

doi:10.15199/48.2015.03.21

Sensor radarowy z sygnałem szumowym dla systemu obrony aktywnej*

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozwiązanie radaru szumowego bliskiego zasięgu z cyfrową linią opóźniająca i cyfrowym układem detektora korelacyjnego. Radar ten składa się z trzech podstawowych układów: nadajnika sygnału szumowego, odbiornika Front-End z zerową wartością częstotliwości pośredniej oraz cyfrowego układu detektora korelacyjnego zrealizowanego w strukturze FPGA. Przedstawione zastosowanie rozwiązania praktycznego radaru szumowego jest zastosowaniem nowatorskim. Pokazuje ono, że pewne cechy radarów szumowych uchodzące w klasycznym zastosowaniu radarów za wady, w innym zastosowaniu mogą stać się zaletami. Takim zastosowaniem jest na przykład zaproponowana przez autorów metoda radarowego monitorowania stref ochronnych za pomocą radaru szumowego o bardzo niskim potencjale energetycznym w systemie obrony aktywnej obiektów mobilnych. Możliwość jednoczesnego wystawienia wielu barier ochronnych znajdujących się na różnej odległości od radaru, oraz możliwość wyznaczenia prędkości radialnej obiektu, który przekracza daną barierę powodują, że proces podjęcia decyzji o uruchomieniu obrony aktywnej obciążony jest bardzo małym ryzykiem.

Abstract. The solution to the noise short-range radar with digital delay line detector and a digital correlation system is presented. Radar is composed of three main systems: the noise signal transmitter, front-end zero intermediate frequency receiver and digital correlation detector circuit implemented in FPGA structure. The use of the noise of the radar practical solution is the use of the novel. It shows that some of the features of radar noise escaping in a classic use of radar for defects in another application may become advantages. Such use is, for example, the method proposed by the authors of the radar monitoring of protection zones the noise radar with a very low energy potential of active defense system of mobile objects. The ability to simultaneously issue multiple safety barriers located at different distances from the radar, and the ability to determine the radial velocity of the object exceeds the particular barrier to make the process of deciding to launch active defense poses a very low risk of making a wrong decision (**Noise signal radar sensor of active defense system**)

Słowa kluczowe: Telekomunikacja, radar, sygnał szumowy, korelator.

Keywords: Telecommunications, Radar, Noise signal, Correlator.

Wstęp

Radary szumowe to radary, które wykorzystują sygnały losowe lub pseudolosowe do oświetlenia celu. Ich podstawowe parametry to szerokie widmo sygnału, mała gęstość widmowa mocy i możliwość uzyskania dużej czułości urządzeń odbiorczych [1]. Wybór sygnału sondującego jest jednym z podstawowych problemów przy projektowaniu radaru. Właściwości sygnału sondującego z punktu widzenia zastosowań radarowych opisuje się za pomocą funkcji niejednoznaczności. Sygnał losowy o dużym iloczynie czasu trwania i szerokości pasma umożliwia uzyskanie funkcji niejednoznaczności w kształcie odwróconej pinezki, co zapewnia dokładny pomiar zarówno odległości jak i prędkości radialnej celu. Typową funkcję niejednoznaczności χ sygnału losowego opisano zależnością (1) i przedstawiono na rys. 1.

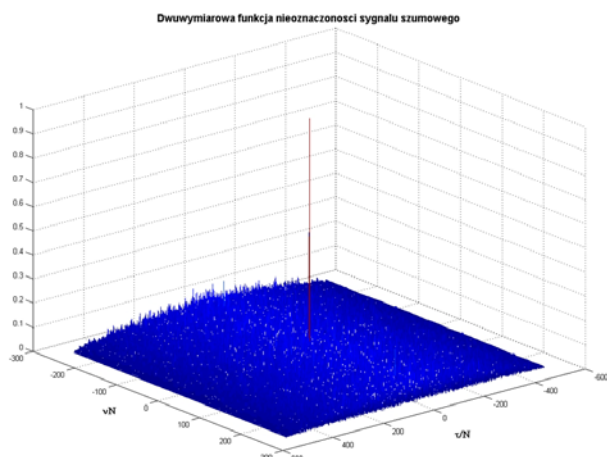
$$(1) \quad \chi(\tau, \alpha) = \left| \sqrt{|\alpha|} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(\alpha(t - \tau)) dt \right|$$

gdzie: $\alpha = 1 - 2v/c$ współczynnik skalowania czasu, v – prędkość radialna obiektu, c – prędkość światła, τ – opóźnienie, $s(t)$ – sygnał odebrany przez radar.

