

# ZAŁOGOWE I BEZZAŁOGOWE SYSTEMY LOTNICZEGO ROZPOZNANIA ELEKTRONICZNEGO – ROLA I KONCEPCJE UŻYCIA

Andrzej WITCZAK\*, Adam KAWALEC\*, Wiesław KLEMBOWSKI\*\*

\* Instytut Radioelektroniki Wydziału Elektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna  
00-908 Warszawa, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2

\*\* SAAB Technologies Poland Sp. z o.o.  
04-041 Warszawa, ul. Ostrobramska 101 A

## Streszczenie

*W referacie omówiono potrzeby różnych użytkowników wojskowych w zakresie informacji dostępnej z rozpoznania elektronicznego. Przedyskutowano właściwości lotniczego rozpoznania elektronicznego i dokonano ich porównania z elektronicznym rozpoznaniem naziemnym i satelitarnym. Przedstawiono przykładowe rozwiązania załogowych i bezzałogowych lotniczych systemów rozpoznania elektronicznego. Zestawiono właściwości i typowe parametry tych systemów oraz przeprowadzono ich dyskusję pod kątem właściwości dostępnej informacji o sytuacji powietrznej, naziemnej i nawodnej przydatnej różnym użytkownikom. Omówiono i wyjaśniono zasady wytwarzania zobrażenia radarowych o wysokiej rozdzielczości. Przedstawiono koncepcje sposobów przeszukiwania przestrzeni powietrznej przez radar lotniczy wczesnego ostrzegania z elektronicznym przeszukiwaniem przestrzeni, dla zapewnienia równoczesnego wykrywania i śledzenia obiektów powietrznych i naziemnych.*

*Dokonano porównania załogowych i bezzałogowych lotniczych systemów rozpoznania pod kątem możliwych funkcji realizowanych z wykorzystaniem zbieranych danych.*

*W podsumowaniu przedstawiono wnioski odnośnie koncepcji wykorzystania informacji uzyskanych za pomocą rozpoznania elektronicznego realizowanego z wykorzystaniem lotniczych systemów załogowych i bezzałogowych, w systemach zbioru i uogólniania danych dla systemów dowodzenia.*

## 1. WPROWADZENIE.

Perspektywy wprowadzenia na uzbrojenie lotniczych bezzałogowych platform, zdolnych do przenoszenia środków rozpoznania elektronicznego, wymagają określenia roli i koncepcji użycia zarówno załogowych jak i bezzałogowych systemów lotniczego rozpoznania elektronicznego. Jest to szczególnie istotne ze względu na prowadzone dyskusje i wyrażane poglądy o przewidywanej w przyszłości całkowitej dominacji bezzałogowych systemów lotniczych realizujących funkcje rozpoznania jak również funkcje środków ogniowych. Z tego powodu należy poddać analizie zapotrzebowanie na informacje z rozpoznania elektronicznego różnych użytkowników wojskowych i możliwości ich uzyskania przez załogowe i bezzałogowe systemy. Przegląd rozwiązań lotniczych systemów rozpoznania, zarówno będących w użytkowaniu jak i w fazie opracowania, pozwala na ocenę ich właściwości w zakresie uzyskiwania informacji i przygotowania do przekazania użytkownikom.

W niniejszym referacie, jako rozpoznanie elektroniczne rozumiane jest rozpoznanie stosujące emisję sygnału sondującego (radarowe) jak i rozpoznanie na podstawie odbieranych sygnałów emitowanych celowo lub sygnałów okazjonalnych odbitych od obiektów (pasywna radiolokacja- PCL [1]).

Możliwości rozpoznania lotniczego są zasadniczo różne od możliwości rozpoznania naziemnego i satelitarnego. Podstawową zaletą rozpoznania lotniczego w stosunku do rozpoznania naziemnego jest możliwość szybkiego przemieszczania systemu do rejonu będącego przedmiotem obserwacji oraz znacznie większe zasięgi wykrywania obiektów metodami radiolokacyjnymi, jak również emitowanych sygnałów przez emitery naziemne i morskie, dzięki

wydłużeniu horyzontu radiowego. Duże wartości horyzontu radiowego dla pułapów lotu w górnej warstwie atmosfery, predysponują rozpoznanie lotnicze dla stosowania w celu wczesnego ostrzegania przed obiektami powietrznymi i morskimi.

Elektroniczne rozpoznanie satelitarne jest zależne od rodzaju orbity, na której jest satelita. W przypadku orbity geostacjonarnej obszar rozpoznania jest stały i z góry zdefiniowany. Natomiast przy orbicie zapewniającej przemieszczanie się satelity obserwacje powtarzane są okresowo, nie zapewniając ciągłego pokrycia obserwowanego obszaru, co w większości sytuacji może być nie akceptowalne. Ponadto znajomość czasu, w którym satelita oświetla dany obszar Ziemi ułatwia podjęcie działań maskujących. Powyższe właściwości prowadzenia rozpoznania satelitarnego wskazują na małą przydatność tego typu rozpoznania w warunkach dużej dynamiki współczesnych działań.

