

A Circularly Polarized End-Fire Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons

Chao Xie, Junping Geng, Kun Wang, Chaofan Ren, Han Zhou, Xuxu Cheng, Erwei Liu, Jiawei Han, Jing Zhang, Weinan Gao, Xianling Liang, Chong He, Ronghong Jin

Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
Email: gengjunp@sjtu.edu.cn

Received: Apr. 22nd, 2020; accepted: May 7th, 2020; published: May 14th, 2020

Abstract

A circularly polarized end-fire antenna applying Spoof surface plasmon polaritons is presented in this paper. The main transmission and radiation structure of the proposed antenna is the SSPPs structure, which is fed by the printed monopole. And this antenna achieves the characteristics of end-fire and circular polarization, by introducing the S-shaped units and the rotation between units. The proposed antenna operates from 2.1 GHz to 2.65 GHz, and has a good end-fire radiation pattern. Furthermore, the axial ratio (AR) less than 3 dB covers the band ranging from 2.435 GHz to 2.525 GHz, which shows the good performance of circular polarization.

Keywords

Spoof Surface Plasmon Polaritons, End-Fire, Circular Polarization

一种基于人工表面等离激元的圆极化端射天线

谢超, 耿军平, 王堃, 任超凡, 周晗, 程旭旭, 刘二伟, 韩家伟, 张静, 高伟男, 梁仙灵, 贺冲, 金荣洪

上海交通大学电子工程系, 上海
Email: gengjunp@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2020年4月22日; 录用日期: 2020年5月7日; 发布日期: 2020年5月14日

摘要

本文提出了一种基于人工表面等离激元的圆极化端射天线, 其主要传输和辐射结构为旋转SSPPs结构, 通过单极子耦合馈电。SSPPs结构中的S形单元及其依次等角度步长绕轴旋转并等间距排列实现了天线的端射和圆极化。该天线的阻抗匹配频带为2.1~2.65 GHz, 在该频率范围内具有稳定的端射特性。在频率2.435~2.525 GHz范围内, 其轴比小于3 dB, 具有圆极化特性。

文章引用: 谢超, 耿军平, 王堃, 任超凡, 周晗, 程旭旭, 刘二伟, 韩家伟, 张静, 高伟男, 梁仙灵, 贺冲, 金荣洪. 一种基于人工表面等离激元的圆极化端射天线[J]. 天线学报, 2020, 9(2): 13-18. DOI: 10.12677/ja.2020.92002

关键词

人工等离子激元, 端射, 圆极化

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

表面等离子激元(Surface plasmon polaritons, SPPs)是一种沿金属与电介质界面传播的特殊的表面电磁波, 主要存在于光学频段的。由于金属具有良好的导电特性, SPPs 在微波频段不存在。但是近年来, 通过引入一些特殊的周期性结构, 研究人员在微波频段发现了类似于 SPPs 的现象, 称之为人工表面等离子激元(Spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) [1]。由于其具有低损耗、高束缚、色散特性可调等优点, SSPPs 在功分器、传输线和滤波器等微波器件中应用广泛[2] [3] [4] [5]。近年学者们渐渐在天线设计中应用了 SSPPs 技术, 文献[6]利用 SSPPs 结构的偶模设计了一款侧射全向天线, 但其方向图圆度较差。文献[7]中的天线利用 SSPPs 的偶模实现频扫。目前关于 SSPPs 天线的研究大多数和文献[6] [7]类似, 主要是利用 SSPPs 的偶模设计漏波天线, 但是研究 SSPPs 端射天线的较少, 文献[8]利用非对称馈电的方式设计一款 SSPPs 端射天线, 在 2~3.4 GHz 内具有良好的辐射特性。文献[9]提出一种共面波导馈电的单边渐变 SSPPs 端射天线, 其具有结构简单、效率高等优点。但是文献[8] [9]中的天线在工作频带内的方向图均是线极化。

本文提出了一种通过 S 形扭曲与臂依次旋转形成的新型 SSPPs 结构, 通过单极子激励, 该天线可工作在 2.1~2.65 GHz, 相对带宽 23.2%, 端射方向图稳定。并且该 SSPPs 自身结构的旋转特性, 使所设计的天线在 2.435~2.525 GHz 内具有圆极化特性。