Odbiornik korelacyjny stanowi jeden z podstawowych układów radaru szumowego. Zasada korelacyjnej detekcji koherentnej sygnału szumowego pozwala na pracę wielu urządzeń w tym samym zakresie częstotliwości bez wzajemnego zakłócania się. Radar szumowy krótkiego zasięgu został tu zastosowany jako sensor systemu obrony aktywnej wozów bojowych.

Wozy bojowe w trakcie realizacji zadań narażone są na ataki rakiet i pocisków z ładunkami kumulacyjnymi typu RPG (**Ręczny Granatnik Przeciwpancerne**). Ataki mogą być realizowane z małej odległości przez to czas na obronę jest bardzo krótki i nie przekracza 1 sekundy. Ważnym elementem obrony jest wykrycie atakującego pocisku i określenie jego parametrów lotu. Najważniejsze z nich to: prędkość, odległość od atakowanego pojazdu oraz kierunek lotu. Parametry te mają wpływ na wybranie odpowiedniego sposobu obrony. Wszystkie te czynności muszą być wykonane w bardzo krótkim czasie praktycznie bez ingerencji załogi pojazdu, a w większości przypadków w sposób automatyczny. Jednym ze sposobów wykrycia atakujących pocisków jest zastosowanie radaru pracującego w zakresie mikrofalowym a precyzyjniej w zakresie fal milimetrowych lub centymetrowych. Jak każdy aktywny radar, tak i radar szumowy wykrywa obiekty wysyłając w ich kierunku sygnał radiowy i odbierając odbite od niego echo.

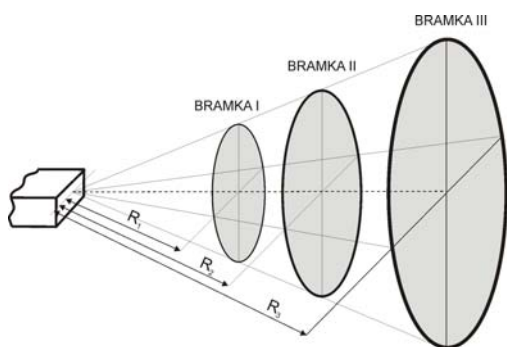
Ze względu na właściwości radarów szumowych [2, 3], dla celów obrony aktywnej pojazdu przed pociskami kumulacyjnymi opracowano sensor mikrofalowy pracujący w paśmie X o niskim potencjale energetycznym w postaci radaru z sygnałem szumowym i cyfrowym korelatorem. Radar ten jest w stanie określić odległość do celu z



Rys.1. Przykładowa postać dwuwymiarowej funkcji niejednoznaczności sygnału szumowego.

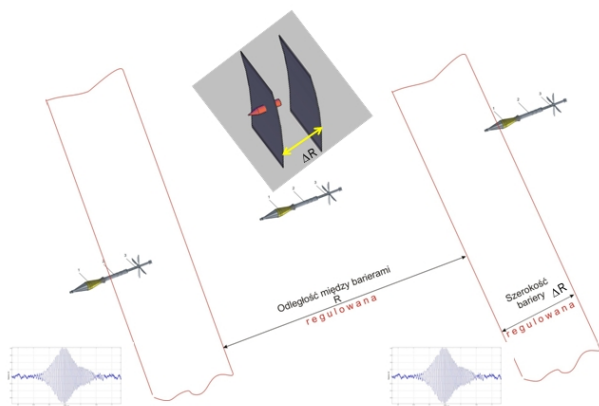
*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2014 jako projekt rozwojowy O R00 0062 11

