



Wielowrotniki Butlera w układach natychmiastowego pomiaru kierunku promieniowania elektromagnetycznego w zakresie mikrofal

ZDZISŁAW CHUDY, LESZEK KACHEL

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Z uwagi na dużą przydatność urządzeń rozpoznania i wykrywania emisji, autorzy podjęli prace badawcze oraz konstrukcyjne, dotyczące rozwiązań układowych natychmiastowego pomiaru kierunku opromieniowania w zakresie mikrofal z wykorzystaniem wielowrotników Butlera. W artykule przedstawiono przegląd rozwiązań układowych monoimpulsowego systemu rozpoznania i namiaru źródeł promieniowania w paśmie mikrofalowym. W części dotyczącej badań eksperymentalnych przedstawiony jest wynik badań układów pracujących w paśmie 2÷4 GHz.

Słowa kluczowe: namiar, promieniowanie mikrofalowe, matryca Butlera, mikrofalowy dyskryminator fazy, kołowy szyk antenowy, natychmiastowy system odbioru

Symbole UKD: 623.611 :: 621.396.663

Wstęp

Urządzenia rozpoznawcze spełniające wymagania klasy ESM (ang. *Electronic Support Measures*) przeznaczone są do wykrywania i rozpoznawania sygnałów emitowanych przez systemy radiolokacyjne. Dane z przeprowadzanego monitoringu środowiska elektromagnetycznego włącznie z danymi z analiz i identyfikacji emisji radarowych służą wypracowaniu niezbędnych decyzji w zakresie ocen sytuacji lądowej, nawodnej i powietrznej przez służby odpowiedzialne za bieżącą kontrolę stanu przestrzeni elektromagnetycznej. Natomiast w czasie pokoju wykorzystywane są urządzenia wywiadu (SIGINT), które służą do zbierania informacji o aktywności elektromagnetycznej i wojskowej monitorowanego środowiska.

Informacje zebrane przez systemy SIGINT służą do budowania i uzupełniania baz danych zawierających charakterystyki urządzeń radiolokacyjnych i komunikacyjnych. Główną funkcją systemów ESM oprócz ostrzegania przed zagrożeniem namierzenia przez wrogie systemy kierowania ogniem jest natychmiastowe określenie kierunków położenia i identyfikacja źródeł sygnałów elektromagnetycznych na podstawie przygotowanej wcześniej przez urządzenia SIGINT bazy danych. Systemy ESM realizują swoje funkcje w czasie rzeczywistym i umożliwiają bieżącą aktualizację informacji o rodzaju i typie urządzeń radioelektronicznych wykorzystywanych na polu walki [2].

1. Cechy urządzeń wykrywająco-rozpoznawczych

Zasadniczą funkcją urządzeń wykrywająco-rozpoznawczych jest wykrycie i rozpoznanie parametrów źródła promieniowania elektromagnetycznego. Obok funkcji rozpoznania, urządzenia te spełniają jednocześnie funkcję urządzeń ostrzegania o opromieniowaniu energią elektromagnetyczną. Przedstawiona w artykule koncepcja i rozwiązania konstrukcyjne systemu rozpoznania należą do grupy urządzeń natychmiastowych funkcjonujących w systemie monoimpulsowym. Opracowane moduły mikrofalowe i układy przetwarzania sygnałów stwarzają szanse na wykonanie nowoczesnego, małogabarytowego urządzenia o wysokich walorach technicznych i eksploatacyjnych z jednoczesnym zapewnieniem wysokiego prawdopodobieństwa wykrycia współczesnych źródeł promieniowania elektromagnetycznego [5, 9].

Zaletą działania środków ostrzegawczo-rozpoznawczych jest:

- działanie bez bezpośredniej styczności z obiektami rozpoznania;
- obejmowanie zasięgiem dużych przestrzeni;
- długotrwała funkcjonalność;
- zapewnienie podjęcia szybkiego przeciwdziałania;
- trudność zwalczania i skrytość działania.

Dodatkowo urządzenia te umożliwiają:

- szybkie określenie częstotliwości roboczej (nośnej);
- określanie zamiaru na ZE;
- dokładne określenie parametrów rozpoznawanych sygnałów: rodzaj modulacji, rodzaj transmisji (ciągła, impulsowa), czas trwania i powtarzania impulsu, polaryzacja;
- rejestrację sygnałów;
- przetwarzanie za pomocą elektronicznej techniki obliczeniowej.

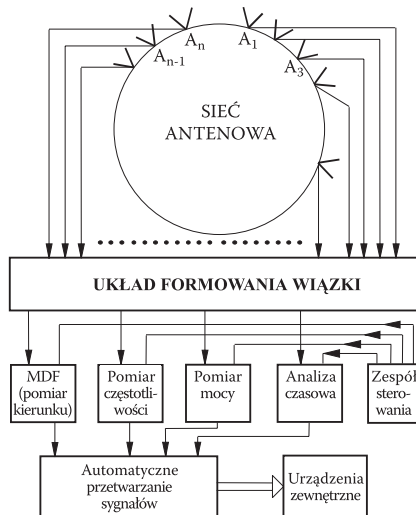
Wymienione cechy rozważane są szczegółowo przez każdego użytkownika urządzenia niezależnie (np. operator urządzenia na lądzie, operator urządzenia na wodzie, operator urządzeń obrony plot., pilot samolotu).

2. Istota systemu rozpoznania radioelektronicznego i kryteria doboru jego konfiguracji

Sygnaly docierajace do systemu namiaru zrodla promieniowania moga miec dowolna czestotliwosc, dowolna polaryzacje pola elektromagnetycznego, dowolna moc oraz moga dochodzic z dowolnego kierunku. Cechy odbieranych sygnalow emitowanych przez wymienione zrodla promieniowania narzucaja wymagania na systemy rozpoznania, ktore powinny charakteryzowac sie: szerokim pasmem pracy, duza czuloscia, dookolna charakterystyka promieniowania, a ponadto powinny byc polaryzacyjnie nieselektywne [1].

