

Zastosowanie radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję użycia radaru z szerokopasmowym sygnałem szumowym jako radaru penetracji gruntu (GPR). Zaprezentowano koncepcję systemu rozpoznania terenu ze względu na zakopane w nim np. miny czy improwizowane ładunki wybuchowe. Prezentowana koncepcja zakłada użycie sygnału szumowego generowanego analogowo w paśmie $1 \div 3$ GHz z mocą rzędu pojedynczych mikrowatów. W artykule zaprezentowano wybrane układy radaru takie jak system antenowy, odbiornik Front-End, system akwizycji danych oraz przedstawiono koncepcję przetwarzania sygnałów w oparciu o struktury FPGA. Koncepcja użycia sygnału losowego umożliwi pracę wielu nadajników i wielu odbiorników w tej samej przestrzeni z uwagi na fakt, że sygnały szumowe są sygnałami wzajemnie ortogonalnymi. Przedstawiona koncepcja radaru szumowego GPR może być wykorzystana do budowy systemu rozpoznania terenu pod kątem poszukiwania min ukrytych np. na drodze przejazdu kolumny pojazdów wojskowych.

Abstract. This article describes a concept of use a wideband noise radar in the ground penetrating applications (GPR). Concept assumes using of analog-generated noise signal with frequency range from 1 to 3 GHz and power magnitude about single microwatts. Chosen radar sub-systems like antenna system, Front-End receiver, data acquisition system and concept of signal processing in FPGA will be presented. Usage of noise signal allows to correct work of multiple transmitters and receivers in the same space. Avoid of mutual jamming is possible due to orthogonality of noise signals. Presented conception of noise signal based GPR could be used in terrain recon and mine detector systems, where time of scanning is an essential requirement, for example in a military vehicles convoy. **The concept of use a wideband noise radar in the ground penetrating applications**

Słowa kluczowe: telekomunikacja, radar szumowy, korelator, FPGA.
Keywords: telecommunication, noise radar, correlator, FPGA.

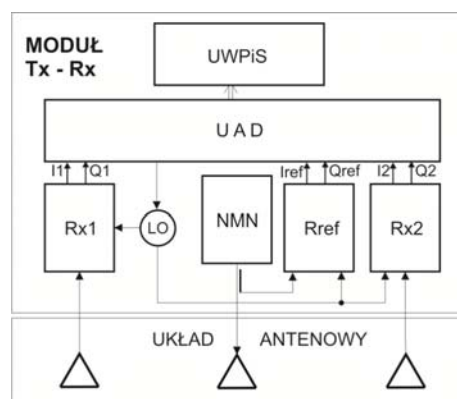
Wstęp

W ostatnich latach znacząco wzrosło zainteresowanie wykrywaniem, lokalizowaniem i identyfikacją płytko zakopanych w ziemi obiektów za pomocą technik radarowych. Do tego celu zarówno dla potrzeb cywilnych jak i wojskowych zostało opracowane wiele rozwiązań radarowych i opracowane zostało wiele technik przetwarzania sygnałów [1–2]. Rozwiązania te wykorzystują impulsowe sygnały złożone np. typu *chirp*, sygnały z kodowaniem fazy, sygnały ciągłe FM-CW i sygnały ze skokową zmianą częstotliwości [3–7]. Dla tego rodzaju zastosowań możliwe jest także użycie radaru z szerokopasmowym sygnałem szumowym [8–10]. Takie rozwiązanie pozwala na zmniejszenie złożoności systemu radarowego przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej rozdzielczości w odległości, jak również umożliwia uniknięcie zakłócających interferencji z innymi źródłami fal elektromagnetycznych. Na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej prowadzone są prace nad klasycznymi radarami typu GPR [11], jak również prowadzone są badania nad zastosowaniem radaru szumowego do wykrywania płytko zakopanych obiektów typu mina. System radaru szumowego wykorzystuje pasmo od 1 GHz do 3 GHz przez co uzyskuje się wysoką rozdzielczość przestrzenną w odległości (głębokości). W artykule prezentowana jest koncepcja użycia systemu radarowego z sygnałem szumowym do wykrywania i lokalizacji płytko zakopanych obiektów np. min.

