



BIULETYN WAT  
VOL. LV, NR 2, 2006

## Trudno wykrywalne radary szumowe

KRZYSZTOF KULPA

Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych,  
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19,  
e-mail: [Kulpa@ise.pw.edu.pl](mailto:Kulpa@ise.pw.edu.pl)

**Streszczenie.** Od wielu lat prowadzone są prace nad radarami trudno wykrywalnymi (LPI). Klasyczne radary impulsowe można wykrywać z odległości znacznie większych niż odległości, na których radar jest w stanie wykrywać cele. Sytuacja zmieniła się znacznie po wprowadzeniu radarów pracujących z falą ciągłą, dla których efektywną detekcją obiektów można uzyskać przy mocy emitowanych sygnałów w zakresie od pojedynczych miliwatów do kilkuset watów. W radarach z falą ciągłą najczęściej stosuje się liniową, piłokształtną modulację częstotliwości (sygnały LMF). Radary takie charakteryzują się dość prostą konstrukcją i małymi wymogami na moc obliczeniową. Postęp w dziedzinie rozpoznania radioelektronicznego umożliwił jednak wykrywanie tych radarów. Dalsze poszukiwania technologii, która mogłaby zostać zastosowana w radarach trudno wykrywalnych, doprowadziły do opracowania różnych systemów modulacji emitowanej fali ciągłej, tak by z jednej strony uzyskać jak najlepsze własności detekcyjne radaru, z drugiej zaś uczynić radar trudnym do wykrycia. Jedną z ciekawszych modulacji, która zyskuje na popularności w ostatnim okresie, jest modulacja fali nośnej radaru sygnałem szumowym. Radar taki, zwany radarem szumowym, ma wiele unikatowych cech. Nie występuje w nim zjawisko niejednoznaczności odległościowej lub dopplerowskie, co w znacznym stopniu ułatwia proces detekcji i śledzenia obiektów. Długi czas oświetlenia obiektów pozwala na stosowanie procedur identyfikacji obiektów na podstawie zmian czasowych powierzchni skutecznej celu, co jest szczególnie cenne przy wykrywaniu helikopterów i startujących rakiet. Szumowy charakter emitowanego sygnału powoduje duże utrudnienia w detekcji emisji oraz bardzo komplikuje proces identyfikacji źródła emisji przez urządzenia ESM.

**Słowa kluczowe:** radiolokacja, radary trudno wykrywalne, radary szumowe, odbiór korelacyjny  
**Symbole UKD:** 621.396.96

## 1. Wstęp

Określenie radar szumowy odnosi się do grupy radarów używających sygnałów losowych lub pseudolosowych dla podświetlenia celu. Radary szumowe mogą znaleźć różnorakie zastosowania. Można je stosować jako radary bliskiego i średniego zasięgu do kontroli ruchu lotniczego, jako radary pola walki, jako radary śledzące a także jako radary obrazujące pracujące z syntetyczną aperturą (SAR).

Radary szumowe, pracujące zwykle z falą ciągłą, mają w wielu dziedzinach przewagę nad klasycznymi radarami impulsowymi i dopplerowsko-impulsowymi, które do skanowania przestrzeni wykorzystują krótkie impulsy elektromagnetyczne o mocy dochodzącej do pojedynczych megawatów. Radary pracujące z falą ciągłą emitują w przestrzeń znacznie mniejsze moce, zwykle w zakresie od pojedynczych miliwatów do setek watów, co znacznie ułatwia konstruowanie nadajników i mikrofalowych traktów nadawczych. W radarach tego typu stosuje się nadajniki tranzystorowe, co w znaczący sposób zmniejsza masę i koszty radaru.

W radarach szumowych nie występuje problem niejednoznaczności pomiaru częstotliwości dopplerowskiej lub niejednoznaczności pomiaru odległości, który znacznie komplikuje działanie radarów impulsowo-dopplerowskich oraz radarów FMCW (radarów z falą ciągłą i liniową modulacją częstotliwości). Bardzo niska moc szczytowa oraz emisja niespecyficznego sygnału szumowego powoduje, że radary szumowe charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami LPI (Low Probability of Interception), co oznacza, że radar taki może wykryć obiekt na odległościach znacznie większych, niż sam może być wykryty przez klasyczne urządzenie rozpoznawcze.

