

doi:10.15199/48.2019.11.41

Zastosowanie przesuwника fazy w strukturze mikrofalowego detektora częstotliwości

Streszczenie. Mikrofalowe detektory częstotliwości pozwalają na natychmiastowe określenie częstotliwości nieznanego sygnału mikrofalowego w bardzo szerokim paśmie. Kluczowym problemem dla uzyskania określonej precyzji pomiaru jest niejednoznaczność charakterystyki wyjściowej detektora w wybranym przedziale częstotliwości. Zastosowanie w strukturze detektora częstotliwości dodatkowego przesuwnika fazy pozwala na przesunięcie charakterystyki wyjściowej detektora tak, aby uzyskać jednoznaczną charakterystykę w wybranym zakresie pracy.

Abstract. Microwave frequency detectors allow instantaneous determination of unknown microwave signal frequency in a very broad frequency band. A key problem to obtain a specific measurement precision is the ambiguity of the output characteristic of the detector in the required operating band. The use in the frequency detector structure of the additional phase shifter allows to move the output characteristics of the detector so as to obtain unambiguous characteristic in the selected operating range. **Application of the phase shifter to microwave frequency detectors**

Słowa kluczowe: detektor częstotliwości, pomiar częstotliwości, pierścieniowy detektor fazy, szerokopasmowy przesuwnik fazy.

Keywords: frequency detector, frequency measurement, ring phase detector, wideband phase shifter.

Wstęp

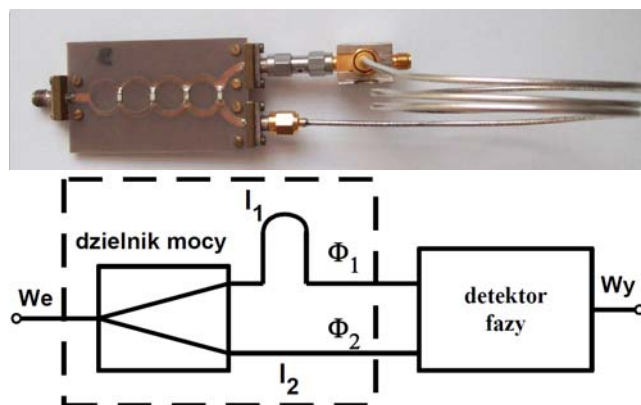
Mikrofalowe detektory częstotliwości pozwalają na natychmiastowe określenie częstotliwości nieznanego sygnału mikro-falowego. Z tego względu urządzenia tego typu wykorzystywane są w zastosowaniach wojskowych i cywilnych do pomiaru krótkotrwałych emisji mikrofalowych w bardzo szerokim paśmie częstotliwości [1,2]. Mikrofalowe detektory częstotliwości wykorzystywane są głównie w urządzeniach rozpoznania i przeciwdziałania radioelektronicznego, urządzeniach do monitorowania emisji elektromagnetycznych, miernictwie mikrofalowym. Ich cechą charakterystyczną jest prosta budowa, niski koszt wytwarzania, szerokie pasmo pracy. Ze względu na przebieg napięcia wyjściowego w funkcji częstotliwości wyróżniamy detektory typu "sinus" lub "cosinus". W literaturze występują także jako detektory jednofunkcyjne. Rodzaj zastosowanej metody przetwarzania napięcia wyjściowego uzależniony jest od ilości wykorzystanych detektorów częstotliwości oraz ich struktury wewnętrznej. Kluczowym problemem dla uzyskania określonej precyzji pomiaru częstotliwości chwilowych sygnałów mikrofalowych z wykorzystaniem szerokopasmowych detektorów częstotliwości jest zachowanie jednoznacznej charakterystyki wyjściowej w wybranym paśmie pracy.

W celu poprawy tego parametru do układu detektora wprowadzony został dodatkowy przesuwnik fazy zbudowany w technologii linii mikropaskowej. Zastosowanie w strukturze detektora częstotliwości przesuwnika fazy pozwala na przesunięcie charakterystyki wyjściowej detektora na osi częstotliwości. Efektem jest jednoznaczna charakterystyka wyjściowa w wybranym zakresie pracy. W artykule do pomiaru częstotliwości wykorzystano amplitudową metodę przetwarzania napięcia wyjściowego oraz detektor częstotliwości typu "cosinus".

