

# Projeto de Divisor de Potência Wilkinson com Elementos Concentrados

Natalia F. da Silva, Eduardo S. Sakomura, Edson R. Schlosser e Marcos V. T. Heckler

**Resumo**—Este artigo apresenta o projeto de um divisor de potência Wilkinson baseado em elementos concentrados. Para este projeto, foi utilizado o software Ansys HFSS para simular o comportamento eletromagnético do divisor. A frequência central de operação do dispositivo é 2,4 GHz, visando à aplicação em um circuito de *beamforming*, que será embarcado em veículo aéreo não-tripulado (VANT). Os resultados medidos do protótipo apresentam boa concordância com as curvas simuladas. Como principais resultados obtidos, destacam-se: perda de inserção de ~0,4 dB, isolamento entre portas de saída de ~27 dB e dimensões extremamente compactas, sendo as dimensões laterais inferiores a 30% das obtidas com um divisor Wilkinson tradicional empregando-se o mesmo laminado de micro-ondas.

**Palavras-Chave**—Divisor de potência, Matriz espalhamento, Elementos concentrados.

**Abstract**—This paper presents the design of a Wilkinson power divider using lumped elements. For this design, the electromagnetic simulator Ansys HFSS was used to simulate the electromagnetic behavior of the proposed structure. The design frequency is 2.4 GHz, which is suitable for the integration of the beamforming circuitry into an unmanned aerial vehicle (UAV). The agreement between experimental and numerical results is very good. The main results obtained with the prototype are: low insertion loss (~0.4 dB), high isolation between the output ports (~27 dB) and compact dimensions, with edge sizes lower than 30% of the ones of a standard Wilkinson divider designed with the same microwave laminate.

**Keywords**—Power divider, Scattering matrix, Lumped elements.

## I. INTRODUÇÃO

Divisores de potência são dispositivos fundamentais em radiofrequência, e, em geral, são utilizados como somadores em circuitos de *beamforming*. Nestes, um sinal pode ser dividido em dois ou mais sinais iguais, ou com pesos diferentes [1]. Esses dispositivos são utilizados em diversos sistemas de telecomunicações, como, por exemplo, em redes de antenas aplicadas em radares, veículos aéreos não-tripulados, sistemas de telemetria, entre outros [2]- [3].

Os tipos de divisores de potência mais comuns na literatura são os divisores de junção T, resistivo e Wilkinson. Dentre essas opções, o divisor Wilkinson se destaca por apresentar uma alta isolamento entre as portas de saída, baixa perda de inserção e

Natalia F. da Silva, Eduardo S. Sakomura, Edson R. Schlosser e Marcos V. T. Heckler, Laboratório de Eletromagnetismo, Micro-Ondas e Antenas (LEMA), Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete-RS, e-mails: {nataliaferao.aluno, eduardosakomura.aluno, edsonschlosser, marcosheckler}@unipampa.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) sob Termo de Outorga 21/2551-0000664-1.

um bom casamento de impedância em todos os acessos. Em geral, esse dispositivo é concebido utilizando-se seções de linha de transmissão com comprimento  $\lambda/4$  através das tecnologias de microfita ou *coplanar waveguide with ground* (CPWG) [1], sendo  $\lambda$  o comprimento de onda guiado. Também é possível utilizar elementos concentrados para projetar esse dispositivo, a fim de reduzir o seu tamanho físico.

Nesse contexto, algumas técnicas de miniaturização de circuitos estão apresentadas nas referências [4]–[6]. Em [4], é realizada a redução do circuito utilizando uma técnica apenas com linhas de transmissão. Já em [5], a técnica empregada utiliza uma compensação capacitiva ou indutiva, associada com trechos de linha para obter a defasagem desejada. No trabalho da referência [6], tem-se uma modelagem utilizando indutores ativos e capacitores, com a análise feita através da matriz ABCD.

Neste trabalho, é proposto um divisor Wilkinson compacto utilizando elementos concentrados, a partir da análise de sua matriz espalhamento. Para demonstrar a técnica, foram projetados dois modelos, o primeiro utilizando linhas de transmissão e o segundo com componentes discretos, ambos em tecnologia de microfita. Os divisores foram projetados no substrato RO4360G2 para operar na frequência de 2,4 GHz, com uma entrada, duas saídas e divisão de potência de saída equilibrada.

