

Demonstrator radaru szumowego bliskiego zasięgu z korelatorem analogowym w paśmie X

Streszczenie. W artykule przedstawiono zasadę kwadraturowej detekcji korelacyjnej sygnałów szumowych za pomocą analogowego szerokopasmowego korelatora mikrofalowego. Zaprezentowano wyniki pomiarów funkcji korelacji sygnałów szumowych oraz pokazano zastosowanie takiego rozwiązania w radarze szumowym do precyzyjnego określania zmian odległości a także szybkości tych zmian. Przedstawiono wyniki działania radaru szumowego bliskiego zasięgu w odniesieniu do obiektów stałych i ruchomych. Artykuł zakończono wnioskami i planami zastosowania prezentowanej techniki detekcji w szerokopasmowych radarach szumowych.

Abstract. A principle of quadrature correlation detection of noise signals using an analog broadband microwave correlator is presented in the paper. Measurement results for the correlation function of noise signals are shown and application of such solution in the noise radar for precise determination of distance changes and velocity of these changes is also presented. Results for short range noise radar operation are presented both for static and moving objects. Conclusions and future plans for applications of presented detection technique in broadband noise radars bring the paper to an end (**Demo of Noise radar with analog X-band correlator**)

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

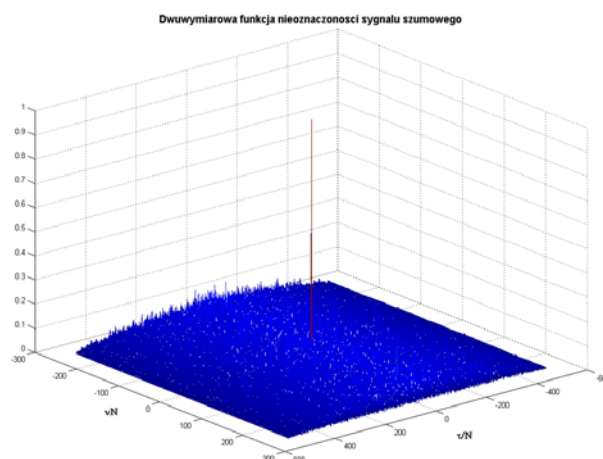
Keywords: Telecommunications, radar, noise signal, correlator,

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]. 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. W dotychczasowej literaturze prezentowane są trzy podstawowe typy odbiorników korelacyjnych: całkowicie analogowy odbiornik korelacyjny, analogowo-cyfrowy odbiornik korelacyjny i całkowicie cyfrowy odbiornik korelacyjny. Rozwój radarów szumowych obserwowany jest od ponad 50 lat. Analiza i przegląd literaturowy pokazuje, że w ostatnim czasie znacznie wzrosło zainteresowanie tego typu radarami. Rocznie ukazuje się kilkadziesiąt artykułów na temat radarów szumowych i znacząca ich część dotyczy koncepcji budowy radaru i jego analizy oraz przetwarzania sygnałów. Należy zauważyć, że radary szumowe w pełni wyczerpują własności radarów LPI (*Low Probability of Intercept*), przez co należy się spodziewać w najbliższym czasie znaczącego wzrostu ich gotowych aplikacji zarówno w zastosowaniach cywilnych jak i wojskowych. Już w 2000 roku raportowano o 13 szumowych radarach LPI spełniających 5 funkcji zastosowań wojskowych i 2 zastosowań cywilnych. Funkcje militarne to rozpoznanie pola walki, radary obrony powietrznej 2-D i 3-D czy naziemne systemy kierowania ogniem. Raportowane funkcje cywilne to jeden radar morski i jeden radar antykolizyjny.

Jak każdy aktywny radar, tak i radar szumowy wykrywa obiekty wysyłając w ich kierunku sygnał radiowy i odbierając odbite od niego echo. 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 jednoznaczny pomiar odległości i prędkości radialnej celu.

Typową funkcją niejednoznaczności χ sygnału losowego opisano zależnością (1) i przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Przykładowa postać dwuwymiarowej funkcji nieoznaczności wąskopasmowego sygnału szumowego.