Mikrofalowy detektor częstotliwości

Struktura mikrofalowego detektora częstotliwości przedstawiona jest na rysunku 1. Sygnał wejściowy podawany jest na wejście Układu Wypracowania Proporcjonalnej Różnicy Fazy UWPRF. Następuje zamiana informacji o częstotliwości na równoważną jej różnicę faz. Sygnały wyjściowe UWPRF podawane są na wejście detektora fazy DF i w nim dokonuje się proces zamiany różnicy faz sygnałów wejściowych na odpowiadające jej napięcie wyjściowe, proporcjonalne do częstotliwości sygnału wejściowego. Pasma pracy układu jest określone przez różnicę długości linii transmisyjnych l_1 i l_2 UWPRF

oraz pasma pracy wykorzystanych elementów. Do określenia częstotliwości wykorzystana jest (w przybliżeniu) liniowa część charakterystyki wyjściowej detektora



Rys. 1. Widok oraz schemat detektora częstotliwości typu "cosinus"

Napięcie na wyjściu detektora częstotliwości opisuje zależność (1).

$$(1) U_{wy} = k \cdot \cos(\Phi)$$

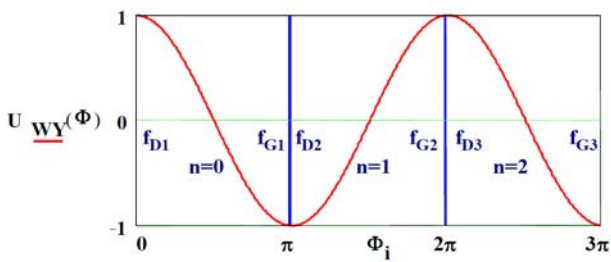
gdzie: k – współczynnik detekcji, $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ – różnica faz sygnałów na wejściach detektora fazy

Napięcie na wyjściu detektora jest opisane funkcją okresową. Zakres zmian fazy na wejściu detektora wynosi π i częstotliwość może być określona w sposób jednoznaczny dla zmian fazy w zakresie $n\pi \div (n+1)\pi$, gdzie $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ [1].

Stąd stosunek częstotliwości górnej f_G do f_D może także przyjmować określone wartości. Dla tego stosunku częstotliwości przebieg charakterystyki wyjściowej detektora jest jednoznaczny i detektor można wykorzystać do określenia częstotliwości.

$$(2) \frac{f_G}{f_D} = \frac{n+1}{n}, \quad \text{dla } n = 1, 2, 3, \dots$$

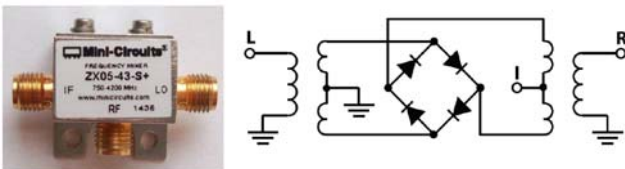
Graficzne zobrazowanie zależności (2) przedstawione jest na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg napięcia wyjściowego detektora fazy w funkcji zmian fazy sygnałów wejściowych

Uzyskanie dowolnej wartości stosunku f_G/f_D jest możliwe poprzez zastosowanie w strukturze detektora częstotliwości przesuwника fazy. Może on być umieszczony w gałęzi górnej lub dolnej układu UWPRF (wynika to z możliwości realizowalności fizycznej przesuwника) [1].

Do budowy detektora częstotliwości został wykorzystany czterostopniowy dzielnik mocy, linie transmisyjne oraz detektor fazy. Jako detektor fazy został wykorzystany układ ZX04-43-S+ firmy Mini Circuits. Widok i schemat wewnętrzny układu przedstawiony został na rysunku 3.



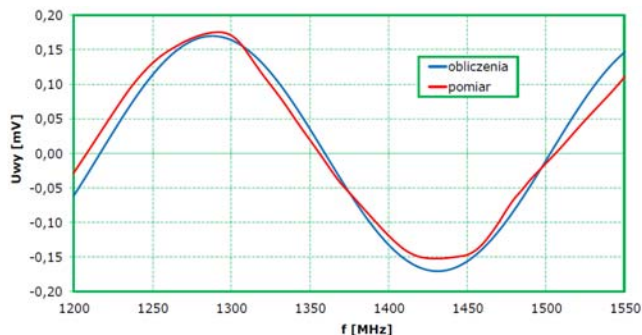
Rys. 3. Widok oraz schemat układu ZX05-43-S+

Jest to układ pierścienia diodowego pracującego w zakresie częstotliwości 750 - 4200 MHz. W zależności od warunków pracy może być wykorzystany w charakterze mieszacza lub detektora fazy.

Wyniki testów detektora bez i z dodatkowym przesuwnikiem fazy

Detektor częstotliwości został zaprojektowany do pracy w paśmie o szerokości 150 MHz. Częstotliwość górna i dolna zostały określone jako odpowiednio 1325 i 1475 MHz. Dla podanych wartości częstotliwości górnej i dolnej została, zgodnie z zależnością (3), obliczona różnica długości linii transmisyjnych.

