

Projeto de um Conversor de Polarização Ultrafino e de Banda Ultralarga

Luiz Gustavo Coelho Pedro, Lucas Katsumata Negrão Durço, Francisco Diego Martins Nobre, Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos e Maurício Weber Benjô da Silva

Resumo— Este trabalho propõe o projeto de um conversor de polarização reflexivo de banda ultralarga baseado em uma metassuperfície anisotrópica. A célula unitária compreende três subressonadores dispostos sobre um substrato dielétrico com aterramento. Resultados numéricos mostram que a estrutura proporciona uma taxa de conversão de polarização superior a 90% compreendida entre 15,25 e 37,77 GHz com uma banda fracionária de 85,95%, abrangendo parcialmente a banda Ku, em sua totalidade a banda K e quase completamente a banda Ka. Além disso, a estrutura tem uma espessura de $\lambda/8,19$ e periodicidade de $\lambda/5,3$, considerando a frequência mais baixa de operação.

Palavras-Chave— Conversor de polarização linear, metassuperfície, ultrafino, banda ultralarga.

Abstract— This work proposes the design and simulation of an ultra-wideband reflective polarization converter based on an anisotropic metasurface. The unit cell comprises three sub-resonators on a ground-backed dielectric substrate. Numerical results demonstrate a polarization conversion ratio (PCR) over 90% from 15.25 to 37.77 GHz (85.95% fractional bandwidth). This partially covers the Ku band, fully covers K, and almost entirely covers Ka. At the lowest operating frequency, the structure exhibits a compact periodicity of $\lambda/5.3$ and an ultra-thin profile of $\lambda/8.19$.

For papers written in English, please drop both sections above (Resumo and Palavras-Chave).

Keywords— Linear polarization converter, metasurface, ultra-thin, ultra-wideband.

I. INTRODUÇÃO

O estado de polarização da onda eletromagnética (EM) refere-se à direção de oscilação de um campo elétrico em um plano perpendicular à direção de propagação [1]. Sua manipulação é importante, assim como a frequência e a fase, para diversas aplicações nas faixas de frequência de micro-ondas, terahertz e ópticas [2], [3], [4].

Conversores de polarização têm aplicações em uma gama de projetos, tais como antenas, comunicação por rádio e

tecnologia de radar, para citar algumas. Diversos métodos de conversão de polarização foram introduzidos, os quais sofrem com largura de banda estreita, altas perdas, estruturas volumétricas e respostas dependentes do ângulo [5], [6], [7]. Devido às suas propriedades incomuns, não facilmente encontradas naturalmente, os metamateriais têm sido alvo de estudos em diversas aplicações [8], [9], [10]. Uma das aplicações mais comuns é o controle da polarização EM. Algumas estruturas propostas convertem a polarização através de reflexão a partir da metassuperfície, chamados conversores de polarização reflexivos [11], enquanto outras alcançam esse objetivo através da transmissão, chamados conversores de polarização transmissivos [12]. No entanto, os estudos sobre conversores ainda enfrentam dificuldades relacionadas às bandas de conversão estreitas ou ressonadores complexos, o que exige novos métodos de projeto para produzir estruturas dinâmicas, de banda ultralarga e altamente eficientes com boa escalabilidade [11], [13].

Diversos estudos sobre polarizadores vêm sendo propostos na literatura. Os projetos são focados em conversores transmissivos e reflexivos visando diversas aplicações. Em [14] os autores propõem a integração de um conversor reflexivo de banda larga a uma antena MIMO visando melhor isolamento e redução da seção reta radar, simultaneamente. Um conversor de polarização transmissivo reconfigurável usado para controlar o estado de polarização de uma antena corneta é proposto em [15]. Os estados de polarização linear ou circular podem ser ajustados controlando-se a tensão de polarização de diodos PIN integrados às células unitárias. Já no trabalho apresentado em [16], os autores desenvolveram um conversor de polarização linear para linear que permite conversões de polarização transmissiva e reflexiva em diferentes bandas de operação, simultaneamente. Os resultados apresentados mostram que a estrutura altera o estado de polarização da onda transmitida na faixa de frequência de 7,07 GHz a 7,46 GHz, enquanto o estado de polarização da onda refletida é alterado na faixa de frequência de 16,59 GHz a 16,91 GHz. Como observado, os conversores de polarização são encontrados em diversas aplicações e em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

