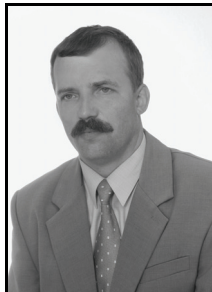


Zdzisław CHUDY

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

Struktury planarnych matryc Butlera w układzie demonstratora technologii namiaru źródeł promieniowania mikrofalowego

Dr inż. Zdzisław CHUDY



Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. W latach 2004 – 2007 na stanowisku kierownika zakładu, a od roku 2008 - zastępca dziekana. Posiada bogate doświadczenie dydaktyczne z zakresu analogowych układów elektronicznych, miernictwa elektronicznego, techniki mikrofal. W zakresie działalności naukowo-badawczej prowadzi badania w obszarze namiaru źródeł promieniowania elektromagnetycznego zakresu mikrofal i oddziaływania ich energii na infrastrukturę techniczną.

e-mail: zdzislaw.chudy@wel.wat.edu.pl

Streszczenie

Nowe typy systemów odbiorczych umożliwiających wykrycie i analizę sygnałów emitowanych przez występujące emiterzy energii elektromagnetycznej to urządzenia, które gwarantują określenie częstotliwości nośnej wykrytego sygnału, określenie kierunku na ZE tj. źródło sygnału oraz innych parametrów charakterystycznych z jednoczesnym przetwarzaniem i rejestracją tych danych. Sugerowane rozwiązanie układowe to przykład szerokopasmowego systemu bez przeszukiwania pracującego w trybie monoimpulsowym.

Słowa kluczowe: źródła promieniowania elektromagnetycznego, namiar, kołowy szyk anten, matryca Butlera.

Butler planar matrix structures in a technology demonstrator system for direction finding of microwave radiation sources

Abstract

The new types of receiver systems enable detection and analysis of the signals emitted by electromagnetic sources. They are systems which guarantee determining the carrier frequency of the finding, defining the direction finding of the signal source and well as other specific parameters with simultaneous data processing and recording. The proposed system solution is an example of the broadband system with no scanning mode working in monoimpulse mode. Data from monitoring of the electromagnetic environment with data from analysing and identifying radar emissions are necessary for taking a decision concerning the situation on earth, at sea, as well as in the air, by services responsible for "on-line" checking the condition of electromagnetic surroundings. The equipment used in such systems should analyse, classify and identify detected signals very fast to determine the level of danger. Besides identifying, these system are used for immediate warning about scanning with an electromagnetic beam. The presented experimental model for identification-warning systems can be used in stationary as well as portable systems (for example: on vehicles, in plane and in ship) thanks to its small dimensions. Taking into considerations the working band, the obtained accuracy of localisation and the monopulse operation regime one can summarise that the presented system can be very efficient for detecting the short-time emission.

Keywords: electromagnetic radiation sources, direction finding system, circular antennas array, Butler matrix.

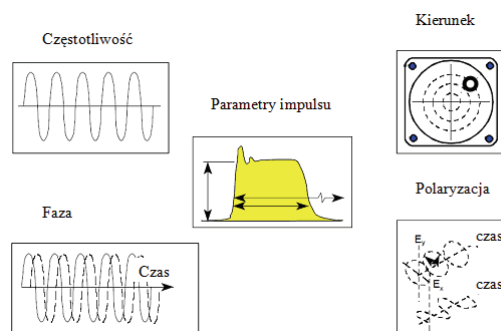
1. Wstęp

Realizowane wykrycie i wskazanie kierunku na położenie źródła emisji sygnału w czasie zbliżonym do rzeczywistego, wymaga dużej czułości i precyzji namiaru. Treść artykułu dotyczy szerokopasmowego układu namiaru dookólnego, wykrywającego emisję mikrofal od źródeł promieniowania w paśmie 2÷4GHz. Projekt układu oparty jest na wielowrotniakach Butlera, które we współpracy z odpowiednio zaprojektowanym szykiem anten kierunkowych zapewniają jednoznaczny namiar w systemie monoimpul-

sowym. W analizie wykorzystane są wyniki analiz symulacyjnych i dane pomiarowe uzyskane na bazie wykonanego demonstratora technologii namiaru.