A próxima seção apresenta a metodologia para desenvolver um circuito defasador com elementos concentrados. Na seção III, estão descritas todas as etapas do projeto dos divisores de potência Wilkinson. Os resultados obtidos das simulações e das medidas estão apresentadas na seção IV. Por último, na seção V, as conclusões do trabalho são realizadas.

## II. CIRCUITOS COM ELEMENTOS CONCENTRADOS DESENVOLVIDOS A PARTIR DA MATRIZ ESPALHAMENTO

A partir da matriz espalhamento  $[S]$ , é possível analisar muitas particularidades de um dispositivo de  $N$  portas. A técnica pode ser aplicada em circuitos formados por indutores, capacitores, resistores, entre outros, desde que apresentem comportamento linear. Os parâmetros  $S$  podem ser obtidos através da relação geral

$$S_{mn} = \left. \frac{V_m^-}{V_n^+} \right|_{V_k^+ = 0}, \quad \text{para } k \neq n, \quad (1)$$

em que  $V_m^-$  denota uma onda de tensão que sai pela porta  $m$  e  $V_n^+$  uma onda de tensão incidente na porta  $n$ . A Equação (1) é

válida desde que as portas, com exceção do acesso  $n$ , estejam conectadas em cargas casadas.

Na Fig. 1, um quadripolo com elementos na configuração  $\pi$  é ilustrado. Caso as impedâncias descritas por  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  sejam resistências com valores apropriados, o circuito poderá funcionar como um atenuador. Caso as impedâncias  $Z_1$  e  $Z_3$  estejam relacionadas com capacitores e  $Z_2$  com um indutor, então o circuito poderá operar como um filtro passa-baixa ou defasador (proporcionando atraso de fase). Por outro lado, tem-se a possibilidade de o circuito operar como um filtro passa-alta ou defasador (ocasionando avanço de fase), caso as impedâncias  $Z_1$  e  $Z_3$  estejam relacionadas com indutores e  $Z_2$  com um capacitor.

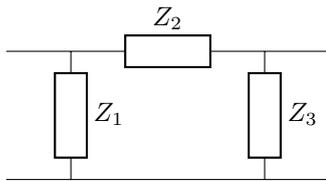


Fig. 1: Quadripolo com configuração  $\pi$ .

Considerando a topologia  $\pi$  passa-baixa, é possível realizar o atraso de fase na faixa de  $-180^\circ < \zeta < 0^\circ$ , em que  $\zeta$  é a fase de atraso desejada. Já a topologia  $\pi$  passa-alta possibilita realizar o avanço de fase na faixa de  $0^\circ < \zeta < +180^\circ$ .

Os valores dos componentes necessários para se obter determinada defasagem podem ser obtidos a partir da especificação dos parâmetros  $S$  desejados. Nesta abordagem, assume-se que o parâmetro  $S_{mn}$  seja representado por um número complexo descrito na forma exponencial, dado por

$$S_{mn} = |S_{mn}|e^{j\pi\zeta_{mn}/180}, \quad (2)$$

em que  $|S_{mn}|$  corresponde à magnitude e  $\zeta_{mn}$  à fase em graus. Para um quadripolo, os índices  $m$  e  $n$  podem assumir valores 1 ou 2 para representar as portas 1 ou 2, respectivamente.

Considerando os componentes do circuito ideais, expressões foram deduzidas através dos parâmetros  $S$  impondo as seguintes condições:

- 1) A porta analisada deve estar casada quando as demais estiverem conectadas em cargas casadas. Neste caso,  $S_{11} = S_{22} = 0$ ;
- 2) A magnitude do parâmetro de transmissão deve ser unitária; ou seja,  $|S_{21}| = |S_{12}| = 1$  (desconsiderando-se perdas de inserção);
- 3) A fase do parâmetro de transmissão deve ser especificada; ou seja,  $\zeta_{21} = \zeta_{12} = \zeta$ .