Neste estudo, propomos o projeto de um conversor de polarização de banda ultralarga baseado em metassuperfície. A geometria da célula unitária, composta por duas espiras circulares e uma espira quadrada, apresenta a inovação fundamental de estabilidade espectral em forma de platô, não observada anteriormente em outros projetos, o que se explica pela proximidade de múltiplas ressonâncias distribuídas continuamente ao longo dos elementos, em contraste com outras

Luiz Gustavo Coelho Pedro, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Avaré, Avaré-SP, e-mail: luizgustavocoelho@pedro@gmail.com; Lucas Katsumata Negrão Durço, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Avaré, Avaré-SP, e-mail: Lucasdurcoo@gmail.com; Francisco Diego Martins Nobre, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, RR, e-mail: nobredie@gmail.com; Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos, Departamento de Engenharia de Comunicações, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, e-mail: alpscamos@gmail.com; Maurício Weber, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Avaré, Avaré-SP, e-mail: mauriciobenjo@id.uff.br. Este trabalho foi financiado em parte pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), sob o processo 210.847/2024.

formas geométricas comuns, que geram bandas largas através da superposição de ressonâncias discretas com bandas mais estreitas.

II. PROJETO E SIMULAÇÃO

O conversor de polarização proposto neste estudo é composto de um arranjo periódico de subressonadores dispostos sobre um substrato dielétrico sobre um plano metálico. A parte frontal é formada por duas espiras circulares concêntricas separadas por uma espira quadrada e um corte na diagonal é feito em 45 graus a partir do eixo x em todas as espiras. A camada metálica é modelada como um filme de cobre com espessura de 0,035 mm e condutividade elétrica $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m. O substrato dielétrico selecionado é o Rohacell 51 IG, com permissividade relativa $\epsilon_r = 1,071$, tangente de perda $\delta = 0,0031$ e espessura $h = 2,4$ mm.

A vista em perspectiva da estrutura proposta com as indicações dos elementos da célula unitária é mostrada na Fig. 1(a), enquanto a Fig. 1(b) apresenta a vista frontal, cujas dimensões geométricas otimizadas da célula unitária, expressas em milímetros, são: $r_1 = 1,8$, $r_2 = 0,6$, $l = 2$, $w = 0,15$ e $g = 0,7$. A periodicidade da estrutura da metassuperfície é $p = 3,7$ mm. A Fig. 1(c) mostra a vista lateral, os ressonadores, o substrato dielétrico e o plano de incidência da onda EM.

A modelagem e simulação da estrutura proposta foram realizadas no software comercial CST Microwave Studio 2024. Condições de contorno periódicas foram delimitadas para a célula unitária ao longo os eixos x e y (limites periódicos). A condição de espaço livre foi considerada na direção $+z$ e na placa metálica traseira, a condição de contorno foi definida como condutor elétrico perfeito, consequentemente não há transmissão de sinal através dessa superfície. Uma porta do tipo *Floquet* foi usada para incidência de onda plana. Assim, os efeitos da onda incidente polarizada linearmente foram analisados numericamente.

Devido à simetria da célula unitária proposta, considerando os eixos x e y , a metassuperfície pode converter ondas polarizadas linearmente em y para x , bem como de x para y com a mesma eficiência. Para quantificar matematicamente essa conversão, definem-se os coeficientes de reflexão complexos r_{ij} , que representam a razão entre o fasor do campo elétrico refletido na polarização i e o campo incidente na polarização j . A partir destes, as magnitudes dos coeficientes de reflexão da onda co-polarizada são definidas como $R_{xx} = |r_{xx}| = |E_{rx}|/|E_{ix}|$ e $R_{yy} = |r_{yy}| = |E_{ry}|/|E_{iy}|$. De forma análoga, as magnitudes dos coeficientes de reflexão por polarização cruzada são expressas por $R_{xy} = |r_{xy}| = |E_{rx}|/|E_{iy}|$ e $R_{yx} = |r_{yx}| = |E_{ry}|/|E_{ix}|$.

O mecanismo de conversão de polarização pode ser melhor compreendido ao decompor a onda eletromagnética plana incidente em duas componentes ortogonais u e v , as quais formam um ângulo de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo y , conforme ilustrado na Fig. 2. Nesse novo sistema de coordenadas, introduzem-se os coeficientes de reflexão complexos co-polarizados $\tilde{r}_u$ e $\tilde{r}_v$, que relacionam as componentes dos campos refletido e incidente estritamente ao longo dos eixos u e v , respectivamente.

