcji. W związku z tym działający prototyp nie może zawierać na przykład gotowego analizatora wektorowego, gdyż jest to nie do przyjęcia z uwagi na koszty i gabaryty. Tempo rozwoju technologicznego oferowanego w postaci materiałów i podzespołów przez firmy światowe sprawia również, że jedynie kopiowanie koncepcji obcych w ostatecznym rozwiązaniu własnym dałoby przestarzały technologicznie i nieuzasadniony ekonomicznie efekt końcowy. Tym bardziej że dostępne opisy rozwiązań zawarte w publikacjach też są pochodną pewnej zwłoki w implementowaniu najnowszych technologii. Jest to charakterystyczny aspekt tego projektu: jak zaimplementować najnowsze technologie, metody i algorytmy, znane i/lub autorsko ulepszone, uzyskując w rezultacie wyniki na najwyższym poziomie taktyczno-technicznym.

2.1. Radar skokowej modulacji częstotliwości

Na rysunku 1 zaprezentowany jest schemat blokowy realizowanego radaru ze zintegrowanym synteizatorem częstotliwości (opisanym w punkcie 2.3). Sygnał kanału A, o zmiennej wartości częstotliwości generowanej sekwencyjnie i skokowo, po wzmocnieniu (PA) trafia do anteny nadawczej. Sygnał anteny odbiorczej, z kolei, po wstępnym wzmocnieniu (LNA) trafia na wejście szerokopasmowego mieszacza (mieszacz). Do mieszacza dostarczany jest także sygnał LO, pozyskiwany z kanału B synteзаторa. Wyjście IF mieszacza wyprowadza sygnał odbierany, ulokowany na częstotliwości pośredniej.

Sygnal ten, po filtracji (LPF) i wzmacnieniu (regulowanym – VGA) trafia na wejście detektora fazy. Wejście LO detektora fazy przyłączone jest do wyjścia A-B syntezatora, zapewniając sygnał wzorcowy detekcji fazy.

Radar posiada bramki odłączające sygnał radiowy nadawany (GTx) oraz sygnał odbierany (GRx). Sterowanie tymi bramkami odbywa się bezpośrednio z syntezatora, gdyż jest ściśle powiązane z sekwencją modulacji. Ta szczególna topologia wynika z konieczności zapewnienia nadzwyczaj szybkiego włączania i wyłączenia sygnałów sterowania bramkami, w czasie ułamkowym nanosekundy. Rozwiązanie takie umożliwi regulowany i kontrolowany moment włączania sygnału nadawanego oraz dobór właściwego czasu trwania okresu nadawania. Podobnie jeśli chodzi o sygnał odbierany. Bramkowanie sygnałów zapewnia możliwość unikania przesterowywania toru odbiorczego sygnałem odbijanym bezpośrednio od powierzchni gruntu. Umożliwia tym samym uzyskiwanie większej dynamiki radaru.



Rys. 1. Schemat blokowy realizowanego radaru obserwacji podpowierzchniowej

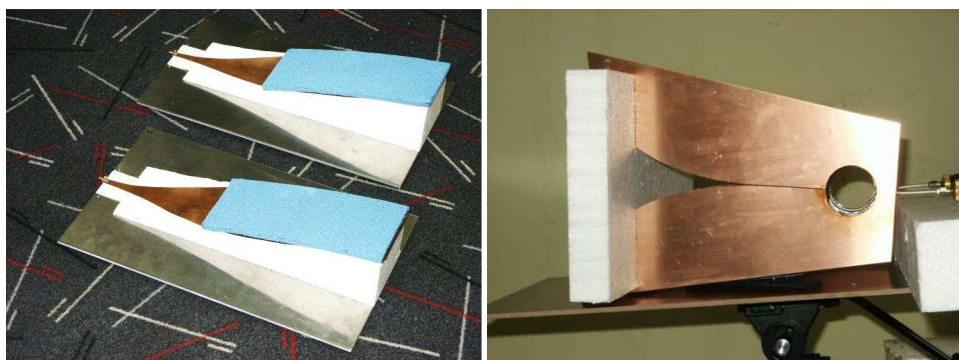
Fig. 1. Block diagram of the Ground Penetrating Radar being implemented