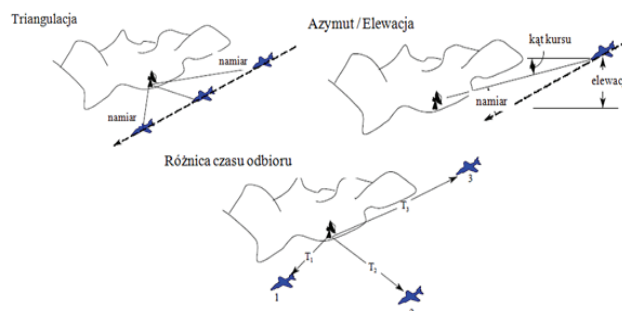
2. Wykrywanie i namiar źródeł promieniowania elektromagnetycznego

W chwili obecnej szczególne znaczenie w technice odbiorczej mają urządzenia pracujące w paśmie 0.5÷18GHz, a używane głównie do prowadzenia monitoringu pracy występujących emiterów sygnałów elektromagnetycznych typu: pokładowe urządzenia śledzenia i naprowadzania, naziemne stacje radiolokacyjne, systemy naprowadzania i nawigacji i itp. Głównym zadaniem obok faktu wykrycia promieniowania jest precyzyjne określenie kierunków przychodzenia sygnałów i identyfikacja ich źródeł. 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. Najistotniejszymi informacjami od urządzeń tej grupy są: namiar na źródło promieniowania, częstotliwość nośna sygnału, częstotliwość powtarzania, czas trwania impulsu i itp. (rys. 1), [1, 3, 8]. Mając na uwadze cechy metod monoimpulsowych możliwym jest realizacja układów zapewniających: szybki tzw. natychmiastowy namiar z możliwością realizacji szerokokątnej obserwacji przestrzeni pomiarowej z natychmiastową oceną parametrów odbieranych sygnałów [1, 3].



Rys. 1. Informacja o źródle emisji energii elektromagnetycznej
Fig. 1. Information about electromagnetic sources of radiation

W zależności od rodzaju mierzonego parametru sygnału, różni się trzy sposoby określenia namiaru źródeł ZE: amplitudowy, fazowy oraz amplitudowo-fazowy, (rys. 2).

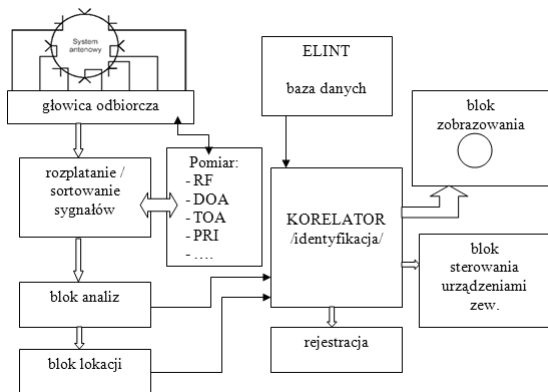


Rys. 2. Lokacja źródeł promieniowania elektromagnetycznego
Fig. 2. Localization of electromagnetic sources of radiation

Wyniki badań oraz osiągane zdolności konstrukcyjne w zakresie budowy układów MDF (mikrofalowy dyskryminator fazy) i MDCz (mikrofalowy dyskryminator częstotliwości) pozwoliły na znaczną modyfikację rozwiązań co do realizacji namiaru źródeł. Na znaczeniu zyskały prace ukierunkowane na bezpośrednie wykorzystanie szerokopasmowych struktur mikrofalowych w połączeniu z nowymi elementami badań z zakresu metod analiz i symulacji komputerowych, [1, 2, 3].

3. System rozpoznania elektronicznego źródeł energii mikrofal z wykorzystaniem wielowrotników Butlera

Współcześnie, uwzględniając nowe rozwiązania technologiczne w dziedzinie urządzeń wykrywania i rozpoznania, miniaturyzację, integrację układów pomiarowych i przetwarzanie sygnałów o bardzo dużej szybkości, nieuchronnym staje się zmiana technologii wykonania zarówno podzespołów jak również i samych urządzeń realizujących proces odbioru i analizy sygnałów w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Klasyczny układ systemu ESM / RWR ulega znacznej modyfikacji, (rys. 3). Wdrażane są do produkcji konwertery AC o dużej szybkości i wysokiej rozdzielczości oraz bardzo czułe odbiorniki rozpoznania o dużej szybkości skanowania. Rosnąca złożoność układów oraz dążenie do obniżenia ich ceny powodują, że postęp w tej dziedzinie wyznaczany jest przez rozwój technologii elementów półprzewodnikowych oraz monolitycznych mikrofalowych układów scalonych (MMUS) [5, 7].