Ten typ radaru ma też kilka wad. Wykrycie obiektu w radarze szumowym wymaga zastosowania znacznie bardziej złożonych algorytmów przetwarzania sygnałów w porównaniu do klasycznych radarów. Wymagana moc obliczeniowa jest również znacznie większa od mocy obliczeniowej potrzebnej w radarze impulsowym i często przekracza jeszcze moc obliczeniową dostępnych na rynku elementów. W radarze szumowym występuje również, znany dobrze w telekomunikacji, problem maskowania słabych sygnałów pochodzących od obiektów odległych przez silne sygnały, których źródłem są obiekty położone bardzo blisko radaru. Siła echa radarowego zmienia się z odwrotnością czwartej potęgi odległości, dlatego też do prawidłowego działania radaru szumowego konieczna jest bardzo duża dynamika traktów odbiorczych (zwykle powyżej 100 decybeli).

Pierwszy artykuł o radarze szumowym był opublikowany w 1959 roku przez B. M. Hortona [1], który przedstawił koncepcję szumowego pomiaru odległości. Dalsze publikacje na temat tych radarów pojawiły się w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku [2, 3, 4]. Radary szumowe nie doczekały się jednak praktycznej realizacji w tamtym okresie, gdyż stworzenie odbiornika korelacyjnego przy użyciu układów analogowych było niezwykle trudne.

W ostatniej dekadzie radary szumowe zostały ponownie odkryte. Przyczyną tego jest szybki rozwój cyfrowego przetwarzania sygnałów, zarówno w warstwie algorytmicznej, jak i w warstwie sprzętowej. Współczesne procesory sygnałowe (DSP) i programowalne układy logiczne (PLD), zaopatrzone w sprzętowe układy mnożące osiągają moce obliczeniowe na poziomie wielu GFLOPS-ów. Daje to możliwość wyznaczania funkcji niejednoznaczności wzajemnej (korelacji dopplerowsko-odległościowej) pomiędzy sygnałem nadawanym i odbieranym w czasie rzeczywistym.

Obecnie publikowanych jest wiele artykułów prezentujących teorię działania radarów szumowych [5, 6] oraz ich zastosowanie do wykrywania obiektów ruchomych w radarach bliskiego i średniego zasięgu, a także w radarach z syntetyczną aperturą (SAR) i odwrotną syntetyczną aperturą (ISAR).

Radary szumowe mogą być projektowane jako radary z mechanicznie bądź elektronicznie sterowaną anteną. W celu zwiększenia czasu integracji sygnału, radary szumowe mogą być wyposażane w anteny wielowiązkowe. By uniknąć przesłuchów pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, radary szumowe wyposaża się zwykle w osobne anteny nadawcze i odbiorcze.

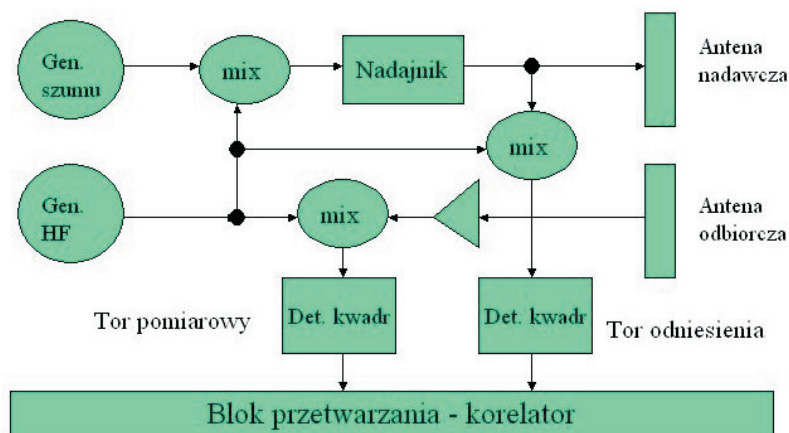
## 2. Przetwarzanie sygnałów w radarze szumowym

Radar szumowy emituje falę ciągłą, będącą realizacją procesu stochastycznego. W większości przypadków radary szumowe mogą być traktowane jako radary emitujące wąskopasmowy sygnał mikrofalowy. Sygnał emitowany można przybliżać sinusoidalną falą nośną modulowaną w amplitudzie, częstotliwości lub fazie szumem dolnopasmowym (szumem białym po ograniczeniu pasma).

