

一种大周期新型漏波天线设计

左 丽

广州南方学院, 广东 广州

收稿日期: 2021年10月26日; 录用日期: 2021年12月2日; 发布日期: 2021年12月9日

摘 要

传统周期漏波天线所支持的工作波长与周期间距相比拟, 天线设计自由度很有限。基于主模一致性, 本文提出一种大周期漏波天线, 其基本周期由三个不同的物理单元通过中线一致的原则排列组成, 通过设计调整天线尺寸使三个周期单元的波数相同, 一致的主模保证了每个单元对电磁波相位延迟相同, 这使天线的工作波长仅为物理周期间距的三分之一, 因此该天线展示出更大的电尺寸。另一方面, 由于单元结构及排列具有较高的设计自由度, 天线更易于集成在表面路径复杂的共形系统中。最后制作并测试了天线实物, 实测结果表明该天线工作在6.4 GHz到9.55 GHz频率范围内, 实测 S_{11} 在工作频段内基本都小于-10 dB, 最大增益为14.1 dBi。测试结果与仿真结果相一致, 证实了该设计的有效性。

关键词

主模一致, 大周期, 电尺寸, 设计自由度

The Leaky-Wave Antenna with Big Period

Li Zuo

Nanfang College-Guangzhou, Guangzhou Guangdong

Received: Oct. 26th, 2021; accepted: Dec. 2nd, 2021; published: Dec. 9th, 2021

Abstract

The operating wavelength of the traditional periodic leaky-wave antenna is comparable to its period, and the design freedom of the antenna configuration is very limited. Based on the consistency of the fundamental mode, this paper proposes a leaky-wave antenna with a big period, which is composed of three different physical elements arranged according to the principle of consistent midline. The antenna size is designed so that the wave numbers of the three periodic units are the same. The consistent fundamental mode ensures that each element has the same phase delay to

Email: 15764246971@163.com

the electromagnetic wave, which makes the operating wavelength of the antenna only one-third of its physical period, consequently, the antenna exhibits a larger electrical size. On the other hand, since the basic elements feature high design freedom, the antenna is easily integrated with a conformal system with complicated surface paths. Finally, the prototype is fabricated and tested, in the measurement, the operating frequency changes from 6.4 to 9.55 GHz, and the measured S_{11} is basically less than -10 dB, the maximum gain is 14.1 dBi. Close agreements between the simulations and measurements are obtained, validating the effectiveness of the design.

Keywords

Consistent Fundamental Mode, Big Period, Larger Electric Size, Design Freedom

Copyright © 2021 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

漏波天线是一种行波天线[1], 以低剖面、增益高、频率扫描等优点在微波毫米波领域备受关注[2]。漏波天线按结构可分为均匀、准均匀和周期漏波天线。均匀和准均匀漏波天线的导波是快波, 通常只能在前向进行扫描[2]; 而周期性结构的导波是慢波, 经过周期调制可实现高阶谐波的前后向扫描[3]。近年来, 国内外做了很多研究来提高微带漏波天线的辐射性能。SIW (substrate integrated waveguide) 基片集成波导结构的漏波天线具有较宽的波束扫描范围[4] [5]。使用复合左右手材料(CRLH)同样可以提高天线的辐射范围[6] [7]。相比之下, 具有周期性结构的漏波天线不仅具有波束随频率前后向扫描的特性[8] [9] [10], 而且易于制造加工, 可以广泛应用于集成通信系统中。但是周期性结构漏波天线会引入开阻带效应(OSB), 导致主波束在边射方向不能进行连续扫描。通过研究边射方向的高次谐波特性[11], 设计不同的天线结构可以抑制阻带同时保留高增益, 比如在微带线同侧放置两根短截线[12], 或者设计阵列结构也可以抑制阻带[13]。文中选取三种已研究的周期性微带漏波天线, 分别是周期性交错微带漏波天线[14], 周期性半宽度微带漏波天线[15], 以及传统的加载周期性短路钉微带漏波天线[16], 它们是由一系列相同的单元排列组成, 引入短路钉结构减小天线尺寸。但是天线结构单一, 设计自由度较低, 不适用几何结构要求更高的实际系统中。