A onda incidente polarizada em y ($\vec{E}_i$) pode então ser expressa em função das componentes u e v : $\vec{E}_i = \vec{u}\vec{E}_{iu}e^{j\phi} +$

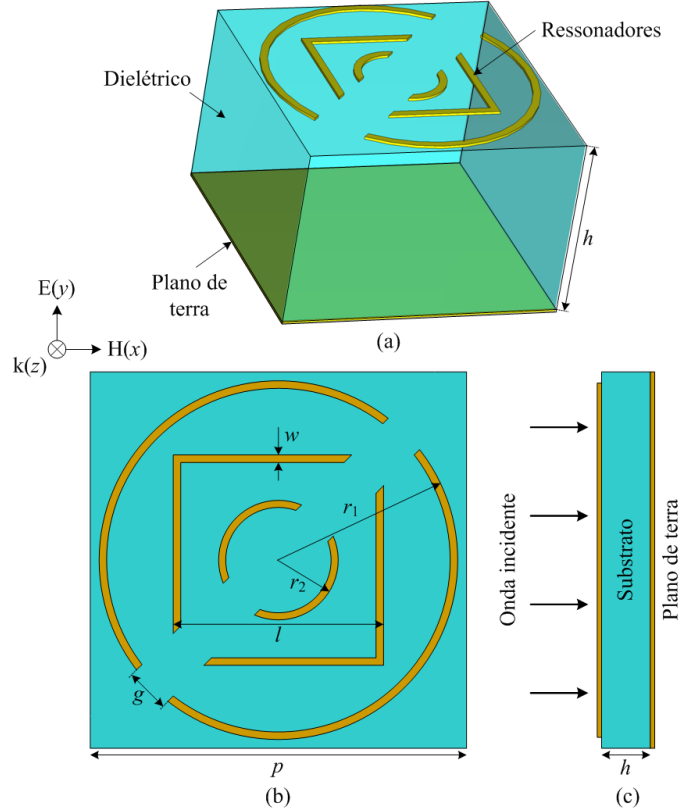


Fig. 1: Célula unitária da estrutura proposta: (a) Vista em perspectiva, (b) vista superior e (c) vista lateral.

$\vec{v}\vec{E}_{iv}e^{j\phi}$, onde $\vec{u}$ e $\vec{v}$ são as direções unitárias e ϕ é a defasagem das componentes. A componente do campo elétrico refletido $\vec{E}_r$ pode ser expressa como: $\vec{E}_r = \vec{u}\tilde{r}_u\vec{E}_{ru}e^{j\phi} + \vec{v}\tilde{r}_v\vec{E}_{rv}e^{j(\phi \pm 180^\circ)}$, tal que $\varphi = \varphi_{uu}$ e $\varphi \pm 180^\circ = \varphi_{vv}$.

Devido à anisotropia da metassuperfície, existe uma diferença de fase ($\Delta\varphi$) entre $\tilde{r}_u$ e $\tilde{r}_v$. Se $r_u \approx r_v$ e $\Delta\varphi \approx 180^\circ$, os campos resultantes para E_{ru} e E_{rv} estarão ao longo da direção x , como mostrado na Fig. 2(a). Em outras palavras, a amplitude unitária ($R_{uu} = R_{vv} = 1$) e a diferença de fase de 180 graus entre a componente refletida de u e v são as condições de conversão de polarização para as ondas refletidas polarizadas em u e v . Para verificar isso, foram realizadas simulações numéricas da amplitude e da fase de reflexão para a célula unitária iluminada com polarização ao longo dos eixos u e v [ver inserção na Fig. 2(b)]. Os resultados são apresentados na Fig. 2(b), e mostram que as amplitudes dos campos refletidos das polarizações ao longo dos eixos u e v são aproximadamente iguais e próximos da unidade. Como observado, em algumas frequências, a amplitude da onda refletida cai devido às perdas ôhmicas, mas ainda permanece próximo da unidade. Além disso, a diferença de fase é de aproximadamente 180° de 15,25 a 37,77 GHz, o que implica a capacidade de conversão de polarização para essa faixa de frequência.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a funcionalidade da conversão de polarização cruzada, a Razão de Conversão de Polarização (*Polarization*