Dla pewnych klas obiektów, których wykrycie i śledzenie jest istotne dla rozpoznania sytuacji taktycznej, takich jak pociski artyleryjskie różnych klas (artyleria klasyczna, moździerz, haubice, rakiety ziemia –ziemia), radary naziemne są w stanie zapewnić zadowalający poziom informacji. Zastosowanie w tym przypadku lotniczych systemów rozpoznania byłoby niezwykle trudne ze względu problemy w zapewnieniu stałego oświetlenia wybranego wycinka przestrzeni, szczególnie w warstwie przy powierzchni Ziemi.

## 2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZAPOTRZEBOWANIA RÓŻNYCH UŻYTKOWNIKÓW NA INFORMACJE Z ROZPOZNANIA ELEKTRONICZNEGO.

Działania na współczesnym polu walki wymagają dostarczania aktualnej informacji o sytuacji w przestrzeni powietrznej i na powierzchni Ziemi a także nawodnej. Największa dynamika działań występuje w przestrzeni powietrznej, co powoduje, że wymagana jest duża częstość odnawiania informacji, niekiedy nawet z okresem rzędu ułamka sekundy.

Z tej przyczyny wymagania na informację dla systemów obrony powietrznej są najwyższe, zarówno na dużą częstość odnowy informacji jak i duże zasięgi wykrywania obiektów powietrznych różnych klas (samoloty załogowe i bezzałogowe, rakiety manewrujące, rakiety zwalczania obiektów powietrznych). Z kolei dla wojsk lądowych istotne są informacje o sytuacji na powierzchni Ziemi dotyczące ruchów wojsk własnych i przeciwnika, co może być zapewnione w każdych warunkach pogodowych przez lotniczy system z radarem z syntetyczną aperturą (SAR) [2].

W środowisku morskim kontrola sytuacji na powierzchni morza i w przestrzeni powietrznej, dokonywana z platformy lotniczej, zapewnia duże zasięgi wykrywania obiektów nawodnych i nisko lecących, dzięki wydłużeniu horyzontu radiowego.

Dzięki temu użytkownik otrzymuje informacje zapewniające realizację wczesnego ostrzegania zwiększające czas na przygotowanie własnych działań.

## 3. ZAŁOGOWE SYSTEMY ROZPOZNANIA LOTNICZEGO.

Systemy rozpoznania wykorzystujące instalowane na statkach powietrznych radary pojawiły się w końcowym okresie II Wojny Światowej. Zimna wojna i związany z nią wyścig zbrojeń skutkowały budową szeregu mniej lub bardziej udanych konstrukcji, po obu stronach żelaznej kurtyny tworząc pojęcie systemów wczesnego ostrzegania (AEW – ang. Airborne Early Warning). Wprowadzenie w 1977 roku na wyposażenie amerykańskich sił zbrojnych samolotu

Boeing 707-320B z charakterystycznym grzybem anteny radaru APY-1, znanego pod kodowym określeniem E3A „Sentry”, a powszechnie jako AWACS (Airborne Warning and Control System) stanowiło istotny krok milowy w rozwoju tych systemów.

Od 29 grudnia 2006 roku Polska jest współudziałowcem pokrywającym 3% kosztów floty takich samolotów w ramach Programu Wczesnego Ostrzegania i Kontroli Powietrznej NATO (NATO Airborne Early Warning & Control Programme), zwany dalej „Programem NAEW&C”, a który jest największym wspólnie finansowanym programem NATO ustanowionym przez 15 państw członków NATO w celu budowy i eksploatacji systemu AWACS opartego na flocie 18 samolotów w wersji E-3S US/NATO z radarem APY-2 oraz udoskonalonymi w stosunku do pierwowzoru systemami samolotów dozoru radiolokacyjnego E-3A wyposażonych w radary dalekiego zasięgu. Państwa uczestniczące w Programie NAEW&C utworzyły NATO Airborne Early Warning and Control Programme Management Organization, zwaną dalej „organizacją NAPMO”, która zarządza w ich imieniu Programem NAEW&C.

Ponosząc istotne nakłady niezbędne na utrzymanie i modernizację floty NAPMO, mamy formalnie zagwarantowany dostęp do informacji w sytuacjach kryzysowych i wojennych. W okresie pokoju samoloty pojawiają się na polskim niebie w ramach ćwiczeń lub zabezpieczenia szczególnie ważnych wydarzeń (np. w czasie EURO 2012).

Jak dowodzą jednak przeprowadzone analizy [7], w przypadku powstania w Europie kilku źródeł konfliktów, zabezpieczenie potrzeb obronnych RP w informację z sensorów powietrznych, może być niemożliwe. Obecny system użycia nie gwarantuje stałego zabezpieczenia pola radiolokacyjnego na poziomie zabezpieczającym wszystkie rodzaje interesów Polski.

Szereg krajów członkowskich NAPMO, podejmuje prace w celu zbudowania alternatywy w stosunku do limitowanych możliwości wspólnego systemu, a ponadto w celu zapewnienia możliwości realizacji innych suwerennie deklarowanych zadań.