Koncepcja systemu

Do wykrywania płytko zakopanych w ziemi obiektów zakłada się użycie radaru szumowego pracującego w paśmie 1 GHz, współpracującego z systemem antenowym w postaci szyku liniowego anten wieloelementowych. Przewiduje się konstrukcję modułu systemu radarowego z sygnałem szumowym. Składał się on będzie z konfigurowanych modułów nadawczo-odbiorczych wyposażonych w autonomiczny układ akwizycji danych UAD oraz układ wstępnego przetwarzania i sterowania UWPiS. Schemat blokowy modułu Tx – Rx przedstawiono na rys. 1. Poza tym, w skład modułu wchodzić będą trzy

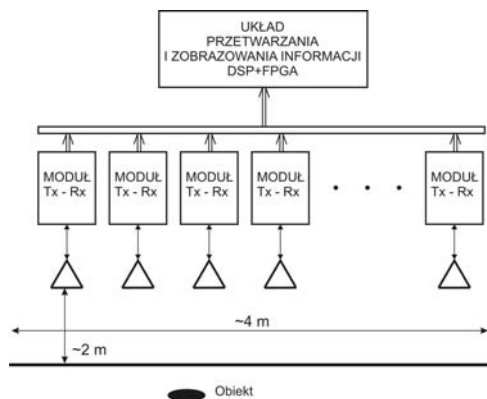
koherentne odbiorniki homodynowe Rx1, Rref i Rx2 typu Front-End z kwadraturowymi detektorami fazy, sterowanymi wspólną synchronizowaną z przetwornikami A/C heterodyną LO oraz filtrami wejściowymi ograniczającymi pasmo do 2 GHz i niskoszumnymi szerokopasmowymi wzmacniaczami mikrofalowymi.



Rys. 1. Schemat blokowy modułu nadawczo – odbiorczego systemu radarowego.

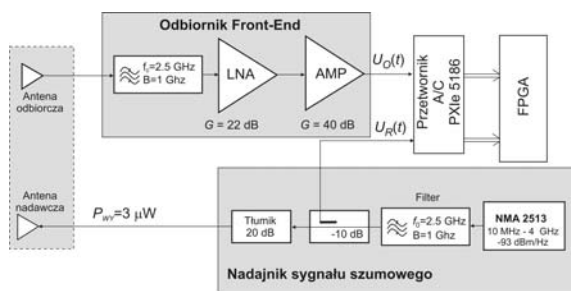
Źródłem sygnału sondującego jest mikrofalowy półprzewodnikowy generator szumów generujący sygnał szumowy w paśmie $1 \div 3$ GHz z gęstością widmową mocy rzędu -90 dBm/Hz. Tak skonstruowany moduł wraz z systemem antenowym stanowi część rekonfigurowalnego systemu radaru szumowego do detekcji obiektów zakopanych na niewielkiej głębokości. Jedną z możliwych wersji takiego systemu przedstawiono na rys. 2. Przedstawiona koncepcja zakłada użycie wielu zintegrowanych modułów nadawczo-odbiorczych (Tx-Rx) rozmieszczonych w jednej linii na pewnej wysokości nad powierzchnią rozpoznawanego gruntu, np. na wysokości 1 m. Zakłada się użycie szerokopasmowych anten kierunkowych z szerokością listka głównego w dwóch płaszczyznach nie przekraczającą 20° . System taki mógłby obserwować i analizować pas drogi o szerokości np. 4 m.

Wstępnie przewiduje się użycie takiego radaru np. na bezzałogowej mobilnej platformie lądowej. Radar mógłby być zabudowany na wysięgniku o odpowiedniej długości, przez co w czasie poruszania się platformy analizowany byłby pas drogi ze względu na potencjalne zakopane w nim obiekty takie jak miny czy improwizowane ładunki wybuchowe.