Sygnal pozyskiwany z detektora fazy podawany jest na przetwornik analogowo-cyfrowy (w przypadku realizacji analogowej). Dalej, dane pomiarowe wartości wektorowej kolejnych składowych spektralnych syntezowanego impulsu dostarczane są do komputera (docelowo o charakterze wbudowanym). Na etapie realizacji odwrotnej transformaty Fouriera (skanowanie typu A) oraz na etapie rekonstrukcji obrazu (skanowanie typu B i C) przeszukiwane zostają tablice korekcyjne systemu.

Tablice korekcyjne zawierają współczynniki korygujące wartości amplitudowe, fazowe i apertury systemu anten oraz zniekształcenia toru sygnałowego, dla poszczególnych wartości generowanych częstotliwości radaru. Zestawienie skanowań A, B oraz C umożliwia wyświetlenie obrazu również w postaci 3D.

2.2. System anten

Na obecnym etapie zostały wytypowane dwa rodzaje anten, możliwe do ostatecznej implementacji: anteny typu Horn oraz anteny typu Vivaldi. W obydwu przypadkach użycia tych anten zakłada się również późniejszą konstrukcję liniowej macierzy anten. Na taki wybór wpłynęło dużo pierwszoplanowych czynników. Przede wszystkim, obydwa rodzaje anten pozwalają uzyskiwać bardzo szerokie pasmo przy nieskomplikowanej konstrukcji. Jednak anteny Horn mają stosunkowo dużą objętość, gdyż realizowane są przestrzennie. Anteny Vivaldi mogą być mniejsze i lżejsze. Mogą być budowane z blachy lub wykonywane planarnie. Aby zrealizować możliwie szybko pierwsze próby na sprzęcie, został wykonany komplet 2 anten szerokopasmowych typu Semi-Horn (rys. 2, lewy). Wybór takiego rodzaju anteny wynikał z relatywnie niskiego nakładu pracy związanej z samą realizacją fizyczną anten. Wyniki okazały się na tyle atrakcyjne, że anteny spełniły wymagania początkowego etapu realizacji projektu. Dokumentacja została zaczerpnięta z rozprawy doktorskiej Jangwoo Han, Texas A&M University [6].



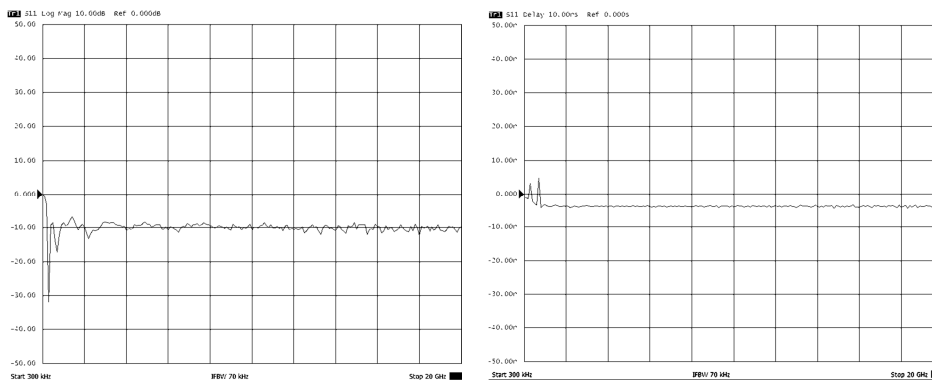
Rys. 2. Zrealizowane anteny typu Semi-Horn (na zdjęciu z lewej strony) oraz anteny typu Vivaldi (zdjęcie z prawej strony)

Fig. 2. Built antennas of Semi-Horn type (left photo) and Vivaldi type (right photo)

Wykonanie anten Semi-Horn okazało się bardzo udanym przedsięwzięciem. Przeprowadzono z ich użyciem wiele przydatnych prób radarowych.