2. 天线结构的分析与设计

2.1. 天线结构

本文设计的圆极化端射天线结构模型如图 1 所示。天线的结构模型主要由两部分组成, SSPPs 传输与辐射结构和印刷单极子馈电结构。其中前者 SSPPs 结构由 N 个 S 形单元沿一金属柱轴向等间距平行排列, 并且在平行面内依次等角度共轴旋转排列而成。后者为梯形印刷单极子, 与金属柱垂直且相隔一定间距。本文中印刷单极子馈电结构采用的介质板为双层板, 介质材料为 FR-4, 其相对介电常数是 4.4, 损耗角正切为 0.025。

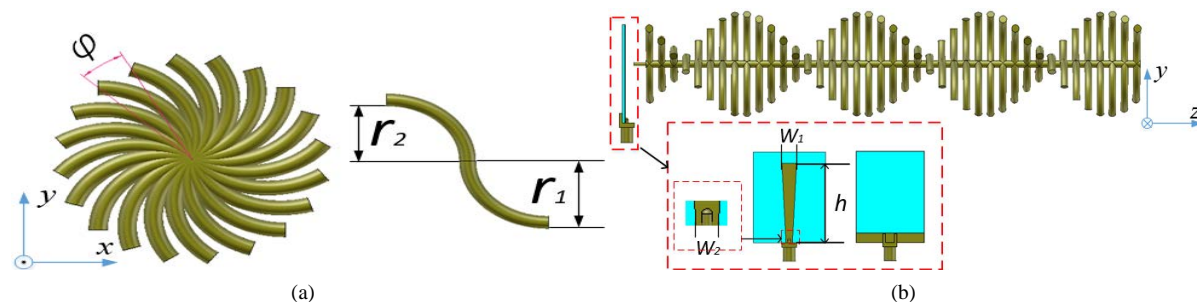


Figure 1. Antenna geometry. (a) Lateral view of the SSPPs structure and the S-shaped unit; (b) Front view of the antenna and the details of the feed

图 1. 天线结构。(a) SSPPs 结构和 S 形单元的侧视图; (b) 天线正视图和馈电结构细节图

2.2. 天线原理

传统的 SSPPs 结构存在着两种最基础的传输模式：奇模和偶模。本文为实现天线的端射特性，需激励起 SSPPs 结构的主要传输模式是奇模。

为此 CST 中，我们用图 1 中的馈电结构激励传统的 SSPPs 结构的奇模工作模式。天线模型如图 2(a) 所示。图 2(b) 是 SSPPs 结构的电场分布，关于 xoz 平面反对称。图 2(c) 是天线在 yoz 平面内的能流分布图，从图中可以看出，传统 SSPPs 上的能量沿着轴向传输，在末端辐射，如图 2(d) 所示。

在传统的 SSPPs 天线的基础上，本文改进的 S 形单元旋转的 SSPPs 天线的整体天线模型如图 1(b) 所示，在 CST 中建模仿真。图 3(a) 是该天线的电场分布图，在 yoz 平面上周期性分布，在轴上的任意位置处，蓝色场或红色场总是在单侧出现，部分位置有反对称的分布，这主要是因为 S 形单元旋转的 SSPPs 天线结构的旋转对称特征造成 yoz 截面上只能展示部分的偶极子场特征，这也表明这种 S 形单元旋转的 SSPPs 结构的电场沿轴向有依次在空间旋转的特性，且 S 单元旋转一周的轮廓(xoy 面)约等于波长，一类似于轴向模的螺旋天线，Z 轴方向的远场矢量也围绕这 Z 轴旋转，因此得到了圆极化波。3(b) 是该天线的能流分布图，可以看出，单极子辐射的电磁能量基本耦合进了 SSPPs 结构，在波沿 SSPPs 的传播过程中能量主要向右传输，在末端辐射，实现了端射，如图 3(c) 所示。