Rys. 2. Konceptcja systemu radarowego z sygnałem szumowym do wykrywania zakopanych w ziemi obiektów

Do pomiarów wykorzystano demonstrator radaru szumowego, którego schemat blokowy przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy demonstratora radaru szumowego

Demonstrator radaru składa się z następujących układów i bloków:

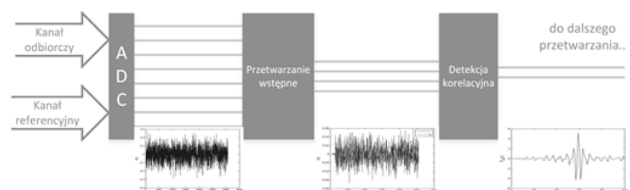
- układu antenowego w postaci dwóch anten planarnych wzajemnie izolowanych przez materiały absorpcyjne, których szerokość wiązki w azymucie i elewacji wynosi 20° a zysk energetyczny jest równy 18 dBi,
- bloku nadajnika generującego sygnał szumowy z mocą $3 \mu W$ w ekwiwalentnym paśmie szumów $B_{sz} = 1.2 \text{ GHz}$,
- bloku odbiornika bezpośredniego wzmocnienia Front-End o sumarycznym wzmocnieniu mocy równym 60 dB i współczynniku szumów $F \leq 4 \text{ dB}$,
- oraz układu digitalizacji i przetwarzania w postaci dwukanałowego przetwornika A/C PXIe-5186 i struktury FPGA realizującego opisany w pkt. 4 algorytm przetwarzania sygnału szumowego w czasie integracji równym $T_{int} = 160 \mu s$.

Parametry radaru szumowego wyszczególnione na rys. 3 zostały zoptymalizowane ze względu na czułość i rozróżnialność systemu radarowego.

Algorytm przetwarzania danych

Opracowanie toru przetwarzania sygnału szumowego w odbiorniku radarowym jest zadaniem wymagającym. Duże wyzwanie dla wydajności układów cyfrowych stanowi

wielkość potrzebnego strumienia danych. Nie bez znaczenia jest tu docelowa aplikacja, która wymaga stosowania sygnału szerokopasmowego dla uzyskania zadowalającej rozdzielczości obrazowań. Wraz z rozwojem techniki cyfrowej odpowiednie wydajne układy stają się dostępne, niemniej jednak omawiane zastosowanie może wymagać zbliżenia się do granicy ich wydajności. Celem, jaki postawiono w projektowaniu algorytmu było zbadanie wpływu parametrów toru na jakość wykryć elementarnych przy założonych granicach: szybkości obliczeń i prostoty implementacji w układzie programowalnym. Przez jakość wykryć rozumie się tu zarówno wierność odwzorowania przebiegu funkcji korelacji jak i szerokość czasowego listka głównego oraz separację pomiędzy listkiem głównym a bocznymi. Celem drugorzędym było sprawdzenie, jak bardzo można zbliżyć się w implementacji do przetwarzania w czasie rzeczywistym i jakie są tego koszty.