Anteny te użyte były w zakresie od 1÷20 GHz. Posiadały one jednak pewne niedoskonałości objawiające się niestałością współczynnika S_{11} . Jego znacznym falowaniem na początku pasma oraz wzrostem powyżej wartości 10 dB dla częstotliwości większych niż 12 GHz.

Anteny typu Vivaldi zapewniają duże pasmo i kierunkowość, są relatywnie małe i lekkie. Zostały wykonane z blachy miedzianej o grubości 0,5 mm (rys. 2, prawy). Uzyskana została bardzo równomierna wartość współczynnika S_{11} , począwszy od 1 GHz, aż do 20 GHz (rys. 3). Dalsze obniżenie częstotliwości dolnej jest kwestią zgodzenia się na zwiększone gabaryty anteny (obecnie ok. 310 mm, dłuższy wymiar). W zakresie pracy anteny, współczynnik opóźnienia grupowego wykazuje również dużą równomierność i liniowość, ułatwia to kalibrację anteny w systemie.



Rys. 3. Parametry S_{11} wykonanej anteny typu Vivaldi (opóźnienie grupowe – z prawej strony), zmierzone przy użyciu VNA typu E5071C-4K5

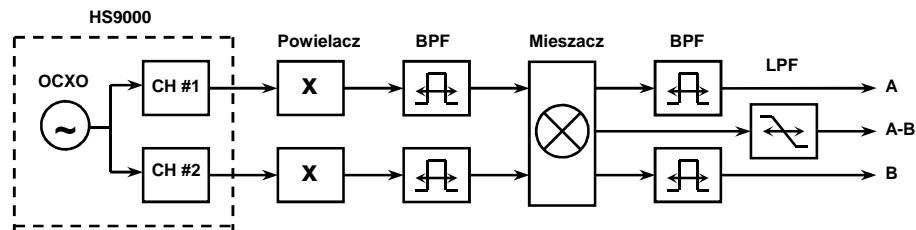
Fig. 3. The S_{11} parameter of Vivaldi type antenna prototype (group delay – on the right), both measured with VNA E5071C-4K5

2.3. Synteza częstotliwości

Synteza częstotliwości jest kluczowym elementem każdego radaru pracującego w domenie częstotliwościowej (CW). Parametry szumowe syntezy decydują o rozdzielczości i zasięgu pracy radaru, podobnie jak jakość realizowanej modulacji. W odniesieniu do radaru obserwacji podpowierzchniowej, wymagania te są tak samo istotne. Można tu mówić o wymaganiach z przedziału między 90÷140 dBc/Hz dla szumów fazowych (w odległości 1 kHz) oraz 110÷150 dBc/Hz dla szumów amplitudowych. Czystość spektralna powinna osiągać wartości nie gorsze niż 70÷90 dBc. Stabilność częstotliwościowa zwykle wystarcza na poziomie 1 ppm.

W odniesieniu do skokowej modulacji częstotliwości, pod uwagę należy wziąć wiele parametrów związanych z przełączaniem częstotliwości. Prędkość przejścia na kolejną wartość częstotliwości powinna być maksymalnie skrócona, by to działanie nie spowalniało czasu akwizycji próbek sygnałowych. Wskazane jest, by ten czas był na poziomie setek nanosekund. Poziom mikrosekund jest jeszcze do zaakceptowania, pod warunkiem że inne parametry przełączania są bardzo dobre. Do tych innych parametrów należy czas dochodzenia do zadanej częstotliwości i zgodności fazowej.

Do realizacji podstawowego komponentu syntezy częstotliwości wygrano moduł typu HS9000 firmy Holzworth. Przy częstotliwości 1 GHz i odległości 1 kHz, szumy fazowe wynoszą -118 dBc/Hz. Jest to moduł mogący zintegrować do 8 niezależnych syntezy o wartości częstotliwości do 6,720 GHz. Do projektu wybrana została wersja modułu generująca dwa niezależne sygnały; pierwszy w przedziale od 250 kHz do 6,720 MHz, drugi zaś w przedziale od 250 kHz do 2,048 GHz. Obydwa tor syntezy modułu posiadają wspólne zasilania, elementy kontrolne i komunikacji oraz generator referencyjny OCXO.