dokładnością do ± 0.5 m. Założono, że wyznaczanie odległości odbywać się będzie w sposób dyskretny, tworząc tzw. bariery ochronne. Idea barier polega na tym, że na stałe ustalone są parametry cyfrowych linii opóźniających. W takiej sytuacji radar ciągle monitoruje wybrany fragment przestrzeni, którego wymiary są zdeterminowane przez kształt charakterystyki antenowej, długość linii opóźniającej i szerokość pasma sygnału sondującego. Ilość stref detekcji, ich szerokość jak również odległość od radaru może ulegać zmianie. Szerokość bariery może się zmieniać od dziesiątków centymetrów do pojedynczych metrów. Regulacja szerokości bariery ochronnej ΔR odbywa na drodze sprzętowej. Polega ona na doborze odpowiedniej szerokości pasma B zajmowanego przez sygnał szumowy. Szerokość bariery można wtedy obliczyć z zależności $\Delta R = c/(2B)$. Istnieje w związku z tym możliwość określenia miejsca położenia celu w przestrzeni z dokładnością do obszaru wyznaczonego przez parametry bariery. Istnieje także możliwość wyznaczenia prędkości radialnej pocisku [2] podczas jego przechodzenia przez barierę. Ideę zastosowania radaru szumowego do detekcji szybko poruszającego się pocisku w systemie obrony aktywnej wozu bojowego przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Koncepcja wykorzystania różnych długości linii opóźniających w radarze szumowego bliskiego zasięgu dla celów utworzenia stref ochronnych na odległościach R_1 , R_2 , R_3 .

Zakłada ona, że pocisk poruszający się z prędkością około 300 m/s o skutecznej powierzchni rozproszenia rzędu 0.05 m^2 wykrywany będzie w trakcie przekraczania barier ochronnych. Fakt przekroczenia określonej bariery będzie informacją na jakiej odległości znajduje się pocisk. W czasie przekraczania bariery obliczona zostanie także prędkość radialna pocisku. Na podstawie zestawienia danych o czasie przekraczania przez pocisk poszczególnych barier oraz jego kolejnych prędkości radialnych, wypracowywana jest decyzja o uruchomieniu lub też nie systemu obrony aktywnej.

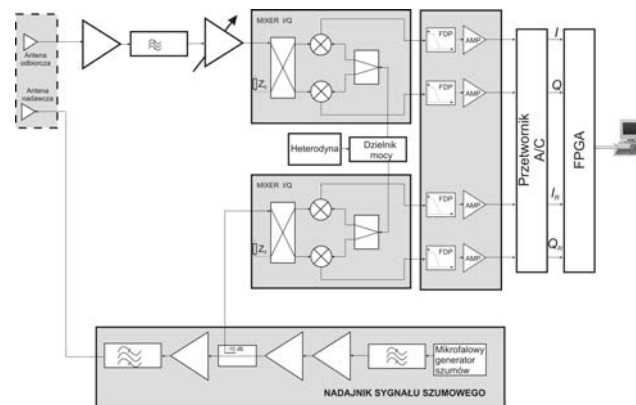


Rys. 2. Koncepcja wykrywania celu poprzez detekcję naruszenia barier ochronnych utworzonych za pomocą radaru szumowego.

Z uwagi na fakt, że radar promieniuje sygnał szumowy ciągły o bardzo małej mocy ($40 \mu\text{W}$), to wykrycie jego obecności staje się bardzo utrudnione, a jednocześnie może on pracować w otoczeniu innych urządzeń bez wzajemnego zakłócania się. Radary szumowe tego typu mogą być skutecznie wykorzystane w systemach ochrony i monitorowania bliskiej otaczającej przestrzeni.

Rozwiązania techniczne radaru szumowego

Nadajnik takiego radaru jest nadajnikiem w którym sygnał wytwarzany jest przez źródło szumów wprost na częstotliwości mikrofalowej pasma X. Pierwotnym źródłem szumów jest dioda pracująca w warunkach kontrolowanego przebiecia lawinowego. Tak wytworzony sygnał jest wzmacniany w torze wzmacniająco-filtrującym. Filtracja jest tu niezbędna w celu określenia pasma zajmowanego przez sygnał sondujący oraz zabezpieczenia poszczególnych stopni wzmacniających przed przesterowaniem. Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy radaru szumowego bliskiego zasięgu z cyfrowym korelatorem, pracującego w paśmie X, natomiast na rysunkach 4 przedstawiono widok demonstratora takiego radaru.



Rys. 3. Schemat blokowy radaru szumowego bliskiego zasięgu z cyfrowym korelatorem, pracującego w paśmie X.