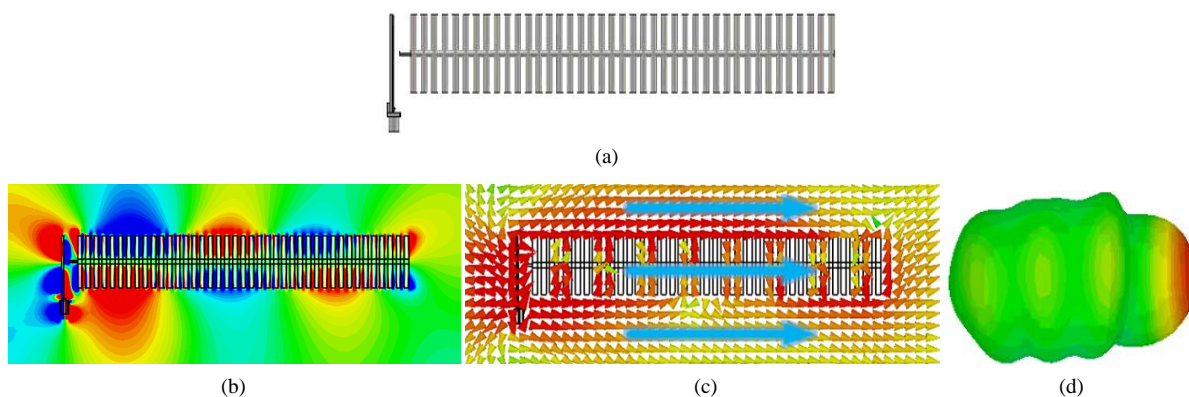


Figure 2. Simulation results of the SSPPs structure. (a) The traditional SSPPs antenna; (b) the electric field distribution; (c) the power flow; (d) the far-field pattern at 2.45 GHz

图 2. SSPPs 结构的仿真结果。(a) 传统 SSPPs 天线；(b) 电场分布；(c) 能流矢量；(d) 2.45 GHz 的远场方向图

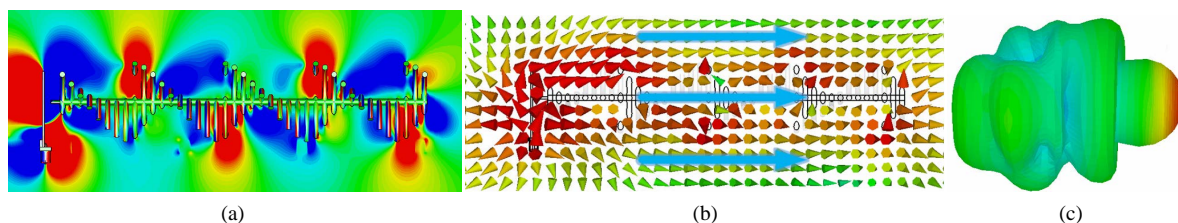


Figure 3. Simulation results of the SSPPs antenna. (a) The electric field distribution; (b) the power flow; (c) the far-field pattern at 2.45 GHz

图 3. SSPPs 天线的仿真结果。(a) 电场分布；(b) 能流矢量；(c) 2.45 GHz 的远场方向图

3. 仿真结果与实测结果分析

相较于传统的 SSPPs 天线，本文提出的 S 形单元旋转形成的 SSPPs 结构为该天线增加了圆极化特性。该结构中主要影响天线圆极化性能的参数为相邻单元的旋转角度 φ 。图 4 为不同旋转角度 φ 值下天线轴比曲线。可以从图 4 看出， φ 值从 16 增加到 20，其满足轴比小于 3 dB 的频率范围往低频偏移。