Podejścia tego nie można zastosować jedynie do radarów ultraszerokopasmowych, pracujących zwykle w paśmie rozpoczynającym się od pojedynczych megaherców, a kończącym się na kilku gigahercach. Radary takie nie będą jednak omawiane w niniejszym artykule.

Sygnał odbierany (echo obiektu) jest opóźnioną i przesuniętą dopplerowsko kopią sygnału nadawanego. Odległość od celu określana jest w procesorze korelacyjnym, zaś kierunek do obiektu jest estymowany przy użyciu technik wywodzących się z monoimpulsowych metod estymacji kąta, przez zastosowanie na przykład anten odbiorczych z wiązką sumacyjną i różnicową bądź przy użyciu technik interferometrycznych, bazujących na różnicy faz odebranych sygnałów w dwóch antenach skierowanych na obiekt.

Klasyczna struktura radaru szumowego przedstawiona jest na rysunku 1. Sygnał szumowy w paśmie podstawowym przesuwany jest za pomocą lokalnej heterodyny do częstotliwości nośnej i emitowany w przestrzeń za pomocą anteny nadawczej. Sygnał z anteny odbiorczej jest wzmacniany i przesuwany do pasma podstawowego w klasycznym odbiorniku heterodynowym, wyposażonym w de-



Rys. 1. Struktura radaru szumowego

tektor kwadraturowy. Sygnał odniesienia jest wypracowywany przez identyczny tor odbiornika heterodynowego, na którego wejście podaje się sygnał nadawany. Sygnały z obydwu odbiorników podawane są na blok korelatora.

Klasyczna funkcja korelacji może być wyznaczona ze wzoru

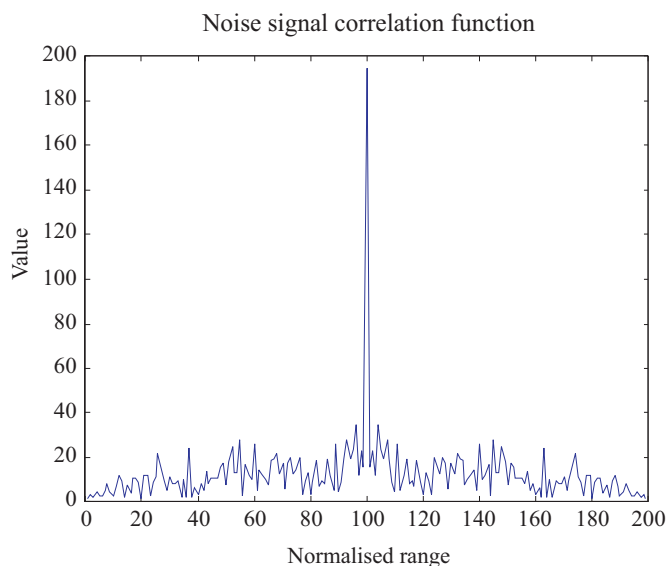
$$y_r(\tau) = \int_{t=0}^{t_i} x_T(t)x_R^*(t-\tau)dt, \quad (1)$$

gdzie:  $x_T$  jest zespoloną obwiednią sygnału nadawanego (po detektorze kwadraturowym),  $x_R$  — jest zespoloną obwiednią sygnału odebranego, a  $t_i$  jest czasem integracji.

Odbiornik korelacyjny poprawia stosunek sygnał/szum o wartość  $t_i B$ , gdzie  $B$  jest szerokością pasma transmitowanego sygnału. Na rysunku 2 przedstawiony jest przykładowy wynik korelacyjnego przetwarzania sygnałów dla  $t_i B = 100$ .

Metoda korelacyjna, opisana równaniem (1) może być stosowana jedynie dla radarów szumowych o bardzo krótkim czasie integracji, mniejszych niż  $\lambda/v_{\max}$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali nośnej radaru, zaś  $v_{\max}$  jest maksymalną szybkością wykrywanych obiektów. Przykładowo, dla 10 centymetrowej fali nośnej i prędkości maksymalnej 1000 m/s maksymalny czas integracji wynosi 100  $\mu$ s, a więc jest porównywalny z długością impulsów w radarach z cyfrową kompresją sygnału. Większość radarów szumowych, w celu zapewnienia małej mocy szczytowej, powinna pracować z dużo dłuższym czasem integracji.

