



Monoimpulsowa detekcja i namiar źródeł promieniowania elektromagnetycznego o zakresie mikrofalowym

ZDZISŁAW CHUDY

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

Streszczenie. Artykuł dotyczy problematyki detekcji i namiaru źródeł sygnałów emitowanych przez radioelektroniczne źródła promieniowania energii elektromagnetycznej. Dane z monitoringu i analiz są informacjami o cechach odbieranego sygnału i jego źródłach, niezbędnymi do podjęcia decyzji o ocenie stanu elektromagnetycznego na ziemi, morzu i w powietrzu. Rozważane rozwiązanie jest przykładem bezzwłocznego systemu monoimpulsowego.

Słowa kluczowe: Monoimpulsowa detekcja, namiar, mikrofałe, system ostrzegania

Symbole UKD: 621.396.969

Wstęp

Współczesny, duży postęp w technologii wytwarzania podzespołów elektronicznych i dokładności ich wykonania, wraz ze stałym rozszerzaniem zakresu wykorzystywanych częstotliwości i jednoczesnym wykorzystaniem nowych narzędzi komputerowego wspomaganie analiz i projektowania stanowią wytyczne dla rozwoju prac badawczych i konstrukcyjnych. Prace te mają na celu nowe typy systemów odbiorczych, umożliwiających wykrycie i analizę sygnałów emitowanych przez urządzenia nadawcze, które podlegają ciągłemu rozwojowi. Realizowany za pomocą systemów odbiorczych proces detekcji sygnału jest źródłem podstawowych informacji służących ocenie cech odbieranego sygnału. Źródłami promieniowania elektromagnetycznego (ZE) są głównie: urządzenia radiolokacyjne, radiostacje, nadajniki, środki nawigacji. Obiekty te mogą być wykrywane, rozpoznawane

i lokalizowane w wyniku odbioru i analizy ich sygnałów przez środki rozpoznania radioelektronicznego występujące w urządzeniach naziemnych, w wyposażeniu platform latających standardowych i bezpilotowych wykorzystywanych w monitoringu stanu środowiska elektromagnetycznego [1, 2, 3, 4].

Rozpoznanie radioelektroniczne z technicznego punktu widzenia może mieć charakter aktywny bądź pasywny. Dla rozpoznania aktywnego wykorzystywane są środki emitujące energię elektromagnetyczną, w przypadku pasywnego — wykorzystywane są środki przystosowane tylko do odbioru tej energii. Rozpoznanie radiowe (*Communication Intelligence — COMINT*) polega na wykrywaniu i lokacji środków łączności radiowej, radioliniowej, a także środków zakłóceń radiowych włącznie z analizą tekstów i parametrów sygnałów od tych środków. Rozpoznanie radiolokacyjne (*Electronic Intelligence — ELINT*) obejmuje przedsięwzięcia wykrywania i określania miejsca położenia środków radiolokacji, radionawigacji i zakłóceń radiolokacyjnych z analizą ich sygnałów [1, 2, 4].

Współczesne urządzenia namiaru źródeł promieniowania elektromagnetycznego

Współcześnie wymaga się stosowania specjalizowanych urządzeń ostrzegania, rozpoznania (ESM) i innych, które umożliwiają prowadzenie działań w ramach walki elektronicznej. Szczególne znaczenie operacyjne mają urządzenia pracujące w paśmie 0,5÷18 GHz, używane do prowadzenia monitoringu istniejących źródeł sygnałów elektromagnetycznych. Głównym zadaniem jest precyzyjne określenie kierunków przychodzenia sygnałów i identyfikacja ich źródeł oraz wykrywanie i szybkie ostrzeżenie o ich pracy. Sprostanie tym oczekiwaniom wymaga dostatecznie dużej czułości i dużej precyzji namiaru. Precyzyjny namiar wymaga zastosowania odpowiedniego zespołu antenowego, który w zależności od przyjętej metody pomiarowej zasadniczo określa możliwości graniczne każdego systemu. Obserwacje ogólnych tendencji rozwojowych w konstruowaniu urządzeń i systemów radioelektronicznych, a w szczególności układów przetwarzania sygnałów, wskazują na istotny wzrost zainteresowania specjalistów stosowaniem sygnałów szerokopasmowych z jednoczesnym wzrostem wartości wykorzystywanych częstotliwości.