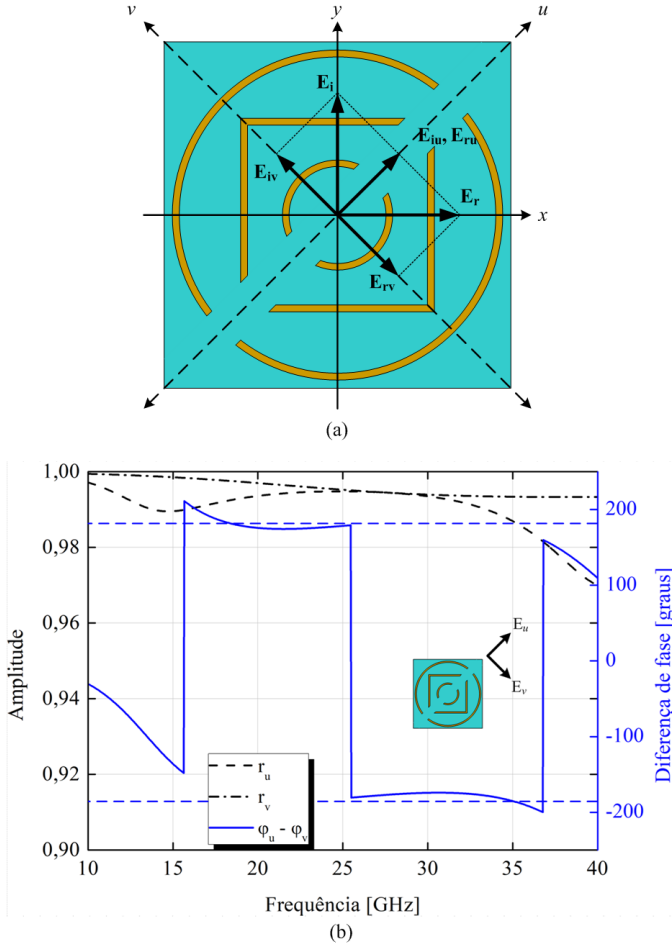


Fig. 2: (a) Célula unitária proposta com o novo sistema de coordenadas. (b) Amplitudes e diferença de fase refletidas simuladas para o campo elétrico da onda incidente ao longo dos eixos u e v , respectivamente.

Conversion Ratio - PCR) pode ser analisada e é definida como:

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \quad (1)$$

para o modo de reflexão, que é a razão entre a potência refletida na componente de polarização cruzada e a potência total refletida.

Conforme descreve a equação (1), para a obtenção de um alto valor de PCR, a componente de reflexão de polarização cruzada deve ser máxima, enquanto a componente de co-polarização deve ter valor mínimo. Nesse sentido, foram analisadas as componentes da onda refletida, que são apresentadas na Fig. 3. Nesse sentido, foram analisadas as componentes da onda refletida, as quais são apresentadas na Fig. 3. Avaliando-se a magnitude do coeficiente de reflexão co-polarizado expressa em decibéis (R_{yy}), nota-se a presença de três frequências de ressonância (em 18,63, 25,53 e 33,72 GHz) com níveis de atenuação abaixo de -10 dB na faixa de frequência de 15,25 a 37,77 GHz. Por outro lado, a magnitude do coeficiente de reflexão de polarização cruzada (R_{xy}) mantém-se superior a -1 dB (muito próxima a 0 dB) nesta mesma faixa. Em particular, entre 17,04 e 35,61 GHz,

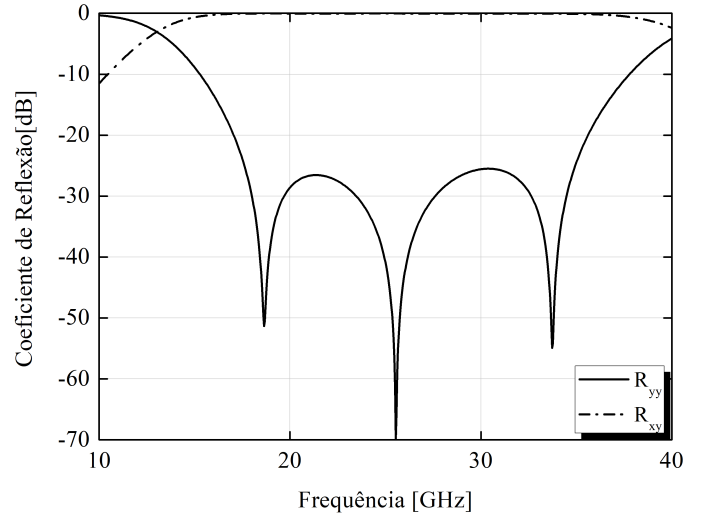


Fig. 3: Coeficientes de reflexão da onda co-polarizada e polarizada cruzada para incidência normal.