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

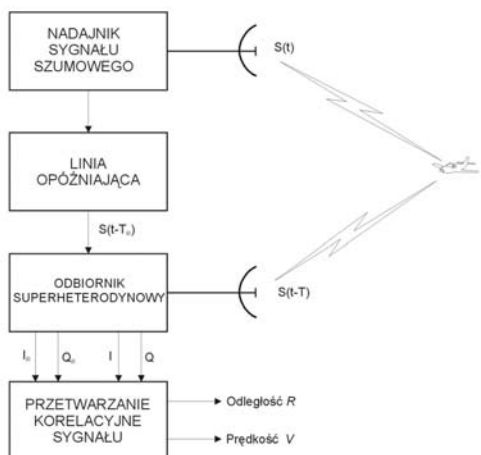
gdzie: $\alpha = 1 - 2v/c$ współczynnik skalowania czasu, v – prędkość radialna obiektu, c – prędkość światła, τ – opóźnienie, $s(t)$ – sygnał odebrany przez radar.

W artykule przedstawiono wyniki działania radaru bliskiego zasięgu, pracującego w paśmie X z mikrofalowym analogowym odbiornikiem korelacyjnym.

Zasada pracy radaru szumowego

Na rys. 2 przedstawiono główne bloki funkcjonalne wchodzące w skład radaru szumowego. Sygnał szumowy jest wysyłany w przestrzeń za pomocą nadajnika i anteny nadawczej, a po opóźnieniu o czas T równym czasowi, w jakim fala elektromagnetyczna przebywa drogę od radaru do celu i z powrotem, odbierany jest przez antenę odbiorczą. Jednocześnie część sygnału nadawanego podawana jest na linię opóźniającą, gdzie ulega opóźnieniu o czas T_{DL} . Czas opóźnienia linii może być stały lub regulowany. Odbiornik superheterodynowy wyposażony jest w dwa kanały: jeden dla sygnału odebranego, a drugi dla części sygnału nadawanego opóźnionego przez linię opóźniającą. Na wyjściu odbiornika po detekcji kwadraturowej uzyskiwana jest para sygnałów I i Q leżących w paśmie podstawowym. Na podstawie tych

sygnałów wyznaczana jest ich wzajemnej funkcji korelacji. Jeżeli czas opóźnienia będzie się zmieniał wystarczająco szybko, to w momencie $T_{DL}=T$ na wyjściu korelatora pojawi się pik korelacyjny na podstawie, którego możliwa jest estymacja odległości.



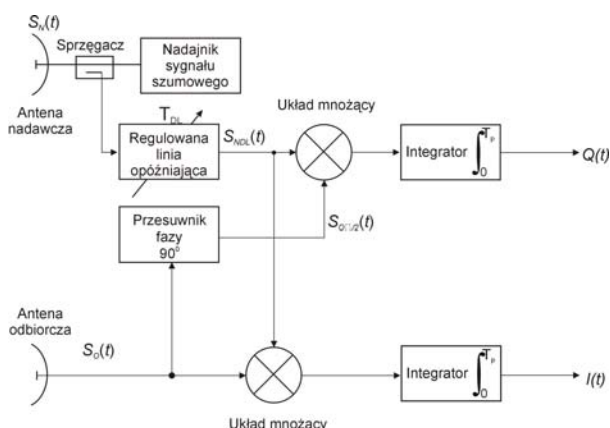
Rys. 2. Schemat blokowy radaru szumowego z zewnętrzną linią opóźniającą.

Możliwe jest także określenie prędkości celu względem radaru, dzięki określeniu przesunięcia dopplerowskiego częstotliwości nośnej sygnału sondującego. Parametr T_{DL} w linii opóźniającej i współczynnik skalowania czasu α_r w bloku przetwarzania korelacyjnego ulegają zmianie tak długo, aż uzyskana zostanie wartość maksymalna funkcji korelacji na wyjściu. Parametry te przyjmują wtedy wartości T_{DL0} i α_{r0} na podstawie, których obliczana jest odległość do celu i jego względna prędkość według zależności:

$$(2) \quad \begin{aligned} D_0 &= \frac{1}{2} T_{DL0} c \\ v &= \frac{1}{2} c (1 - \alpha_{r0}) \end{aligned}$$

Bezpośrednia kwadraturowa detekcja korelacyjna sygnału szumowego

W tym rozdziale zaprezentowana zostanie idea wyznaczenia wartości funkcji korelacji sygnałów szumowych o ograniczonym paśmie w zakresie mikrofalowym.



Rys. 3. Schemat ideowy kwadraturowego korelatora mikrofalowego sygnałów szumowych.