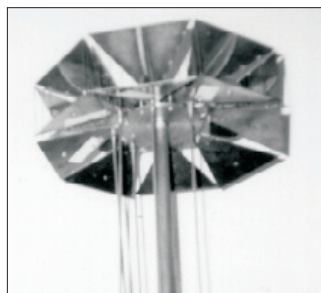
Typowe urzadzenie rozpoznawcze sklada sie z zespolu antenowego, odbiornika z analizatorem parametrów odbieranych sygnalow, ukladu namierzania i opracowywania uzyskanej informacji, aparatury kontrolno-pomiarowej i zespolu zasilania. Szczegolne znaczenie maja urzadzenia klasy ELINT pracujace w pasmie $0,5 \div 18$ GHz, uzywane glownie do prowadzenia monitoringu istniejacych sygnalow elektromagnetycznych, wysylanych przez pokladowe urzadzenia sledzenia i naprowadzania, naziemne stacje radiolokacyjne, systemy naprowadzania i nawigacji i itp. Sa to systemy monoimpulsowego odbioru i przetwarzania odbieranych sygnalow, analizujace ich amplitudy i fazy.

Przykladem rozwiazania jest system, w ktorym cylindryczny szyk anten kierunkowych polaczony z odpowiednimi wejsciami bloku rozdialu sygnalow (np. matryca Butlera) umozliwia dookolny namiar bez mechanicznego przeszukiwania w sposob natychmiastowy (rys. 1) [2].



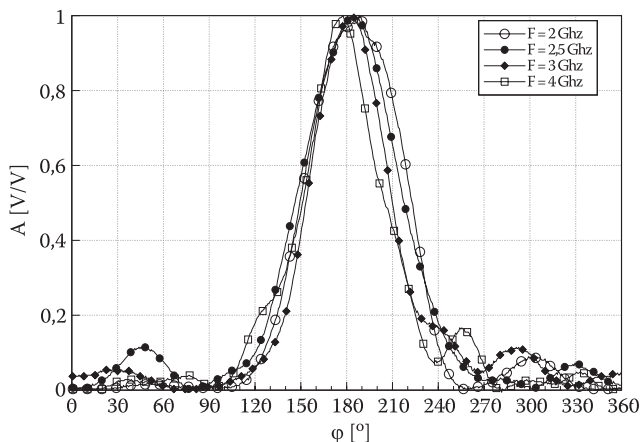
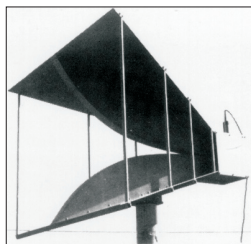
Rys. 1. Schemat blokowy dookólnego systemu namiaru

Publikacje dotyczące układów namiaru źródeł promieniowania elektromagnetycznego w niewielkim stopniu sygnalizują problemy związane z wykorzystywanym systemem antenowym. Podstawowe układy namierzania wykorzystywały anteny, które w sposób mechaniczny realizowały przeszukiwanie wybranego obszaru. Kolejnym etapem były systemy wykorzystujące układy antenowe z elektronicznie sterowaną wiązką. Jednak w dalszym ciągu układy te nie zapewniały natychmiastowej informacji o fakcie występowania promieniowania, jak również przestrzennego położenia jego źródła. Wymagania te spełniane są przez układy z dookólnym szykiem antenowym (rys. 2).



Rys. 2. Struktura cylindrycznego szyku anten tubowych

Popularnymi antenami w zakresie mikrofal, a w szczególności dla częstotliwości pracy powyżej 1 GHz są anteny tubowe grzbietowe. Anteny te pomimo niezbyt skomplikowanej technologii ich wykonania zapewniają duży zysk energetyczny, niski *WFS* oraz relatywnie szerokie pasmo pracy. Przykładowy widok tuby grzbietowej wykonanej w Zakładzie Mikrofal Instytutu Radioelektroniki WAT i pomierzone charakterystyki kierunkowe przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok anteny tubowej grzbietowej oraz jej charakterystyka amplitudowa dla zakresu częstotliwości 2-4 GHz

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają cechę szerokopasmowości analizowanej anteny tubowej. Pojedyncze anteny szerokopasmowe wykorzystywane są jedynie w systemach ostrzegania (RWR), które charakteryzują się prostą budową funkcjonalną, dużą niezawodnością, małą masą i względnie niską ceną realizacji.

Bardziej zaawansowane systemy pomiarowe typu ESM i SIGINT wymagają stosowania złożonych zestawów antenowych, w których jako podstawowe elementy promieniujące wykorzystuje się omówione anteny szerokopasmowe.

3. Wielowrotniki Butlera do współpracy z układem anten w namiarze źródeł opromieniowania

Wielowrotniki Butlera to układy formowania wiązki (UFW) realizowane w oparciu o sprzęgacze kierunkowe i przesuwniki fazy odpowiednio ze sobą połączone. Idea pracy opiera się na wykorzystaniu efektu wektorowego sumowania sygnałów w strukturach sprzęgaczy kierunkowych [5, 8, 9]. Źródłem sygnałów składowych poddawanych przekształceniu w sieci UFW są anteny odbiorcze tworzące szereg antenowy o ściśle określonych właściwościach. Podstawowym układem UFW, jest blok składający się z 4 sprzęgaczy 3 dB/90°, dwóch przesuwników fazy o wartościach -45° oraz odcinków linii je łączących (rys. 4).