Rys. 4. Rozbudowa modułu HS9000 z użyciem dodatkowych elementów

Fig. 4. The HS9000 module with additional components to extend functionality

Z uwagi na to, że elementy umieszczone są w jednej obudowie, są one doskonale sprzężone termicznie. Wspólny oscylator referencyjny i sprzężenie termiczne umożliwiają uzyskanie doskonałej zgodności fazowej obydwu sygnałów. Syntezy oferuje bardzo dobrą prędkość przełączania częstotliwości. Gdy jest wybierana bezpośrednio z wewnętrznej listy (załadowanej wcześniej do pamięci procesora modułu), to następuje w czasie krótszym niż $6 \mu\text{s}$ (dla wartości nie większych niż 5% pasma). Należy podkreślić, że synteza realizowana jest z wykorzystaniem analogowego powielania i przełączania, bez użycia pętli PLL. Zapewnia to eliminację efektu dociągania fazy. W związku z tym zachowana jest zgodność fazowa na granicy przełączeń. Absolutna stałość fazy względem procesu przełączania ma ogromne znaczenie w realizacji radaru o skokowej modulacji częstotliwości. Eliminowany jest w ten sposób błąd fazy wokół granicy przełączeń.

Moduł HS9000 został rozbudowany z uwagi na założony zakres przestrajania częstotliwości syntezy radaru. Na rysunku 4 przedstawiony jest ogólny szkic rozbudowy modułu HS9000 z wykorzystaniem dodatkowych elementów. Sygnały obydwu kanałów (CH #1, CH #2), niezależnie, mogą być podane na wejście powielaczy i podlegać zwielokrotnieniu z uwagi na wartość częstotliwości. Oferowana rozdzielczość przestrajania częstotliwości kanałów (1 mHz) nie ogranicza krotności powielania, nadal wymagana rozdzielczość przestrajania jest zapewniona.

Powielanie jest procesem degradującym próg szumowy, w związku z tym należy maksymalnie ograniczać krotność powielania. Kanał CH#1 pokrywa wartość częstotliwości do wartości 6,720 GHz. Dwukrotne powielenie pozwala uzyskać 13,440 GHz. Proces mnożenia częstotliwości (mieszacz) nie wpływa zasadniczo na poziom szumów. Zważywszy, że kanały są niezależne, a szумы gaussowskie, proces ten może nawet nieznacznie obniżyć poziom szumów.

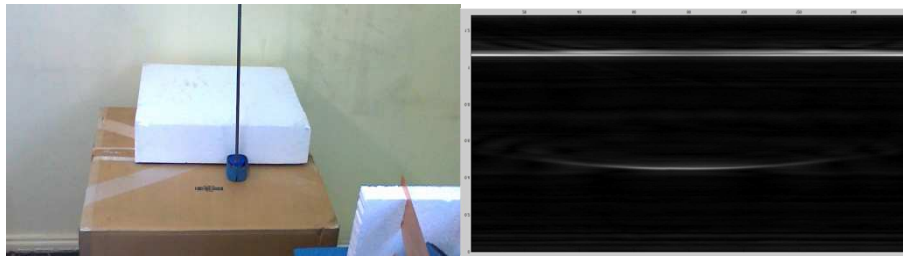
Można też powielić częstotliwość kanału CH#2, na przykład x2, wówczas uzyskuje się (kanał CH#1 powielony x2) 17,536 GHz. Taka wartość mogłaby być wystarczająca.

Innym istotnym problemem jest konieczność usuwania częstotliwości harmonicznych powstających podczas powielania i mnożenia. Zważywszy na to, że częstotliwości poszczególnych kanałów (a przynajmniej kanału CH#1) zmieniają się w procesie modulacji skokowej, filtry te muszą być na bieżąco przestrajane. Na rysunku 4 zaznaczone są też bloki filtrów pasmowych (BPF) i dolnoprzepustowego (LPF). Zaplanowany jest kombinowany sposób przestrajania tych filtrów (w razie konieczności) poprzez przełączanie podzakresów oraz poprzez przestrajanie analogowe. Wymóg złożoności filtrów będzie ograniczany poprzez odpowiedni dobór częstotliwości pośredniej IF.