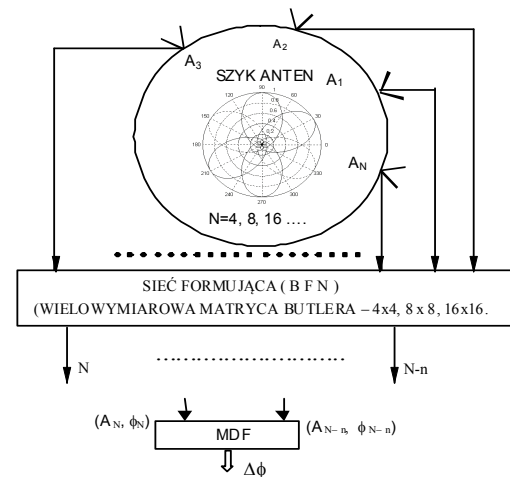
Rys. 3. System ESM / RWR
Fig. 3. ESM/RWR systems

Elementy składowe współcześnie realizowanego systemu wykrywania i analiz parametrów emitowanego promieniowania powinny charakteryzować:

- **system antenowy:** jeden szerokopasmowy nieruchomy system antenowy, pomiary kierunku przychodzenia każdego impulsu z pełnego azymutu 360 stopni bez poszukiwania w kierunku;
- **pomiar częstotliwości i parametrów odbieranych sygnałów:** pomiar częstotliwości każdego impulsu oddzielnie, brak dostrajania do częstotliwości odbieranych sygnałów, pomiar szerokopasmowy (0.5-40GHz). Pomiar częstotliwości sygnałów od radarów „cichych” i radarów z przestrajaniem częstotliwości od impulsu do impulsu, określanie zmian częstotliwości w czasie rzeczywistym każdego impulsu bez dostrajania, pomiar czasu trwania i czasu przyjscia każdego impulsu z wszystkich kierunków w paśmie pracy;
- **pomiar kierunku:** pomiar kierunku przyjscia sygnału bez poszukiwania w kierunku i częstotliwości dla każdego przychodzącego impulsu, dokładność pomiaru nie gorsza niż 3° (rms). Możliwy jednocześnie proces rozplatania ciągu impulsów, ponieważ dla każdego impulsu dokładnie określane są: częstotliwość, modulacja wewnętrzna i kierunek przyjscia;
- **wykorzystanie systemu i platformy nośne:** monitoring emitatorów i gromadzenie informacji, możliwość sterowania selektywnymi systemami zakłócającymi w częstotliwości i w kierunku.

Czułość rzędu: 10^{-9} ÷ 10^{-10} W, małe wymiary i niska moc zasilania. Platformy nośne: naziemna ruchoma, morska, lotnicza i BSP.

Według powyższego, budowę i ideę pracy tak rozumianego systemu stacji przedstawiono na rys. 4. Zasadniczym elementem obok układu anten jest sieć formująca (BFN), w roli której występuje matryca Butlera. Matryca Butlera to wielowrotnik zbudowany z pasywnych elementów liniowych jakimi są sprzęgacze kierunkowe, stałe przesuwniki fazy i linie odpowiednio je łączące, [1, 2, 8]. Matryca jako liniowy wielowrotnik, jest biernym układem mikrofalowym o N wrotach wejściowych i N wrotach wyjściowych (N×N). Idea pracy sieci opiera się na wykorzystaniu zjawiska sumowania i rozdziału sygnałów w strukturach sprzęgaczy kierunkowych.



Rys. 4. System namiaru źródeł promieniowania elektromagnetycznego
Fig. 4. Direction finding system of electromagnetic sources of radiation

Stacja składa się zasadniczo z trzech części: bloku antenowego, bloku odbiorczego i bloku przetwarzania sygnałów, (rys. 4). Blok antenowy może zawierać podbloki służące do odbioru sygnałów w różnych zakresach częstotliwości: 2÷8GHz, 8÷18GHz, ewentualnie dla zakresu rozszerzonego: 0,5÷18GHz i 18÷40GHz. W omawianym systemie odbiorczy blok antenowy to dookólny szyk złożony z szerokopasmowych anten kierunkowych (tuba piramidalna). Cylindryczny szyk antenowy umożliwia obserwację przestrzeni bez mechanicznego poszukiwania spełniając oczekiwania na założoną charakterystykę zespołu antenowego. Podstawowe parametry szyku kołowego to: R - promień szyku,

$\psi = \frac{2\pi}{N}$ - kąt rozmieszczenia anten, N - ilość anten w szyku,

α_n - kąt rozstawienia n-tej anteny względem kierunku odniesienia. Wielowiązkowy system odbiorczy zapewnia: pokrycie wymaganego sektora kątownego obserwacji, stałość parametrów charakterystyki pelengacyjnych systemu i posiada identyczne charakterystyki amplitudowo-fazowe elementów odbiorczych. Dla układu kołowego (rys. 5), gdzie N elementów odbiorczych rozmieszczone jest na obwodzie cylindra o promieniu R , charakterystyka „odbioru promieniowania” wyraża się zależnością:

$$s_n(t) = A_0 F_n(\theta - \alpha_n) e^{j\omega_0 \left(t - \frac{1}{c}(d_n - \min\{d\}) \right)} \quad (1)$$