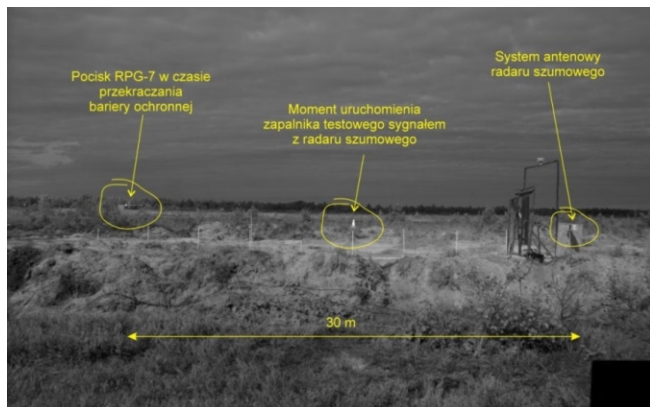
Zaproponowane rozwiązanie radaru szumowego spełnia funkcję sensora radarowego, którego zadaniem jest: wykrycie atakującego pocisku kumulacyjnego w znacznej odległości od bronionego obiektu, ocena jego parametrów ruchu tzn. kierunku, wysokości i prędkości, stwierdzenie czy zagrożenie atakiem dotyczy bronionego obiektu i jeżeli tak to uruchomienie aktywnych środków obrony, których zadaniem jest przechwycenie i zniszczenie pocisku w wyznaczonej strefie.



Rys. 4. Widok kompletnego układu radaru szumowego bliskiego zasięgu z korelatorem cyfrowym wraz z systemem antenowym.

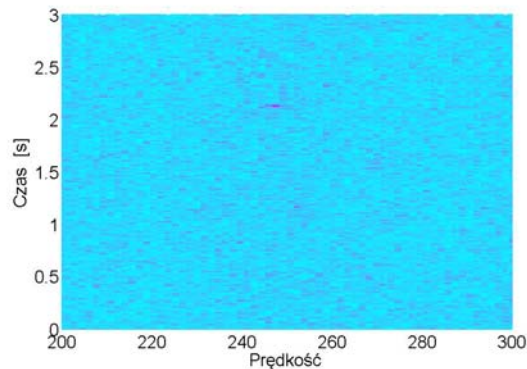
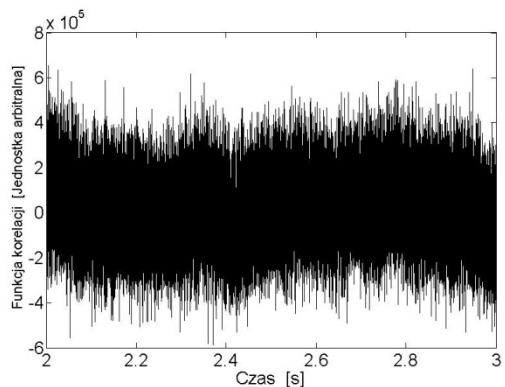
Pomiary eksperymentalne

Badania dotyczyły wykrywania pocisku z głowicą kumulacyjną poruszającego się z prędkością 240 – 260 m/s, którego skuteczna powierzchnia rozproszenia była rzędu setnych części metra kwadratowego. Radarem szumowym przedstawionym na powyższych rysunkach wykonano pomiary w rzeczywistych warunkach poligonowych przedstawionych na rys. 5.

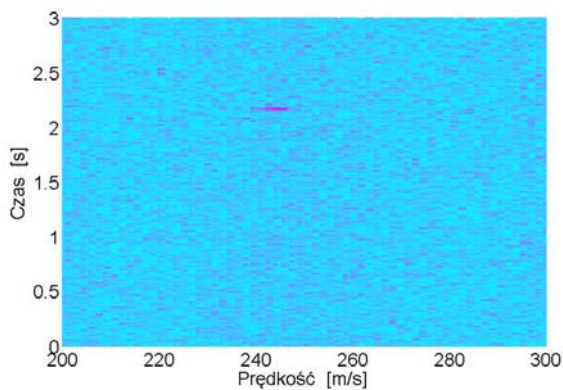
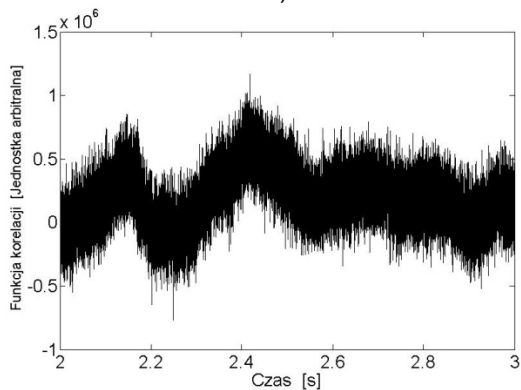


Rys. 5. Zdjęcie sytuacji poligonowej wykonane za pomocą szybkiej kamery.