Przy dłuższym czasie korelacji równanie (1) może być stosowane jedynie dla obiektów nieruchomych. Do detekcji obiektów ruchomych konieczne jest uwzględnienie ruchu obiektu w procesie detekcji. Jeśli założymy, że transmitowany sy-



Rys. 2. Funkcja korelacji sygnału szumowego,  $t_r B = 100$ , oś Y — wartość funkcji, oś X — znormalizowana odległość

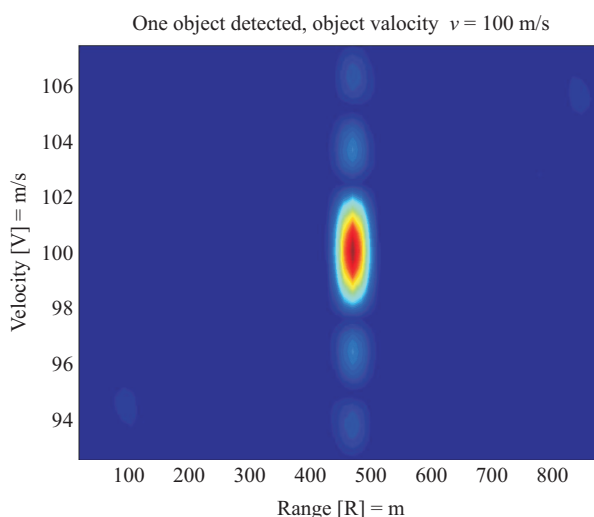
gnał może być potraktowany jak sygnał wąskopasmowy (pasmo sygnału jest dużo mniejsze niż częstotliwość nośna), to sygnał echa odbitego od obiektu, którego odległość od radaru wynosi  $r$ , a prędkość radialna wynosi  $v$  można traktować jako przesuniętą w czasie i przesuniętą w częstotliwości dopplerowskiej kopię sygnału emitowanego. Sygnał odebrany po przesunięciu do pasma podstawowego (na wyjściu detektora kwadraturowego) można przedstawić w postaci:

$$x_R(t) = Ax_T \left(t - \frac{2r}{c}\right) e^{j2\pi \left(-\frac{2v_r F}{c}\right)t + \varphi_R}. \quad (2)$$

Optymalny (w sensie średniokwadratowym) detektor bazuje na koncepcji filtru dopasowanego. Oczywiście, koncepcję tę można wprost zastosować jedynie w przypadku, gdy odległość i prędkość obiektu jest znana. W praktyce, by wykryć cel bez znajomości jego pozycji, konieczne jest zastosowanie banku filtrów dopasowanych do wszystkich możliwych par odległość-prędkość. Podejście to prowadzi bezpośrednio do detektora bazującego na wykrywaniu pików korelacyjnych w funkcji korelacji odległościowo-dopplerowskiej [7], opisanej równaniem:

$$y(r, v) = \int_{t=0}^{t_i} x_R x_T^* \left(t - \frac{2r}{c}\right) e^{-j2\pi \left(-\frac{2v_r F}{c}\right)t} dt. \quad (3)$$

Powyższe równanie jest bardzo podobne do funkcji niejednoznaczności wzajemnej, ale w przeciwieństwie do funkcji niejednoznaczności przesunięcie czasowe (proporcjonalne do odległości) jest wprowadzane jedynie do sygnału transmitowanego. Taka forma przekształcenia jest w pełni naturalna dla problematyki radiolokacyjnej. Jest również wygodniejsza do implementacji przy użyciu techniki cyfrowej. Na rysunku 3 przedstawiona jest funkcja korelacji odległościowo-dopplerowskiej dla pojedynczego obiektu na odległości 480 m i prędkości radialnej 100 m/s.