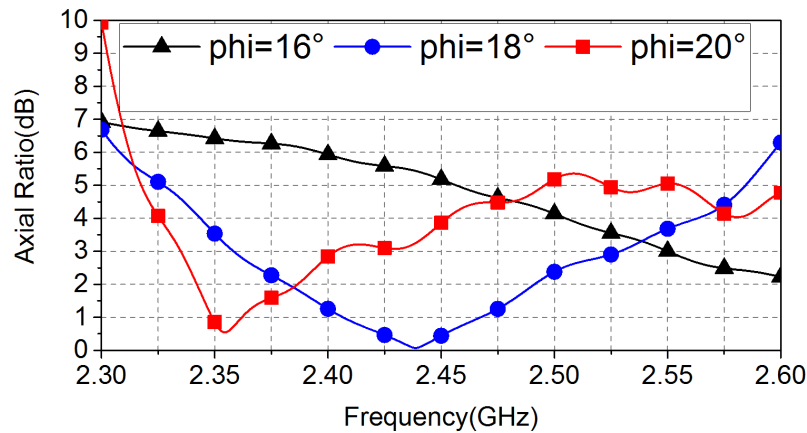


Figure 4. Comparison of the simulated results: AR values for $\varphi = 16^\circ, 18^\circ$ and 20°
 图 4. 仿真结果比较: $\varphi = 16^\circ, 18^\circ$ and 20° 的轴比曲线

Table 1. Parameters of the presented antenna
 表 1. 天线参数

参数	N	W_1	W_2	h	φ
数值	40	6 mm	2.6 mm	36 mm	18°

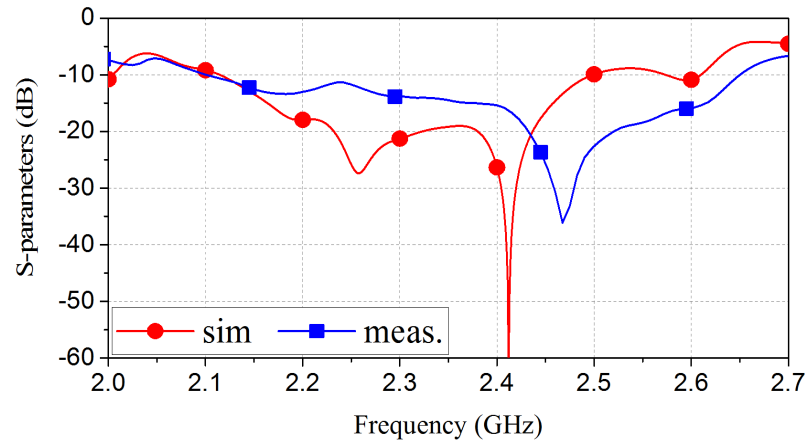


Figure 5. The simulated and measured results of $|S_{11}|$
 图 5. 仿真和实测的 $|S_{11}|$

最后，优化后的天线主要参数如表 1 所示。

天线整体加工模型及测试环境如图 6 所示。为方便安装，我们采用 3D 打印技术加工了树脂的支架，后面的仿真中也加入了支架。实测和仿真结果对比见图 5、图 6 和图 7。从图 5 中可以看出实测的 $|S_{11}|$ 曲线与仿真结果有同样的趋势，实测阻抗带宽 ($|S_{11}| < 10$ dB) 为 23.2% (2.1~2.65 GHz)。图 6 给出了该天线在 xoz 平面内的 2.35 GHz、2.45 GHz 和 2.55 GHz 处的方向图，结果显示，实测的主极化和交叉极化方向图与仿真结果较为吻合，具有很好的端射效果。由于加工的误差，天线的实测轴比小于 3 dB 的频率范围较仿真结果有些偏移，为 2.435~2.525 GHz。从整体性能的比较可以看出，天线的实测结果与仿真结果基本吻合。

本文提出的新型旋转 SSPPs 端射天线与其他 SSPPs 端射天线对比如表 2 所示。我们设计的天线具有新颖的辐射特性，不仅具有良好的端射效果，且在 2.435~2.525 GHz 内具有圆极化效果，其他工作频带内