Warto, więc przyjrzeć się, jaki jest stan i kierunki takich prac zarówno wśród partnerów w ramach NATO jak i w innych krajach. Zbiorcze zestawienie informacji o systemach AEW zawarto w tabeli 1. Kolorem żółtym oznaczono w niej kraje będące, tak jak i Polska, członkiem NAPMO.

Tabela 1. Zbiorcze szacunkowe zestawienie systemów AEW eksploatowanych na świecie.

KRAJ	OPERATOR KRAJOWY	SYSTEM AEW	ILOŚĆ	UWAGI
AUSTRALIA	Royal Australian Air Force	Boeing 737 AEW&C	6(7)	Radar MESA firmy Nortrop Grumman
BRAZYLIA	Brazilian Air Force	Embraer R-99B	3	Program SIVAM (Amazon Surveillance System)
	Brazilian Air Force	Embraer R-99A	5	
CHILE	Chilean Air Force	Boeing 707 „Condor”	1	Z konforemnym radarem firmy ELTA/IAF Phalcon
CHINY	PLA Air Force	KJ 2000	2?	Modyfikowana wersja IL – 76s

<b>EGIPT</b>	Egyptian Air Force	E-2C Hawkeye 2000	6	
<b>FRANCJA</b>	French Air Force	E-3F Sentry	4	
	French Navy	E-2C Hawkeye	3(+1)	
<b>GRECJA</b>	Hellenic Air Force	Embraer R-99A	4	Z radarem Erieye firmy Ericsson AB
<b>INDIE</b>		„Ariavat“ program. – obecnie na Embraer EMB-145.	3	Dostawa od 2008
		IAI Phalcon na samolotach Il - 76	3(6)	
		Kamov Ka-31	?	Na fregatach Kriwak III
<b>INDONEZJA</b>		Modyfikowane 737-200	3	Z radarem SLAMMAR
<b>IRAN</b>		F-14 Tomcats		(wykorzystanie możliwości myśliwca)
<b>IZRAEL</b>		E-2C Hawkeye	?	Były cztery z czego 3 sprzedano do Meksyku po modernizacji
		IAI/Elta Phalcon na Boeing 707	1	
		Gulfstream G 550	3	
<b>JAPONIA</b>	Japan Air Self Defence Force	E-767 AWACS	4	
		E-2C Hawkeye	13	
<b>KOREA POŁUDNIOWA</b>		Boeing 737 AEW&C	4	(dostawa od 2011)
<b>MEKSYK</b>	Maxican Air Force	Embraer R-99A	1	
	Mexican Navy	P-99	2	Wersja morska
	Mexican Navy	E-2C Hawkeye	3	
<b>NATO</b>		E-3 Sentry	17	
<b>PAKISTAN</b>	Pakistan Air Force	Saab – 2000 AEW&C	6	Z radarem Erieye firmy Ericsson AB
	Pakistan Navy	P-3	3	Z systemem Hawkeye 2000
<b>ROSJA</b>		Bariev A-50 „Mainstay”	15-20	Na lotniskowcu Kuzniecov
		A-50 U “Shmel” Kamov Ka-31	?	
<b>ARABIA SAUDYJSKA</b>	Royal Saudi Air Force	E-3 Sentry	5	
<b>SINGAPUR</b>		E-2C Hawkeye	4	Przewidziane do wycofania
		Phalcon na Gulfstream G 550	4	Dostawa od 2008 roku

<b>SZWECJA</b>		S-100B Argus na Saab 340	6	Z radarem Erieye firmy Ericsson AB – PS-890.
<b>TAJWAN</b>		E-2K Hawkeye	2	
		E-2T Hawkeye	4	
<b>TAJLANDIA</b>	Royal Thai Air Force	S-100B Argus na samolocie Saab 340	1(2)	Z radarem Erieye firmy Ericsson AB.
<b>TURCJA</b>	Turkish Air Force	Boeing 737 AEW&C	4	Z radarem MESA
<b>WIELKA BRYTNIA</b>	Royal Air Force	E-3 D Sentry	7	
	Royal Navy	Westland Sea King	13	
<b>WŁOCHY</b>	Italian Navy	Augusta Westland EH 101 - AEW	6	Z radarem Eliradar HEW-784
<b>STANY ZJEDNOCZONE</b>	United States Air Force	E-3B i E-3C Sentry	33	
	United States Navy	E-2C Hawkeye	Min 40	
	United States Custom Service	P-3 Orion	4	Z anteną z E-2C i radarem AN/APS-125
	US Coast Guard	C-130	?	Z radarem AN/APN-145
<b>Zjednoczone Emiraty Arabskie</b>		E-2c Hawkeye	3	(w trakcie modernizacji)

W różnych stadiach realizacji znajdują się kontrakty na dostawę systemów AEW przez Izrael, Włochy, południową Koreę, Hiszpanię i Kanadę, a także z rejonu Pacyfiku Tajlandię, Singapur, Tajwan a także Malezję.

Z tabeli 1 można wywnioskować, iż wiele konstrukcji, nowo wdrażanych w poszczególnych krajach, opera się o modernizację starszych wersji systemów, ich instalacji na innych statkach powietrznych. Można oczywiście znaleźć również zupełnie nowe rozwiązania. Zasadą powszechna jest okresowa modernizacja i unowocześnianie systemów poszerzające ich funkcjonalności.