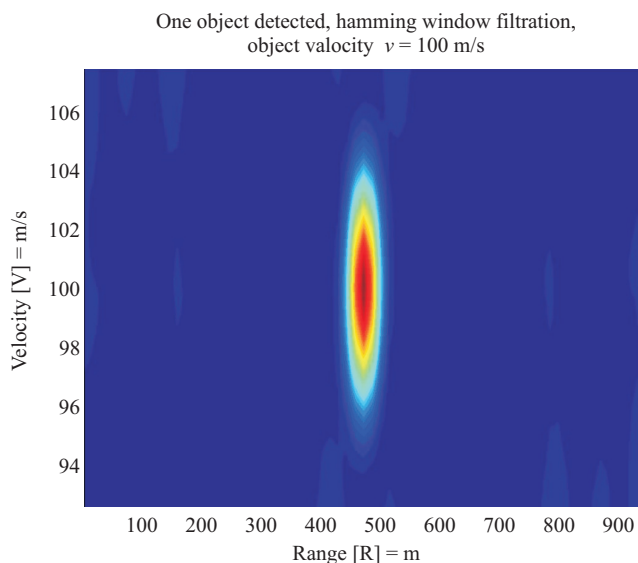
Rys. 3. Korelacja odległościowo-dopplerowska, pojedynczy obiekt, okno prostokątne oś Y — odległość, oś X — prędkość radialna

Na rysunku 3 łatwo zauważyć obecność bardzo wysokich listków bocznych w kierunku częstotliwościowym. Efekt ten spowodowany jest zastosowaniem okna prostokątnego, którego listki boczne są na poziomie  $-13$  dB. By zmniejszyć poziom listków bocznych, konieczne jest zastosowanie odpowiednich okien czasowych (Hamminga, Blackmana lub innych). Oknowanie może być stosowane po stronie nadajnika (przez zmienianie amplitudy transmitowanego sygnału) bądź podczas przetwarzania sygnałów. Drugie podejście prowadzi do zastosowania koncepcji filtracji niedopasowanej [7], zaś proces korelacyjny wyrazi się równaniem:

$$y(r, v) = \int_{t=0}^{t_i} w(t) x_R x_T^* \left(t - \frac{2r}{c}\right) e^{-j2\pi \left(-\frac{2vF}{c}\right)t} dt, \quad (4)$$

gdzie:  $w(t)$  jest wybranym oknem czasowym. Na rysunku 4 przedstawiony jest wynik korelacyjnego przetwarzania sygnału przy zastosowaniu okna Hamminga.

Poziom pierwszego listka bocznego został zredukowany do poziomu  $-40$  dB, okupione to jednak zostało poszerzeniem listka głównego w kierunku prędkościowym.



Rys. 4. Korelacja odległościowo-dopplerowska, pojedynczy obiekt, okno Hamminga, oś Y — odległość, oś X — prędkość radialna

### 3. Równanie zasięgowe radaru szumowego

Radar szumowy, zaopatrzony w antenę nadawczą o zysku  $G_T$  i antenę odbiorczą o zysku  $G_R$ , transmitujący moc mikrofalową  $P_T$ , odbiera sygnał echa od obiektu o powierzchni skutecznej  $S_o$  na odległości  $R$ . Moc odebranego sygnału jest równa

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R S_o \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (5)$$

By wykryć echo obiektu, moc sygnału odebranego musi być większa od iloczynu mocy szumu termicznego pomnożonego przez współczynnik detekcji  $D$

$$P_R \geq P_N \cdot D = kTB D. \quad (6)$$

Współczynnik detekcji wyraża się wzorem

$$D = \frac{D_0}{t_i B}, \quad (7)$$

gdzie:  $D_0$  jest znormalizowanym współczynnikiem wykrywania na tle szumu białego (około 12 dB dla prawdopodobieństwa fałszywego alarmu  $10^{-6}$ ), zaś  $B$  jest pasmem emitowanego sygnału. Zastosowanie równania (4) jest ograniczone przez efekt migracji odległościowej celu. Maksymalny iloczyn pasma i czasu integracji musi spełniać nierówność

$$t_i B \leq \frac{c}{2V_{\max}}. \quad (8)$$

Przy przyjęciu maksymalnej prędkości obiektu 1000 m/s maksymalny zysk integracji jest więc na poziomie 50 dB. Maksymalny zasięg wykrywania obiektu jest zatem określony następującym równaniem:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_T G_T G_R S_o \lambda^2 t_i}{(4\pi)^3 N D_o k T}}. \quad (9)$$

#### 4. Podsumowanie

Radary szumowy jest radarem o najlepszych własnościach LPI spośród wszystkich obecnie stosowanych radarów. Ze względu na możliwość stosowania długich czasów integracji, na poziomie pojedynczych sekund, radary takie mogą pracować z mocami poniżej jednego wata. Ze względu na stosowanie sygnału szumowego, bardzo podobnego do szumu termicznego, radary takie niezwykle trudno jest zidentyfikować. Nawet przy wykryciu ich emisji trudno jest stwierdzić, czy jest to emisja radarowa.