Sensor radarowy ustawiony był w odległości 200 m od wyrzutni i 3 m w bok od linii strzału z antenami zwróconymi w kierunku nadlatującego pocisku. Radar umożliwił ustawienie jednocześnie trzech barier odległościowych w zakresie od 0 do 250 m co 1 m. Bariery ustawiane były za pomocą cyfrowej linii opóźniającej. Na rysunku 6 przedstawiono wynik pomiaru w dziedzinie czasu i w dziedzinie czas – częstotliwość dopplerowska dla sytuacji, gdy pocisk przekraczał bariery usytuowane na odległościach a) 45 m i b) 35 m od radaru. Analizując wyniki przetwarzania sygnału szumowego w dziedzinie częstotliwości w porównaniu do przetwarzania w dziedzinie czasu można zauważyć poprawę stosunku mocy sygnału do mocy zakłócenia na wyjściu korelatora. Jest to spowodowane tym, że dla dłuższego czasu integracji rośnie czułość odbiornika. Nie mniej jednak obecność przecieku bezpośredniego, oraz oddziaływanie tzw. *clutteru* powodują powstanie wysokiego poziomu szumu w funkcji niejednoznaczności tzw. *noise floor*, który ogranicza wykrywanie obiektów o małej skutecznej powierzchni rozproszenia na dużych odległościach. Jest to wyraźnie widoczne na dwuwymiarowych wykresach funkcji korelacji wzajemnej przedstawionych na rys. 6 a) i b). Na rysunku 7 zestawiono wyniki działania korelatora dla przypadku gdy pocisk przekraczał dwie kolejne bariery ochronne usytuowane w odległości 23 m i 12 m. Podobnie jak poprzednio przedstawiono wyniki dla przypadków przetwarzania w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości. Z pomiarów tych wynika, że istnieje możliwość przeprowadzenia detekcji zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości a także określenia prędkości radialnej celu podczas przekraczania poszczególnych bramek odległościowych oraz średniej prędkości poruszania się celu między barierami. W tym miejscu należy nadmienić, że oś czasu została związana z początkiem i końcem działania radaru, który był uruchamiany niesynchronicznie z czasem odpalenia pocisku.

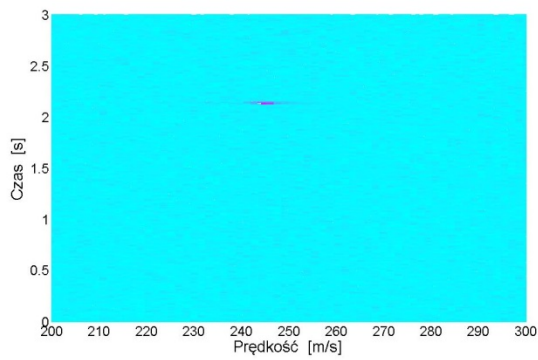
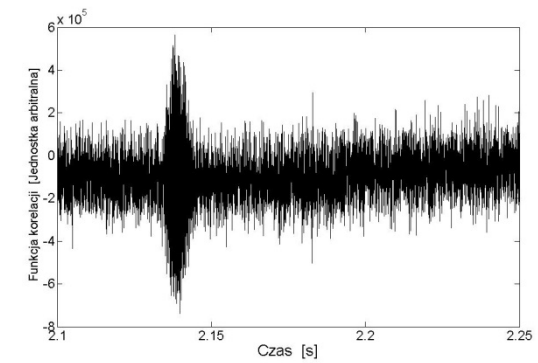


a)

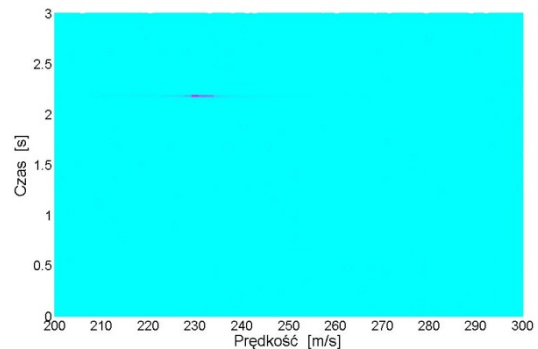
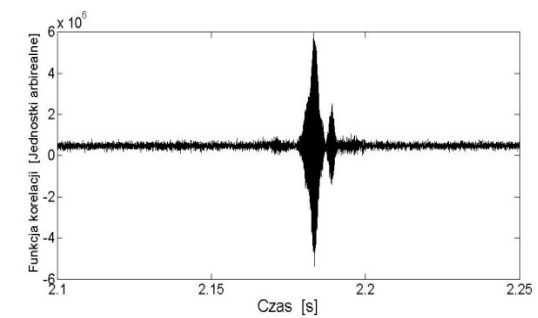


b)