Analizę korelatora mikrofalowego przeprowadzono w oparciu o schemat ideowy przedstawiony na rys. 3. Zakładamy, że nadajnik generuje sygnał w postaci szumu o ograniczonym paśmie i rozkładzie normalnym z zerową wartością średnią i wariancją równą σ^2 . Sygnał generowany

przez nadajnik można opisać zależnością (3) [2], natomiast przebiegi w poszczególnych punktach układu opisują zależności (4) i (5).

$$(3) \quad S_N(t) = X(t)\cos(\omega_0 t) - Y(t)\sin(\omega_0 t)$$

$$(4) \quad S_{NDL}(t) = k_1 S_N(t - T_{DL})$$

$$(5) \quad S_O(t) = k_2 S_N\left(t - \frac{2D}{c}\right)$$

gdzie: D – odległość chwilowa między radarem a obiektem, ω_0 – częstotliwość środkowa pasma sygnału szumowego, k_1, k_2 – współczynniki, $X(t)$ i $Y(t)$ – niezależne stacjonarne procesy losowe o rozkładzie gaussowskim z zerową wartością średnią.

Wyrażenie opisujące chwilową odległość D między radarem a obiektem ma postać:

$$(6) \quad D = \frac{cT}{2} + vt + M \cos(\omega_m t)$$

gdzie: M i ω_m są odpowiednio amplitudą i pulsacją dodatkowego ruchu harmonicznego pewnych części obiektu.

Obiekt, jako całość może poruszać się z prędkością radialną v lub pozostawać w spoczynku. W wyniku wykonania operacji mnożenia sygnałów $S_{NDL}(t)$ z $S_O(t)$ oraz $S_{O;\pi/2}(t)$ z $S_{NDL}(t)$ i operacji całkowania, otrzymuje się wyrażenia na dwa kwadraturowe sygnały wyjściowe R_I i R_Q w postaci

$$(7) \quad R_I(\tau) = A(\tau) \cos\left(\omega_0 \left(\Delta T + \frac{2vt}{c} + \frac{2M}{c} \cos(\omega_m t)\right)\right)$$

$$(8) \quad R_Q(\tau) = A(\tau) \sin\left(\omega_0 \left(\Delta T + \frac{2vt}{c} + \frac{2M}{c} \cos(\omega_m t)\right)\right)$$

gdzie: $\Delta T = (T - T_{DL})$, $\tau = \Delta T + (2/c)(vt + M \cos(\omega_m t))$

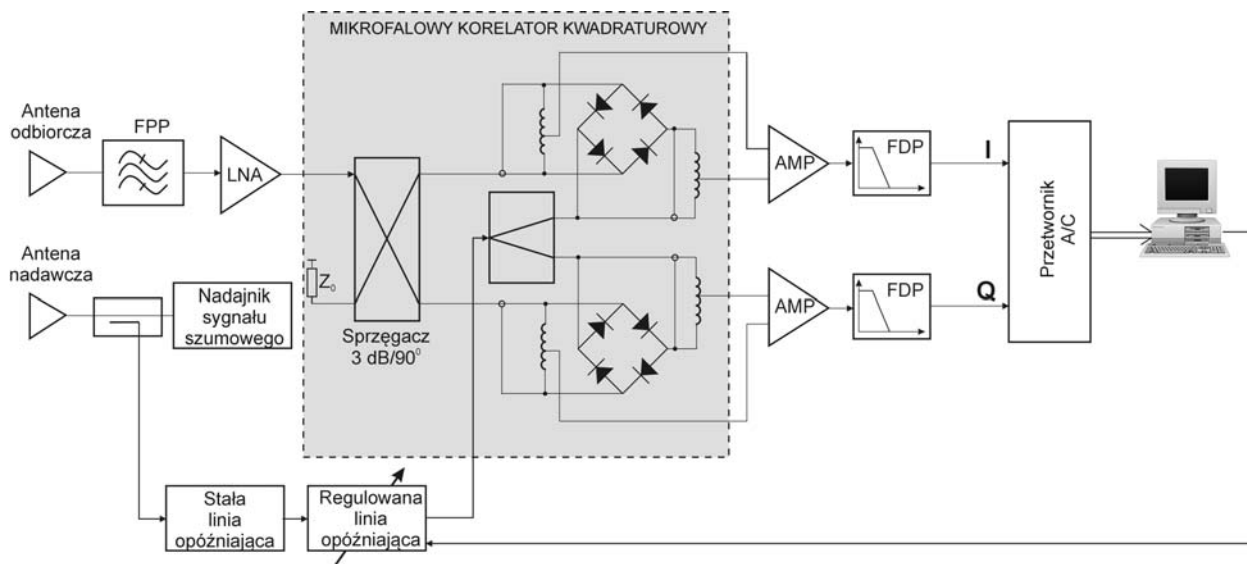
Wyrażenia (7) i (8) są składowymi kwadraturowymi funkcji korelacji sygnału szumowego nadawanego i odbieranego przez radar. Z przeprowadzonej analizy wynika, że w układzie sprzętowym zrealizowanym w oparciu o schemat ideowy z rys. 3, w odróżnieniu od przetwarzania cyfrowego [3], wyznaczana jest funkcja korelacji sygnału szumowego o ograniczonym paśmie [4]. Jeżeli $R(\tau)$ jest zespoloną reprezentacją funkcji korelacji, to analogicznie do zespolonej reprezentacji sygnału analitycznego można zdefiniować chwilową amplitudę A , fazę φ i pulsację ω przebiegu funkcji korelacji, jako:

$$(9) \quad A(\tau) = \sqrt{R_I^2(\tau) + R_Q^2(\tau)}$$

$$(10) \quad \varphi(t) = \arctan(R_Q(\tau) / R_I(\tau))$$

$$(11) \quad \omega(t) = \frac{d}{dt} \varphi(t)$$

Szczególne znaczenia, w przedstawionym sposobie korelacyjnej detekcji sygnału szumowego nabierają zależności (7) i (8). Pokazują one, że możliwe jest wykrywanie nieznacznych ruchów obiektu względem szumowego radaru obserwacyjnego. W zależności od wartości częstotliwości środkowej pasma sygnału szumowego, wielkość tych zmian może przybierać wartości od dziesiątków mm dla pasma S do ułamków milimetra dla pasma K.



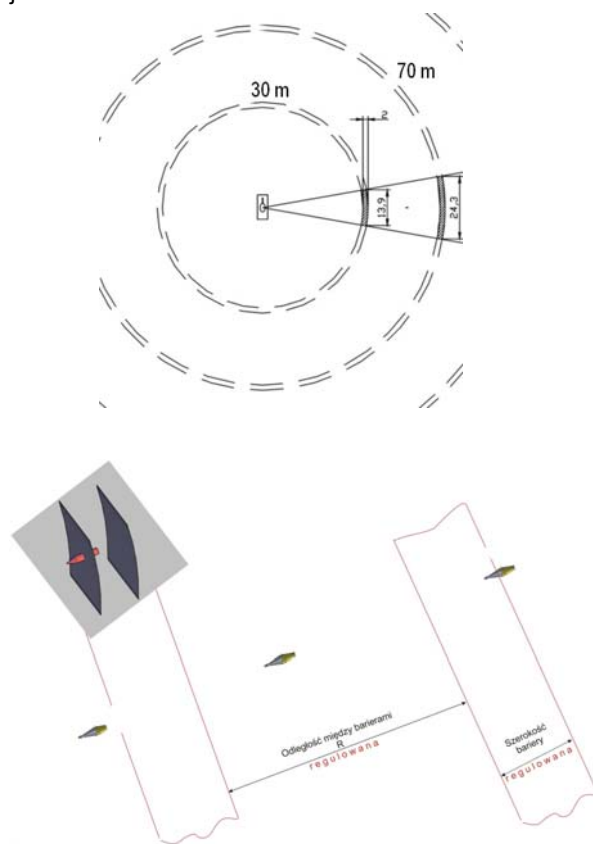
Rys.4. Schemat blokowy demonstratora radaru szumowego bliskiego zasięgu pracującego w paśmie X.

W przypadku, gdy $\tau = 0$, chwilowa amplituda osiąga wartość maksymalną $A(0) \approx k\sigma^2$. Wartość ta jest proporcjonalna do całkowitej mocy nadawanego sygnału szumowego.