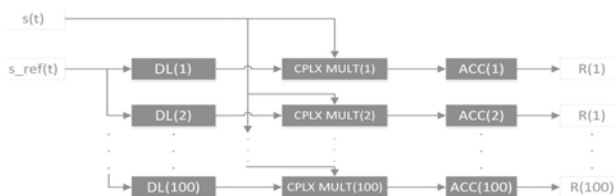
Rys. 4. Schemat toru przetwarzania

Na wejściu układu znajduje przetwornik analogowo-cyfrowy. W badaniach wykorzystano ADC pracujący z częstotliwością próbkowania $6,25 \text{ GHz}$. Dokonuje on akwizycji sygnału w dwóch kanałach: referencyjnym (bezpośrednim) i pomiarowym (opóźnionym), zapisując dane w postaci 8-bitowych próbek. Daje to strumień danych o wielkości 100 Gbps. Przesłanie takiej ilości danych w czasie rzeczywistym jest wymagające, natomiast przetworzenie w standardowym układzie programowalnym prawie niemożliwe. Konieczne jest buforowanie danych oraz podział czasu pracy na fazy akwizycji oraz przesyłania. Mimo takiego, upraszczającego implementację, podejścia, w dalszym ciągu operuje się na licznych zbiorze próbek. Wobec tego zasadnym wydaje się zastosowanie przetwarzania wstępnego, które pozwoli na redukcję ilości danych. Główną trudnością realizacji takiego bloku jest osiągnięcie odpowiedniej częstotliwości pracy, która w idealnym przypadku powinna dorównywać częstotliwości pracy ADC. Z bloku przetwarzania wstępnego próbki podaje się do układu detektora korelacyjnego. Dzięki zmniejszeniu strumienia danych blok detektora może pracować na zegarze o niższej częstotliwości. Z istoty korelacji wynika konieczność zastosowania filtra dolnoprzepustowego, tak więc strumień danych za detektorem ulega dalszemu zmniejszeniu. W ramach badań nad algorytmem testowano możliwości implementacji klasycznych metod przetwarzania sygnału wielkiej częstotliwości, które pozwoliłyby na zredukowanie strumienia danych. Analizowany sygnał w procesie przetwarzania wstępnego poddano filtracji pasmowej w paśmie od 1 do 2 GHz. Następnie dokonano demodulacji kwadraturowej wyznaczając składowe synfazową i kwadraturową w paśmie podstawowym w zakresie do 500 MHz co pozwoliło na redukcję częstotliwości próbkowania do 1 GHz. Zastosowanie powyższych operacji pozwoliło zmniejszyć ilość danych o 83%.

Korelator cyfrowy

Najważniejszym blokiem układu przetwarzania jest detektor korelacyjny. Przeprowadzono eksperymenty

numeryczne z wykorzystaniem sygnału zarejestrowanego w laboratoryjnym układzie pomiarowym. Testowano korelatory działające na sygnale rzeczywistym lub zespolonym, w pasmie radiowym lub z uprzednią konwersją do pasma podstawowego, dokonujące obliczeń w dziedzinie czasu lub częstotliwości. Podstawowa wersja algorytmu bazuje na klasycznej postaci korelatora w dziedzinie czasu [12-13], stanowiąc jego zdyskretyzowaną implementację. Schemat działania takiego korelatora przedstawiono na rys. 5.

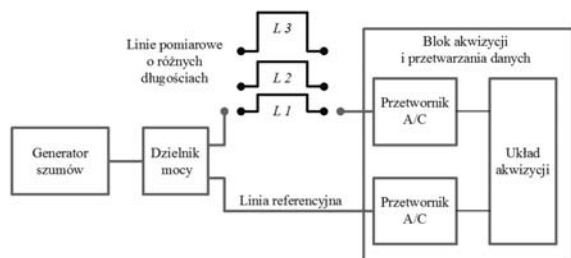


Rys. 5. Schemat ideowy korelatora w dziedzinie czasu

Sygnal referencyjny podawany jest na linii opóźniającej o różnych wartościach opóźnienia τ . Po przejściu przez daną linię wyznacza się wektor wartości sygnału referencyjnego z wektorem sygnału odebranego (sygnały mogą być zespolone – przetwarzanie kwadraturowe), a następnie sumuje się zadaną ilość próbek wektora wynikowego. Otrzymana suma jest wartością współczynnika korelacji $R(\tau)$, gdzie τ jest dyskretną wartością opóźnienia wnoszoną przez daną linię.