Do najczęściej wykorzystywanych w nowym wydaniu systemów należą bez wątpienia system Hawkeye 2000, nowe zmodernizowane wcielenie znanego od lat systemu E-2C, instalowany na dosyć pokażnej ilości nowych platform (patrz rys.1) czy też rodzina systemów tworzonych w oparciu o produkt szwedzkiej firmy Ericsson (obecnie SAAM Microwave System). Sercem systemu Erieye jest aktywny radar impulsowo-dopplerowski PS-890 z elektronicznie sterowaną wiązką. Znalazł on zastosowanie na kilku platformach lotniczych. (Rys.2)



Rys. 1 E-2C „Hawkeye” w wersji podstawowej oraz P3 - Orion AEW z systemem Hawkeye 2000 AEW.



Rys.2. System Erieye na platformach (od lewej) SAAB-340, Embraer EMB-145, Embraer R-99 (projekt SIVAM - nadzoru na obszarze Amazonii).

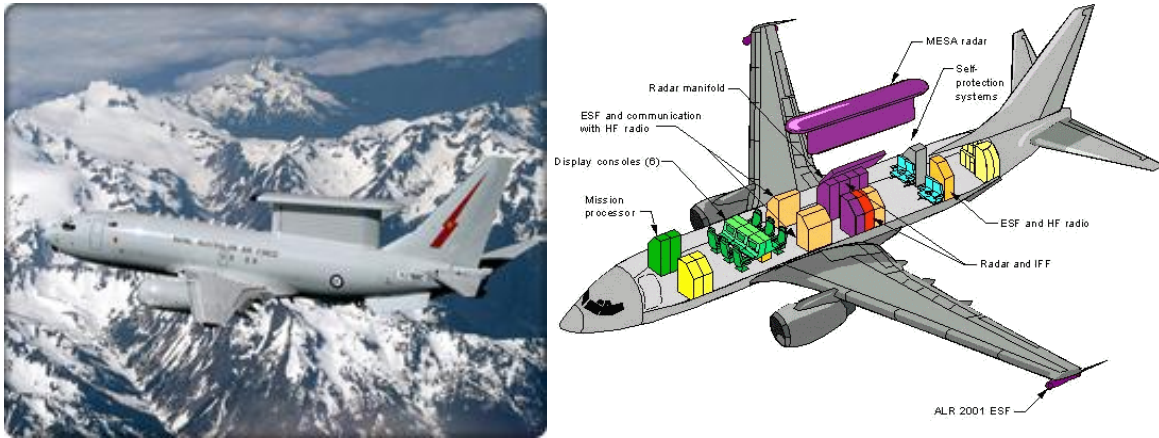
Skuteczne użycie anten z fazowaną anteną w konstrukcjach szwedzkich, ale i także tragiczne efekty instalacji anten obrotowych spowodowały wzrost popularności systemów tego typu w nowych opracowaniach. Można do nich zaliczyć między innymi skonstruowany na potrzeby projektu australijskiego „Wedgetail” przez firmę Boeing systemu opartego o samolot 737-700 gdzie sercem jest wielofunkcyjny system radarowy (MESA) Multi-Role Electronically Scanned Array firmy Northrop Grumman ESSD (dawniej Westinghouse). (Rys.3). System



wdrożony w kilku innych krajach w tym między innymi w Turcji z istotnym udziałem ich krajowego przemysłu.

Również inne kraje podejmują prace nad budową systemów z konforemnymi instalacjami antenowymi. Należą do nich konstrukcje przemysłu izraelskiego takie jak CAEW - EL/W-2085 Phalcon (rys.4.). Nieco starsza wersja radaru Phalcon na samolocie Boeing 707 od 1994 roku jest wykorzystywana przez Siły Powietrzne Chile pod nazwą Condor.

Wszystkie modernizacje pierwszych konstrukcji jak i nowo tworzone rozwiązania łączą z sobą rozpoznanie przestrzeni powietrznej oparte o radar z urządzeniami rozpoznania elektronicznego klasy ESM i ELINT.



Rys. 3 System AEW&C - MESA na platformie Boeing 737-700



Rys.4 Nowa wersja konforemnego systemu CAEW - EL/W-2085 Phalcon firmy IAI na samolocie „Gulfstream G550” - o nazwie Eitam

Ciekawym trendem, jaki się można zauważyć w konstrukcji systemów AEW są instalacje na aerostatach. Przykładem może być amerykański system TARS (patrz rys.5) . Podobne rozwiązania spotkamy w Izraelu, ale również było one używane w czasie operacji w Iraku i Afganistanie.



Rys.5 Sterowiec systemu TARS z radarem na pokładzie i jego rozmieszczenie na terytorium Stanów Zjednoczonych.