Desta forma, as impedâncias em paralelo contidas no circuito  $\pi$  com atraso de fase são calculadas por

$$Z_1 = Z_3 = Z_{C_\pi} = Z_0 \left( \frac{2e^{j\pi\zeta/180}}{1 - e^{j\pi\zeta/180}} + 1 \right), \quad (3)$$

enquanto que a impedância série é determinada por

$$Z_2 = Z_{L_\pi} = \frac{2Z_{C_\pi}Z_0^2}{Z_{C_\pi}^2 - Z_0^2}, \quad (4)$$

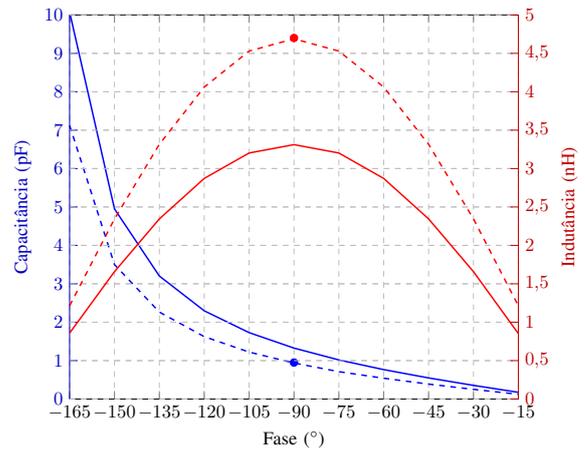


Fig. 2: Valores dos componentes de uma rede  $\pi$ . Curvas em azul: capacitâncias ( $C_p$ ); Curvas em vermelho: indutância ( $L_s$ ).

sendo  $Z_0$  a impedância característica considerada para obtenção dos parâmetros  $S$ . A partir desses valores, é possível determinar as capacitâncias e a indutância dos elementos do circuito através de

$$C_p = \frac{1}{j2\pi f Z_{C_\pi}} \quad (5)$$

e

$$L_s = \frac{-jZ_{L_\pi}}{2\pi f}, \quad (6)$$

sendo  $C_p$  as capacitâncias em paralelo e  $L_s$  a indutância série. Na Fig. 2, é possível observar as combinações de capacitâncias e indutâncias necessárias para se obterem as fases de saída do circuito  $\pi$  em  $f = 2,4$  GHz. O gráfico está traçado com linhas sólidas para  $Z_0 = 50 \Omega$  e com linhas tracejadas para  $Z_0 = 50\sqrt{2} \Omega$ .

A abordagem aqui descrita é utilizada para substituir as linhas de transmissão de um divisor Wilkinson convencional por circuitos equivalentes em elementos concentrados.

### III. DIVISOR DE POTÊNCIA WILKINSON

O diagrama esquemático de um divisor de potência Wilkinson com relação de potência de saída uniforme ( $P_2 = P_3$ ) pode ser visualizado na Fig. 3, em que as linhas de transmissão de comprimento  $\lambda/4$  e impedância característica  $\sqrt{2}Z_0$  podem ser implementadas em diferentes tecnologias, como, por exemplo, microfita e guia de onda coplanar aterrado (CPWG).

Este tipo de divisor tem como principal característica a isolamento entre as portas de saída [1]. Para se obterem potências iguais nas portas 2 e 3, duas linhas de transmissão (LTs) são utilizadas após a junção, as quais possuem impedâncias características  $\sqrt{2}Z_0$ , onde  $Z_0$  é a impedância de referência. Ambas as LTs têm comprimento  $\lambda/4$ , o que resulta em um atraso de fase de  $90^\circ$ . Entre essas LTs, é adicionado um resistor com valor  $2Z_0$ , que garante a isolamento entre as portas de saída [1].

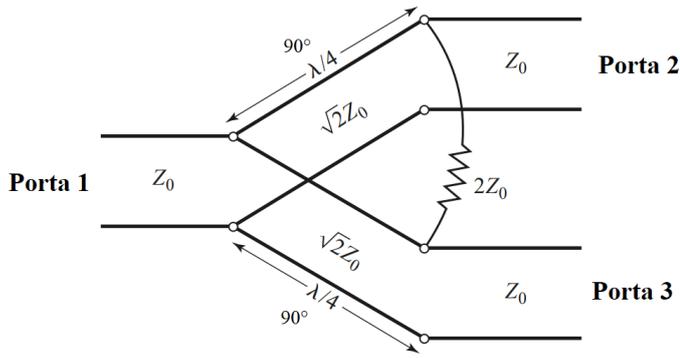


Fig. 3: Diagrama esquemático de um divisor de potência Wilkinson (adaptado de [1]).

TABELA I: Parâmetros de projeto do divisor Wilkinson em tecnologia de microfita.