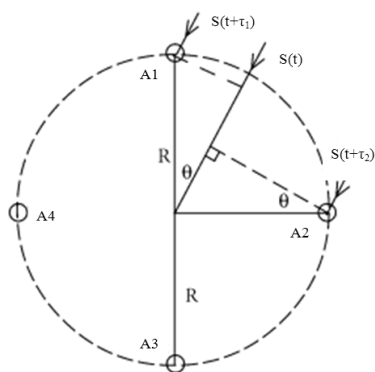
a składowa cosinusoidalna:

$$A_c = \begin{cases} A_0 \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin\left[\theta - \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}\right]\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin\left[\theta - \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi}{N}\right]} \cos\left(-\frac{\omega_0}{c}(d_n - \min\{d\})\right) & \text{dla } |\theta - \alpha_n| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{dla } |\theta - \alpha_n| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie: A_0 - amplituda fali padającej, α_n - kąt pomiędzy n -tą anteną a anteną odniesienia, N - numer anteny, θ - kąt nadejścia sygnału namierzanego, D - apertura anteny, λ - dł. fali:

$$\Psi_n = 2\pi \frac{n}{N} K \quad K = \pm \frac{N}{2} \quad \alpha_n = n \frac{2\pi}{N} \quad n = 1, 2, \dots, N$$

Własności amplitudowo-fazowe sygnałów od anten są ściśle uzależnione od konfiguracji układu antenowego oraz ilości i charakterystyki pojedynczej anteny. Wykorzystując cechy szyku w zależności od geometrycznego rozmieszczenia anten, możemy kształtować charakterystykę wypadkową całego układu antenowego tak by zapewnić obserwację przestrzeni w pełnym azymucie. Analiza cech dookólnego szyku antenowego, pozwala na określenie zależności oraz wpływu takich parametrów jak: promień szyku, kąt przyjscia sygnału oraz jego częstotliwość, (rys. 5), [6, 8].

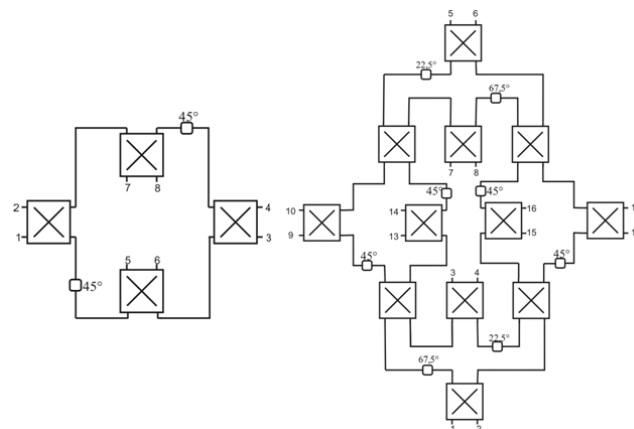
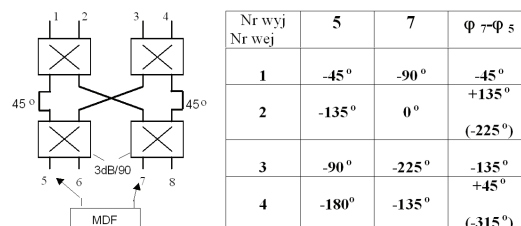


Rys. 5. Dookólny szyk antenowy
Fig. 5. Array of cylindrical antennas

Drugi zespół systemu to blok formowania sygnałów (BFN), realizowany w oparciu o struktury matryc Butlera. Wykorzystanie struktur Butlera powoduje, że wprowadzamy tzw. układową transformację amplitudowo - fazową dla sygnałów wejściowych do poszczególnych wrót matrycy. Wewnątrz matrycy zachodzi transformacja „wejściowych” cech amplitudowych sygnałów od wejść (tym samym od anten) na cechy fazowe sygnałów rejestrowanych we wrotach wyjściowych matrycy. Relacje fazowe sygnałów między wybranymi wrotami wyjściowymi matrycy odwzorowują przestrzenne położenie źródła sygnału w odpowiednio zorientowanym przestrzennie systemie anten odbiorczych. Przetwarzanie sygnałów występujące w matrycy nacechowane jest określonymi zmianami amplitud i faz sygnałów wynikającymi z cech zastosowanych podzespołów. Wykorzystanie określonej grupy sprzęgaczy i przesuwników fazy wraz z liniami je łączącymi, umożliwia realizację układu podstawowej matrycy Butlera typu 4x4 oraz 8x8, (rys. 6), [2, 4, 8].