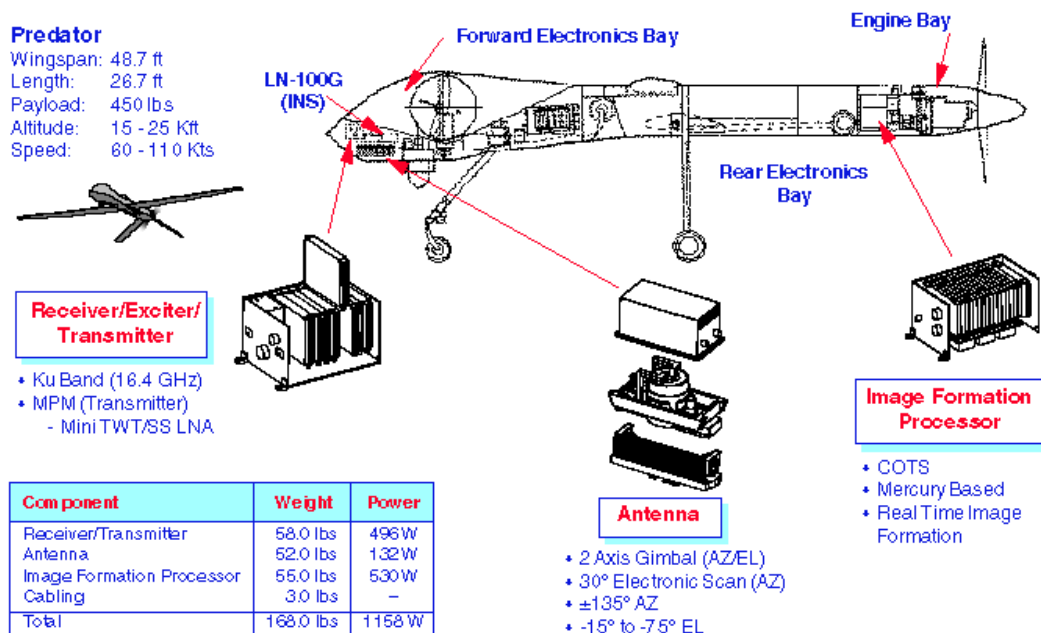
Wiele z przedstawionych systemów ma za zadanie patrolowanie odległych obszarów w zwalczaniu między innymi nielegalnego przemytu. Ta funkcja staje się często bardzo ważnym przyczynkiem do wdrażania tego typu systemów w zarządzie nie tylko sił zbrojnych, ale również straży granicznych różnych krajów, służb celnych itp.

#### 4. KONCEPCJE GENERACJI ZOBRAZOWANIA RADAROWEGO O WYSOKIEJ ROZRÓŻNIALNOŚCI.

Wprowadzając do użycia systemy oparte o platformy lotnicze, zawsze chętnie wykorzystywano je do obserwacji powierzchni ziemi. Zbiory funkcji klasy powietrze-ziemia były i są jednym z istotnych elementów skutecznego rozpoznania oraz wykonania uderzenia bez widoczności optycznej celu, w tym z dużych odległości będących poza zasięgiem systemów obrony przeciwnika. Problemem pozostawała możliwość uzyskiwania wystarczająco dobrej rozdzielczości. Dzisiaj uzyskiwane zobrażenia w radarach wielozadaniowych są wystarczające dla potrzeb uderzenia na dobrze kontrastowe obiekty (mosty, odizolowane obiekty naziemne, okręty itp.) z odległości nawet kilkudziesięciu kilometrów. **Przeprowadzenie szczegółowej analizy terenu z lokalizacją i identyfikacją pojedynczych jednostek techniki wojskowej wymaga stosowania rozwiązań o wyższej rozdzielczości. Rozwiązaniami tymi są radary klasy SAR (Synthetic Aperture Radar) specjalizowane do potrzeb rozpoznania. Wykonują one podobnie jak kiedyś radary obserwacji bocznej rozpoznanie terenu znajdującego się z boku trasy lotu. Przykład zabudowy SAR na UAV (PREDATOR) przedstawiono na rys. 6.**

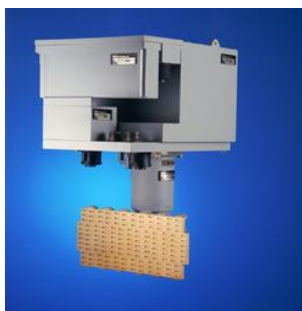


Postępująca miniaturyzacja elektroniki i wzrost wydajności techniki obliczeniowej powoduje, iż urządzenia tego typu mogą być umieszczane nie tylko na dużych statkach powietrznych, ale również na niewielkich obiektach bezpilotowych. Takie stosowanie obciążone jest koniecznością stabilizacji lotu platformy lub kompensacji niestabilności lotu, co w każdym przypadku jest dużym wyzwaniem szczególnie dla małych obiektów bezpilotowych silnie podlegających oddziaływaniu atmosfery oraz skutkom szumów sterowania czy też zaburzeniom ciągu.



Rys.6 SAR na pokładzie PREDATORA

Kolejne ilustracje (7-11) pokazują przykładowe rozwiązania techniczne, coraz mniejszych SAR, których wielkość pozwala na ich użycie na pokładzie UAV. Możliwe do uzyskania zobrazenie zostało przedstawione na rys. 12. Należy podkreślić, iż w zależności od zastosowanych częstotliwości dali nośnej możliwe jest nie tylko wykrywanie obiektów ukrytych pod warstwą roślinności lub prostych układów masujących, ale również pod powierzchnią ziemi.



