

PROJEKTOWANIE MIKROFALOWYCH SPRZĘGACZY KIERUNKOWYCH W TECHNICIE LINII TRANSMISYJNYCH QUASI-TEM. ANALIZA, PROJEKTOWANIE I BADANIA EKSPERYMENTALNE.

ROBERT SMOLARZ

Streszczenie

Wymagania stawiane przed nowoczesnymi systemami radiokomunikacyjnymi i radiolokacyjnymi są coraz wyższe. Standardy sieci komórkowych takie jak LTE Advanced czy 5G opierają swoje działanie na pracy w szerokim paśmie częstotliwości. Ważne jest też, aby urządzenia radiowe osiągały coraz większą sprawność i większy stopień zminiaturyzowania. Założenia te można spełnić projektując układy zintegrowane wykorzystujące technikę linii paskowych, w których występuje zjawisko propagacji fali quasi-TEM. Z praktycznego punktu widzenia, są to obwody wykonywane na laminatach w tzw. technologii PCB (ang. *Printed Circuit Board*) lub na specjalnych podłożach pół ceramicznych, półprzewodnikowych w technologii monolitycznej. W obu tych przypadkach, zintegrowanie układów aktywnych z pasywnymi w obrębie jednego urządzenia czy też bloku funkcjonalnego staje się proste pod względem symulacji oraz wykonania. Niestety dużym problemem są straty wtrąceniowe oraz odbiciowe, które pojawiają się na połączeniach niedopasowanych układów pracujących w paśmie mikrofalowym. Inną problematyczną kwestią jest zminiaturyzacja układów pasywnych projektowanych szczególnie w technice monolitycznej. W przypadku realizacji komponentów składających się z linii transmisyjnych (np. sprzęgacze kierunkowe), geometria projektowanego układu może być większa niż rozmiar pojedynczego układu scalonego, który jest zdefiniowany przez dany proces technologiczny.

Zakres niniejszej rozprawy doktorskiej skupia się na trzech głównych aspektach związanych z mikrofalowymi sprzęgaczami kierunkowymi. Pierwszy z nich dotyczy możliwości polepszenia właściwości sprzęgaczy zbudowanych z sekcji sprzężonych linii transmisyjnych wykonanych w technologii PCB i monolitycznej. W ramach pracy omówiono metody kompensacji prędkości fazowych rodzajów parzystego i nieparzystego (struktury symetryczne) oraz indukcyjnego i pojemnościowego współczynnika sprzężenia (struktury asymetryczne), które mogą być zastosowane w sprzęgaczach o pobudzeniu klasycznym (tzw. *single-ended*) lub różnicowym. Zaproponowano również rozwiązania pozwalające na projektowanie dwu- i cztero- paskowych sekcji sprzężonych o zredukowanych stratach całkowitych (sprzęgacz w topologii Langeego).

Drugim aspektem jest opracowanie oraz analiza sprzęgaczy kierunkowych pozwalających na transformację impedancji w wąskim i szerokim paśmie pracy. W klasycznych rozwiązaniach, impedancja wszystkich wrot sprzęgacza jest taka sama i w większości wypadków równa 50Ω . W przypadku, gdy do tak zaprojektowanego sprzęgacza zostanie podłączony układ o innej impedancji (np. układ nieliniowy w postaci wzmacniacza), następuje tzw. niedopasowanie impedancyjne i degradacja parametrów całego obwodu poprzez powstałe straty odbiciowe. W takim przypadku, zastosowanie sprzęgaczy kierunkowych transformujących impedancję jest wskazane i pozwala na znaczącą poprawę właściwości układowych. Po pierwsze następuje redukcja wspomnianych strat odbiciowych między wrotami elementów. Po drugie, rozmiary projektowanego obwodu mogą zostać znacząco zmniejszone, ze względu na brak dodatkowych obwodów dopasowujących. W niniejszej pracy przedstawiono opracowane wąskopasmowe i szerokopasmowe sprzęgacze hybrydowe transformujące impedancje, w których znacząco zwiększono

tw. współczynnik transformacji impedancji oraz nastąpiło zwiększenie pasma operacyjnego. Układy te zostały oparte o topologię pierścieniową (tzw. *rat-race*) oraz tandemową zbudowaną z sekcji linii sprzężonych.

Ostatni, poruszony temat skupia się na użyciu opracowanych sprzęgaczy kierunkowych o polepszonych właściwościach do zastosowań w bardziej złożonych układach wykonanych w technice monolitycznej bazującej na arsenku galu. W ramach pracy zaproponowano dwa zminiaturyzowane sprzęgacze hybrydowe w topologii gałęziowej (tzw. *branch-line*) o pobudzeniu: single-ended i różnicowym. Zaproponowane układy zostały następnie wykorzystane kolejno w projekcie monolitycznego sensora do badań np.: przenikalności dielektrycznej materiałów oraz w monolitycznym zrównoważonym wzmacniaczu pobudzonym różnicowo, który został zaprojektowany na potrzeby niniejszej rozprawy. Trzecim z zaprojektowanych układów jest monolityczny układ radaru z ciągłą falą modulowaną częstotliwościowo FMCW (ang. *Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar*) pracujący w paśmie przewidzianym dla branży automotive w którym wykorzystano wcześniej zaprojektowany skompensowany sprzęgacz trójpaskowy zbliżeniowy.