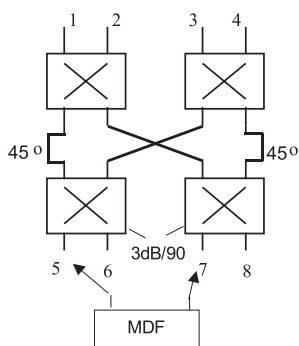


Tabela 1

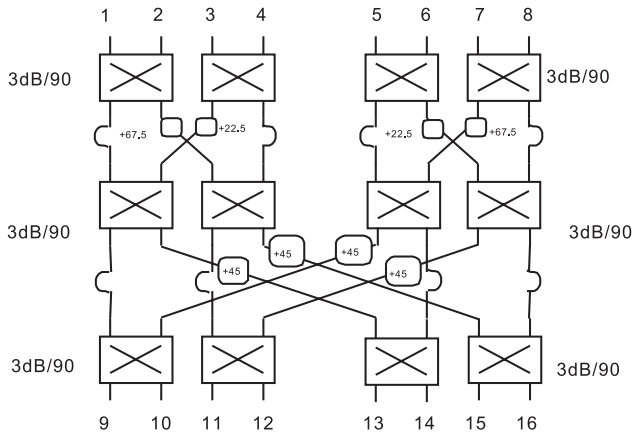
Nr wyj Nr wej	5	6	7	8	$\varphi_7-\varphi_5$ $\varphi_8-\varphi_6$	$\varphi_7-\varphi_6$
1	-45°	-135°	-90°	-180°	-45°	$+45^\circ$ $(+315^\circ)$
2	-135°	-225°	0°	-90°	$+135^\circ$ (-225°)	$+225^\circ$ (-135°)
3	-90°	0°	-225°	-135°	-135°	-225° $(+135^\circ)$
4	-180°	-90°	-135°	-45°	$+45^\circ$ (-315°)	-45°

Rys. 4. Struktura układu formowania wiązki antenowej dla systemu 4-antenowego

Rozbudowa struktury UFW do układu 8-wejściowego umożliwia współpracę z systemem 8 anten (rys. 5).

Analiza struktury macierzy przedstawionej na rysunku 4 pozwala stwierdzić, że określając różnice faz sygnałów między wyj. 7 i wyj. 5 ($\varphi_7-\varphi_5$) lub wyj. 8 i 6 ($\varphi_8-\varphi_6$), zauważymy, że odpowiadają one rozłożeniu anten na kole w punktach o azymucie -45° , -135° , 45° , 135° . W przypadku układu z rysunku 5, określając różnice faz sygnałów między wrotami wyjściowymi 11 i 9 lub 12 i 9 (kolejne inne kombina-

cje: 15-9, 16-9, 11-10, 12-10, 14-11, 14-12, 15-13) zauważymy, że odpowiadają one rozłożeniu anten na kole w punktach o azymucie $22,5^\circ$, $67,5^\circ$, $112,5^\circ$, $157,5^\circ$, $202,5^\circ$, $247,5^\circ$, $292,5^\circ$, $337,5^\circ$. Fakt ten oznacza, że mierząc różnicę faz sygnałów wychodzących z odpowiednich wrót wyjściowych, możemy określić rozkład wejść odwzorowujących przestrzenne równomierne rozmieszczenie anten.



Rys. 5. Struktura układu formowania wiązki antenowej dla systemu 8-antenowego

4. Analiza pracy i wyniki symulacji dookólnego systemu namiaru

Celem wykazania własności układów formowania, analizie poddano system namiaru zawierający układ 4 anten ($N = 4$), rozmieszczonych na obwodzie okręgu w punktach odniesienia -45° , -135° oraz $+45^\circ$, $+135^\circ$. Schemat strukturalny powyższego rozwiązania przedstawiono na rysunku 6.

Zastosowane anteny (tuby sektorowe), posiadają charakterystyki kierunkowe opisane zależnością (1)

$$F(\Theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \sin \Theta\right)}{\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \sin \Theta}, \quad (1)$$

gdzie: D — szerokość apertury anteny.

Anteny tworzą po połączeniu szereg dookólny o własnościach kierunkowych opisanych zależnością:

$$A_n(\Theta) = \frac{\sin \left\{ \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \sin \left[\Theta - (2n-1) \frac{\pi}{2N} \right] \right\}}{\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \sin \left[\Theta - (2n-1) \frac{\pi}{2N} \right]}, \quad (2)$$

gdzie $n = \pm N/2$.

Uwzględniając fakt, że UFW wnosi zmiany faz sygnałów w zależności od układu wejście — wyjście (tab. 1), można wykazać że prąd w. cz. we wrotach wyjściowych 5 i 7 w warunkach obecności sygnału we wrotach wejściowych 1 i 4 będzie określony przez zależności:

$$i_5 = \frac{A_1(\Theta)}{(\sqrt{2})^2} \sin(\omega t - 45^\circ) + \frac{A_4(\Theta)}{(\sqrt{2})^2} \sin(\omega t - 180^\circ) \quad (3)$$

$$i_7 = \frac{A_1(\Theta)}{(\sqrt{2})^2} \sin(\omega t - 90^\circ) + \frac{A_4(\Theta)}{(\sqrt{2})^2} \sin(\omega t - 135^\circ). \quad (4)$$

Dokonując przekształceń zależności (3 i 4) z uwzględnieniem zasad sumowania sygnałów w sprzęgaczu kierunkowym, można wyznaczyć wypadkowe fazy sygnałów we wskazanych wyjściach w postaci tangensów kątów ϕ_5 oraz ϕ_7 , a następnie ich różnicę ϕ_{7-5} wg zależności:

$$\operatorname{tg} \phi_{7-5} = \frac{\operatorname{tg} \phi_7 - \operatorname{tg} \phi_5}{1 + \operatorname{tg} \phi_7 \operatorname{tg} \phi_5}. \quad (5)$$

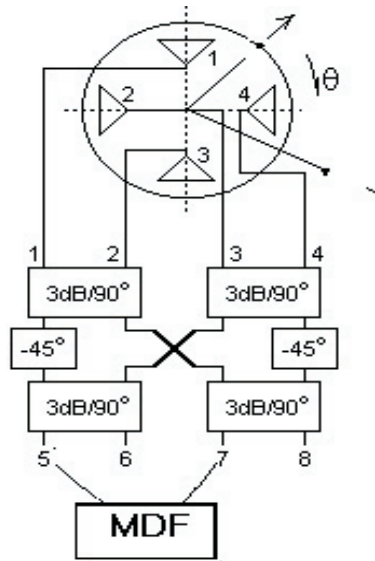
Uzupełniając równania (3)(5) parametrami anten, wyznaczymy wartość kąta przychodzenia sygnału, czyli namiar Θ . Uzyskana wartość zdeterminowana jest cechami UFW. Występujący błąd namiaru $\delta\Theta$ wyrazi się różnicą obliczonego kąta $\phi_{0,75}$ i rzeczywistego namiaru Θ :

$$\delta\Theta = \phi_{7-5} - \Theta. \quad (6)$$

Analizę własności układu w funkcji zmian kąta namiaru Θ , przeprowadzono dla częstotliwości środkowej pasma pracy $f_s = 3$ GHz na podstawie sformułowanych uogólnionych zespolonych transmitancji opisujących relacje sygnałów (od wejść do wyjść UFW z uwzględnieniem transmitancji sprzęgaczy kierunkowych C_s — wrota sprzężone i T_b — wrota bezpośrednie):