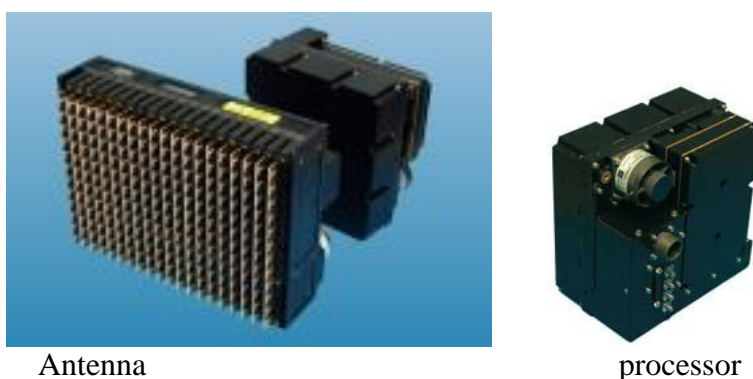
Rys. 7 EL/M-2055 SAR/MTI UAV Recce Payload (IAI/ELTA, Israel)



Rys.8 STacSAR – Lockheed Martin, SAR w pasmie J (17 GHz) Rozróżnialność (0,5-50m) , zasięg 10 km nadajnik o mocy 12 W, waga 29,5 kg



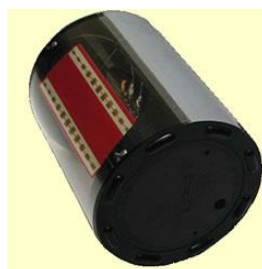
Rys.9 MiniSAR Tactical UAV SAR Payload (Sandia Labs / USA)



Antenna

processor

Rys.10 Pico SAR - SELEX Galileo FINMECCANICA COMPANY



Rys.11 NanoSAR – ImSAR & Insitu, Stripmap SAR/GMTI; pasmo X; Rozróżnialność 35 cm na zasięgu 1 km , waga 0,4 kg.



Rys. 12. Przykład obrazu z SAR

## 5. KONCEPCJE ELEKTRONICZNEGO PRZESZUKIWANIA PRZESTRZENI PRZEZ LOTNICZE RADARY WCZESNEGO OSTRZEGANIA.

Obecnie obserwuje się potrzebę wykorzystywania radaru lotniczego do realizacji jednocześnie wielu różnorodnych zadań. Wymagania formułowane w odniesieniu do współczesnego lotniczego radaru wielofunkcyjnego można scharakteryzować wskazując jego kluczowe zdolności operacyjne [3]:

- jednoczesne wykrywanie, śledzenie i klasyfikacja celów o różnych cechach i dynamice (np. samolot odrzutowy, helikopter w zawisie, rakieta balistyczna, BSL, okręt),
- realizacja różnorodnych zadań w wybranych obszarach przestrzeni, wykrywanie małych ( $RCS \ll 1 \text{ m}^2$ ) i położonych blisko siebie obiektów,
- pokrycie zadanego sektora przestrzeni,
- duży zasięg wykrywania różnych klas obiektów wykorzystujący zwiększony horyzont radiowy,
- niskie prawdopodobieństwo wykrycia radaru przez środki walki radioelektronicznej (LPI radar) oraz wysoka odporność na zakłócenia aktywne i pasywne,
- współpraca z systemami nadrzędnymi i wymiana danych z innymi platformami powietrznymi.

Powyższe założenia często prowadzą do przeciwstawnych wymagań technicznych stawianych współczesnemu radarowi. Wczesne wykrywanie i śledzenie samolotów myśliwskich wymaga zdolności jednoczesnego aktywnego śledzenia wielu celów, przeszukiwania dużego obszaru przestrzeni, zapewnienia dużej rozróżnialności (odległościowej i kątowej) i częstości odświeżania informacji o śledzonym obiekcie (rzędu pojedynczych sekund). Podobnie wykrywanie i śledzenie rakiet manewrujących i kierowanych (np. ARM) wymaga krótkich czasów odświeżania informacji i odpowiednio wysokiej zdolności wykrywania relatywnie małych obiektów ( $RCS < 1 \text{ m}^2$ ) na tle zakłóceń od powierzchni morza lub ziemi, zakłóceń pogodowych, przelatujących ptaków czy insektów. Z kolei wykrywanie śmigłowców, w szczególności w zawisie, wymaga długich czasów oświetlania celu operującego na niskim

pułapie i wykonywania pomiarów w obecności odbić od ziemi oraz obiektów stałych (np. budynków, ścian lasu, itp.) znajdujących się w pobliżu obserwowanego celu.

Okres odświeżania informacji nie jest parametrem krytycznym w przypadku śledzenia dużych celów, charakteryzujących się małą manewrowością i które mogą być wykryte w dużej odległości od radaru (np. okręt, bombowiec, rakiet TBM w fazie startu). Dokładne odwzorowanie trasy rakiet manewrujących wymaga nie tylko krótkiego czasu odświeżania informacji, ale również dokładnej estymacji współrzędnych. W przypadku celów o mniejszej dynamice (np. okrętów oraz dużych samolotów), wymagania na dokładność pomiaru położenia obiektu i jego prędkości nie są krytyczne.