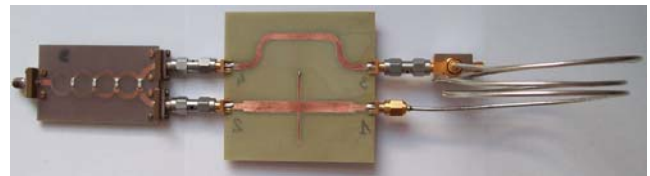
$$(3) \quad l_1 - l_2 = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r} (f_G - f_D)}$$



Rys. 4. Przebieg teoretycznej i rzeczywistej charakterystyki napięcia wyjściowego detektora częstotliwości w funkcji częstotliwości dla różnicy długości linii transmisyjnych 732 mm

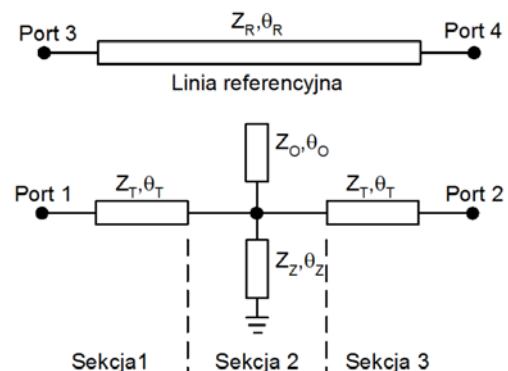
Obliczona różnica długości linii transmisyjnych wynosi 732 mm. W tym zakresie częstotliwości przebieg charakterystyki wyjściowej nie jest jednoznaczny. Pomiary detektora częstotliwości zostały przeprowadzone dla poziomu mocy sygnału wejściowego 0 dBm, różnicy długości linii transmisyjnych 732 mm. Wyniki pomiarów oraz charakterystyka teoretyczna przedstawione zostały na rysunku 5.

Jak wynika z rysunku 4 charakterystyka wyjściowa detektora jest w przybliżeniu liniowa (możliwa do wykorzystania) w zakresie 1300 - 1425 MHz. W układzie praktycznym istnieje konieczność uzyskania liniowego zakresu pracy w zakresie częstotliwości 1325 - 1450 MHz. Uzyskanie jednoznacznego przebiegu charakterystyki wyjściowej w zadanym zakresie częstotliwości wymaga zastosowania przesuwника fazy o przesunięciu 45 stopni [1]. Zmodyfikowana wersja detektora częstotliwości przedstawiona została na rysunku 5.



Rys. 5. Widok detektora częstotliwości typu "cosinus" z przesuwnikiem fazy 45 stopni

W układzie zastosowany został przesuwник fazy z wykorzystaniem zwartego i rozwartego strojnika, którego struktura przedstawiona została na rysunku 6 [3-6]. Składa się on z trzech sekcji. Założone względne przesunięcie fazy równe 45° w szerokim zakresie częstotliwości osiągnąć jest poprzez odpowiedni dobór impedancji charakterystycznych oraz długości elektrycznych dwóch równoległe połączonych strojników, stanowiących sekcję 2. Natomiast sekcję 1 i 3 stanowią transformatory impedancji służące poprawie dopasowania. Dla założonej częstotliwości środkowej oraz parametrów podłoża, czyli laminatu, wspomniane powyżej impedancje i długości elektryczne przełożą się na określone szerokości i długości odpowiadających im linii mikropaskowych. Dla potrzeb analizowanego projektu założono częstotliwość środkową przesuwника równą 1400 MHz oraz laminat szklano-epoksydowy typu FR4 o grubości 1,5 mm. W tabeli 1 przedstawiono geometrię oraz parametry elektryczne poszczególnych elementów przesuwника, otrzymane w wyniku symulacji, przeprowadzonych numeryczną metodą FDTD w środowisku MW CST.

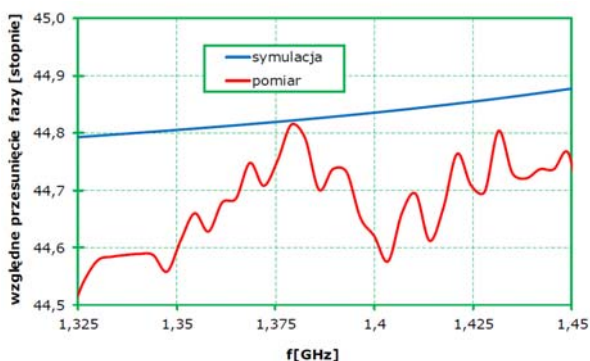


Rys. 6. Struktura przesuwника fazy wraz z linią odniesienia

Tabela 1. Parametry elektryczne oraz wymiary geometryczne elementów przesuwnika dla laminatu FR4 (h = 1,5 mm)