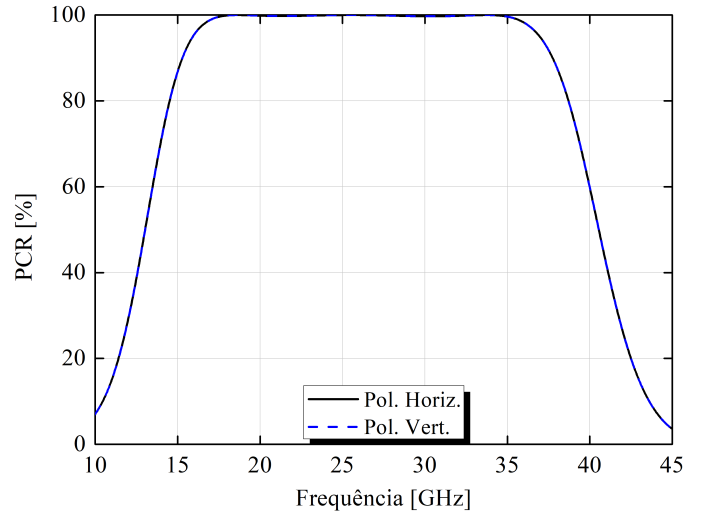


Fig. 4: Taxa de conversão de polarização sob incidência normal para as polarizações horizontal e vertical.

a componente refletida co-polarizada (R_{yy}) é menor que -20 dB, enquanto a de polarização cruzada (R_{xy}) é superior a -0,1 dB. Esse comportamento das componentes justifica a forma de platô observada na PCR, mostrada na Fig. 4, considerando a incidência normal da onda.

Dentro da banda de frequência de interesse (15,25 GHz a 37,77 GHz) a PCR média foi de 99,08%. Considerando as frequências onde ocorreram as ressonâncias plasmônicas, como sejam, 18,63 GHz, 25,53 GHz e 33,72 GHz, os valores das PCR obtidas foram todos de 99,99%. Além disso, a PCR se manteve no valor de 99,99% em toda a faixa de frequência compreendida entre 17,04 e 35,61 GHz. Isso significa dizer que quase toda a energia da onda incidente polarizada em y nessa ampla faixa de frequências é convertida em uma onda polarizada em x . Portanto, pode-se concluir que a metassuperfície proposta pode converter efetivamente ondas eletromagnéticas com polarização y para a polarização x com uma ampla largura de banda (22,52 GHz).

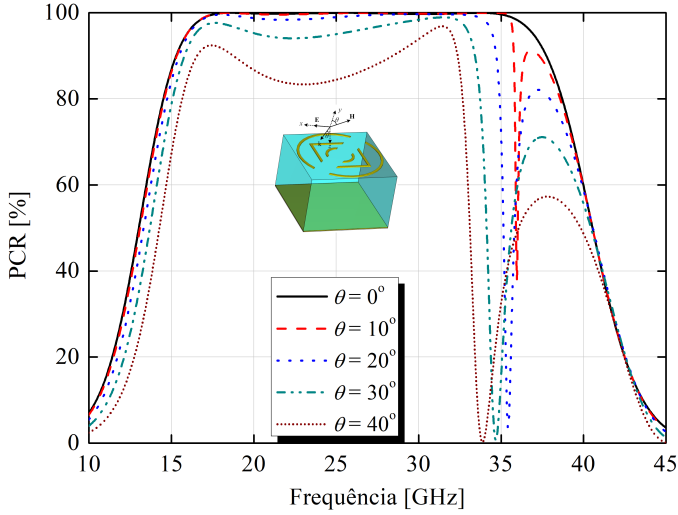


Fig. 5: PCR sob incidência normal e incidência oblíqua para a polarização vertical.