Pomiary laboratoryjne

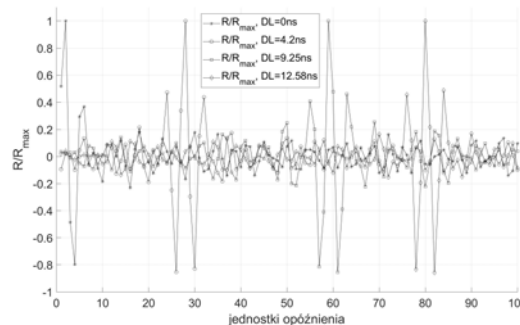
W celu weryfikacji możliwości wykorzystania radaru szumowego do wykrywania obiektów metalowych ukrytych w gruncie przeprowadzona została seria eksperymentów w układzie pomiarowym, którego schemat przedstawiony został na rys. 6. Zgodnie z założeniami jako źródło sygnału szumowego został wykorzystany szerokopasmowy generator szumów, z którego sygnał rozdzielany został na dwa kanały. Jeden kanał stanowił źródło sygnału referencyjnego. Natomiast drugi kanał, poprzez włączenie dodatkowych linii opóźniających o różnych długościach, imitował sygnał odbity od obiektów umieszczonych w gruncie na różnych głębokościach. Sygnały z obydwu kanałów podlegały pomiarowi z wykorzystaniem szerokopasmowych przetworników analogowo-cyfrowych, a następnie przetwarzaniu z wykorzystaniem ultraszybkich układów programowalnych. Kluczową kwestią, stanowiącą przedmiot analizy w niniejszych eksperymentach, był wpływ parametrów przetwarzania (pasma przetworników oraz szybkości przetwarzania) na jakość detekcji potencjalnych obiektów ukrytych w gruncie.



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiarowego wykorzystanego w eksperymencie.

W oparciu o powyższy schemat zbudowane zostało stanowisko pomiarowe. W eksperymentach jako źródło sygnału szumowego wykorzystany został generator

szumów typu NMA2513-2T firmy MICRONETCS, o paśmie pracy od 10MHz do 4000 MHz. W celu imitacji różnych odległości od obiektu zastosowano trzy linie koncentryczne typu RG 405 o długościach odpowiadających opóźnieniom: 4,2, 9,25 oraz 12,58 ns. Aby przenieść całe pasmo sygnału szumowego wykorzystano przetworniki analogowo-cyfrowe dwukanałowego digitizera typu PXI 5186 firmy National Instruments. Pozwoliło to na akwizycję danych z częstotliwością próbkowania równą 6,25 GS/s, z dokładnością 8 bitów w dwóch kanałach jednocześnie. Ze względu na dużą liczbę danych przetwarzanie sygnału realizowane było w trybie offline. W celu odpowiedniej archiwizacji danych z przetworników A/C opracowana została specjalna aplikacja w środowisku LabVIEW, pozwalająca na rejestrację serii po 1 000 000 próbek, co odpowiada czasowi pomiaru równemu 160 μ s. Zebrane w ten sposób dane następnie poddane zostały przetwarzaniu w symulowanym układzie programowalnym FPGA. Na rys. 7 przedstawiono wyniki korelacji sygnału referencyjnego z sygnałem opóźnionym za pomocą dodatkowych odcinków linii o 4,2, 9,25 oraz 12,58 ns. Przebiegi dla otrzymanych funkcji korelacji są zgodne z oczekiwanymi [14 – 15], zaś maksima przypadają dla opóźnień zgodnych z wyliczonymi dla linii użytych w eksperymencie pomiarowym.



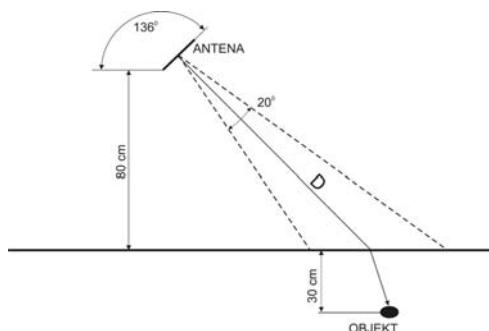
Rys. 7. Porównanie wyników korelacji dla różnych opóźnień (odległości celu)

Istotnym problemem badawczym było określenie możliwego do wykorzystania pasma sygnału. Przy stałej częstotliwości próbkowania wynoszącej 6,25GHz dokonano prób skorelowania sygnałów o pasmach 0 – 3,125GHz (całość wyników ADC), 20-1980MHz oraz 1-2GHz. Poprawne odtworzenie przebiegu funkcji korelacji sygnału szumowego było możliwe dopiero dla najwęższego z badanych pasm. Dla sygnału spróbkowanego z częstotliwością Nyquista w wyniku obliczeń otrzymano tylko obwiednię spodziewanego przebiegu. Mając jednak na względzie potencjalną aplikację tworzonego algorytmu, jaką jest georadar, można przyjąć, że obwiednia jest wynikiem zadowalającym, zwłaszcza przy korzyściach płynących z szerszego pasma, jakimi są zwężenie i wyższy poziom listka głównego.