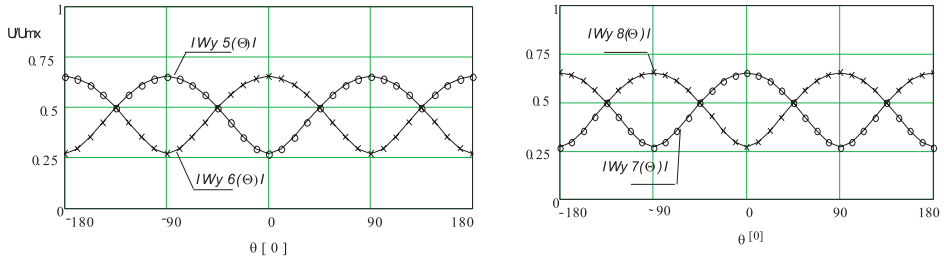
$$\begin{aligned}
 Y_5(f) &= [A_1(\Theta) \cdot C_s(f) + A_2(\Theta) \cdot T_b(f)] \cdot S_p(f) \cdot C_s(f) + [A_3(\Theta) \cdot C_s(f) + A_4(\Theta) \cdot T_b(f)] \cdot S_L(f) \cdot T_b(f) \\
 Y_6(f) &= [A_1(\Theta) \cdot C_s(f) + A_2(\Theta) \cdot T_b(f)] \cdot S_p(f) \cdot T_b(f) + [A_3(\Theta) \cdot C_s(f) + A_4(\Theta) \cdot T_b(f)] \cdot S_L(f) \cdot C_s(f) \\
 Y_7(f) &= [A_1(\Theta) \cdot T_b(f) + A_2(\Theta) \cdot C_s(f)] \cdot S_L(f) \cdot C_s(f) + [A_3(\Theta) \cdot T_b(f) + A_4(\Theta) \cdot C_s(f)] \cdot S_p(f) \cdot T_b(f) \\
 Y_8(f) &= [A_1(\Theta) \cdot T_b(f) + A_2(\Theta) \cdot C_s(f)] \cdot S_L(f) \cdot T_b(f) + [A_3(\Theta) \cdot T_b(f) + A_4(\Theta) \cdot C_s(f)] \cdot S_p(f) \cdot C_s(f)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Symbole $A_1(\Theta) \div A_4(\Theta)$ oznaczają sygnały z anten zmodulowane ich własnościami kierunkowymi, podawane na odpowiednie wejścia (1÷4) UFW. Symbole $Y_5 \div Y_8$ oznaczają sygnały wychodzące z odpowiednich wyjść matrycy 5÷8 (rys. 6). Transmitancje odcinków linii łączących sprzęgacze oznaczono przez $S_L(f)$ oraz przesuwники fazy $S_p(f)$. Powyższy układ równań, pozwala na analizę układu w funkcji kąta namiaru Θ . Wyznaczone w procesie symulacji zmiany modułów i faz sygnałów we wrotach wyjściowych 5÷8 sieci dla poziomu przecięć charakterystyk kierunkowych anten -3 dB, przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

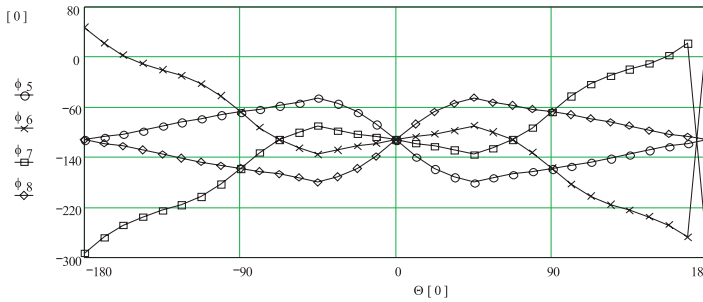


Rys. 6. Schemat blokowy układu namiaru z UFW typu 4×4 z MDF (miernik fazy)

Zmiany amplitud wyjściowych sygnału z wrot UFW mają ścisły związek z rozkładem zmian amplitud wejściowych. Charakterystyki zmian faz sygnałów wyjściowych w poszczególnych wrotach 5÷8, są źródłem informacji o położeniu kątowym źródła oświetlającego system. W analizowanym zakresie zmian kąta $\Theta \in (-180 \div 180^\circ)$, wyraźnie uwidacznia się podział na cztery sektory kątowe o szerokościach 90° . W sektorach tych zmiany faz mają regularny charakter, co oznacza, że w przedziałach tych błąd



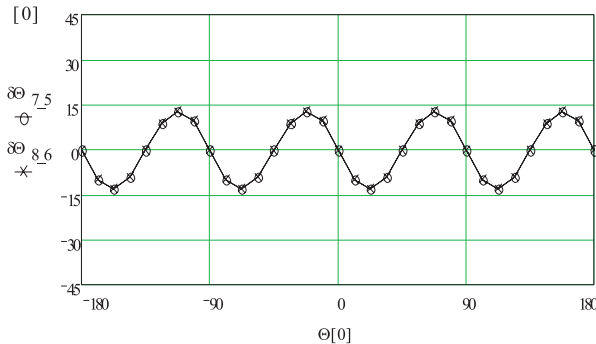
Rys. 7. Rozkład amplitud sygnałów wyjściowych UFW systemu namiaru 4-antenowego (poziom przecięć charakterystyk kierunkowych -3 dB)



Rys. 8. Rozkład faz sygnałów wyjściowych UFW systemu namiaru 4-antenowego (poziom przecięć charakterystyk kierunkowych -3 dB)

namiaru będzie miał małą wartość. Uzyskane z symulacji wartości błędów namiaru $\delta\Theta$ dla poziomów przecięć: -3 dB, przedstawiono na rysunku 9.