Impedância característica ( $Z_0$ )	50,00 $\Omega$
Impedância característica ( $\sqrt{2}Z_0$ )	70,71 $\Omega$
Frequência	2,40 GHz
Largura da linha ( $Z_0$ )	0,86 mm
Largura da linha ( $\sqrt{2}Z_0$ )	0,41 mm
Comprimento de onda para $Z_0$ ( $\lambda_{Z_0}$ )	60,00 mm
Comprimento de onda para $\sqrt{2}Z_0$ ( $\lambda_{\sqrt{2}Z_0}$ )	62,10 mm

A. Projeto em microfita

O projeto do divisor foi desenvolvido em tecnologia de microfita no software Ansys HFSS. O substrato utilizado foi o RO4360G2 da Rogers, com constante dielétrica  $\epsilon_r = 6,15$ , tangente de perdas  $\tan \delta = 0,0038$  e espessura de 0,61 mm. Já o resistor usado foi do tipo SMD 0402 imperial de 100  $\Omega$ . Na Tabela I são apresentadas especificações e informações relacionadas ao projeto físico do dispositivo em tecnologia de microfita.

A Fig. 4 apresenta o modelo do divisor Wilkinson com conectores SMA em suas terminações, o qual apresenta dimensões de 24 mm  $\times$  37 mm.

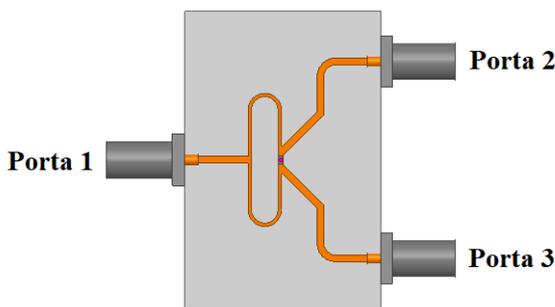


Fig. 4: Divisor de potência em microfita.

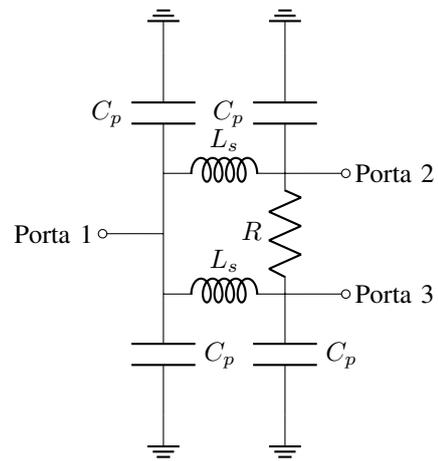


Fig. 5: Diagrama esquemático do divisor Wilkinson com componentes discretos.

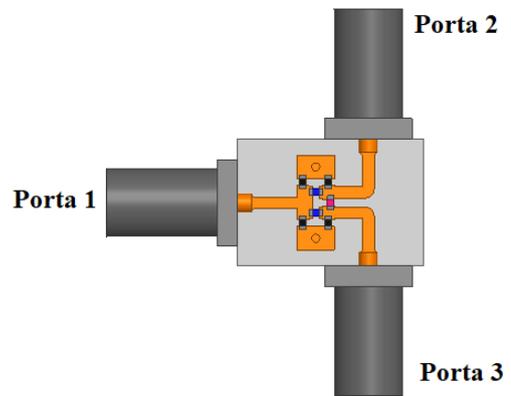


Fig. 6: Divisor de potência com elementos concentrados.

B. Projeto com elementos concentrados

O projeto com elementos concentrados consiste em substituir as linhas de transmissão de comprimentos  $\lambda/4$  por redes  $\pi$  equivalentes que atrasam a fase em  $90^\circ$ . O modelo circuintal do divisor Wilkinson pode ser visualizado na Fig. 5, em que os valores obtidos através das Eqs. (5) e (6) foram  $C_p = 0,94$  pF e  $L_s = 4,7$  nH (ver os pontos destacados na Fig. 2).

A partir da Fig. 5, o modelo eletromagnético equivalente foi desenvolvido no software Ansys HFSS empregando-se o laminado RO4360G2 da Rogers. Os componentes (capacitores, indutores e resistores) utilizados correspondem ao modelo SMD 0402 imperial e sintetizados através de superfícies RLC. Devido aos efeitos parasitas que surgem no circuito quando componentes discretos são utilizados, fizeram-se ajustes nos valores dos capacitores e indutores. Os valores otimizados foram  $C_p = 0,56$  pF e  $L_s = 3,9$  nH. Adicionalmente, um resistor de 100  $\Omega$  foi usado.