W procesie projektowania radaru wielofunkcyjnego trudności techniczne osiągnięcia określonych wymagań i szerokiej gamy zdolności operacyjnych, odnoszą się, zatem do:

- określenia zakresu realizowanych funkcji przeszukania,
- śledzenia i kierowania systemami współpracującymi w zakładanym obszarze przestrzeni (zasięg, kąty pokrycia),
- określenia zakładanej dokładności pomiarów tras i trajektorii celów śledzonych oraz częstości odświeżania informacji,
- przyjęcia wiarygodnych warunków detekcji obiektu o określonej sygnaturze (RCS) na tle niepożądanego oddziaływania otoczenia radaru (powierzchni morza, ziemi, warunków pogodowych, itp.) lub obecności zakłóceń celowych (aktywnych i biernych).

Zdolność wykrywania celów przez radar opisuje prawdopodobieństwo detekcji i fałszywego alarmu, które odnoszą się do statystycznych zależności charakteryzujących zdolności wykrywania słabych sygnałów użytecznych ( $S$ ) na tle szumu ( $N$ ). Detekcja celu z maksymalnym prawdopodobieństwem oraz zapewnienie dużej dokładności pomiaru współrzędnych ( $X, Y, Z, V, t$ ) z minimalnym poziomem fałszywych alarmów wymaga uzyskania odpowiednio wysokiej wartości współczynnika sygnału do szumu ( $S/N$ ) na wejściu detektora. Korzystając z równania radarowego, współczynnik  $S/N$  można opisać w sposób, który pokazuje zależność tego parametru od trzech głównych komponentów odnoszących się do: systemu (budżetu energetycznego), obiektu (jego skutecznej powierzchni odbicia RCS) i środowiska (warunków propagacji, tj. współczynnika propagacji  $F_p$  i tłumienia sygnału w atmosferze  $L_\alpha$ ) [3]:

$$\frac{S}{N} = f(P_i, G_A, \lambda, T, B, L, D) \cdot f(RCS) \cdot f(F_p, L_\alpha)$$

Ponieważ dwa ostatnie człony równania nie zależą od właściwości projektowanego systemu radaru wielofunkcyjnego, kluczowym zagadnieniem projektowym jest właściwe ułożenie budżetu energetycznego radaru. Można założyć, że budżet energetyczny radaru jest określony przez okres czasu, w którym wiązka antenowa obserwuje obiekt w trakcie sondowania przestrzeni (ang. dwell time – TD) oraz przez poziom energii emitowanej/odbieranej na kierunku obiektu (moc impulsowa nadajnika  $P_i$ , zysk anteny  $G_A$ , długość fali elektromagnetycznej  $\lambda$ , temperatura szumów  $T$ , pasmo  $B$ , straty torów nadawczo-odbiorczych  $L$ , zysk obróbki  $D$ ). Wartość TD jest zależna od założonego sposobu przeszukiwania przestrzeni przez wiązkę antenową (antena nieruchoma/ obracana), charakterystyki antenowej (szerokość wiązki), ograniczeń systemowych (np. opóźnienia przełączania wiązki i przetwarzania danych). Liczba ech odebranych od obiektu zależy, więc od wartości TD oraz okresu powtarzania impulsów. Aby

zapewnić maksymalne zasięgi i najlepsze warunki pomiarowe korzystna jest maksymalizacja wartości TD, z drugiej strony, aby zapewnić częste odświeżanie informacji o szybko poruszającym się obiekcie w bliskiej odległości od radaru pożądane jest, aby wartość ta była możliwie mała.

Jak łatwo zauważyć radary z antenami nieruchomymi oferują swobodę kształtowania wartości TD i charakteryzują się budżetem energetycznym o większych możliwościach zarządzania [4], w porównaniu do rozwiązań z antenami obracanymi. W tych drugich budżet energetyczny jest silnie determinowany przez prędkość obrotową anteny, szerokość wiązki antenowej (w szczególności azymutalną) i sposób przeszukiwania elewacji.

Nieruchomy system antenowy potencjalnie oferuje możliwość bardziej efektywnego wyzyskania potencjału energetycznego radaru i zapewnienia optymalnych warunków pomiarowych a równocześnie nie zawierając elementów ruchomych jest łatwiejszy do zabudowy na platformie lotniczej. Antena nieruchoma z elektronicznym przeszukiwaniem umożliwia zmianę szerokości wiązki antenowej nawet dla każdego jej położenia [5], co jest dogodne dla optymalizacji czasu oświetlenia obiektu powietrznego.

W radarze z anteną nieruchomą do estymacji współrzędnych kątowych najczęściej stosuje się metody mono-impulsowe, poprzez odpowiednią generację zespołu ołówkowych wiązek odbiorczych (mono-impuls amplitudowy) lub formowanie dodatkowych charakterystyk różnicowych (mono-impuls amplitudowo-fazowy). Niekorzystnym zjawiskiem mającym wpływ na dokładność estymacji współrzędnych kątowych jest w przypadku anten ESPW odkształcanie się wiązki (poszerzanie i pochylanie) przy dużych odchyleniach od płaszczyzn prostopadłych do apertury anteny. Zjawisko to musi zostać uwzględnione przy projektowaniu charakterystyk mono-impulsowych (pelengacyjnych) wykorzystywanych w procesie estymacji.