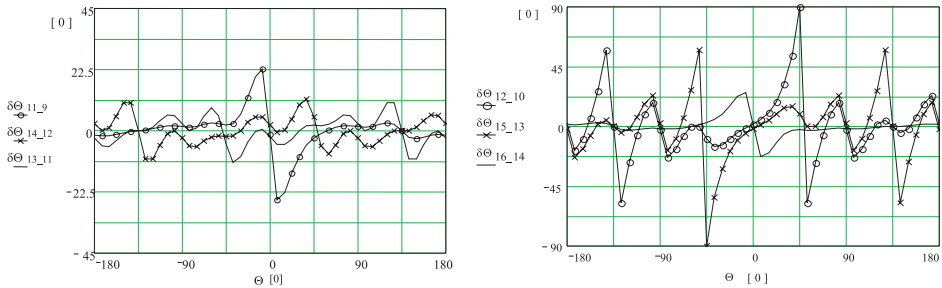
Obserwując kształty charakterystyk błędów w pełnym zakresie kąta azymutu (namiaru) $\Theta \in (-180 \div 180^\circ)$, zauważyć można, że zerowe błędy namiaru występują dla kątów namiaru odpowiadających kątom usytuowania przestrzennego anten odbiorczych oraz w punktach (kątach) odpowiadających przecięciu charakterystyk kierunkowości anten.



Rys. 9. Błędy namiaru w systemie 4-antenowym (poziom przecięć -3 dB)

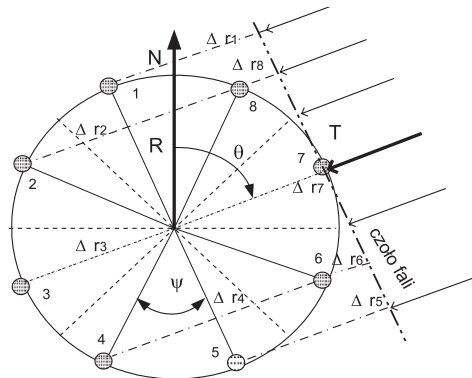
Charakter zmian błędu ma ścisły związek ze zmianami amplitud sygnałów wejściowych pochodzących od anten. Maksimum wartości błędu występuje w przedziale namiaru kątów odpowiadających wartościom między kątami osi elektrycznych poszczególnych anten, a kątami osi równych sygnałów danej anteny z sąsiednimi.

Szyk antenowy zawierający 8 anten tubowych, jest źródłem sygnałów dla UFW typu 8×8 (rys. 3). Wyznaczone w procesie symulacji pracy układu, zmiany faz sygnałów we wrotach wyjściowych 9÷16 sieci w funkcji kąta namiaru Θ , pozwoliły na ocenę dokładności namiaru (rys. 10).



Rys. 10. Błędy namiaru z UFW typu 8×8 współpracującym z szykiem 8 anten

Wybór wrót wyjściowych 13÷11, 14÷12 zapewnia błąd średni $\leq \pm 3^\circ$. W przypadku wrót 11÷9, 16÷14 błąd namiaru poza sektorem $\pm 45^\circ$, osiąga wartość $\leq \pm 1,5^\circ$. W sektorze kąta $\pm 45^\circ$, występuje skokowa zmiana znaku błędu i przyrost jego wartości (max rzędu $\pm 22,5^\circ$). Cecha ta wskazuje, że dokonując namiaru z przełączaniem wrót dla odpowiednich półpłaszczyzn azymutu, możemy zapewnić dokładność namiaru $\delta\Theta \leq 1,5^\circ$. Kąt rozstawu anten Ψ , na obwodzie koła ściśle powiązany jest z ilością anten (rys. 11).



Rys. 11. Rozkład anten z zaznaczonymi własnościami kątowymi

Dla N anten:

$$\Psi = 2 \frac{\pi}{N}. \quad (8)$$

Mając na uwadze skończone wymiary anten, odległość między sąsiednimi antenami tzw. baza d uzależniona jest od wartości promienia okręgu r :

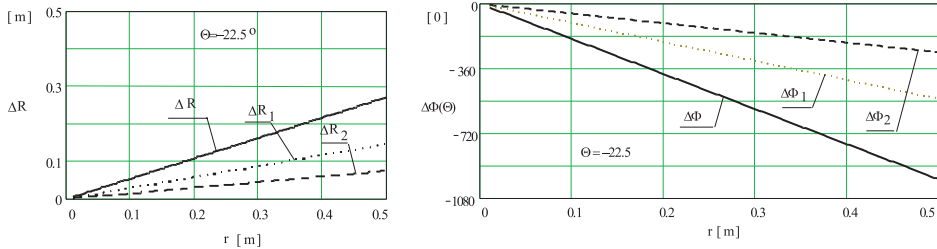
$$d(r) = 2r \sin \frac{\pi}{N}. \quad (9)$$