Źródłem ostatecznej wykorzystywanej informacji o kierunku przychodzenia sygnału jest wskazanie miernika różnicy faz (MDF), (rys. 6). Obecność mikrofalowego dyskryminatora fazy (MDF) w roli miernika różnicy faz dołączanego do wybranych wrót wyjściowych matrycy jako BFN, umożliwia bezpośrednią ocenę kierunku na źródło sygnału w systemie monoimpulsowym bez znajomości częstotliwości tego sygnału. Oznacza to, że system umożliwia poprzez odwzorowanie cech położenia przestrzennego anten odbiorczych namiar na podstawie pomiaru różnicy faz sygnałów wyjściowych z określonych wrót matrycy. Należy zaznaczyć, że tak zorientowany system „obserwuje” całą 360° przestrzeń. Na obwodzie koła może znajdować się dowolna ilość anten np.: 4, 8, 16, 32 itd. Ten ciąg liczb określony jest przez możliwość układu matrycy. Uwzględnienie wartości zróżnicowania faz początkowych sygnałów od anten bezpośrednio wpływa na dokładność namiaru. Struktury matryc charakteryzują się powtarzalnością elementów mikrofalowych. Wybór częstotliwości pracy nie jest

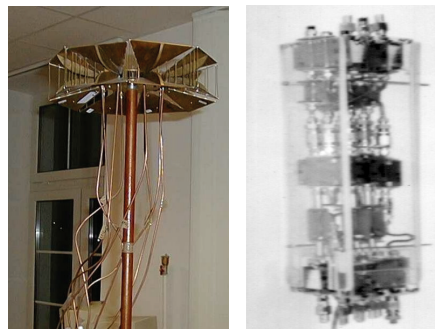
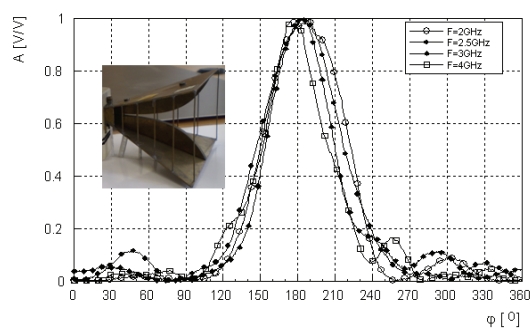
w zasadzie ograniczony, a szerokopasmowa struktura matrycy wymaga zastosowania elementów o szerokim paśmie pracy, [2, 5, 8].



Rys. 6. Matryce Butlera
Fig. 6. Butler matrices

4. Demonstrator technologii namiaru i wynik badań symulacyjno - eksperymentalnych

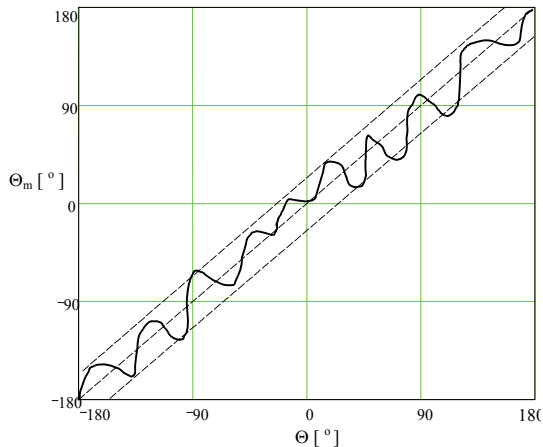
W wyniku prowadzonych od lat prac o charakterze eksperymentalnym, zbudowano model demonstratora technologii monoimpulsowego dookólnego namiaru źródeł promieniowania dla pasma pracy: 2-4GHz.



Rys. 7. Elementy demonstratora systemu namiaru: anteny i matryca typu 8x8
Fig. 7. Elements of direction finding system demonstrator: antennas and matrix of type 8x8

Demonstrator zawiera blok antenowy, układ formowania (BFN), dyskryminator fazy (MDF) i jednostkę rejestrującą – zobrazującą. W roli anten zastosowano anteny tubowe zbudowane przy wykorzystaniu falowodu grzbietowego (tuby grzbietowe), (rys. 7). W dalszej kolejności przeprowadzono badania eksperymentalne zespołu połączonego z przedstawionego szyku antenowego i matrycy wykonanej wg modelu z rys. 6 oraz rys. 7.