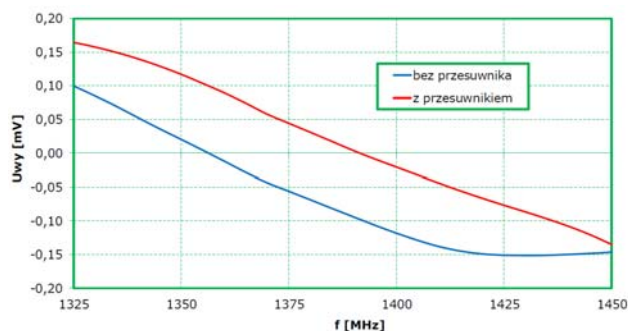
Element przesuwnika	Parametry geometryczne: szerokość [mm] / długość [mm]	Parametry elektryczne: Impedancja [Ω] / długość elektryczna [stopnie]
stojnik zwarty i rozarty	1,37 / 15,00	73,07 / 43,83
transformatory impedancji	5,05 / 27,50	34,66 / 85,42
linia referencyjna	2,83 / 73,93	50 / 223,09

Charakterystyki względnego przesunięcia fazy dla modelu symulacyjnego oraz układu rzeczywistego przesuwnika przedstawione zostały na rysunku 7. Wynika z nich, że w całym analizowanym zakresie częstotliwości zastosowany przesuwnik zachowuje stałe względne przesunięcie fazy wynoszące $44,73^\circ \pm 0,36\%$.



Rys. 7. Względne przesunięcie fazy w modelu symulacyjnym i układzie rzeczywistym przesuwnika

Charakterystyka napięcia wyjściowego w funkcji częstotliwości układu bez przesuwnika fazy i z przesuwnikiem przedstawiona jest na rysunku 8.



Rys. 8 Przebieg rzeczywistej charakterystyki napięcia wyjściowego detektora częstotliwości bez i z przesuwnikiem fazy 45 stopni w funkcji częstotliwości dla różnicy długości linii transmisyjnych 732 mm

Jak wynika z rysunku 9 zastosowanie w strukturze detektora częstotliwości przesuwnika fazy pozwoliło na bardzo precyzyjne przesunięcie w założony przedział zakresu jednoznacznego pomiaru częstotliwości chwilowych, który odpowiada liniowej części charakterystyki napięcia wyjściowego detektora w przedziale od 1325 MHz do 1450 MHz.

Podsumowanie

Zastosowanie w strukturze detektora częstotliwości przesuwnika fazy pozwala na przesuwanie charakterystyki wyjściowej detektora na osi częstotliwości. Efektem jest jednoznaczna charakterystyka wyjściowa w wybranym zakresie pracy. Przedstawiona metoda pozwala na uzyskanie jednoznacznych charakterystyk detektora częstotliwości w wybranym paśmie częstotliwości, zachowując jego podstawową zaletę jaką jest szerokopasmowość. Pewnym ograniczeniem metody jest szerokość pasma pracy zastosowanego przesuwnika fazy. W związku z tym jednym z kierunków dalszych badań nad tego typu układami jest poszukiwanie nowych szerokopasmowych rozwiązań przesuwników fazy z względnym pasmem pracy, sięgającym nawet 100%, przy błędzie przesunięcia fazy nie przekraczającym pojedynczych stopni.

Autorzy: dr inż. Mirosław Czyżewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: miroslaw.czyzewski@wat.edu.pl; dr inż. Czesław Rećko, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Radioelektroniki, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: czeslaw.recko@wat.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Rećko C., Stec B.: Modification of microwave frequency detector characteristic with the use of phase shifter, Metrology and Measurement Systems, Vol. 25 (2018), zeszyt 4, str. 769-777
- [2] Susek W., Stec B., Broadband microwave correlator of noise signals, Metrology and Measurement System, Vol. XVII (2010), zeszyt 2, str. 289-298
- [3] Rutkowski A., Mikrofalowe przesuwniki fazy ze stojnikami równoległymi, Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji, Warszawa, 2003, Tom 49, zeszyt 2, str. 201-224.
- [4] Tang X., Mouthaan K., Phase-Shifter Design Using Phase-Slope Alignment With Grounded Shunt 1/4 Stubs, IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, Vol. 58, No. 6, 06. 2010, pp. 1573-1583.
- [5] Kim S., Chang K., Ultrawide-Band Transitions and New Microwave Components Using Double-Sided Parallel-Strip Lines, IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, Vol. 52, No. 9, 09.2004, pp. 2148-2152.
- [6] Chang Y., Che W., Wang X., Wideband balanced out-of-phase network based on double-sided parallel-strip line, IET Microw. Antennas Propag., 2014, Vol. 8, Iss. 15, pp. 1322-1326.