Rozważając szyk cylindryczny, zawierający N anten zauważamy, że występuje stały związek między wartością promienia r , wartością bazy d anten oraz ich ilością. Towarzyszy temu zjawisko zmiany drogi fazowej fali padającej do poszczególnych anten (dla różnych kątów odbioru Θ jest różna: $\Delta r_1 \neq \Delta r_2 \neq \dots \Delta r_N$). Różnica dróg ΔR dla fal padających względem czoła uzależniona jest od: ilości anten N , wartości kąta namiaru Θ , promienia rozstawu anten r , częstotliwości namierzanego sygnału:

$$\Delta R(\Theta) = d(r) \sin \Theta. \quad (10)$$

Wyznaczone przykładowe wartości różnicy dróg ΔR dla kąta: $\Theta = -22,5^\circ$, z uwzględnieniem zmiany liczby anten szyku, dla układu dwóch sąsiednich anten, przedstawiono na rysunku 12a. Różnica dróg warunkuje zmiany fazy początkowej $\Delta\Phi(\Theta)$ sygnałów docierających do anten:

$$\Delta\Phi(\Theta) = 2 \frac{\pi}{\lambda_0} \Delta R(\Theta). \quad (11)$$

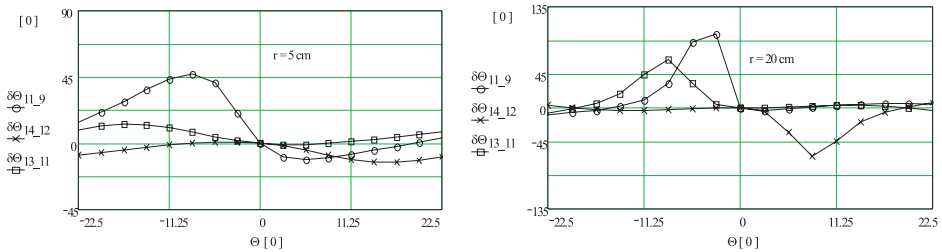


Rys. 12. Zmiany wartości różnicy dróg i fazy początkowej sygnałów docierających do anten a) zmiany ΔR dla $N = 4$; ΔR_1 dla $N = 8$; ΔR_2 dla $N = 16$; b) zmiany $\Delta\Phi$ przy $N = 4$; $\Delta\Phi_1$ przy $N = 8$; $\Delta\Phi_2$ przy $N = 16$

Zmiany fazy początkowej $\Delta\Phi$ sygnału docierającego do anteny w układzie dwóch sąsiednich anten szyku N -elementowego, przedstawiono na rysunku 12b.

Uwzględnienie faz początkowych sygnałów od anten z tytułu niezerowego promienia ich rozmieszczenia, wymaga zmodyfikowania algorytmu pracy systemu (7). Przeprowadzone symulacje dla układu zawierającego 8 anten (sektor opromieniowania: $\Theta \in -22,5 \div 22,5^\circ$), dla dwóch wartości promienia ($r = 5$ i $r = 20$ cm),

wyznaczają błędy namiaru dla wybranych par wrót wyjściowych. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Błędy namiaru kąta oświetlenia systemu z uwzględnieniem promienia szyku anten

Zróznicowanie faz początkowych odkształca przebieg krzywych błędów w stosunku do krzywych błędów z rysunku 12, które nie uwzględniają wpływu zmian wartości promienia r . Przeprowadzona analiza i uzyskane wyniki symulacji pracy zarówno 4-, jak i 8-antenowego systemu namiaru na źródło oświetlające dany system wskazują, że:

- gwarantują pomijalnie małe błędy namiaru dla kątów odpowiadających osiom elektrycznym danej anteny i kątów osi równych sygnałów sąsiednich anten;
- w zależności od kombinacji wrót wyjściowych UFW, istnieje możliwość dokładniejszego namiaru;
- można wyróżnić sektory o zwiększonej dokładności realizowanego namiaru przy uwzględnieniu przełączania par wrót wyjściowych.

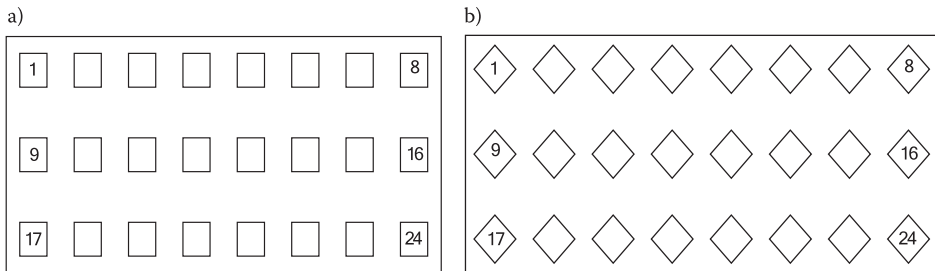
Przedstawione oddziaływanie zmian wartości promienia rozstawu r wykazuje, że dla określonej szerokości charakterystyk kierunkowych anten możemy dobrać odpowiednią średnicę koła szyku, przy której błędy namiaru będą najmniejsze. W celu zmniejszenia wpływu średnicy koła szyku należy zmienić ilość anten lub dobrać anteny o innych wymiarach, zapewniających utworzenie nowego szyku o zmniejszonym promieniu koła ich rozstawu.

5. System namiaru źródeł opromieniowania w zakresie mikrofal

Jednym z rozwiązań spełniających oczekiwania stawiane systemom namiaru jest koncepcja układu z wykorzystaniem systemu antenowego (szyk liniowy lub kołowy) umożliwiającego elektroniczne precyzyjne kształtowanie wiązki antenowej będącej źródłem sygnałów dla matrycy Butlera celem zgromadzenia niezbędnych danych rozpoznawczych o źródłach promieniowania. Rozwiązanie takie może być podstawą wstępnego automatycznego namiaru w paśmie od 2 do 18 GHz.

Rozszerzenie zakresu częstotliwości jest możliwe poprzez zastosowanie właściwej technologii wykonania podzespołów mikrofalowych przy zachowaniu podobnej struktury układu.

Strukturę systemu w wariantcie wykorzystania płaskiego szyku anten przedstawiono na rysunku 14. Szyk antenowy złożony jest z szerokopasmowych anten kierunkowych typu tuba grzbietowa. Mogą one być rozmieszczone w 3 wierszach po osiem anten (rys. 14), a uwzględniając możliwość odbioru polaryzacji pionowej i poziomej można je rozmieścić ukośnie pod kątem 45° . Odległości między antenami są dobierane doświadczalnie. O wypadkowym kształcie charakterystyki systemu antenowego będą decydować wymiary i parametry anten.