Radary te nie jest jednak pozbawiony wielu wad. Obiekty bliskie mogą swoim echem przysłaniać obiekty dalekie. Stosując klasyczną korelacyjną metodę przetwarzania sygnałów, nie można osiągnąć teoretycznej zdolności wykrywania na kierunkach, na których występują silne echa. Problem ten można jednak minimalizować, stosując adaptacyjne metody usuwania silnych echa [8]. Metody te jednak wykraczają znacznie poza zakres niniejszego artykułu.

Przy stosowaniu długich czasów integracji (0,1-1 s) możliwe jest wyznaczenie nie tylko prędkości, ale również przyspieszenia obiektu. Przy jeszcze dłuższych czasach integracji możliwe jest zastosowanie technik odwrotnej apertury (ISAR) w celu określenia kształtu wykrytego obiektu. Wydaje się, że radary te znajdą duże zastosowanie w bliskiej przyszłości, gdy wysokie moce obliczeniowe, konieczne do wyznaczania równania (4) w czasie rzeczywistym będą powszechnie dostępne.

*Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2005 r.*



## LITERATURA

- [1] B. M. HORTON, *Noise-modulated distance measuring system*, Proc. IRE, V0147, May 1959, pp. 821-828.
- [2] G. R. COOPER, C. D. MCGILLEM, *Random signal radar*, School Electr. Eng., Purdue Univ., Final Report, TREE67-11, June 1967.
- [3] D. B. BRICK, J. GALEJS, *Radar Interferences and its Reduction*, The Sylvania Technologist, vol. 11, No. 3, July 1959, pp. 96-108.
- [4] S. E. CRAIG, W. FISHBEIN, O. E. RITTENBACH, *Continuous-Wave Radar with High Range Resolution and Unambiguous Velocity Determination*, IRE Trans. Mil Electronics, vol. MIL 6, No. 2, April 1962, pp. 153-161.
- [5] K. A. LUKIN, *The Principles of Noise Radar Technology*, proc NRTW 2003, Yalta, Ukraine, 18-20 Sept. 2002.
- [6] S. R. J. AXELSSON, *On the Theory of Noise Doppler Radar*, Proc. IGARSS 2000, Honolulu, 24-28 July 2000, pp. 856-860.
- [7] K. S. KULPA, Z. CZEKAŁA, M. SMOLARCZYK, *Long-Integration-Time Noise Surveillance Radar*, First International Workshop On The Noise Radar Technology NRTW-2002, September 18-20, 2002, pp. 238-243.
- [8] K. KULPA, Z. CZEKAŁA, *Short Distance Clutter Masking Effects in Noise Radars*, Proc. of the Int. Conf. on the Noise Radar Technology, Kharkiv, Ukraine, 21-23 October 2003.

K. KULPA

### Low Probability of Interception Noise Radars

**Abstract.** For many years the intensive research on Low Probability of Interception (LPI) radars are conducted all over the world. Classical pulse radars can be detected from the long distance, considerably greater than distances on which the radar is able to detect targets. The situation changed considerably for radars working with the continuous wave. That type of radars emits small peak power — from single mill-watts to several hundreds of watts and can detect target far beyond the ESM detection range. The linear (sawtooth) frequency modulation is usually applied in such radar. Those radars are quite simple and require relatively low computational computing power. However the progress in Electronic Support Measurement (ESM) made detections of these radars possible. Further research on LPI radars has led to development of different technology and different signal modulations. The one technology — namely noise radars — gains on the popularity in the last decade. In that radar high frequency carrier signal has frequency, phase or amplitude noise modulation. The noise radar has many unique features. The noise technology is free from range or Doppler ambiguity, what simplifies the detection and tracking processes. The long illumination time allows for usage of target identification procedures based on target Doppler history changes and changes in effective target cross-section, what is essential for at the detection and non-cooperative identifications of helicopters and missiles. Noise character of emitted signal causes large difficulties in the detection of the radar, and complicates significantly the identification as the threat by enemy ESM devices

**Keywords:** Noise Radar, Low Probability of Interception, Correlation receiver

**Universal Decimal Classification:** 621.396.96