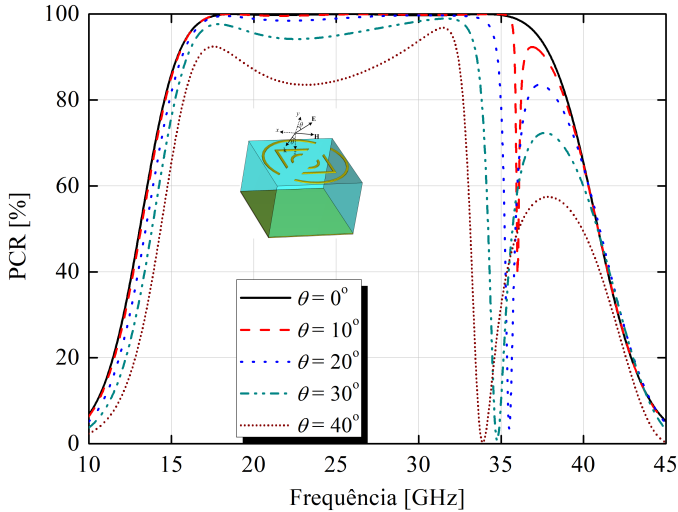


Fig. 6: PCR sob incidência normal e incidência oblíqua para a polarização horizontal.

Neste artigo, para verificar a estabilidade angular do conversor proposto, foi investigada a PCR sob incidência oblíqua. Devido à escolha do tipo de substrato, de sua espessura e da geometria da célula unitária, a resposta da metasuperfície torna-se independente da polarização, como observado na Fig. 4. Assim, nas Figs. 5 e 6 são apresentados os resultados da PCR para diferentes ângulos de incidência, θ , para as polarizações vertical e horizontal, respectivamente.

Uma análise das Figs. 5 e 6 mostra que a onda sob incidência oblíqua degrada a largura de banda com o aumento do ângulo de incidência. Em 10 graus, a estrutura quase não apresentou variação no nível da PCR, apenas uma redução na banda, mantendo-se praticamente intacta até 35,76 GHz. Em 20 graus, a estrutura apresentou uma redução no limite superior de frequência, mas manteve alto nível de PCB até esta frequência, havendo uma redução de pouco mais de 3 GHz na banda, mas manteve alto nível da PCR. Já em 30 graus, a estrutura mantém taxa de conversão acima de 90%,

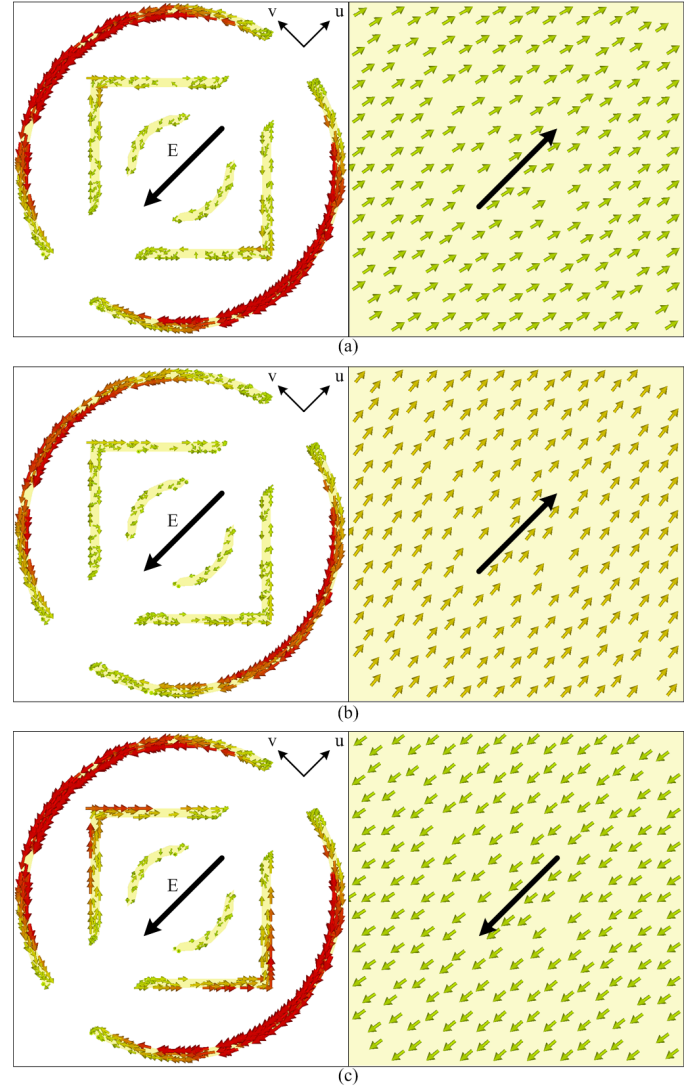


Fig. 7: Densidade de corrente superficial nas camadas frontal (à esquerda) e traseira (à direita) da célula unitária da metasuperfície proposta em (a) 18,63 GHz, (b) 25,53 GHz e (c) 33,72 GHz.

mas com redução na banda. Acima de 40 graus a estrutura perde a estabilidade, não sendo mais uma opção para utilizar a estrutura como conversor de polarização cruzada.