Pomiary poligonowe

W celu weryfikacji możliwości wykorzystania radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie przeprowadzona została seria eksperymentów poligonowych w układzie pomiarowym, którego schemat przedstawiony został na rys. 8. Anteny radaru szumowego umieszczone zostały na wysokości 80 cm nad poziomem gruntu z jednoczesnym pochyleniem ich w stosunku do tego poziomu o kąt 46°. Parametry anten w takim przypadku pozwalały na obserwację wycinka ziemi o wymiarach około 60 x 60 cm i możliwość pomiaru odległości ukośnej D do ukrytego obiektu. W wyznaczonym

obszarze obserwacji na głębokości 30 cm umieszczono imitację obiektu w postaci rogu odbijającego, który na wybranej częstotliwości pracy radaru równej 2.5 GHz charakteryzował się skuteczną powierzchnią rozproszenia $\sigma = 0.008 \text{ m}^2$.

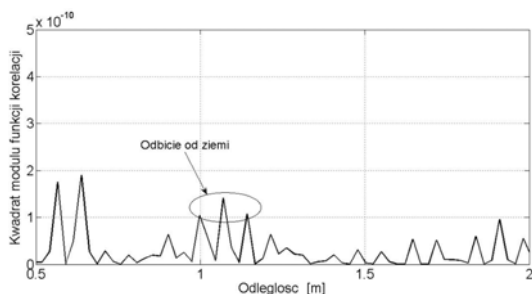


Rys. 8. Schemat blokowy poligonowego stanowiska pomiarowego.

Do pomiarów wykorzystano demonstrator radaru szumowego, którego schemat blokowy przedstawia rys. 3. Pomiary przeprowadzono dla następujących sytuacji:

- obserwacja powierzchni gruntu bez obiektu,
- obserwacja powierzchni gruntu z wykonanym w nim zagłębieniu o wymiarach 25x25x30 cm,
- obserwacja powierzchni gruntu z umieszczonym obiektem w zagłębieniu po jego zasypaniu

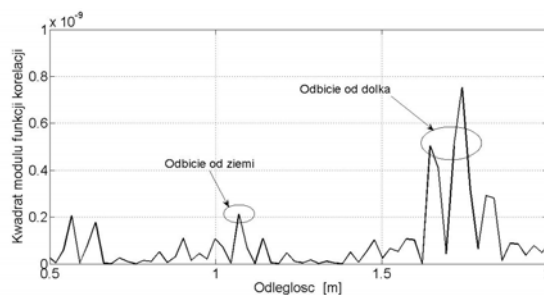
Pomiary te pozwoliły na weryfikację możliwości wykorzystania radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie. Na rys. 9 przedstawiono wynik przetwarzania korelacyjnego sygnału szumowego dla sytuacji a), natomiast na rys. 10 i 11 odpowiednio dla sytuacji b) i c).



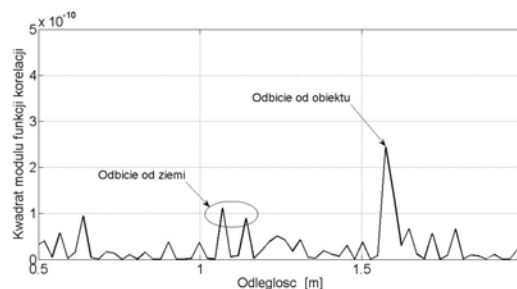
Rys. 9. Wartość kwadratu modułu funkcji korelacji $R(\tau)$ dla przypadku obserwacji sytuacji a).