Urządzenie namiaru powinno zagwarantować: duże prawdopodobieństwo przechwyty, dużą dokładność namiaru, zoptymalizowane procedury wykrywania i przechwytywania sygnałów, zdolność do działania w „gęstym” środowisku elektromagnetycznym [5]. Nowe rozwiązania technologiczne w dziedzinie urządzeń wykrywania i rozpoznania obejmują: szerokie pasmo częstotliwości wykrywanych sygnałów (do 40 GHz), konwertery AC o dużej szybkości i wysokiej rozdzielczości, bardzo czułe odbiorniki rozpoznania o dużej szybkości skanowania, szerokopasmowy cyfrowy natychmiastowy namiar, szerokopasmowy cyfrowy natychmiastowy

pomiar częstotliwości oraz przetwarzanie i analizę w czasie rzeczywistym. Stąd też urządzenia klasy ESM wykorzystują w swych rozwiązaniach:

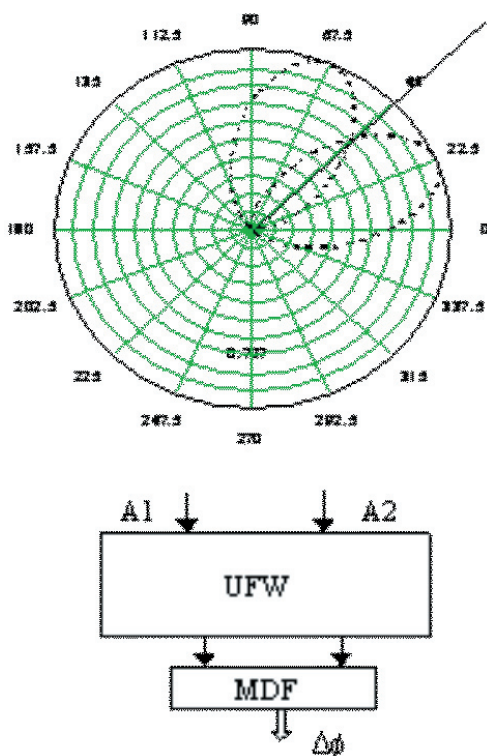
- zestawy i szyki antenowe (anten y i szyki szerokopasmowe, układy zmiany polaryzacji);
- głowice odbiorcze (odbioru bezpośredniego, interferometryczne, przestraiane wąsko i szerokopasmowe, macierzowe);
- moduły pomiarowe (pomiar częstotliwości, demodulatory FM i AM, odbiorniki cyfrowe);
- moduły przetwarzania danych (algorytmy pomiarowe, procesory sygnałowe, bazy danych, komputery).

Natomiast kryteria opisujące własności urządzeń ESM określają względy:

- funkcjonalne: prawdopodobieństwo przechwyty sygnалу, czułość (detection range), dokładność namiaru, odporność na zakłócenia, zdolność do rozpoznania sygnałów o szczególnych własnościach;
- techniczno-ekonomiczne: koszt, ergonomia, wymiary, waga, zasilanie.

Wymienione kryteria rozważane są szczegółowo w zależności od użytkownika (np. operator urządzenia na łądzie, operator urządzeń obrony plot., pilot samolotu). Obecnie rozwijane bezałogowe aparaty latające stanowią jeden z najbardziej wyrafinowanych i zaawansowanych technologicznie środków technicznych. Z wystarczającą elastycznością operują nad odległymi rejonami określonego terytorium. Współdziałając z bezpilotowymi aparatami rozpoznawczymi, dysponują możliwościami docierania do najważniejszych silnie chronionych obiektów oddziaływania.