IV. MECANISMOS FÍSICOS

Para investigar o mecanismo físico de conversão de polarização da metasuperfície proposta de banda ultralarga, mapas das distribuições de corrente superficial foram simulados nas camadas superior e inferior nas frequências de ressonância de 18,63, 25,53 e 33,72 GHz, respectivamente, conforme mostrado nas Figs. 7(a)–(c). Como pode ser observado, as correntes superficiais ao longo do ressonador apresentam distribuições semelhantes em todas as frequências de ressonância. Nestas frequências as correntes fluem ao longo dos dois braços do anel externo do ressonador sem mudar de direção, o que torna o ressonador equivalente a um ressonador de fio cortado.

Além disso, as correntes superficiais ao longo dos dois braços do ressonador em cada frequência de ressonância

produzem correntes induzidas na superfície de aterramento. As direções das correntes induzidas podem determinar os tipos de resposta de ressonância nas frequências de ressonância. Como mostrado na Fig. 7(c), as correntes de superfície ao longo do ressonador são paralelas às correntes induzidas na superfície de aterramento, e assim, uma ressonância elétrica é identificada em 33,72 GHz. Por outro lado, nas Figs. 7(a) e (b), é notado que as correntes de superfície ao longo do ressonador são antiparalelas às correntes induzidas no plano de terra, o que resulta na circulação de corrente perpendicular ao campo magnético aplicado dentro da estrutura, que excita um dipolo magnético. Assim, uma ressonância magnética é identificada nas frequências de 18,63 e 25,53 GHz. Portanto, devido às características de múltiplas ressonâncias, a metassuperfície proposta pode operar em banda ultralarga otimizando os parâmetros geométricos.

Como observado na Fig. 7, em todas as frequências de ressonância a corrente de superfície tem maior intensidade na espira circular externa, sendo esse, portanto, o elemento responsável pela geração das ressonâncias na metassuperfície. De fato, a ausência das espiras internas não tem influência na resposta da estrutura no que se refere à largura de banda. Contudo, a inserção destas espiras ajuda no acoplamento mútuo, fenômeno observado com maior ênfase na frequência de 33,72 GHz, aproximando as frequências ressonantes. Como resultado, o acoplamento mútuo induzido, provocado pelas inserção das espiras internas, reduz o espaçamento entre as frequências de ressonância e otimiza a resposta da estrutura, promovendo vales mais profundos (menores níveis em dB) para a reflexão de co-polarização e maximizando a reflexão de polarização cruzada para valores próximos a 0 dB, gerando o comportamento espectral em forma de platô da PCR.

V. CONCLUSÕES

Um conversor de polarização reflexivo de banda ultralarga baseado em uma metassuperfície foi proposto neste artigo. Ao utilizar um substrato com espessura específica e introduzir abertura diagonal nos elementos da célula unitária, três ressonâncias (elétrica e magnética) foram obtidas, o que aumentou consideravelmente a largura de banda de operação. Resultados numéricos mostraram que a estrutura proposta pode converter eficientemente ondas linearmente polarizadas em ondas com polarização cruzada na faixa de frequência de 15,25 a 33,37 GHz, com uma taxa média de conversão de polarização superior a 90%. Adicionalmente, os sinais refletidos e a diferença de fase para o campo elétrico decomposto em suas componentes perpendiculares confirmaram o comportamento de conversão. A estrutura apresentou baixa estabilidade sob incidência oblíqua, mas independência de polarização. O mecanismo físico de conversão foi investigado e mostrou que a interação entre os elementos da célula unitária possibilitou alta eficiência de conversão da metassuperfície. O conversor proposto pode ser usado em muitas aplicações na faixa frequências de micro-ondas devido à sua ampla banda de operação. Como uma etapa futura deste trabalho, planeja-se a fabricação de um protótipo do conversor de polarização proposto, seguida da realização de medições experimentais

em laboratório. Os dados empíricos obtidos serão comparados com os resultados numéricos apresentados neste estudo, visando validar o modelo computacional e atestar a viabilidade prática da metassuperfície para aplicações reais em sistemas de telecomunicações.