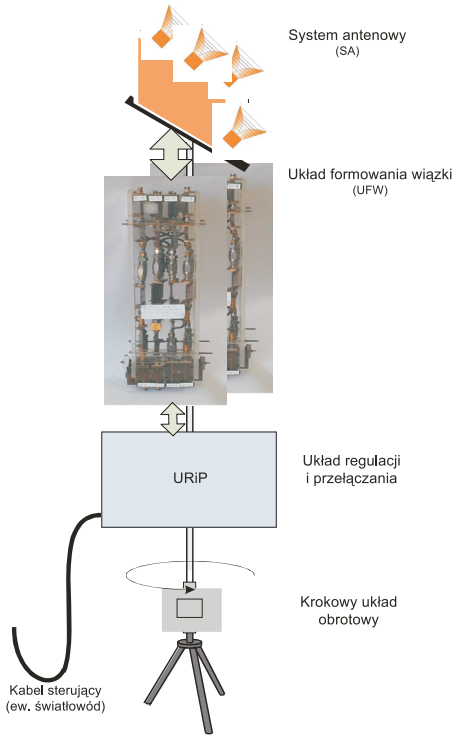


Rys. 14. Sposób rozmieszczenia anten tubowych grzbietowych systemu antenowego (S.A.): a) wariant podstawowy; b) skośnie pod kątem 45° względem płaszczyzny pionowej

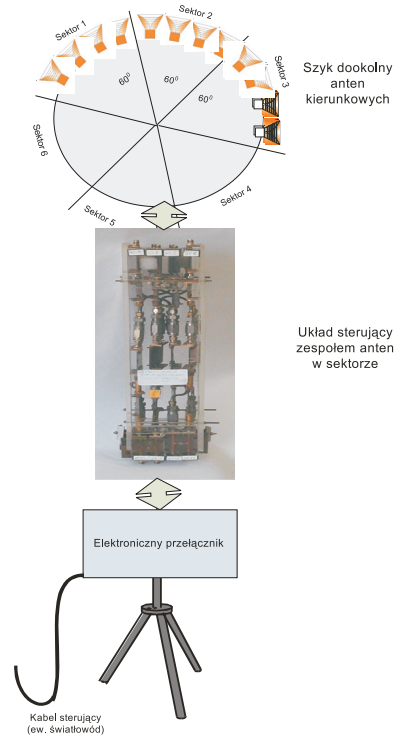
Prezentowany na rysunku 15 wariant systemu namiaru zawiera oprócz bloku anten moduły: układ formowania wiązki (UFW), układ regulacji i przełączania (URiP) oraz złącze obrotowe.

Moduł formowania wiązki to układ z wykorzystaniem matrycy Butlera (typu 8×8).

Drugim układem zasadniczo różnym od poprzedniego jest układ zawierający system anten kierunkowych w szyku dookólnym będącym źródłem sygnałów dla matrycy Butlera o ilości wejść odpowiadającej ilości anten (rys. 16). To, co różni ten system od poprzedniego, to możliwość jednoczesnej obserwacji w zakresie kąta pełnego oraz brak głowicy obrotowej. Wykorzystanie antenowego systemu dookólnego i kilku sektorowych umożliwia dokonywanie namiaru w pierwszej kolejności tzw. zgrubnego, a następnie dokładnego w wydzielonym sektorze.



Rys. 15. Struktura systemu antenowego z uwzględnieniem układów sterujących

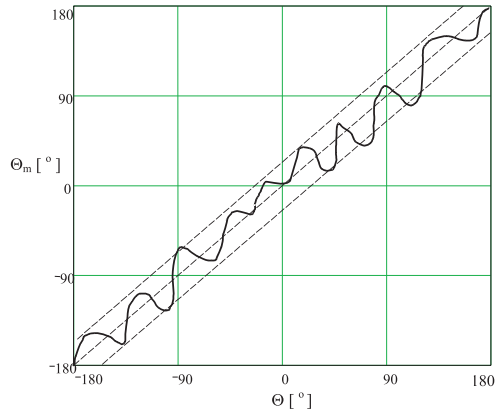
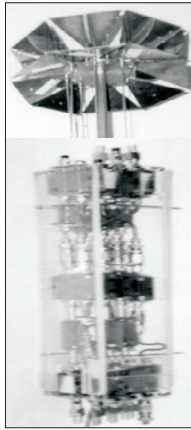


Rys. 16. Struktura systemu namiaru z sektorowym szykiem dookołnym anten kierunkowych

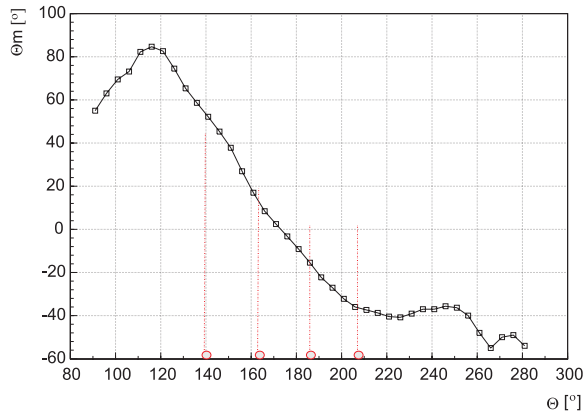
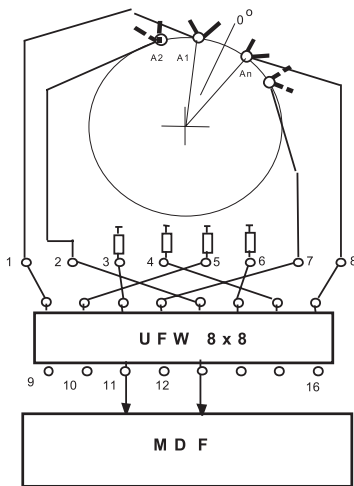
6. Wynik badań eksperymentalnych

Wykorzystując uzyskane wyniki z przeprowadzonych analiz teoretycznych, przeprowadzono badania eksperymentalne układów złożonych z dookołnego i sektorowego szyku anten typu tuba grzbietowa (rys. 3) i matrycy Butlera zrealizowanej zgodnie z rysunkiem 5. Pomiaru kąta opromieniowania dokonano z wykorzystaniem układu mikrofalowego dyskryminatora fazy (MDF) dołączonego do wrót 9 i 11 sieci Butlera. Widok układu namiaru oraz uzyskaną charakterystykę pelengacyjną dla sygnału namierzanego źródła o częstotliwości 3 GHz przedstawiono na rysunku 17.