Budowa i koncepcja wykorzystania radaru szumowego na pasmo X z analogowym korelatorem mikrofalowym

Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy radaru szumowego bliskiego zasięgu [5]. Składa się on z obwodów wejściowych, niskoszumnego wzmacniacza mikrofalowego, szerokopasmowego mikrofalowego korelatora kwadraturowego [6], analogowej linii opóźniającej, wzmacniaczy mcz. o dużym wzmacnieniu oraz układu zobrazowania informacji. Obwody wejściowe wyposażono w wymienne filtry mikrofalowe wykonane w technice NLP. Pasma filtrów można zmieniać od 150 MHz do 800 MHz, a ich częstotliwość środkowa wynosi 9.2 GHz. Wzmacniacz niskoszumny jest układem szerokopasmowym o wzmacnieniu 55 dB i współczynniku szumów nie gorszym niż 1.5 dB w paśmie pracy równym 800 MHz. Zarówno wzmacniacz w.cz. jak i filtry mikrofalowe zostały zaprojektowane, wykonane i przebadane w Zakładzie Mikrofal Instytutu Radioelektroniki WAT. Na wyjściu detektora kwadraturowego występują dwa sygnały I i Q opisane wzorami (7) i (8). Sygnały te podlegają wzmacnieniu we wzmacniaczach pomiarowych o regulowanym wzmacnieniu napięciowym od 100 do 10000. Pasma sygnałów wyjściowych korelatora jest ograniczane w filtrach dolnoprzepustowych. Zakres zmian pasma poddetekcyjnego wynosi od 10 Hz do 20 kHz. Tak przygotowane sygnały są dygitalizowane w przetworniku A/C i łączem USB przekazywane do komputera klasy PC, spełniającego funkcję układu przetwarzania i zobrazowania informacji. Nadajnik radaru szumowego składa się z półprzewodnikowego źródła szumów pierwotnych średniej mocy oraz ciągu wzmacniaczy i filtrów mikrofalowych. Uzyskano w ten sposób źródło sygnału szumowego pracujące na częstotliwości środkowej $f_0 = 9.2$ GHz z pasmem $B_{3dB} = 270$ MHz i gęstością widmową mocy $G_{sz} = -64$ dBm/Hz. Widmo mocy szumów kształtowane było ostatecznie przez wyjściowy filtr pasmowo-przepustowy FPP o równomiernie płaskiej charakterystyce transmitancji. Integralną częścią radaru jest analogowa linia opóźniająca wykonana tak, że jej opóźnienie odpowiada odległości pokonywanej przez falę elektromagnetyczną od radaru do celu i z powrotem równej 60 m. Tak, więc zastosowanie linii

o stałej długości zdeterminowało odległość, na jakiej będzie wykrywany obiekt tzn. 30 m. Tego typu radar umożliwia stworzenie pewnych ściśle określonych w przestrzeni stref obserwacji, których wycinek przedstawiono poglądowo na rys. 5. Wszelkie naruszenia tych stref będą sygnalizowane przez radar szumowy, jak również określana będzie prędkość, z jaką obiekt przekroczył daną strefę. Stosując linię o zmiennej długości można zmieniać odległość, w jakiej zostanie ustanowiona strefa ochronna.



Rys. 5. Koncepcja wykorzystania różnych długości linii opóźniających w radarze szumowym bliskiego zasięgu dla celów utworzenia stref ochronnych.

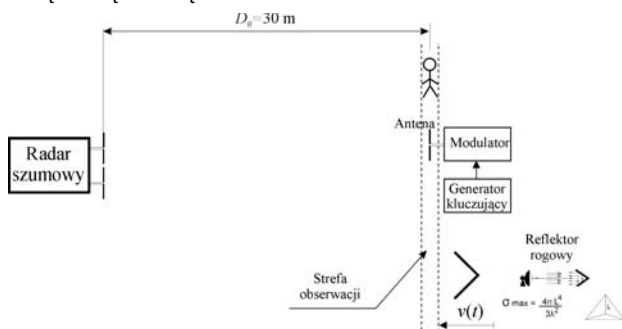
Regulacja szerokości bariery ochronnej D_B odbywa się w sposób bardzo prosty na drodze sprzętowej. Polega ona na doborze odpowiedniej szerokości pasma B zajmowanego przez sygnał szumowy. Szerokość bariery można obliczyć z następującej zależności:

$$(12) \quad D_B = \frac{c}{B}$$

W przypadku analizowanego radaru szerokość ta wynosi 1.1 m. Z uwagi na fakt, że radar promieniuje sygnał szumowy ciągle o 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 jak również mogą dawać informację o prędkości poruszającego się obiektu w wybranej strefie obserwacji.