AGRADECIMENTOS

Os autores Agradecem o apoio da CAPES, Universidade Federal Fluminense e Instituto Federal de São Paulo, Campus Avaré. Este trabalho foi financiado em parte pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), sob o processo 210.847/2024.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Beruete, M. Navarro-Cia, M. Sorolla, and I. Campillo, "Polarization selection with stacked hole array metamaterial," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, pp. 053102-1-053102-5, Mar. 2008.
- [2] K. Zhang, Y. Yuan, X. Ding, H. Li, B. Ratni, Q. Wu, J. Liu, S. N. Burukur, and J. Tan, "Polarization-Engineered Noninterleaved Metasurface for Integer and Fractional Orbital Angular Momentum Multiplexing," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 15, art. no. 2000351, 2020.
- [3] K. Pedram, M. Karamirad, and N. Pouyanfar, "Evolution and Move toward Fifth-Generation Antenna," *The Fifth Generation (5G) of Wireless Communication*, IntechOpen, vol. 20, 2019.
- [4] Pouyanfar, N. "Broadband CPW - FED square slot antenna loaded with parasitic element for WLAN/WiMAX applications," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 56, pp. 338-340, 2014.
- [5] T. Meissner and F. J. Wentz, "Polarization rotation and the third Stokes parameter: The effects of spacecraft attitude and Faraday rotation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 3, pp. 506-515, Mar. 2006.
- [6] J. Xu, T. Li, F. F. Lu, S. M. Wang, and S. M. Zhu, "Manipulating optical polarization by stereo plasmonic structure," *Opt. Express*, vol. 19, pp. 748-756, Jan. 2011.
- [7] J. H. Shi, H. F. Ma, W. X. Jiang, and T. J. Cui, "Multiband stereometamaterial-based polarization spectral filter," *Phys. Rev. B*, vol. 86, pp. 035103-1-035103-5, Jul. 2012.
- [8] K. Pedram, J. Nourinia, C. Ghobadi, N. Pouyanfar, and M. Karamirad, "Compact and miniaturized metamaterial-based microstrip fractal antenna with reconfigurable qualification," *AEU Int. J. Electron. Commun.*, vol. 114, Feb. 2020, Art. no. 152959.
- [9] M. Alibakhshikenari et al., "Singular Integral Formulations for Electrodynamics Analysis of Metamaterial-Inspired Antenna Array," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 2, pp. 179-183, 2021.
- [10] G. S. S. Vaddi, S. Vanka, D. S. Vittamsetti and S. Ravuri, "A Review of Wideband Antenna Technologies for UAV Communication Systems," 2025 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), Chennai, India, 2025, pp. 1-5.
- [11] M. Couto, M. Silva, and A. Campos, "A novel ultra-wideband reflective cross-polarization converter based on anisotropic metasurface," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 35, no. 12, pp. 1652-1662, 2021.
- [12] G. Deng, Y. Zhu, Q. Zhang, J. Yang, Y. Li and Z. Yin, "Reconfigurable Broadband Transmissive-Type Polarization Converter Based on Liquid Crystal Metasurfaces," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 8, pp. 2327-2331, 2025.
- [13] J. Chatterjee, A. Mohan and V. Dixit, "Ultrawideband RCS Reduction of Planar and Conformal Surfaces Using Ultrathin Polarization Conversion Metasurface," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 36563-36575, 2022.
- [14] P. Das and K. Mandal, "Polarization Converter Surface Integrated MIMO Antenna for Simultaneous Reduction of RCS and Mutual Coupling," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 9, pp. 1782-1786, 2022.
- [15] S. S. Zhu, P. Wang, Y. Zhang, Z. M. Yan, Y. Wang, and H. C. Zhou, "A reconfigurable polarization converter and related application as horn antenna cladding," *J. Appl. Phys.*, vol. 133, no. 2, Jan. 2023, Art. no. 023102.
- [16] Z. Shen, Q. Zhang, X. Huang, J. Wu, and H. Yang, "Simultaneous transmissive and reflective polarization conversion cross different operating bands in a single metasurface," *Opt. Laser Technol.*, vol. 169, pp. 110071, 2024.