A Fig. 6 apresenta o modelo eletromagnético compactado do divisor Wilkinson com elementos concentrados e com conectores SMA nas terminações. A vista isométrica do circuito no HFSS e as respectivas dimensões do laminado e dos com-

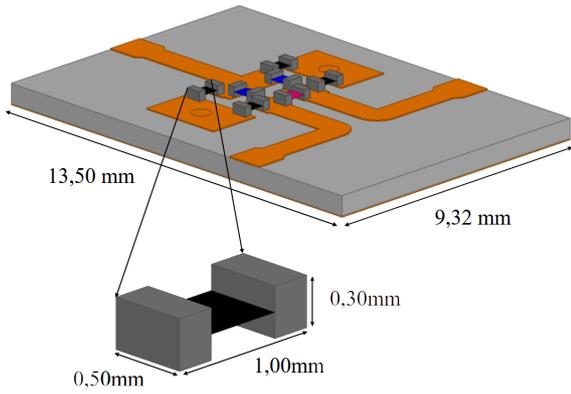


Fig. 7: Vista isométrica do modelo eletromagnético com as dimensões principais do divisor de potência compacto.

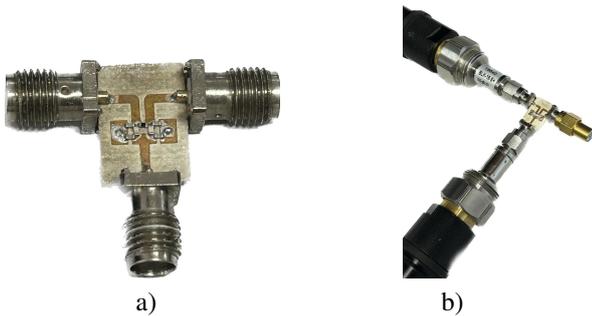


Fig. 8: Divisor de potência Wilkinson com elementos concentrados. a) Protótipo; b) Medição em bancada.

ponentes são ilustrados na Fig. 7. Na Fig. 8 é apresentado o protótipo construído.

Para fins de comparação, ambos os modelos eletromagnéticos são mostrados em vista superior na Fig. 9. Verifica-se claramente que a técnica proposta neste artigo permite a obtenção de uma estrutura muito mais compacta que o divisor Wilkinson tradicional, considerando-se o mesmo laminado de micro-ondas para ambos os dispositivos. Destaca-se que ambas as ilustrações foram extraídas do simulador com visualização em uma mesma escala.

#### IV. RESULTADOS

A comparação de desempenho de ambos os divisores projetados é apresentada na Fig. 10, onde as linhas sólidas e as linhas tracejadas correspondem às magnitudes dos parâmetros  $S$  dos divisores em microfita e em elementos concentrados, respectivamente. Verifica-se desempenho semelhante de ambos os dispositivos projetados. Ainda que o divisor em microfita apresente coeficientes de reflexão de entrada mais baixos, as discrepâncias na frequência de projeto encontram-se bem abaixo de 1%, uma vez que os níveis de todos os parâmetros  $S_{nm}$  encontram-se abaixo de  $-25$  dB em 2,4 GHz. O divisor compacto apresenta perda de inserção ligeiramente inferior ao divisor projetado em tecnologia de microfita.

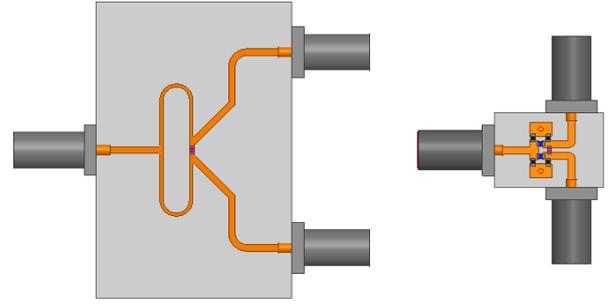


Fig. 9: Vistas superiores de ambos os modelos eletromagnéticos dos divisores de potência.