Wyniki pomiarów

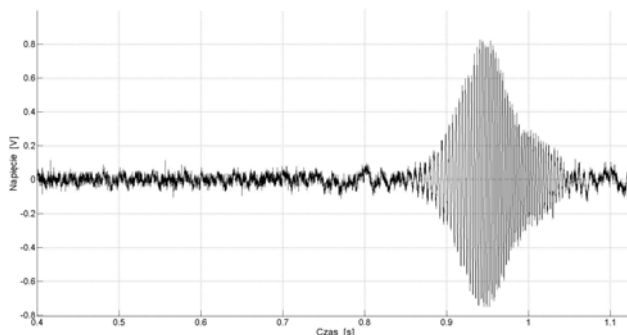
W układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 6 przeprowadzono pomiary odległości i prędkości radialnej różnych obiektów. Wykorzystano do tego celu radar szumowy zbudowany według schematu blokowego z rys. 4 o średniej mocy nadajnika $P_T = 40 \mu\text{W}$, którym wygnano pomiary następujących obiektów: reflektor rogowy, przełączaną antenę i człowiek.



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiarowego

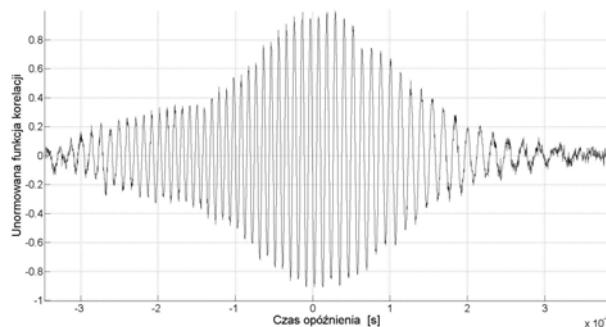
Reflektor rogowy

Do pomiarów prędkości użyto reflektora rogowego, którego średnia prędkość radialna v wynosiła około 5 m/s, a skuteczna powierzchnia rozproszenia $\sigma = 1 \text{ m}^2$. Na rys. 7 przedstawiono przebieg napięcia na wyjściu I demonstratora radaru w czasie, gdy reflektor rogowy z prędkością 5 m/s przekraczał strefę obserwacji radaru. Maksimum zarejestrowanego przebiegu występuje dla odległości $D = D_0 = 30 \text{ m}$, co jednocześnie odpowiada czasowi opóźnienia $\tau = 0$, funkcji korelacji sygnałów nadawanego i odebranego.



Rys. 7. Przebieg napięcia na wyjściu I demonstratora radaru szumowego pracującego w paśmie X, podczas przekraczania strefy obserwacji przez reflektor rogowy.

Zmiana czasu opóźnienia τ odbywała się poprzez zmianę odległości D reflektora rogowego od radaru szumowego według zależności $\tau = 2(D_0 - D)/c$. W związku z powyższym można narysować przebieg z rys. 7 w układzie współrzędnych funkcji korelacji [7] tzn. wartość $R(\tau)$ w funkcji opóźnienia τ . Przebieg ten przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Unormowana funkcja korelacji sygnałów szumowych nadawanego i odebranego w przypadku przekraczania strefy obserwacji przez reflektor rogowy.

Zmiana wartości czasu opóźnienia funkcji korelacji z rys. 8, związana jest z ruchem reflektora rogowego według zależności

$$(13) \quad \tau(t) = \frac{2vt}{c} = 2\pi f_{\text{Doppler}} t$$

Z zależności (13) wynika, że pulsacja przebiegu wyjściowego korelatora mikrofalowego jest wprost pulsacją dopplerowską, a przebieg ten można opisać następującą zależnością

$$(14) \quad R_I(\tau) = A(\tau) \cos(2\pi f_{\text{Doppler}} \tau)$$

Wykorzystując dwa przebiegi I i Q z wyjść korelatora mikrofalowego, opisane zależnościami (7) i (8), można dokonać obliczenia częstotliwości dopplerowskiej w przedziale czasu, dla którego reflektor rogowy znajdował się w pobliżu punktu odpowiadającego odległości D_0 od radaru. Dla takiego przypadku pulsacja określona wzorem (11) jest pulsacją dopplerowską, a częstotliwość Dopplera można wyznaczyć ze wzoru:

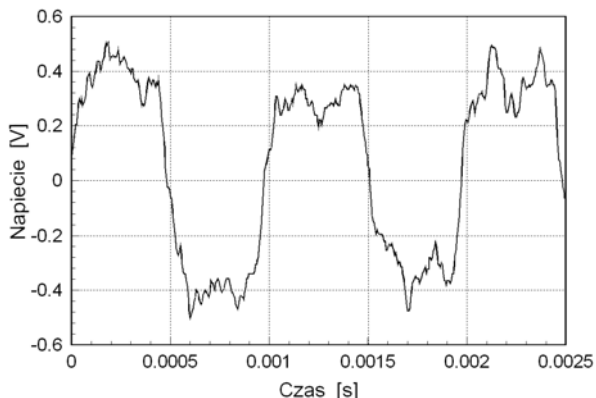
$$(13) \quad f_D(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \arctan\left(\frac{R_Q(\tau)}{R_I(\tau)}\right)$$

Pozwala to na odmienny sposób wyznaczania częstotliwości Dopplera, niż jest to klasycznie przyjęte. W ujęciu klasycznym częstotliwość Dopplera wyznacza się przechodząc z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości za pomocą transformaty Fouriera. W przypadku określenia składowych kwadraturowych funkcji korelacji na w.cz., dzięki zastosowaniu korelatora mikrofalowego, uzyskuje się możliwość określenia wartości częstotliwości Dopplera w funkcji czasu. Oznacza to, że można określić, jak w poszczególnych fazach ruchu zmieniała się prędkość obiektu.

Przełączana antena

Do oceny czułości i zasięgu demonstratora radaru szumowego z korelatorem analogowym pracującego w paśmie X zastosowano, jako imitator celu przełączaną antenę. Jest to układ składający się z anteny do wyjścia, której podłączono odcinek zwartej linii transmisyjnej, której długość jest zmieniana za pomocą generatora kluczującego. Częstotliwość pracy tego generatora symuluje częstotliwość Dopplera poruszającego się obiektu.

Tak skonstruowana antena, odbija padające na nią promieniowanie mikrofalowe tak, jak odbijałby cel o skutecznej powierzchni rozproszenia równej skutecznej powierzchni rozproszenia anteny i prędkości radialnej v , dla której częstotliwość Dopplera wynosi tyle, ile wynosi częstotliwość generatora kluczującego.

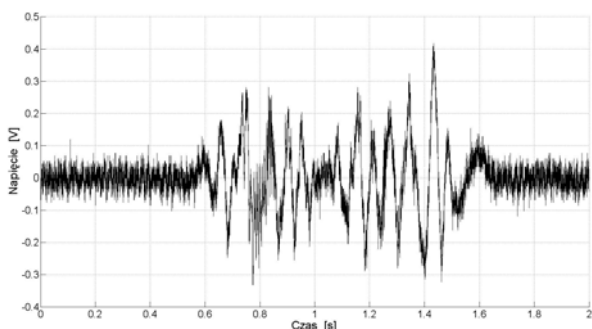


Rys. 9. Napięcie na wyjściu / korelatora mikrofalowego dla przypadku opromieniowania przełączanej anteny.

Na rys. 9 przedstawiono przebieg napięcia na wyjściu korelatora dla przypadku, gdy w strefie obserwacji znalazł się obiekt imitowany przez antenę, której skuteczna powierzchnia rozproszenia $\sigma_A=0.3 \text{ m}^2$, a częstotliwość kluczowania $f_D=1 \text{ kHz}$. Wynik ten pokazuje, że możliwe jest wykrycie przekroczenia bariery ochronnej przez bardzo mały obiekt, poruszający się z prędkością $v = 16.3 \text{ m/s}$ (58 km/h) z odległości 30 m, przy mocy ciągłej szumowego nadajnika rzędu $40 \mu\text{W}$.

Człowiek w strefie obserwacji

Przeprowadzono także doświadczenia związane z wykrywaniem obecności ludzi w strefie obserwacji ze szczególnym uwzględnieniem detekcji ruchu w tej strefie. Na rys. 10 przedstawiono przebieg napięcia na wyjściu korelatora dla przypadku, gdy znajdujący się w strefie obserwacji człowiek wykonał szybkie ruchy rękami do przodu i do tyłu w stosunku do radaru.



Rys. 10. Napięcie na wyjściu / korelatora mikrofalowego dla przypadku obecności w strefie obserwacji człowieka.