本文提出的一种大周期漏波天线设计, 由三种不同结构的辐射单元沿着中线排列组成。天线结构参数更多, 具有更灵活的设计策略, 并展现出较窄的辐射波束, 与其他天线相比方向性更好, 如果用于更远距离传输的系统中, 也具有更强的抗干扰能力。

2. 天线设计

2.1. 主模一致性

传播常数对研究微带漏波天线的辐射性能参数有着重要作用, 其公式表达为

$$k = k(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (1)$$

其中 $\alpha(\omega)$ 是衰减常数, $\beta(\omega)$ 是相位常数。无限长周期结构中相距为 p 的任意两点传播的电磁场只相差一个传播因数 $C = e^{-k_p}$, p 是周期间距。周期性微带漏波天线传播的导波为慢波, 由于周期结构会引入无

穷多次谐波, 但是其-1次谐波往往是快波, 所以周期性漏波天线主要以-1次谐波为主要工作模式, 根据Floquet定理, -1次谐波 k_{-1} 与基次谐波 k_0 的波数满足:

$$k_{-1} = k_0 - \frac{2\pi}{p} \quad (2)$$

其中 k_0 也是天线基本单元的波数, p 为周期间距。传统周期性漏波天线满足严格物理周期性, 均具有相同的周期单元, 其波数与周期间距满足公式(2)。现假设有三种周期单元结构不同、波数相同的传统周期性漏波天线, 当这三种天线的波数相等时满足:

$$k_{-1(a)} = k_{-1(b)} = k_{-1(c)} \quad (3)$$

如果它们的周期间距 p 均相等, 由式(2)得到三种天线的基本周期单元 a, b, c 的波数相等, 表示为:

$$k_{0(a)} = k_{0(b)} = k_{0(c)} \quad (4)$$

将这三种基本周期单元 a, b, c 组合形成一种新的周期性结构漏波天线, 假设其天线波数为 $k_{-1(d)}$, 虽然新的天线单元结构不同, 但是波数相同, 即相位常数相同, 由相位常数所决定的主波束角度也基本不变。所以经分析由不同结构的基本周期单元形成的新的周期性漏波天线在主模一致条件下, 其天线波数 $k_{-1(d)}$ 与传统的单元相同的周期性漏波天线 a, b, c 具有一致的传播常数。如图1是天线的传播曲线示意图。

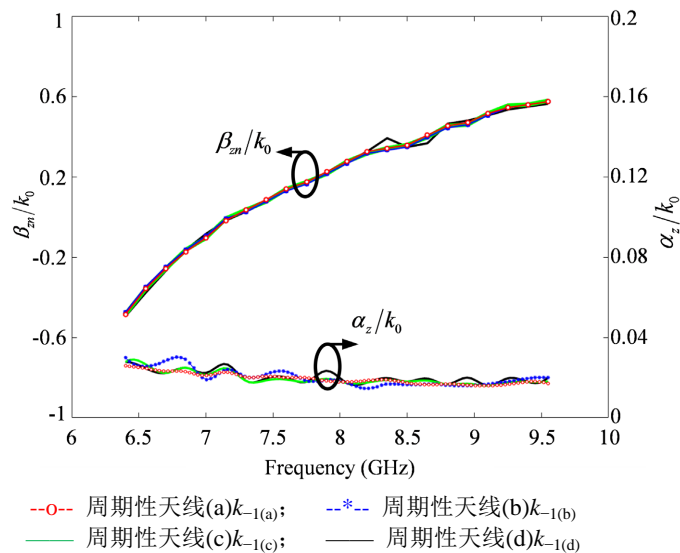


Figure 1. Schematic diagram of propagation constant

图1. 传播曲线示意图

2.2. 单元设计

我们选择之前工作中的三种周期性天线A、B、C, 其具体分别是周期性交错微带漏波天线, 周期性半宽度微带漏波天线, 以及传统的加载周期性短路钉微带漏波天线。取其天线单元分别为单元A、B、C, 三种单元组成的大周期结构图如图2所示, 将三种天线单元依次沿着中线进行级联。这种组合方式使得单元ABC组合成为一个新的周期单元, 其周期间距增大为 $3p$, 由于大周期单元的调制, 代入公式(2)得到大周期漏波天线的-1次谐波波数 k_{-1} 变为:

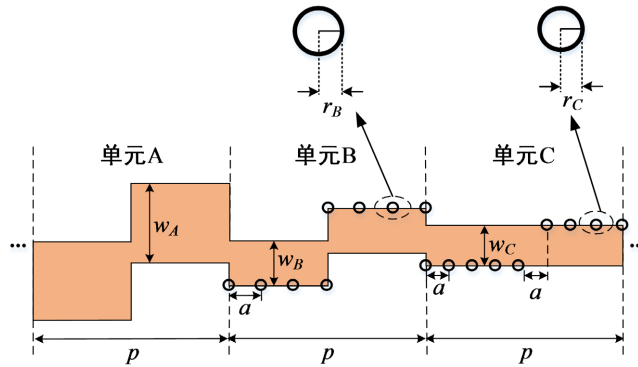


Figure 2. Structure diagram of big period
图 2. 大周期单元结构图

$$k_{-1} = k_0 - \frac{2\pi}{3p} \tag{5}$$

其中 k_0 是调制后的大周期单元的波数。

由于主模一致性，大周期单元天线与传统周期性漏波天线具有相同的波数。波数 k 由相位常数 β_n 和衰减常数 α_n 决定，天线的主波束角度 θ 与天线相位常数 β_n 有关，所以其主波束角度与传统周期性天线相比基本不变；而主波束的半功率波瓣宽度 θ_{HPBW} 与衰减常数 α_n 相关，其公式描述为：

$$\frac{\beta_n}{k_0} = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \tag{6}$$

$$\frac{1}{\theta_{HPBW} \cdot \cos \theta} = \frac{0.18}{\alpha_n/k_0} = \bar{L} \tag{7}$$

\bar{L} 是周期单元的归一化电长度 ($\bar{L} = p/\lambda_0$)，经过大周期调制后，周期间距增大为 $3p$ ，所以归一化电长度变为：

$$\bar{L} = 3p/\lambda_0 \quad (\lambda_0 \text{ 是自由空间波长}) \tag{8}$$

由于电长度 \bar{L} 与主波束的半功率波瓣宽度成反比关系，大周期调制使 \bar{L} 增大，从而减小半功率波瓣宽度，这种新的周期结构天线具有波束宽度更窄的优点。

3. 大周期漏波天线的仿真和实测

3.1. 仿真结果

文中提出的大周期漏波天线一共由三个组合后的大周期单元组成，电长度比较长，足以向外辐射能量。通过软件仿真得到相同天线单元组成的周期性漏波天线以及基于主模一致的大周期漏波天线的-1次谐波波数对比，如图 3 所示。图中的黑色曲线代表提出的大周期漏波天线的传播常数，从仿真结果中可以看出，其工作频带并没有因为大周期调制的原因而发生改变，与具有相同单元的周期性漏波天线的相位常数曲线趋势基本一致，证实了主模一致分析理论的有效性。从衰减常数曲线看，大周期漏波天线的衰减常数更小，所以其波瓣宽度更窄。如图 4 展示了不同天线在边射附近的场波瓣的分贝图，可以看出黑色曲线代表的大周期天线 D 的波束宽度比其他三种传统周期性天线更窄，进一步证实了本文所提出天线的波瓣宽度要比其它三种天线更窄。