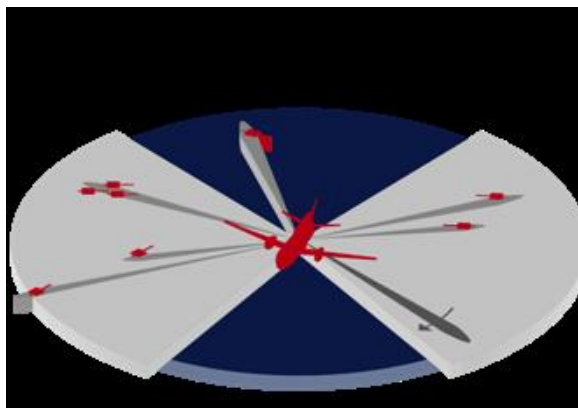
Dużo zalet anten nieruchomych, w tym przede wszystkim możliwość jednoczesnej realizacji wielu funkcji i zadań operacyjnych, wskazuje na ich przewagę w zastosowaniu do radarów wielofunkcyjnych instalowanych na platformach lotniczych.

W praktycznym wykorzystaniu właściwości radaru lotniczego wielofunkcyjnego z nieruchomą anteną z przeszukiwaniem elektronicznym, stosowana jest praca z czasowym przeplataniem różnych sposobów oświetlania przestrzeni:

- przeszukiwanie przestrzeni jedną lub wachlarzem wiązek ze stałym okresem odnawiania informacji w trybie wczesnego ostrzegania,
- dośledzanie obiektów powietrznych z dużą częstością dla wybranych priorytetowych tras,
- obserwacja wybranych obszarów powierzchni ziemi lub morza dla wytworzenia zobrazowania radarowego dużej rozdzielczości (SAR, ISAR),
- obserwacja powierzchni morza dla wczesnego wykrywania i śledzenia obiektów morskich,
- wykrywanie niebezpiecznych zjawisk pogodowych, pokrycia lodowego morza i zanieczyszczeń środowiska (plamyropy).

Przykład takiej organizacji realizacji funkcji przez radar lotniczy jest przedstawiony na rys.13 [6]. Skuteczność wykorzystania dysponowanej energii w lotniczym wielofunkcyjnym radarze zależy w dużej mierze od doboru sygnałów sondujących i ich sekwencji czasowych w poszczególnych rodzajach pracy.





Rys.13 Koncepcja równoczesnego przeszukiwania sektorów przestrzeni i śledzenia wybranych obiektów [6 ].

## 6. PODSUMOWANIE

Dokonany przegląd potrzeb w zakresie lotniczego rozpoznania elektronicznego oraz rozwiązań lotniczych systemów i ich właściwości wykazał, że zarówno systemy załogowe jak i bezzałogowe, ze względu na odmienne charakterystyki, mogą zapewnić użytkownikom niezbędne informacje. W zadaniach związanych z kontrolą sytuacji na dużych terytoriach i realizacją funkcji wczesnego ostrzegania, dogodniejsze jest stosowanie lotniczego systemu załogowego, w którym można zmniejszyć strumień danych przesyłany do naziemnych systemów dowodzenia i podejmować decyzje związane z korektą rozpoznania..

Lotnicze systemy bezzałogowe mają wystarczające zdolności dla prowadzenia rozpoznania związanego z działaniami na polu walki. Narzucającym się rozwiązaniem, które by wykorzystywało możliwości systemów załogowych i bezzałogowych, jest fuzja danych z tych systemów i zapewnienie ich współdziałania bezpośredniego lub przez nadrzędny system dowodzenia.

## LITERATURA

- [1] Grifits H.D. Baker C. Passive coherent location radar systems. IEE Proc. Radar, Sonar, Navigation. 2005. vol.132, no3.
- [2] Serafin P. Airborne SAR/ISAR. Seminarium WAT-SAAB 15.06.2012
- [3] Klembowski W. Sankowski M. Rutkowski T. Popik J. Problemy zarządzania zasobami radaru wielofunkcyjnego z nieruchomą anteną ESPW. Materiały Konferencji UiSR Listopad 2011. Wydanie WAT WEL.
- [4] Sabatini S., Tarantino M., *Multifunction Array Radar. System Design and Analysis*, Artech House, 1994.
- [5] Moore S. Airborne AESA Radar Research. IEEE A&S Systems Magazine, February 2010.
- [6] Winberg E. AEW&C in different domains. Seminarium WAT-SAAB 15.06.2012.
- [7] „Analiza porównawcza z systemem AWACS w ujęciu ekonomiczno-technicznym w tym analiza SWOT, alternatywnych rozwiązań systemu rozpoznania sytuacji powietrznej i dowodzenia z punktu widzenia potrzeb Rzeczypospolitej Polskiej”. Raport z pracy realizowanej dla Departamentu Spraw Obronnych Ministerstwa Gospodarki, IRE WEL WAT, Warszawa, 28 listopad 2008.