Za podstawowe zadanie tych aparatów należy uważać system wykrywania i interpretacji stanu środowiska pod względem elektromagnetycznym. Takie bezpilotowe aparaty latające już dzisiaj mogą rozpoznawać obiekty rozmieszczone na dużej głębokości, a dzięki wielokanałowej łączności naziemni operatorzy mogą sterować tymi aparatami na dalekich odległościach. Ponieważ zasadniczym celem jest namiar i dokładność jego oceny, stąd należy uwzględnić fakt, że na dokładność rzutuje konfiguracja zestawu antenowo-odbiorczego i przyjęta zasada pomiaru. Zadaniem systemu rozpoznawczego jest szybkie wykrycie emisji i namiar jego źródła (ZE). Ważny jest minimalny czas namiaru i jego dokładność. Wymagania powyższe realizuje namiernik określający kierunek na źródło promieniowania elektromagnetycznego poprzez pomiar kąta odbioru fal elektromagnetycznych względem kierunku odniesienia. Preferowanym rozwiązaniem jest zastosowanie układów funkcjonujących w zakresie b. w. cz. na bazie metod monoimpulsowych włącznie z wykorzystaniem wielowiązkowych systemów odbiorczych (rys. 1).



Rys. 1. Idea funkcjonowania systemu namiaru źródła energii elm.

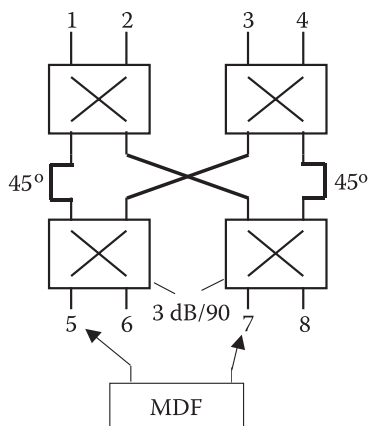
Chwilowe wartości napięć wejściowych układu formowania wiązki (UFW) jako sygnały od anten odbiorczych $u_1(t)$ i $u_2(t)$ odwzorowują cechy amplitudowo-fazowe anten A_1 , A_2 i dróg transmisji detekowanego sygnału:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= A_1 \exp(-j(\omega t + \phi_1)) \\ u_2(t) &= A_2 \exp(-j(\omega t + \phi_2)). \end{aligned} \quad (1)$$

Istota rozwiązania opiera się na wykorzystaniu własności fazowych specjalizowanego UFW sygnałów odbieranych przez system anten kierunkowych rozmieszczonych dookoła (rys. 1). Mikrofalowy dyskryminator fazy (MDF) w roli miernika różnicy faz, dołączony do wybranych wrót UFW umożliwi wskazanie kierunku przychodzenia odbieranego sygnału wielkiej częstotliwości w systemie monoimpulsowym bez znajomości częstotliwości sygnału.

Szerokopasmowa matryca formowania sygnałów

Wieloantennyowy system odbiorczy charakteryzuje pokrycie pełnego sektora kątownego obserwacji, identyczne charakterystyki amplitudowo-fazowe dla kolejnych elementów odbiorczych oraz duża szybkość namiaru. Jednym z takich rozwiązań jest układ zawierający dookólny sztyk anten kierunkowych współpracujący ze specjalizowaną matrycą kształtującą cechy fazowe odbieranych sygnałów, tak by dołączony miernik różnicy faz (MDF) wskazywał w sposób bezpośredni „namiar” (rys. 2).



Rys. 2. Układ matrycy formowania sygnałów od anten odbiorczych

TABELA 1

Własności fazowe matrycy

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

W matrycy kształtującej, zbudowanej z szerokopasmowych sprzęgaczy kierunkowych i odpowiednich przesuwników fazy, zachodzi transformacja cech amplitudowych sygnałów od anten na cechy fazowe, odwzorowujące przestrzenne położenie źródła sygnału w odpowiednio zorientowanym systemie. Postać pod-

stawową maczy i jej cechy fazowe przedstawiono na rysunku 2 oraz w tabeli 1. Wektorowe sumowanie sygnałów występujące w maczy określa zależność:

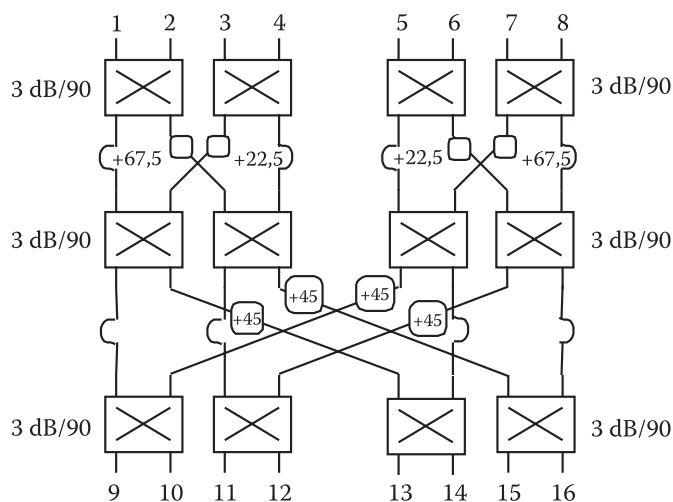
$$u = A \exp(-j(\omega t + \phi))$$

$$\text{gdzie } A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (2)$$

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Określając różnice faz sygnałów na wyj. 5 i wyj. 7 (lub na wyj. 8 i 6), zauważymy, że odpowiadają one rozłożeniu anten na kole w punktach o azymucie -45° , -135° , 45° , 135° . Mierzac zatem różnicę faz sygnałów przychodzących z odpowiednich wyjść, możemy określić, z którego wejścia sygnał pochodzi. Tak więc, układ formujący sygnały od anten kształtujących przestrzenną charakterystykę promieniowania systemu, transformuje je do poszczególnych wyjść i zapewnia określone własności fazowe odwzorowujące rozkład przestrzenny 4 anten odbiorczych. Zmienne w amplitudzie sygnały anten transformowane są przez układ formujący do jego wyjść z zapewnieniem określonych jego strukturą relacji fazowych. Ocena kąta odbioru sygnału podejmowana jest na podstawie wskazań miernika różnicy faz.

Kolejny bardziej rozbudowany układ formowania wiązki składa się z 12 sprzęgaczy 3 dB/90°, 8 przesuwników fazy o wartościach odpowiednio $+22,5^\circ$, $+45^\circ$, $+67,5^\circ$ oraz odcinków linii je łączących (rys. 3).

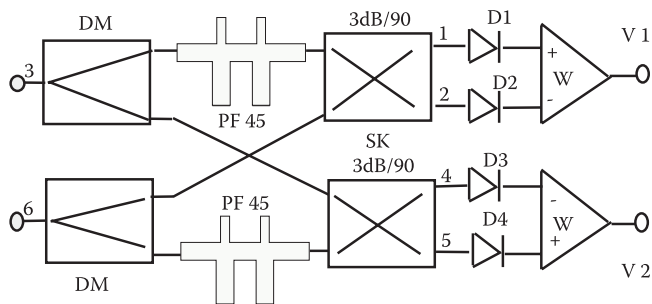


Rys. 3. Struktura maczy ośmiowiejściowej

Przedstawiona struktura (rys. 3) to ośmiowiejsiowy układ formowania przewidziany do współpracy z ośmioma antenami odbiorczymi [4].

Szerokopasmowy mikrofalowy dyskryminator fazy

Mikrofalowy dyskryminator fazy (MDF) (rys. 4) składa się z interferometru mikrofalowego, detektorów sygnałów mikrofalowych D i układu odejmowania na częstotliwościach wizyjnych. Interferometry mikrofalowe mogą być wykonane na wiele różnych sposobów. W wersji przedstawionej na rysunku 4 do ich budowy potrzeba sześć podzespołów mikrofalowych w postaci dwóch sprzęgaczy, dwóch szerokopasmowych przesuwników fazy i dwóch dzielników mocy. Układ jest symetryczny i wymaga zastosowania 45° przesuwników fazy w celu zapewnienia właściwej pracy.