Opracowane metody projektowe oraz układy zostały zweryfikowane eksperymentalnie poprzez pomiary wykonanych układów lub symulacje (tak stało się jedynie w przypadku monolitycznego wzmacniacza zrównoważonego). W każdym z zaproponowanych sprzęgaczy kierunkowych stwierdzono poprawę parametrów względem znanych już rozwiązań. Dodatkowo, ostatni rozdział w którym to zweryfikowano aplikacyjność potwierdza możliwość implementacji opracowanych rozwiązań monolitycznych w monolitycznych mikrofalowych układach scalonych.

MICROWAVE DIRECTIONAL COUPLERS' DESIGN WITH THE USE OF PLANAR QUASI-TEM TRANSMISSION LINE SECTIONS. ANALYSIS, EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND APPLICATIONS

ROBERT SMOLARZ

Abstract

Modern radio communication and radiolocation systems have to fulfill ever demanding requirements. Cellular network standards such as LTE Advanced or 5G are based on operation across a broad frequency band. It is also important that wireless devices become increasingly efficient and miniaturized. These requirements can be addressed by designing integrated circuits using the strip transmission line technique in which a quasi-TEM wave propagation appears. From a practical point of view, such circuits are manufactured using *printed circuit board* (PCB) technology or on special ceramic or semiconductor substrates with *monolithic microwave integrated circuit* (MMIC) technology. In both cases, the integration of active and passive systems within one device or functional block becomes simple in terms of simulation and fabrication. However, such networks feature insertion and reflection losses that appear at the connections of mismatched circuits operating in the microwave frequencies. Another issue is related to the miniaturization aspect, which is especially crucial for passive components designed using the MMIC technique. In the case of components consisting of transmission lines (e.g. directional couplers), the geometry of the designed circuitry can exceed the size of a single integrated circuit, which is defined by a chosen technological process.

The scope of this dissertation focuses on three main aspects related to microwave directional couplers. The first concerns the possibility of improving the properties of couplers composed of coupled-line sections designed in both PCB and MMIC technologies. This work discusses the methods of even and odd phase velocity compensation in symmetrical structures, as well as the equalization of inductive and capacitive coupling coefficients in asymmetric structures. Such approaches improve the electrical performance of the couplers in terms of obtained directivity, isolation and return losses. The author proposed the utilization of such methods in single-ended and differentially-fed directional couplers. Furthermore, an investigation on the reduction of total losses in two- and four-coupled-line section has been conducted.

The second aspect is focused on the development and analysis of impedance-transforming directional couplers operating in narrow and wide frequency bandwidths. In well-known solutions, the impedance of all of the coupler's ports is the same and is equal to the standardized value of 50Ω . In cases where such a coupler has been connected with a component that has a different impedance, an effect called impedance mismatch is observed. Such an issue has a direct influence on return loss increase, and therefore on the degradation of the total performance of the circuit. In such cases, the use of impedance-transforming directional couplers is desirable and enables the significant improvement of circuit parameters. First, a reduction of the return losses between the ports of the elements is obtained. Second, the overall size of the designed circuit can be reduced because additional matching circuits are not needed. In this work, studies related to the impedance-transforming hybrid couplers based on rat-race and tandem topologies operating in narrow and broad operational bandwidths is presented. In comparison

to well-known solutions, the impedance-transformation ratio is increased. Moreover, an enhancement of the bandwidth in the rat-race coupler is also obtained.

The last topic discussed in the dissertation focuses on the utilization of the developed directional couplers in complex, monolithic applications based on gallium arsenide. As part of the work, two miniaturized hybrid couplers in a single-ended and a differentially-fed branch-line topology have been proposed. The couplers have been used in the design of a monolithic sensor intended for measurements of material dielectric permittivities and in a monolithic balanced differentially excited amplifier, which has been designed for the purposes of this dissertation. The third of the designed chips is a monolithic *frequency-modulated continuous-wave* (FMCW) radar front end operating in the automotive frequency band, in which a previously designed compensated three-coupled-line section coupler was utilized.

The developed design methods and circuits have been experimentally verified by measurements of the fabricated structures. In each of the proposed directional couplers, the performance has been improved in relation to the existing solutions. In addition, the last chapter confirms the applicability of the developed monolithic solutions in monolithic microwave integrated circuits.