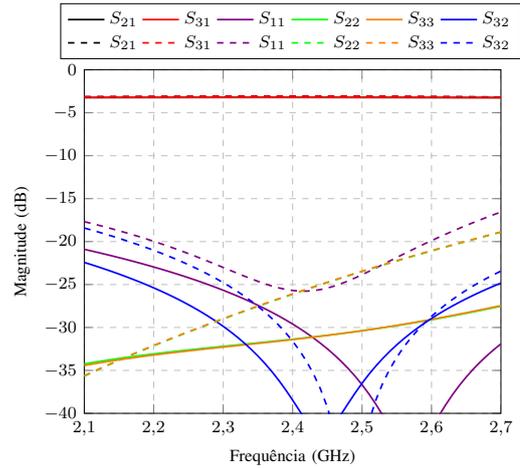


Fig. 10: Comparação dos resultados simulados dos divisores Wilkinson em microfita e em componentes concentrados.

Após a modelagem eletromagnética, o protótipo fabricado foi caracterizado em bancada. Na Fig. 11 são apresentadas as curvas simuladas (linhas tracejadas) e medidas (linhas sólidas).

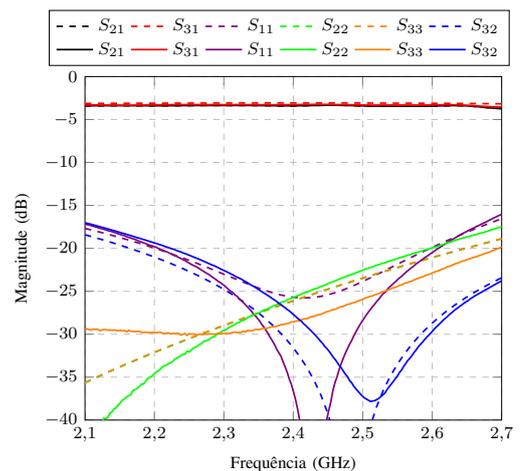


Fig. 11: Comparação dos resultados simulados e medidos do divisor Wilkinson em componentes concentrados.

Verifica-se que o desempenho do protótipo está bastante próximo dos resultados obtidos previamente em simulação, o que valida a estratégia de projeto proposta.

## V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, foram apresentados dois projetos de divisores de potência Wilkinson na frequência de 2,4 GHz. O dispositivo em elementos concentrados apresentou uma redução de área de 7 vezes em comparação ao de microfita, o que reduz o custo drasticamente, visto que laminados com baixas perdas na frequência de micro-ondas são comercialmente caros. Por outro lado, componentes SMD são baratos.

O divisor Wilkinson em elementos concentrados apresentou excelente desempenho. Na frequência central de projeto, o dispositivo apresentou perda de inserção de 0,4 dB, isolamento entre portas de 27 dB e coeficientes de reflexão nas portas abaixo de  $-25$  dB quando cargas casadas são aplicadas às portas.

O dispositivo projetado será utilizado no futuro em projetos de redes de antenas visando *beamforming* em veículos aéreos não-tripulados, visto que apresenta baixo custo, dimensões reduzidas e massa praticamente desprezível.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) sob Termo de Outorga 21/2551-0000664-1.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. M. POZAR, Microwave Engineering, 4th ed.
- [2] R. Rahardi, M. Rizqi, W. D. Lukito, R. Virginio, M. Hilmi and A. Munir, "Meander Line-based Wilkinson Power Divider for Unmanned Aerial Vehicle Application," 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), Batam, Indonesia, 2020.
- [3] Y. Agarwal, A. Jain and K. Shambavi, "1:2N wilkinson power divider for WLAN applications," 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2017.
- [4] Imani, MA, Shama, F, Roshani, GH. Miniaturized Wilkinson power divider with suppressed harmonics. Microw Opt Technol Lett. 2020; 62: 1526– 1532. <https://doi.org/10.1002/mop.32201>
- [5] Wang, X., Ohira, M., Ma, Z., Sakagami, I., Mase, A. and Yoshikawa, M. (2016), Capacitive/inductive compensation factor in coupled lines wilkinson power divider design. Microw. Opt. Technol. Lett., 58: 2940-2944. <https://doi.org/10.1002/mop.30206>
- [6] Liang-Hung Lu, Yu-Te Liao and Chung-Ru Wu, "A miniaturized Wilkinson power divider with CMOS active inductors," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 15, no. 11, pp. 775-777, Nov. 2005, doi: 10.1109/LMWC.2005.859020.