3. TECHNIKA ZOBRAZOWANIA

Wykrywanie min w ziemi jest w dużej mierze problemem rozpoznawania kształtów prześwieczonego obiektu. Widziany obiekt może być zarówno sprawną miną, jak i fragmentem zniszczonego urządzenia, które z biegiem czasu znalazło się pod ziemią, lub też naturalnym kamieniem. Rozpoznawanie kształtów z obrazu uzyskiwanego z radaru GPR jest złożonym problemem, głównie ze względu na bardzo zróżnicowany stopień rozmycia oraz dokładności i rodzaj zniekształceń dla każdej z 3 osi wynikowego obrazu. Wydaje się, że relatywnie najłatwiej o dużą dokładność skanowania typu A (osi w głąb ziemi). Stwierdzenie to jest najbardziej poprawne dla anteny patrzącej wprost, na dość duży obiekt. W takiej konfiguracji rozdzielczość może sięgać ułamków milimetrów, nawet pomimo ewentualnego przysłaniania (o ile odbierany sygnał jest dostatecznie silny). Skanowanie typu B (w osi wzdłuż ziemi) wiąże się ściśle z problemem apertury anteny. Skutkuje to charakterystycznym rozmyciem obrazu w formie hiperboli oraz problemem intensywnego

przykrywania sygnałów pochodzących od małych obiektów przez pochodzące od dużych obiektów, znajdujących się w pobliżu (ale nie przysłaniających). Ostatni efekt jest w szczególności niebezpieczny, z dwóch powodów: (1) pozwala zgubić obiekt, gdy bezpośrednio pod nim znajduje się obiekt dobrze odbijający fale elektromagnetyczne oraz, co równie ważne, (2) nie pozwala na obrazowanie specyficznych kształtów ścian obiektów. Zniekształcenia te powodują, że dla skanowania typu B uzyskanie rozdzielczości podobnych jak dla dużych obiektów ze skanowania typu A, jest praktycznie niemożliwe.

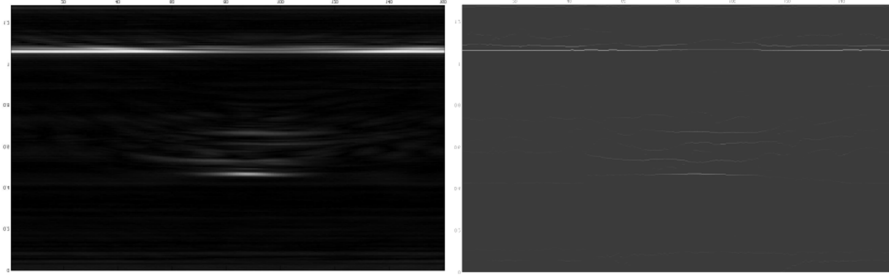


Rys. 5. Przykładowe wykonanie skanowania typu B (realizowana scena – z lewej)

Fig. 5. Example of scan type B (the real scene – on the left)

Na rysunku 5 zamieszczone zostało przykładowe skanowanie typu B, dla sceny jednoelementowej, obiektu w postaci metalowego pręta. Obiekt w tej formie pozwolił na czytelną wizualizację charakterystycznej hiperboli rozmycia obrazu. Umieszczony za obiektem blok styropianu jest praktycznie niewidoczny. Widoczna jest natomiast ściana w formie wyraźnej, ciągłej linii. Skanowanie wykonane zostało w paśmie 3-18 GHz. Pasma zostało ograniczone od dołu z uwagi na istotne przesłuchy anten (wymagają ekranowania).