Z przedstawionych wykresów wynika jasno, że z powodzeniem można użyć szerokopasmowego radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie i nie tylko. Jak pokazuje rys. 10 możliwe jest także wykrywanie wszelkich nieciągłości samego gruntu. W analizowanym przypadku nieciągłością ośrodka propagacji, było wykonane zagłębienie wypełnione powietrzem w skanowanej powierzchni gruntu (ziemia-powietrze-ziemia). Nieciągłość ta została z powodzeniem wykryta przez radar szumowy.

Na rys. 11 przedstawiono wynik przetwarzania korelacyjnego dla przypadku, gdy w gruncie ukryty był obiekt o $\sigma_c = 0.008 \text{ m}^2$, na odległości ukośnej do ziemi D równej około 110 cm i głębokości 30 cm. Radar szumowy wykrywa taki obiekt z jakością definiowaną przez P_s/P_{sz} równym 6 dB, tzn. moc pików korelacyjnych dla $\tau = \tau_{corr}$ jest 4 razy większa od mocy tła szumowego w otoczeniu $\tau \neq \tau_{corr}$.



Rys. 10. Wartość kwadratu modułu funkcji korelacji $R(\tau)$ dla przypadku obserwacji sytuacji b)



Rys. 11. Wartość kwadratu modułu funkcji korelacji $R(\tau)$ dla przypadku obserwacji sytuacji a).

W tym miejscu wyjaśnienia wymaga usytuowanie względem powierzchni ziemi zakopanych w niej obiektów. Otóż radar dokonuje pomiaru czasu jaki upłynie od chwili wystania sygnału sondującego do chwili jego powrotu po odbiciu się go od obiektu. Na charakterystykach 9 10 i 11 odległość wyznaczono dla stałej wartości prędkości fali elektromagnetycznej równej prędkości światła. W gruncie jednak fala elektromagnetyczna rozchodzi się wolniej. Dla przenikalności elektrycznej badanego gruntu wynoszącej około 4, prędkość rozchodzenia się w nim fali maleje dwukrotnie.

Wnioski

Prezentowana w artykule koncepcja radaru do wykrywania płytko zakopanych obiektów zakłada użycie sygnału szumowego generowanego analogowo w paśmie $1 \div 3 \text{ GHz}$ z mocą rzędu pojedynczych mikrowatów. Przewiduje się konstrukcję modułową radaru w postaci zunifikowanych podzespołów takich jak system antenowy, odbiornik Front-End, system akwizycji danych oraz przedstawiono koncepcję przetwarzania sygnałów w oparciu o struktury FPGA. Koncepcja użycia sygnału losowego umożliwia pracę wielu nadajników i wielu odbiorników w tej samej przestrzeni z uwagi na fakt, że sygnały szumowe są sygnałami wzajemnie ortogonalnymi. Przedstawiona koncepcja radaru szumowego może być wykorzystana do budowy systemu rozpoznania terenu pod kątem poszukiwania min ukrytych np. na drodze przejazdu kolumny pojazdów wojskowych. Przebadane algorytmy przetwarzania sygnału szumowego nadają się do implementacji w struktury FPGA. Korzyścią z wykorzystania tej platformy może być nie tylko równoległe obliczanie współczynnika korelacji dla wielu linii opóźniających ale także zdolność na odebranie kolejnych sondowań w czasie krótszym niż potrzebny na przetworzenie jednego z nich. Kluczowe znaczenie na wydajność docelowej aplikacji będą miały wykorzystane interfejsy przesyłu danych oraz możliwa do osiągnięcia częstotliwość pracy detektorów korelacyjnych oraz układów konwersji strumienia danych z szeregowego na równoległy.