Rys. 4. Układ mikrofalowego dyskryminatora fazy (MDF)

Parametry interferometru mikrofalowego zależą od własności użytych podzespołów. W badanym przypadku poddano analizie układ, w skład którego wchodzi:

- jednostopniowy dzielnik mocy Wilkinsona dla równego podziału mocy o transmitancji odzwierciedlającej własności częstotliwościowe wg zależności:

$$S_D = \frac{2}{3 \cdot \cos(\theta(f)) + j2\sqrt{2} \cdot \sin(\theta(f))}, \quad (3)$$

gdzie: $\theta(f)$ — długość elektryczna dzielnika;

- układ względnego przesuwnika fazy zrealizowanego w technice NLP z wtrąconymi odcinkami linii zwartych i rozwartych, który to zapewnia zmianę fazy sygnału o 45° w stosunku do zmian fazy w linii odniesienia;

- sprzęgacz kierunkowy typu Langa o transmitancjach dla wrót bezpośrednich:

$$S_B = \frac{\sqrt{1-k^2}}{\sqrt{1-k^2} \cos(\theta_1(f)) + j \sin(\theta_1(f))} \quad (4)$$

dla wrót sprzężonych:

$$S_S = \frac{jk \cdot \sin(\theta_2(f))}{\sqrt{1-k^2} \cos(\theta_2(f)) + j \sin(\theta_2(f))}, \quad (5)$$

gdzie: $\theta_1(f), \theta_2(f)$ — długość elektryczna obszaru sprzężenia;
 k — współczynnik sprzężenia.

W ogólnych rozważaniach przyjmuje się:

$$\theta_1 = \theta_2 = \frac{\pi f}{2 f_0}. \quad (6)$$

Napięcie na wejściu każdego detektora sygnałów mikrofalowych określa zależność:

$$U_{dj} = \sum_{i=1}^2 T_{ji} U_i, \quad (7)$$

gdzie: T_{ji} — transmitancja interferometru od wejściowych wrót „i” do wyjściowych wrót „j”;
 U_i — napięcie we wrotach wejściowych „i”.

Transmitancja T_{ji} jest złożoną funkcją parametrów elementów układu, jak również odbić na wejściu i wyjściu. Pełne wyobrażenie o trudnościach związanych z analizą niedoskonałości podzespołów interferometru mających wpływ na transmitancję obrazuje jedynie pełny graf przepływu. Analiza układu ulega znacznemu uproszczeniu przy dopasowanych detektorach, dopasowaniu na wejściu i wyjściu MDF oraz przy założeniach upraszczających:

- w stosunku do sprzęgacza: dopasowane wejścia i wyjścia, idealna kierunkowość, pełna symetria;
- w stosunku do dzielnika mocy: dopasowanie wejścia i wyjścia, pełna symetria, idealna separacja wyjść.

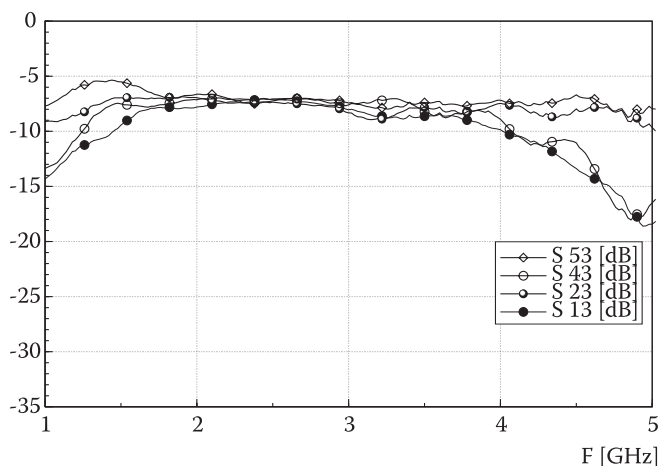
Napięcia wyjściowe z układu MDF, przy założeniu kwadratowej charakterystyki diod detekcyjnych oraz jednakowych sprawnościach detekcji, jako wizyjne napięcia wyjściowe określone są zależnościami:

$$\begin{aligned} V_1 &= k_1 \cdot \bar{U}_{w1} \cdot \bar{U}_{w2} \cos((\Phi_2 - \Phi_1) + 45) \\ V_2 &= k_2 \cdot \bar{U}_{w1} \cdot \bar{U}_{w2} \sin((\Phi_2 - \Phi_1) + 45), \end{aligned} \quad (8)$$