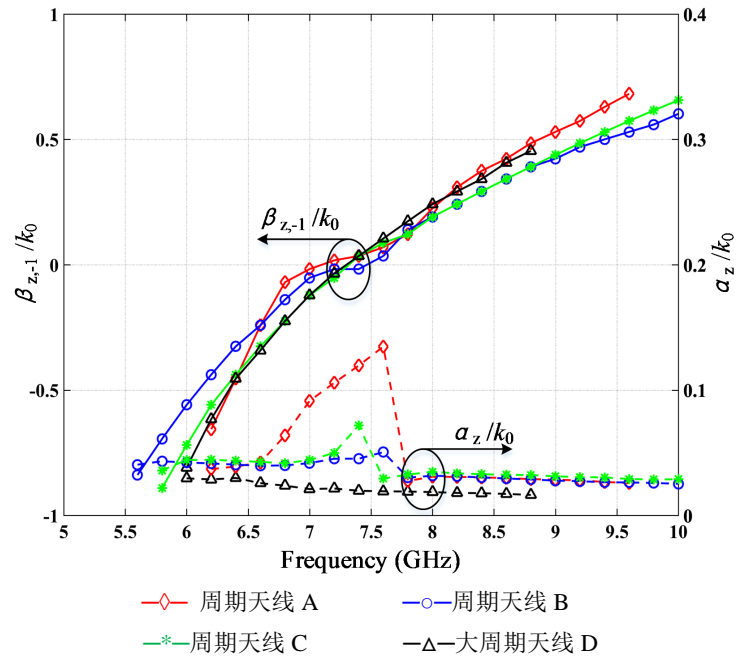


Figure 3. 1st harmonic dispersion curve with different antennas
图 3. 不同漏波天线的-1 次谐波色散曲线

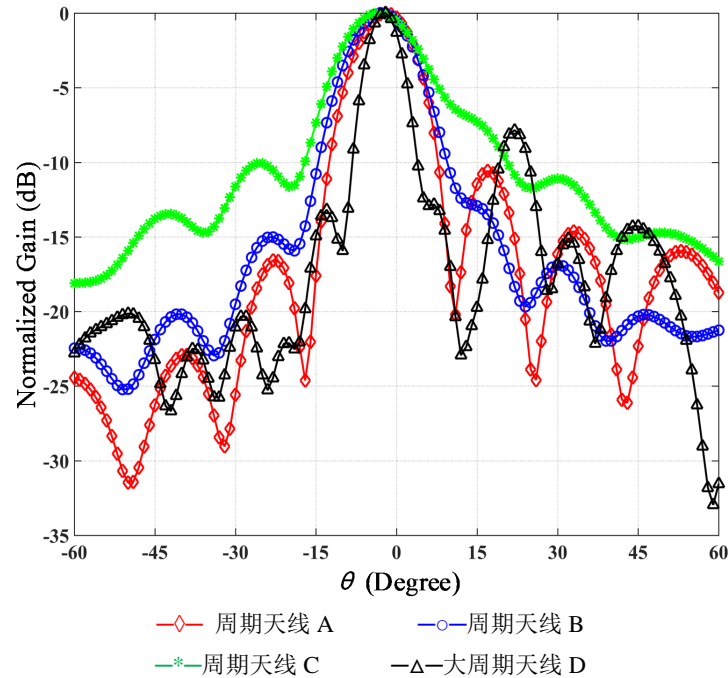


Figure 4. Radiation pattern of LWA at stopband frequency
图 4. 阻带频率下漏波天线辐射方向图

图 5 显示当 A、B、C 三种单元排列顺序不同时，其相位曲线是基本重合的，说明不同单元的组合顺序基本不会影响天线相位常数，这表明该大周期天线结构具有很灵活的设计策略，可以为实际应用提供更多的选择。

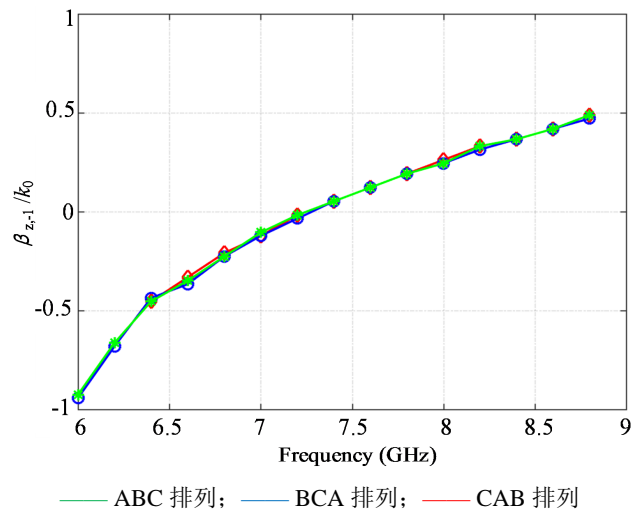


Figure 5. Phase constant of antenna with different arrangements
图 5. 不同排列方式的天线相位常数曲线