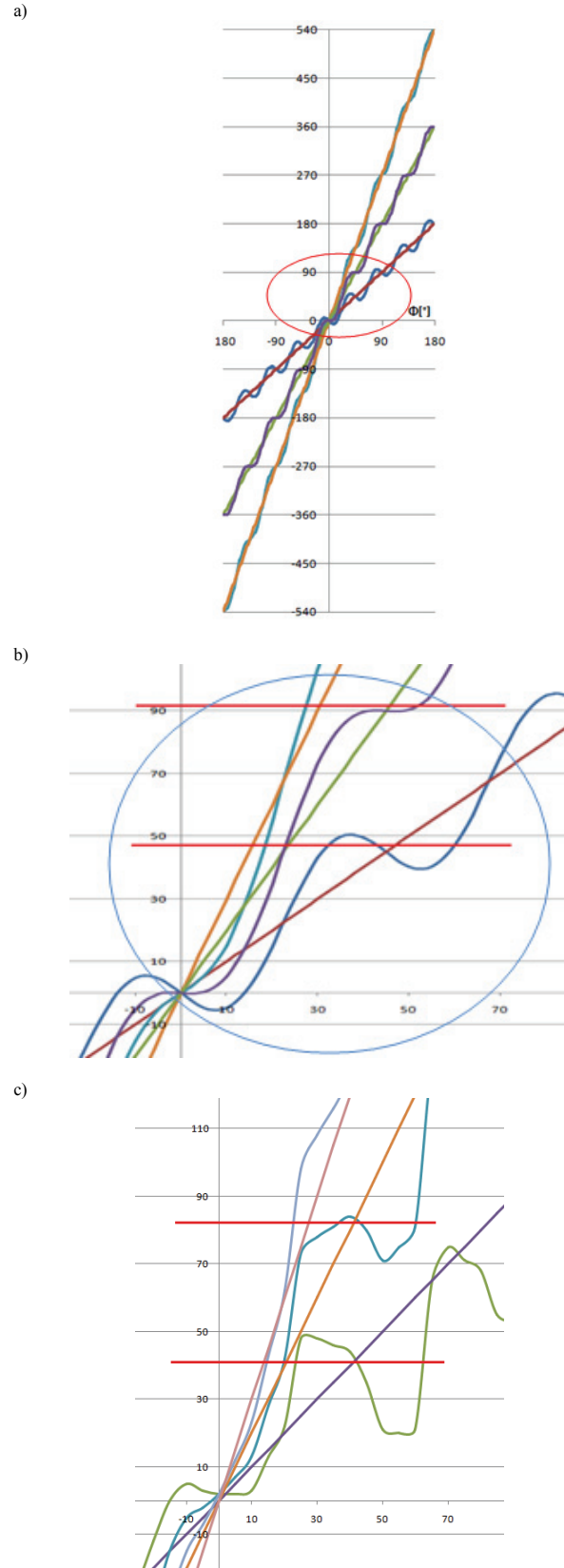
Pomierzoną charakterystykę pelengacyjną dla sygnału od testowego źródła ZE o zmiennej częstotliwości z zakresu 2÷4GHz, przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Charakterystyka pelengacyjna
Fig. 8. Pelengation characteristic

Wyznaczone wartości kątów Θ_m to namiary **ZE** w stosunku do znanych jego położeń kątowych Θ . 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. Analiza cech fazowych zdeterminowanych strukturą zastosowanej matrycy Butlera typu 8x8 pozwala zauważyć, że można wybrać pary wrót, w których różnice faz będą równe całkowitej wielokrotności wartości podstawowej kąta położenia określonej anteny w szyku względem odniesienia (dla kąta $22,5^\circ$ są to kąty: 45° , $67,5^\circ$ itd.). Skorzystanie z kolejnych par wrót wyjściowych umożliwiającą uzyskanie wartości różnic faz odpowiadających zwielokrotnionej wartości kąta podstawowego względem odniesienia, stanowi możliwość wprowadzenia tzw. układuowego udoładnienia realizowanego namiaru. Wówczas dokładność zastosowanego miernika różnic faz „przekłada” się na szerszy przedział mierzonych kątów. Jednocześnie wprowadzana tym zabiegiem transformacja (wzrost nachylenia) zwiększa prawdopodobieństwo jednoznacznego namiaru. Celem wykazania zjawiska eliminacji niejednoznaczności powyższym sposobem, przeprowadzono badania symulacyjne modelu matrycy z wykorzystaniem sygnału testowego i kolejnymi parami wrót zapewniającymi zwielokrotnienie kąta z wartości $22,5^\circ$ na 45° i $67,5^\circ$, (rys. 9a oraz 9b).