为线极化。

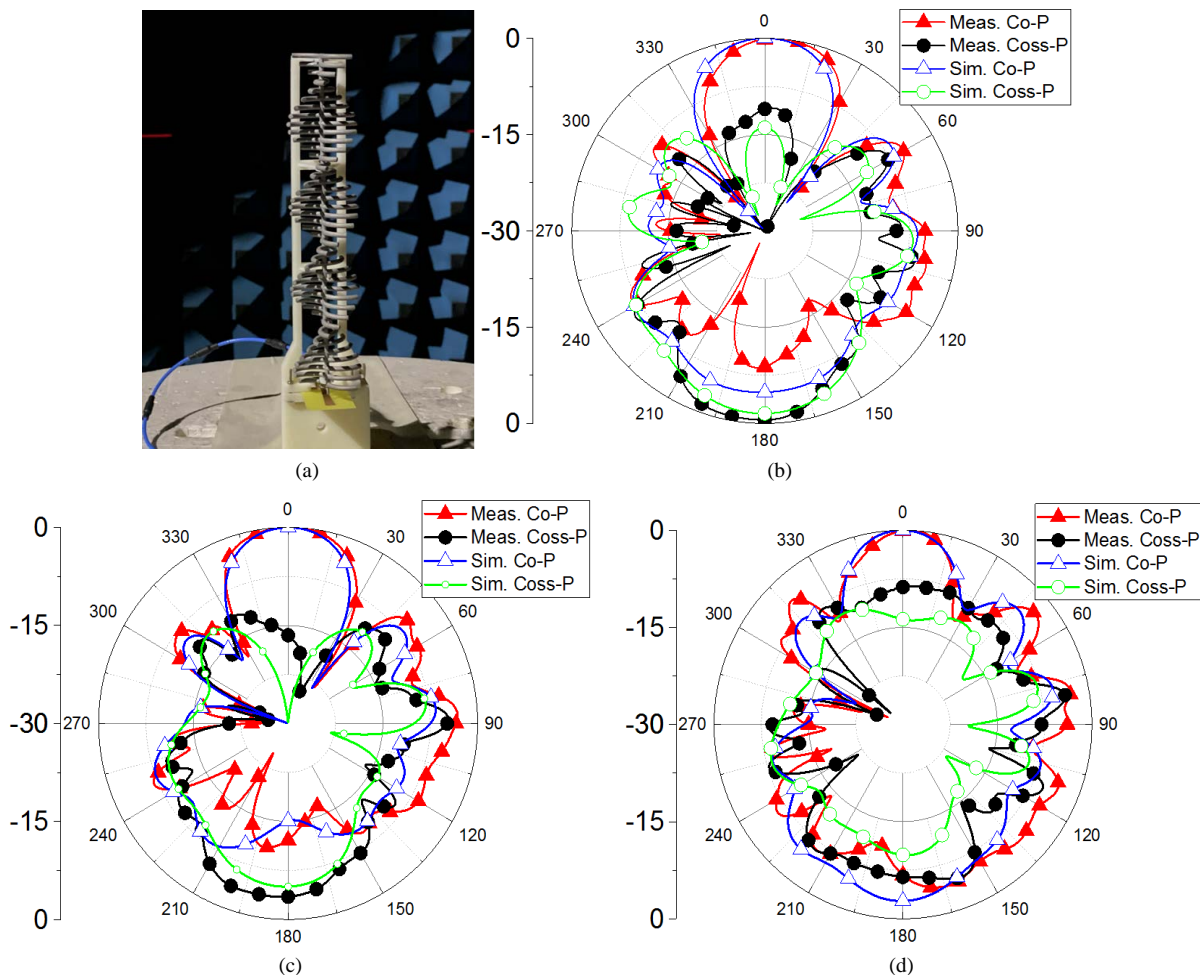


Figure 6. Simulated and measured radiation pattern of the proposed antenna (a) the fabricated prototype of the proposed antenna and the test environment, (b) 2.35 GHz (xoz plane); (c) 2.45 GHz (xoz plane); (d) 2.55 GHz (xoz plane)

图 6. 天线的仿真和实测方向图。(a) 加工的天线和测试环境；(b) 2.35 GHz (xoz 平面)；(c) 2.45 GHz (xoz 平面)；(d) 2.55 GHz (xoz 平面)