Na rys. 10 łatwo można rozpoznać fazę, gdy ręce człowieka poruszały się w strefie obserwacji w kierunku radaru, oraz fazę, gdy wykonywały ruch powrotny. Pomimo, że stosunek sygnał/szum jest w tym przypadku wyraźnie mniejszy niż dla anteny, czy reflektora rogowego, to w dalszym ciągu możliwe jest wykrycie obecności obiektu w strefie. Możliwe jak także określenie prędkości radialnej poruszającego się obiektu, jako całości, lub poruszających się jego poszczególnych części. Stwierdzenie tego faktu prowadzi do zaproponowania zastosowania opisanego urządzenia do monitorowania czynności życiowych organizmów żywych na odległość.

Wnioski

Zaproponowany sposób analogowej detekcji korelacyjnej w paśmie X pozwoli na budowę radarów szumowych za pomocą, których możliwy będzie precyzyjny pomiar odległości i prędkości obiektów. 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 nieintencjonalny. Zastosowany w nim detektor korelacyjny pozwala na osiąganie dużych zysków detekcji, a przez to relatywnie dużych zasięgów przy stosunkowo małej mocy sygnału nadajnika. Ze względu na pracę odbiornika radaru, jako odbiornika bezpośredniego wzmacnienia, wymagane jest użycie wzmacniacza w.cz. o dużym wzmacnieniu rzędu 60 dB i niskim współczynniku szumów, w praktyce nie przekraczającym wartość 1.5 dB. Wzmacniacz taki powinien swobodnie współpracować z zestawem filtrów pasmowo-przepustowych ustalających pasmo sygnału w granicach od 150 do 800 MHz wokół częstotliwości środkowej $f_0=9.2 \text{ GHz}$. W takim też paśmie powinien pracować wzmacniacz w.cz. Wymagania te powodują, że konstrukcja takiego bloku wzmacniająco-filtrującego stawia przed konstruktorem wysokie wymagania. W Zakładzie Mikrofal Instytutu Radioelektroniki WAT autor skonstruował taki stopień wejściowy odbiornika demonstratora radaru szumowego z analogowym korelatorem pracującym w paśmie X.

Obszary zastosowań radarów szumowych to: radary antykolizyjne [8], ochrony obiektów, wykrywania ruchu, rozpoznawanie i penetracja obiektów niedostępnych, penetracja obiektów ukrytych w płytkich warstwach ziemi, wykrywanie żywych istot w obszarach niedostępnych i zakrytych [9]. Dalsze plany autora to zastosowanie przedstawionej w artykule koncepcji szerokopasmowego korelatora mikrofalowego do budowy wybranych typów radarów szumowych bliskiego zasięgu.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt rozwojowy O R00 0082 12.

LITERATURA

- [1] Li Z., Narayanan R., „Doppler Visibility of Coherent Ultrawideband Random Noise Radar Systems”, *IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, No 3, 2006.
- [2] Axelson R. J. „Noise Radar for Range Doppler Processing and Digital Beam-forming Using Low-Bit ADC”, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, No 12, 2003.
- [3] Lai C.-P., Narayanan R.M., Ruan Q., Davydov A. „Hilbert-Huang transform analysis of human activities using through-wall noise and noise-like radar”, *IET Radar Sonar Navig.*, 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 244-255.
- [4] Susek W., Stec B.: Broadband microwave correlator of noise signals, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XVII(2010), No. 2, 2010,
- [5] Susek W., Stec B., and Recko Cz., "Noise Radar with Microwave Correlation Receiver," *Acta Physica Polonica A*, 119(4), 483-487 (2010)
- [6] Stec B., „Analiza charakterystyk fazowych i amplitudowych mikrofalowego dyskryminatora fazy z detektorami pierścieniowymi”, *Biuletyn WAT*, Nr 11(423), 1987, str. 71-76.
- [7] Susek W., Demodulacja kwadraturowa sygnałów szumowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2010) Nr 8, str. 224 – 231.
- [8] Lukin K. A., Mogyla A. A., Alexandrov Y. A., Zemlayaniy O. V., Lukina T., Shiyan Yu: „W-band Noise Radar Sensor for Collision Warning Systems”, *IEEE Proc. 2000*.
- [9] Rutkowski A. K., Adam Kawalec A, System detekcji pasywniej obiektów ruchomych ukrytych za ścianą z wykorzystaniem sygnałów GSM, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2011) Nr 10, str. 147 – 151.

Autor: dr inż. Waldemar Susek, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: Waldemar.Susek@wat.edu.pl