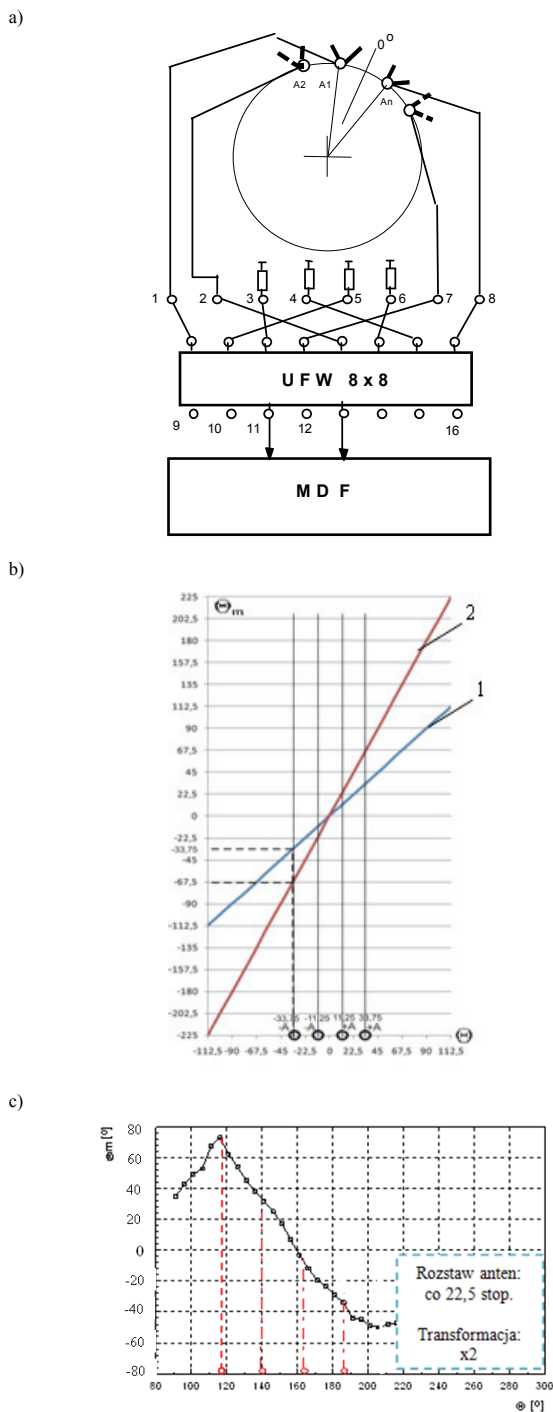
Dla par wrót, gdzie mierzone różnice faz są odpowiednio dwu i trzy krotną wielokrotnością wartości podstawowej kwantu przesunięcia danej matrycy, wyraźnie zauważalnym jest efekt eliminacji wieloznaczności odczytu (rys. 9b). W podobnej procedurze symulacyjnej wykorzystane zostały wartości z pomierzonej charakterystyki pelengacyjnej przedstawionej dla omawianego demonstratora na rys. 8. Uzyskany wynik badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 9c. Wykorzystanie w strukturze modelu matrycy Butlera ściśle określonych wrót, umożliwia znaczącą rekonfigurację struktury matrycy tj. konfigurację o mniejszej liczbie elementów (redukcja liczby podzespołów).



Rys. 9. Charakterystyki symulacyjne namiaru źródła promieniowania na kierunku $22,5^\circ$ dla sygnału testowego z transformacją kąta do wartości 45° i $67,5^\circ$ (a, b), charakterystyki symulacyjne z transformacją kąta do wartości 45° i $67,5^\circ$ dla wartości z pomierzonej charakterystyki pelengacyjnej (c)

Fig. 9. Simulation characteristics of direction finding system of radiation source for test signal with transformation of angle up to 45° and $67,5^\circ$ (a, b), simulation characteristics with transformation of angle up to 45° and $67,5^\circ$ with use of pelengation characteristic (c)

Odmienną metodą układowego „udokładnienia” otrzymywanego niamaru jest wprowadzenie przeskalowania wartości mierzonego kąta odbioru sygnału od „oświetlającego” system niamaru źródła, poprzez zastosowanie zmodyfikowanej struktury szyku antenowego względem przyjętej do realizacji matrycy Butlera (rys. 10). Transformacja ta podobnie jak uprzednio w metodzie z doborem par wrót matrycy, powoduje wzrost nachylenia charakterystyki pelengacyjnej poprzez wykorzystanie w strukturze systemu niamaru matrycy współpracującej z $2 \times N$ elementami szyku antenowego. Metoda ta dedykowana jest w szczególności dla rozwiązań z grup sektorowego niamaru źródeł promieniowania.