Po przeanalizowaniu różnych wariantów algorytmu można wyodrębnić dwa podejścia do zadania implementacji korelatora szumowego w układach programowalnych. Jedno z podejść zakłada osiągnięcie jak największej prędkości odświeżania informacji. Będzie ono wciąż odległe od przetwarzania w czasie rzeczywistym. Wynika to zarówno z rozmiaru strumienia danych jak i z samych algorytmów przetwarzania, które operują na określonych ramach sygnału (FFT) lub wykorzystują układy sumujące – akumulatory – o zadanym czasie sumowania. Ponadto, dla uzyskania zadowalającej przepustowości, należałoby rozważyć wykorzystanie analogowych układów przetwarzania wstępnego i przeniesienie przetwornika A/C do części częstotliwości pośredniej toru przetwarzania. Drugie podejście bazuje na właściwościach aplikacji – w badaniach georadarowych zazwyczaj rozważa się nieruchomy cel oraz niewielką (w porównaniu do prędkości fali EM) prędkość nośnika radaru. W podejściu takim podział na fazy akwizycji, przesyłania i przetwarzania nie jest problemem, ponadto można wydłużać czas obserwacji, co przyczyni się do poprawy jakości detekcji korelacyjnej.

Autorzy: dr hab. inż. Waldemar Susek, prof. WAT, E-mail: waldemar.susek@wat.edu.pl; prof. dr hab. inż. Bronisław Stec, E-mail: bronislaw.stec@wat.edu.pl; mgr inż. Michał Kniola, E-mail: michal.kniola@wat.edu.pl; dr inż. Mirosław Czyżewski, E-mail: miroslaw.czyzewski@wat.edu.pl; Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa.

LITERATURA

- [1] Giannakis I., Giannopoulos A., Warren C., A Realistic FDTD Numerical Modeling Framework of Ground Penetrating Radar for Landmine Detection, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9 (2016), Issue: 1, pp. 37 - 51, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2468597,
- [2] Shao W., Bouzerdoum A., Phung S. L., Signal Classification for Ground Penetrating Radar Using Sparse Kernel Feature Selection, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (2014), Issue: 12, pp. 4670 - 4680, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2341605
- [3] Yarovoy A., Landmine, and unexploded ordnance detection, and classification with ground penetrating radar in *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, (2009), Elsevier Science, pp. 445–455.S.
- [4] Borgioli G., Capineri L., Falorni P., Matucci S., Windsor C. G., The detection of buried pipes from time-of-flight radar data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46, (2008), no. 8, pp. 2254–2266,
- [5] L. Li A., Tan E-C., Jhamb K., Rambabu K., Buried Object Characterization Using Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60, (2012), no. 8, pp. 2564-2664,
- [6] Pasternak M., Karczewski J., Silko D., Miluski W., Łapiński M., Kaczmarek P., Stepped frequency continuous wave GPR unit for unexploded ordnance and improvised explosive device detection”, *12th International Radar Symposium (IRS)*,(2011), pp: 105 – 109,
- [7] Pasternak M., red., *Radarowa penetracja gruntu*, GPR, WKiŁ, Warszawa 2015,
- [8] Yi Xu., Narayanan R. M., Xiaojian Xu., Curtis J. O., Polarimetric processing of coherent random noise radar data for buried object detection, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, (2001), no. 3,
- [9] Lai C. P., Narayanan R. M., Ultrawideband random noise radar design for through-wall surveillance, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, (2010), no. 4, pp. 1716-1730,
- [10] Susek W. Demonstrator radaru szumowego bliskiego zasięgu z korelatorem analogowym w paśmie X, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, (2012), nr 10a,
- [11] Pasternak M., Miluski W., Czarniecki W., Pietrasieński J., An optoelectronic-inertial system for handheld GPR positioning, *Proc. of International Radar Symposium*, (2014),
- [12] Susek W., Stec B., Broadband microwave correlator of noise signals, *Metrology and Measurement Systems*, 17, (2010), no. 2, ss. 289-298, ,
- [13] Susek W., Stec B., Rećko C., Noise radar with microwave correlation receiver, *Acta Physica Polonica A*, 119, (2011), no. 4, pp. 483 – 488,
- [14] Axelsson S. R. J., Noise radar using random phase and frequency modulation, *IEEE Trans. Geo. Remote Sens.*, (2004), 42, no. 11, pp. 2370–2384.
- [15] Axelsson S. R. J., Noise radar for range/Doppler processing and digital beamforming using low-bit ADC, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* vol. 41, (2003), no. 12, pp.2703–2720,