Praktyczne wykorzystanie skanowania typu C (uzyskanie trzeciego wymiaru poprzez kolejne powtórzenie skanowania typu B) w warunkach polowych, przez człowieka, jest natomiast ograniczone przez sposoby wizualizacji. Istnieją dwa tradycyjne sposoby wizualizacji: widok z góry oraz przestrzeń 3D. Oba sposoby wymagają określania progów przezroczystości obiektów i bardzo łatwo uzyskać tutaj efekt przysłonięcia i nie zauważyć obiektów położonych niżej. Próby migrowania w głąb i patrzenia z określonej pozycji na osi Z napotykają na problem nierównomiernego tłumienia sygnału dla różnych fragmentów obrazu, skutkując trudnością w porównywalności informacji na obrazie. Dla wizualizacji w przestrzeni 3D dochodzi jeszcze problem właściwego interfejsu do ustalania właściwego widoku i może być dość czasochłonne i kłopotliwe. Problemy te będą poddane ocenie dla konkretnych scenariuszy działania systemu, aby móc je wyeliminować lub przynajmniej istotnie złagodzić.



Rys. 6. Przykładowe wykonanie skanowania typu B dla obiektu złożonego: z użyciem IFFT (z lewej), z użyciem Root-MUSIC (z prawej)

Fig. 6. Example of scan type B for a complex object: with IFFT (left), with Root-MUSIC (right)

W ramach projektu wykonano badania rezultatów uzyskiwanych ze skanowania typu A z wykorzystaniem algorytmów: IFFT oraz Root-MUSIC. Wykorzystanie IFFT charakteryzuje się problemem zniekształceń wynikających z przesłuchów pomiędzy częstotliwościami przy próbie uzyskania rozdzielczości w dziedzinie czasu większej niż wynika to ze wzoru:

$$\Delta R = c/2B, \quad (1)$$

gdzie: c – prędkość światła, B – efektywne pasmo radaru.

Aby móc uzyskać lepszą rozdzielczość, konieczne byłoby wykorzystanie algorytmów tzw. superrozdzielczych. Na przykład opierających się na założeniu o niewielkiej liczbie pików w dziedzinie czasu. Można wtedy próbować sprowadzić zagadnienie szukania tych pików do algorytmu szukania harmonicznym w szumie białym. Najbardziej znaną obecnie metodą tego typu jest dekompozycja spektralna macierzy autokowariancji sygnału – Root-MUSIC [7]. Charakteryzuje się ona trzema ograniczeniami: (1) przyjmuje założenie o istnieniu szumu białego w sygnale, jednak poza skończoną liczbą harmonicznym założenie to bywa fałszywe, prowadząc do zniekształcenia wyników, (2) wymaga znajomości liczby poszukiwanych harmonicznym w sygnale i liczba ta nie może być duża oraz (3) dokładność wyników degraduje się zarówno ze wzrostem, jak i spadkiem poziomu szumów w stosunku do optymalnej wartości.

Na rysunku 6 przedstawione zostało skanowanie typu B z użyciem IFFT (lewa strona) oraz z użyciem Root-MUSIC (prawa strona). Scena była dosyć złożona; w plastikowym pudełku (ABS) umieszczone zostały 2 płytki drukowane z elementami. Przyjmując geometrię patrzenia jak na rysunku 5, widać kolejno: ściankę pudełka, poszczególne płytki przesunięte poprzecznie względem siebie oraz drugą ściankę pudełka. Zastosowanie algorytmu Root-MUSIC wyraźnie wyostrzyło obraz, za sprawą wytypowania maksimum amplitudowych kolejnych zobrazowań skanowania typu A.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wiele wykonanych badań i eksperymentów pozwoliło na bieżące weryfikowanie zdefiniowanych elementów technologii radaru obserwacji podpowierzchniowej. Podstawowym narzędziem weryfikacji był analizator wektorowy E5071C-4K5, w połączeniu z oprogramowaniem MATLAB/Simulink. Wykorzystane zostały również inne elementy sprzętowe i programowe zakupione dla potrzeb prototypowania, a także wykonane samodzielnie, jak np. anteny typu Semi-Horn oraz Vivaldi.