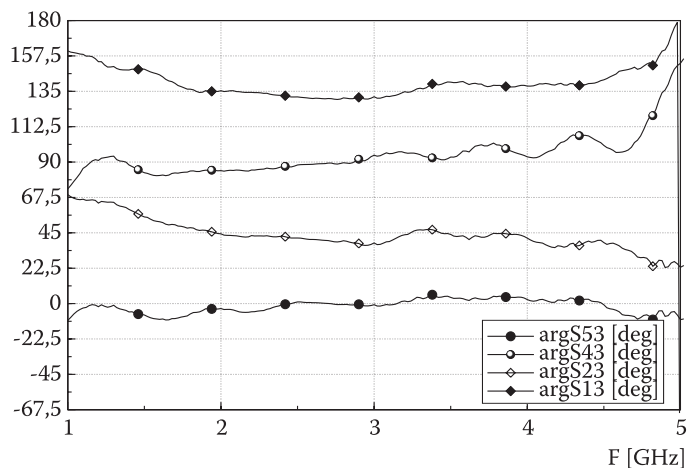
gdzie: $k_1 = k_2 = k$ — stała detekcji detektorów mikrofalowych.

Wyniki badań eksperymentalnych

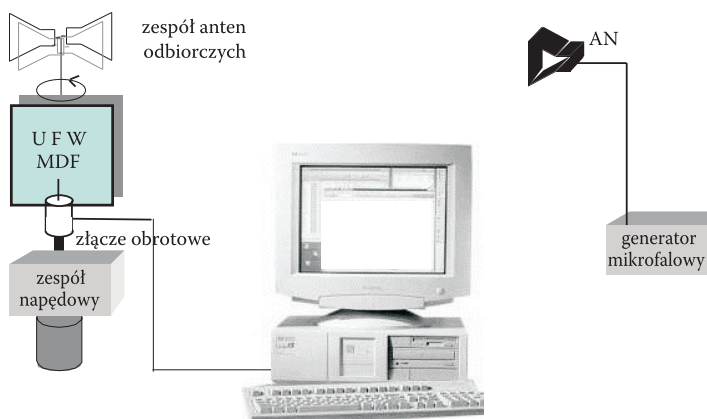
W modelu MDF zastosowane zostały sprzęgacze wykonane z NLP jako sprzęgacze o strukturze palczastej, zwane sprzęgaczami Langa i odcinki NLP. Materiałem podłożowym był laminat szkło-epoksydowy o względnej przenikalności dielektrycznej $\epsilon_r = 4,6$ i grubości $h = 1,5$ mm. Przykładowe przebiegi zmian amplitud i faz sygnału od wejścia 3 i 6 do poszczególnych wyjść przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Występujące odchylenia w przebiegu zmian amplitud sygnału w paśmie pracy są wynikiem istnienia odbić spowodowanych brakiem dopasowań. Spadek amplitud w górnym zakresie częstotliwości jest wynikiem wnoszonego tłumienia przez laminat wraz ze wzrostem częstotliwości. Z punktu widzenia własności MDF, ważne jest zapewnienie stałej zmiany faz w szerokim paśmie pracy.



Rys. 5. Pomierzone charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe MDF



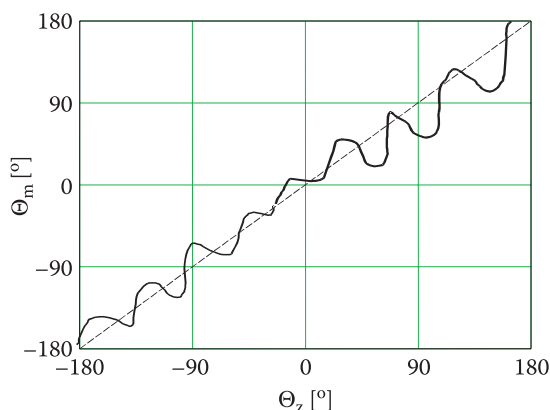
Rys. 6. Pomierzone charakterystyki fazowo-częstotliwościowe MDF



Rys. 7. Struktura stanowiska pomiarowego

Kolejnym elementem eksperymentu były badania doświadczalne systemu monitoringu obecności promieniowania elektromagnetycznego zakresu mikrofal w paśmie 2÷4 GHz.