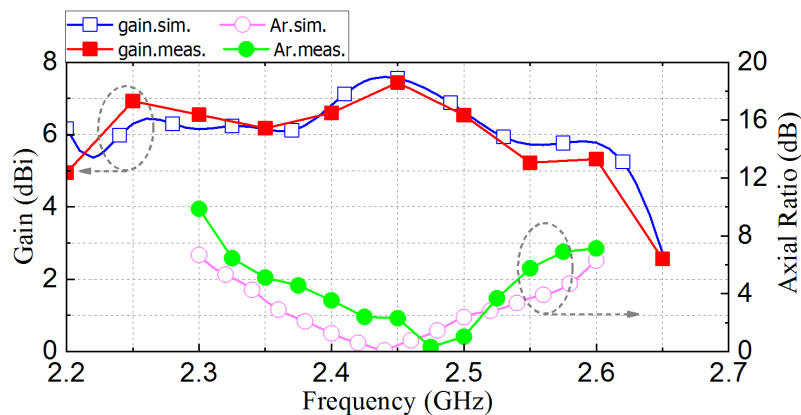


Figure 7. The simulated and measured results of gains and AR values

图 7. 仿真和实测的增益与轴比

Table 2. Comparisons between the proposed antenna with other works
表 2. 本文天线与其他天线的对比

Ref.	Mode	Frequency (GHz)	Pattern	Polarization
8	Odd mode	2~3.4	End-fire	LP
9	Odd mode	7.5~8.5	End-fire	LP
本文	Odd mode	2.15~2.65	End-fire	LP/CP

4. 结论

本文提出了一种新型 S 形单元旋转的 SSPPs 圆极化端射天线。天线中的 SSPPs 结构由 40 个 S 形单元等间距等角度旋转而成。文中采用梯形印刷单极子耦合馈电，激励起 SSPPs 结构的奇模，实现端射。相较于传统 SSPPs 结构，本文提出的 S 形单元及单元旋转形成的 SSPPs 结构使得天线实现了圆极化辐射。实测结果与仿真结果基本吻合，其阻抗带宽约为 23.2% (2.1~2.65 GHz)，带内方向图稳定，具有端射特性，而且在 2.435~2.525 GHz 频率范围内，天线轴比小于 3 dB，辐射圆极化方向图。

参考文献

- [1] Li, Y., Li, W., Li, S. and Jiang, T. (2012) Miniaturization Reconfigurable Wide Slot Antenna for Multi-Mode Wireless Communication Applications. *IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation Antennas and Propagation (APCAP)*, Singapore, 27-29 August 2012, 225-226. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2012.6333238>
- [2] Kianinejad, A., Chen, Z. and Qiu, C. (2016) Low-Loss Spoof Surface Plasmon Slow-Wave Transmission Lines with Compact Transition and High Isolation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **64**, 3078-3086. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2604807>
- [3] Liu, L., et al. (2015) Dual-Band Trapping of Spoof Surface Plasmon Polaritons and Negative Group Velocity Realization through Microstrip Line with Gradient Holes. *Applied Physics Letters*, **107**, 201602. <https://doi.org/10.1063/1.4935976>
- [4] Zhou, S., et al. (2018) Spoof Surface Plasmon Polaritons Power Divider with large Isolation. *Scientific Reports*, **8**, Art. No. 5947. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24404-0>
- [5] Pan, B.C., Liao, Z., Zhao, J. and Cui, T.J. (2014) Controlling Rejections of Spoof Surface Plasmon Polaritons Using Metamaterial Particles. *Optics Express*, **22**, 13940-13950. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013940>
- [6] Wang, D., Geng, J.P. and Wang, K. (2018) A High-Efficiency Broadband Omnidirectional UHF Patch Antenna Applying Surface Plasmon Polaritons for Handheld Terminals. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **17**, 283-286. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2786779>
- [7] Kianinejad, A., Chen, Z.N. and Qiu, C.W. (2017) A Single-Layered Spoof Plasmon Leaky Wave Antenna with Consistent Gain. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **65**, 681-687. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2633161>
- [8] Zhuang, K., Geng, J.P., Ding, Z., Zhao, X., Ma, W., Zhou, H., Xie, C., Liang, X. and Jin, R. (2019) A Compact Endfire Radiation Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons in Wide Bandwidth. *Progress in Electromagnetics Research*, **79**, 147-157. <https://doi.org/10.2528/PIERM18121408>
- [9] Kandwal, A., Zhang, Q., Tang, X.L., et al. (2017) Low-Profile Spoof Surface Plasmon Polaritons Traveling-Wave Antenna for Near-Endfire Radiation. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 1-1.