Bardzo istotnym efektem tego etapu prac był dobór i zakup podzespołów oraz komponentów niezbędnych do zbudowania prototypu demonstracyjnego. Podjęto rozstrzygnięcie na rzecz zbudowania radaru o modulacji skokowej w paśmie do 18 GHz. Taki zakres pasma pozwoli na optymalizację detekcji w zależności od tego, czy obiekty poszukiwane są na granicy gruntu, czy na większej głębokości. Dużo uwagi poświęcono zagadnieniom syntezy częstotliwości o bardzo niskim poziomie szumów fazowych (poniżej 110 dBc) w warunkach szybkiego przełączania pasma (poniżej 10 μ s). Jednocześnie, odpowiedni dobór pasma częstotliwości pośrednich oraz prędkości próbkowania pozwoli zapewnić zadowalającą prędkość pozyskiwania sygnału.

Koncepcja radaru o modulacji skokowej została wybrana głównie dlatego, że potencjalnie oferuje największą wierność odtworzenia obrazu radarowego. Oferuje także znaczną elastyczność w doborze parametrów pracy oraz algorytmów wizualizacji. Wadą tego typu rozwiązania jest wydłużony czas pozyskiwania informacji, narzuca to drastyczne wymagania dotyczące syntezy częstotliwości.

Dalsze prace będą prowadziły do skonstruowania prototypu oraz dokonania ostatecznej implementacji algorytmu rekonstrukcji obrazu. Odpowiednia wizualizacja, również 3D, pozwoli na obserwację struktury gruntu w czasie rzeczywistym. Planowane jest również wdrożenie metody klasyfikacji obiektów w procesie automatycznego podejmowania decyzji, w odniesieniu do rodzaju wykrytego obiektu.

LITERATURA

- [1] Gilmore C.G., *A Comparison of Imaging Methods using GPR for Landmine Detection and A Preliminary Investigation into the SEM for Identification of Buried Objects*, Masters of Science in Electrical Engineering, University of Manitoba, Canada, 2004.
- [2] Daniels D.J., *Ground Penetrating Radar – 2nd Edition*, The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [3] Jol H.M., *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Elsevier Science, First edition 2009.

- [4] Nicolaescu I., van Genderen P., van Dongen K.W., van Heijenoort J., Hakkaart P., Stepped Frequency Continuous Wave Radar – Data Processing, *2nd International Workshop on Advanced GPR*, 14-16 May, 2003, Delft, The Netherlands, 2003.
- [5] Gurbuz A.C., McClellan J.H., and Scott W.R., A Compressive Sensing Data Acquisition and Imaging Method for Stepped Frequency GPRs, *Signal Processing, IEEE Transactions*, vol. 57, no. 7, pp. 264-2650, 2009.
- [6] Han J., *Development of an Electrically Tunable Ultrawideband Radar Imaging Sensor and its Components*, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, May 2005.
- [7] Rao B.D., Hari K.V.S., Performance Analysis of Root-Music, *IEEE Transactions of Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 12, pp. 1939-1949, 1989.

Wide Bandwidth Subsurface Radar

Bogdan OLECH, Andrzej GODZIUK, Mariusz KAPRUZIAK

Abstract. In this paper some results are presented of a R&D project in progress which will be finished with a prototype of wide bandwidth subsurface radar (or, ground penetrating radar – GPR). This radar will be able to detect mines-like objects to allow classification of them. Subsurface radar technology is quite well understood already. In this project the main effort is focused on R&D to properly adopt methods and radar technology available worldwide in order to build a technologically advanced prototype. Expected scientific results of the project may reveal new details between image inversion/migration and the system physical layer (antennas, modulation, etc.). Object classification is still a scientific challenge with no doubt. There are no many methods available, but effectiveness of those existing is rather pure. In general, it is assumed in the project (in obvious way) that the better quality of the image the better classification can be done, with human perception or automatically (ATR). That is why the stepped frequency continuous wave (SFCW) radar is being built, working in wide frequency range (up to 18 GHz). Flexibility of this kind of radar allows to compromise the penetration depth with possible image resolution, according to the specific system task.

Keywords: information technology, subsurface radar sensor, mine detection