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych systemu zawierającego dookólny szyk 8 anten tubowych, 8-wejściową matrycę kształtującą oraz mikrofalowy dyskryminator fazy w roli miernika fazy, uzyskano charakterystykę pelengacyjną przedstawioną na rysunku 8 (wartości: Θ_z — kąt zadany, Θ_m — kąt pomierzony). System matrycy czterowejściowej współpracuje z układem czterech anten kierunkowych, natomiast układ formowania ośmiowejściowy — z 8 antenami. Układ umożliwia szybkie określenie kierunku położenia źródła promieniowania



Rys. 8. Charakterystyka pelengacyjna systemu namiaru 8-antenowego

elektromagnetycznego na podstawie odbioru nawet pojedynczego impulsu sygnału, a wykorzystanie dookólnego szyku antenowego z UFW umożliwia „obserwację” przestrzeni bez mechanicznego przeszukiwania.

Wyniki przeprowadzonych symulacji wskazują, że minimalny błąd maksymalny oceny kąta wystąpi dla systemu anten o szerokościach charakterystyk na poziomie połowy mocy odpowiednio 90° i 45° (system 4-antenowy lub 8-antenowy).

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych obliczeń i pomiarów mikrofalowego dyskryminatora fazy należy stwierdzić, że wyniki doświadczalne potwierdziły w pełni wyniki analizy teoretycznej. Uwzględnienie w obliczeniach wybranych czynników wpływających na wartość błędu fazowego MDF umożliwiło głębsze poznanie zjawisk i poczynienie obserwacji mających duże znaczenie praktyczne. Ze względu na występowanie odbić w układzie rzeczywistym zniekształcenia charakterystyki fazowej MDF w funkcji częstotliwości są tym intensywniejsze, im większe są długości elektryczne dróg propagacji sygnałów w interferometrze mikrofalowym. Zminimalizowanie odbić występujących w miejscach połączeń poszczególnych elementów można uzyskać, wykonując MDF w postaci mikrofalowego układu scalonego. Przeprowadzona analiza teoretyczna i wynik pomiarów pozwala stwierdzić, że istnieje możliwość budowy systemu namiaru na bazie układu MDF i układu formowania wiązki antenowej (UFW). Zaproponowane rozwiązanie może być wykorzystane w pełni w układzie urządzenia wczesnego wykrywania i ostrzegania. Małe gabaryty, a więc i waga, w pełni uzasadniają celowość zastosowania w wyposażeniu bezpilotowych aparatów latających przeznaczonych do zadań rozpoznawczo-obserwacyjnych.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] B. STEC, *Radioelectronic Reconnaissance Monopulse Station*, International Defence Conference, Abu Dhabi, 19-23 March 1995, 553-567.
- [2] B. SMÓLSKI, *Analiza i synteza mikrofalowych układów natychmiastowego pomiaru częstotliwości*, Dodatek do Biul. WAT, nr 7, Warszawa, 1980.
- [3] A. SHELEG, *A matrix-fed circular array for continuous scanning*, IEEE, vol. 56, Nov. 1968.
- [4] Z. CHUDY, L. KACHEL, *Monoimpulsowy bierny układ pomiaru kierunku na źródło promieniowania mikrofalowego*, rozprawa doktorska, Warszawa, 2002.

Z. CHUDY

Monopulse detection and bearing of microwaves electromagnetic radiation sources

Abstract. Identification systems are designed for detecting as well as for identifying the signals emitted by radioelectronic sources of electromagnetic energy. Data from monitoring of electromagnetic environment, with the data from analysing and identifying electromagnetic emissions are necessary to take a decision concerning the situation on earth, at sea, as well as in the air. The solution presented in our paper, is the example of immediate working systems in a monopulse regime.

Keywords: monopulse detection, bearing, microwaves, warning system

Universal Decimal Classification: 621.396.969