Pomierzone wartości kątów Θ_m to namiary ZE w stosunku do znanych położeń kątowych Θ . Występujące odchylenia pomierzonych wartości w stosunku do linii ciągłej są wynikiem rzeczywistych parametrów podzespołów i występujących oddziaływań obejmujących interferencje fal sygnałów przetwarzanych w strukturze zestawu pomiarowego oraz oddziaływania otoczenia. Odmiennym układem namiaru jest układ przedstawiony na rysunku 18.



Rys. 17. Widok modelu systemu namiaru i pomierzona charakterystyka pelengacyjna



Rys. 18. Widok struktury systemu namiaru sektorowego i uzyskana charakterystyka pelengacyjna dla sygnału namierzanego źródła o częstotliwości 3 GHz

Zmodyfikowany system namiaru (rys. 10) zawiera: MDF, układ formujący (typu 8×8) oraz system 4 anten rozstawionych w sektorze 67,5°. Zastosowanie UFW ośmiowieściowego wymaga uwzględnienia współczynnika transformacji kąta odpowiadającego wartości 2 wynikającego z układu szyku anten (odpowiadającego UFW typu 16×16). Zmianie ulega nachylenie charakterystyki pelengacyjnej systemu. Udokładnienie namiaru w układzie sektorowym (rys. 18) wynika z faktu zmniejszenia ilości stopni transformacji amplitudowo-fazowej odbieranego sygnału.

7. Wnioski

Zasadniczo stawiane wymagania dla urządzeń odbiorczych z dookólnym szykiem anten odbiorczych sprowadzają się do spełnienia warunków:

- szerokopasmowość 2-18 GHz (z możliwością rozbudowy do zakresu częstotliwości 0,5-40 GHz),
- prawdopodobieństwo wykrycia 100%,
- rozpoznanie sygnałów w czasie rzeczywistym,
- dokładność określania częstotliwości nośnej poniżej 0,1% dla każdego odebranego impulsu,
- dokładność określenia zmian częstotliwości w trakcie trwania impulsu rzędu 100 kHz,
- dookólny system antenowy z monoimpulsowym układem namiaru kierunku,
- dokładność namiaru kierunku w azymucie $2,5^\circ$ wartości skutecznej,
- czułość systemu > -60 dBm.

Uwzględniając przedstawione oczekiwania i możliwości technologiczne, aktualnie możliwym jest realizacja toru antenowego w wersji szerokopasmowej (wielostopniowa głowica — bloki anten na podpasma). Dostępne na rynku wzmacniacze w pełni zapewniają żądane parametry w zakresie od 0,5-40 GHz. W przedstawionej propozycji ocena namiaru podejmowana jest na podstawie wskazań pojedynczego specjalizowanego układu MDF bez znajomości częstotliwości sygnału. Wykorzystując dookólne przestrzenne rozmieszczenie systemu anten odbiorczych mamy możliwość natychmiastowej oceny namiaru na podstawie odbioru pojedynczego impulsu sygnału. Dodatkowa współpraca UFW (wolne wrota wyjściowe) z mikrofalowym dyskryminatorem częstotliwości (MDCz) i innymi układami przetwarzania umożliwia pomiar parametrów czasowych i częstotliwościowych namierzanych źródeł.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.10.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 16.11.2006 r.

LITERATURA

- [1] J. BUTLER, R. LOVE, *Beamforming matrix simplifies design of electronically scanned antennas*, Electronic Design, vol. 9, April 1961.
- [2] S. LIPSKY, *Microwave passive direction finding*, John Wiley & Sons, 1987.
- [3] J. POPIK, M. SŁĄBA, Z. KOWALCZYK, *Cylindrical Antenna Array Feeding Network For Electronic Scanning*, MIKON, t. 1, 1998, 384-388.
- [4] A. RUTKOWSKI, *Systemy namiaru kierunku z macierzą Butlera*, I Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy rozpoznania i walki radioelektronicznej”, Żegiestów, grudzień 1995, 113-122.
- [5] B. STEC, Z. CHUDY, L. KACHEL, *Monoimpulsowy układ formowania wiązki antenowej w systemie namiaru źródeł promieniowania elektromagnetycznego*, V Szkoła-Konferencja „Metrologia wspomagana komputerowo”, Rynia k/W-wy, 21-24.05.2001, 291-298.

- [6] B. STEC, Z. CHUDY, L. KACHEL, *Multielement Circuits for High Frequency Signals in Receiving Systems*, MIKON, t. I, Wrocław, 21-24.05.2000, 61-64.
- [7] B. STEC, Z. CHUDY, L. KACHEL, *Szerokopasmowy układ formowania wiązki antenowej dookólnego systemu namiaru źródeł promieniowania*, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji PAN, nr 2, 2001, 255-271.
- [8] B. STEC, *Radioelectronic Reconnaissance Monopulse Station*, International Defence Conference, Abu Dhabi, 19-23 March 1995, 553-567.
- [9] Z. CHUDY, L. KACHEL, *Monoimpulsowy bierny układ pomiaru kierunku na źródło promieniowania mikrofalowego*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2002.

Z. CHUDY, L. KACHEL

**Butler matrix for devices of immediate direction
finding of microwave radiation sources**

Abstract. Research and development works over systems were undertaken for their great usability. The systems concerns microwave detection used Butler's matrix. In this paper is presented the review of the monoimpulse systems dedicated for detection of the bearing direction in microwave band. In this paper in the part dedicated for experiments description we show the results for devices working in the 2-4 GHz band.

Keywords: direction finding, microwave radiation, Butler matrix, microwave phase discriminator, cylindrical antennas arrays, immediate receiving system

Universal Decimal Classification: 623.611 : : 621.396.663