Rys. 10. System niamaru (a), charakterystyki z analiz symulacyjnych (b), pomierzona charakterystyka pelengacyjna systemu niamaru (c)
 Fig. 10. Direction finding system (a), simulation characteristics (b), experimental characteristics (c)

Celem weryfikacji celowości wprowadzenia efektu transformacji zależności kątowych pomiędzy współpracującymi blokami: antenowym, a matrycą Butlera, przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem modelu przedstawionego na rys. 10. Ośmiowejściowa matryca Butlera współpracując z elementami 16 elementowego szyku anten umożliwia wykorzystanie efektu transformacji układowej typu 2:1.

Własności przedstawionych charakterystyk pelengacyjnych – z badań symulacyjnych oraz badań eksperymentalnych modelu demonstratora wg modelu z rys. 10, wskazują że wykorzystanie zaproponowanych metod udokładnienia niamaru i eliminacji niejednoznaczności jego wskazań, to bardzo efektywne rozwiązanie nie powodujące nadmiernej rozbudowy układu jak również nie wnoszące wzrostu kosztów realizacji. Wzrost nachylenia charakterystyki pelengacyjnej zapewnia zwiększenie rozdzielczości kątowej z punktu widzenia zastosowanego miernika fazy. Modyfikacja struktury szyku antenowego może przyczynić się do zminimalizowania niedokładności z tytułu wpływu zmian wartości początkowych faz sygnałów od poszczególnych anten.

5. Podsumowanie

Rezultaty analiz teoretycznych i wyniki badań doświadczalnych potwierdziły, że istnieje możliwość realizacji dookólnego, monoimpulsowego układu pomiaru kierunku na źródło promieniowania mikrofalowego. Sposób rozwiązania obejmuje zbudowanie odpowiedniego układu systemu antenowego, szerokopasmowego układu formowania wiązki i zerokopasmowego mikrofalowego dyskryminatora fazy. Zaproponowany układ cechuje natychmiastowy niamar na źródło promieniowania w czasie rzeczywistym bez znajomości częstotliwości. Dedykowany jest do wykorzystania w układach wczesnego ostrzegania i wsparcia systemów walki elektronicznej. Propozycja rozwiązania wyróżnia się tym, że jest to stacja rozpoznania elektronicznego umożliwiająca pomiar kierunku z dokładnością lepszą niż 3 stopnie wartości skutecznej (3° rms), zapewnia przechwytywanie sygnałów z prawdopodobieństwem wykrycia sygnałów blisko 100%, umożliwia wykrywanie tzw. „cichych radarów”. Proponowane rozwiązania mogą być poddane dalszej miniaturyzacji przez co mogą być wykorzystane jako urządzenia rozpoznania umieszczane na platformach bezpilotowych. Proponowany system niamaru opiera się w swej konstrukcji na matrycy Butlera. Powtarzalność elementów składowych i zwarta konstrukcja to kolejne zalety projektu.

6. Literatura

- [1] Chudy Z., Stec B.: Modelowanie wielowymiarowych mikrofalowych struktur matryc Butlera, Biuletyn WAT Numer Specjalny (2) 2007.
- [2] Lipsky S.: Microwave passive direction finding, John Wiley & Sons, 1987.
- [3] Macnamara T.: Positions and Magnitudes of Fixed Phase Shifters in Butler Matrices Incorporating 90° Hybrids, IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. H, No. 5, October 1988.
- [4] Szóstka J.: Fale I Anteny, WKŁ, Warszawa 2001.
- [5] Wincza K., Gruszczynski S.: A Broadband 4×4 Butler matrix for modern-day antennas, 35th European Microwave Conference, European Microwave Week 2005, Paryż, Francja 2005.
- [6] Stec B., Rutkowski A.: Szerokopasmowa mikrofalowa tuba grzbietowa, Biuletyn WAT nr 7, Warszawa 1989.
- [7] Stec B.: Radioelectronic Reconnaissance Monopulse Station. International Defence Conference, Abu Dhabi, 1 March 1995.
- [8] Stec B., Chudy Z., Kachel L.: Multielement Circuits for High Frequency Signals in Receiving Systems, MIKON 2000, Wrocław.