Rys. 6. Wyniki przetwarzania sygnałów w radarze szumowym z korelatorem cyfrowym w przypadku obserwacji jednoczesnej dwóch barier ochronnych oddalonych od radaru o a) 45 m i b) 35.



a)



b)

Rys. 7. Wyniki przetwarzania sygnałów w radarze szumowym z korelatorem cyfrowym w przypadku obserwacji jednoczesnej dwóch barier ochronnych oddalonych od radaru o a) 23 m i b) 12 m.

W prezentowanym przypadku średnia prędkość radialna pocisku wyznaczana w danej komórce odległościowej wynosiła 248 m/s i ulegała zmniejszaniu wraz ze zbliżaniem się do radaru. Spowodowane to było dwoma czynnikami: po pierwsze w chwili przekraczania bramek nie działał już silnik marszowy pocisku i pocisk poruszał się ruchem jednostajnie opóźnionym a po drugie, boczne ustawienie anten w stosunku do linii strzału powodowało, że im pocisk był bliżej radaru tym mniejsza była jego prędkość radialna.

4. Wnioski

Zaproponowane rozwiązania radarów szumowych zarówno z analogową [4] jak i cyfrową korelacją [5 – 7] mogą być wykorzystane w specyficznych aplikacjach radaru szumowego bliskiego zasięgu takich jak: lokalizator istot żywych oraz sensor radarowy systemu obrony aktywnej obiektów mobilnych przed pociskami kumulacyjnymi.

Zaproponowana koncepcja strefowej obserwacji w odległości, daje możliwość zastosowania radaru z sygnałem ciągłym do monitorowania wybranych stref obserwacji. Radar szumowy z sygnałem ciągłym jest trudno wykrywalny, ponieważ jego sygnał jest bardzo podobny do szumów termicznych tła elektromagnetycznego. Zastosowany w nim detektor korelacyjny pozwala na osiągnięcie dużych zysków detekcji, a przez to relatywnie dużych zasięgów przy stosunkowo małej mocy sygnału nadajnika. Radary szumowe charakteryzują się „pinezkową” funkcją niejednoznaczności. Można więc za ich pomocą w sposób dokładny określić odległość i częstotliwość dopplerowską (prędkość radialną).

Sygnały szumowe pochodzące z innych źródeł pracujących w tym samym zakresie częstotliwości nie będąc skorelowanymi z sygnałem własnym radaru szumowego będą miały minimalny wpływ na jego parametry pracy.

LITERATURA

- [1] R. M. Narayanan and X. Xu, „Principles and applications of coherent random noise radar technology,” *Proc. SPIE.*, **5113**, 503-514 (2003).
- [2] Z. Li and R. Narayanan, "Doppler Visibility of Coherent Ultrawideband Random Noise Radar Systems," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, **42**(3), 904-916 (2006).
- [3] R. J. Axelson, "Noise Radar for Range Doppler Processing and Digital Beam-forming Using Low-Bit ADC," *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, **41**(12), 2703 – 2720 (2003).
- [4] W. Susek, "Demonstrator radaru szumowego bliskiego zasięgu z korelatorem analogowym w paśmie X", *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, 10a/2012, s. 106-110, (2012).
- [5] W. Susek, and B. Stec , "Broadband microwave correlator of noise signals," *Metrology and Measurement Systems*, **17**(2), 289-298 (2010).
- [6] W. Susek B. Stec, and Cz. Recko , "Noise Radar with Microwave Correlation Receiver", *Acta Physica Polonica A*, **119**(4), 483-487 (2010).
- [7] B. Stec, "Analysis of phase and amplitude characteristics of microwave phase discriminator with ring detectors", *Bull. WAT* (in Polish), **11**(423), 71-78 (1987).

Autorzy: dr hab. inż. Waldemar Susek, prof. WAT,
prof. dr hab. inż. Bronisław Stec, Wojskowa Akademia Techniczna,
Instytut Radioelektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
E-mail: Waldemar.Susek@wat.edu.pl, bstec@wat.edu.pl