3.2. 实测结果

为了验证仿真结果的准确性，制作并测试了该大周期漏波天线。实物如图 6 所示，介质基板的相对介电常数为 2.55，厚度为 0.8 mm。辐射贴片的具体参数见表 1 所示。为了改善天线的匹配性能，在馈电线和辐射贴片之间加入四分之波长匹配段，从而实现 50 Ω 馈电端口与天线之间的阻抗匹配。

Table 1. The parameter size of antenna model
表 1. 天线实物模型参数尺寸

符号	参数	值(mm)
p	周期间距	36
w_A	单元 A 宽度	15.5
w_B	单元 B 宽度	8.2
w_C	单元 C 宽度	6.8
a	短路钉间距	9
r_B	单元 B 短路钉半径	1
r_C	单元 C 短路钉半径	0.8

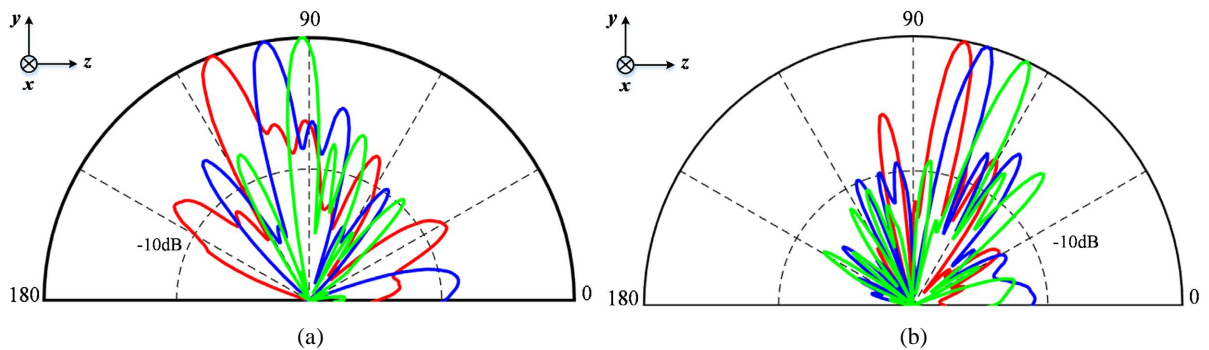
将制作的实物天线在微波暗室中测量，得到归一化远场辐射特性、增益等实测结果。天线实测远场辐射方向图如图 7 所示，分别在后向和前向选取三个频点，可以看出天线可以在较小的增益波动下实现从后向到前向扫描，并且其主瓣较窄，天线方向性较好。天线归一化传播常数的仿真和实测对比结果如图 8 所示，天线整体工作频段为 6.4 GHz 到 9.55 GHz，其总扫描角度从 -32° 到 38° 。从图中可以看出实测和仿真结果的相位常数曲线以及衰减常数曲线基本保持一致，进一步验证天线的有效性。图 9 展示的是实测增益和实测 S_{11} 曲线，从实测结果可以看出，在工作频段内，天线的实测增益基本都大于 10 dBi，在 7.2 GHz 频率下具有最大增益为 14.1 dBi。天线的实测 S_{11} 基本都在 -10 dB 以下，由于基本单元的不一

致，单元的阻抗不匹配，会导致天线单元的反射增大，因此有极少数一些频率是在-5 dB 以下。天线的仿真和实测结果表明由不同单元级联的大周期单元天线不仅具有良好的辐射性能，同时具有波束宽度更窄、方向性更好、结构设计自由度更高的优点，并且验证了该天线设计的可行性。



Figure 6. Prototype of the LWA with big period

图 6. 异形单元周期性漏波天线实物图



- (a) 主波束后向扫描 ——— $f = 6.55$ GHz, ——— $f = 6.85$ GHz, ——— $f = 7.15$ GHz;
- (b) 主波束前向扫描 ——— $f = 7.75$ GHz, ——— $f = 8.05$ GHz, ——— $f = 8.65$ GHz.

Figure 7. The measure radiation pattern of far-field

图 7. 实测远场辐射方向图

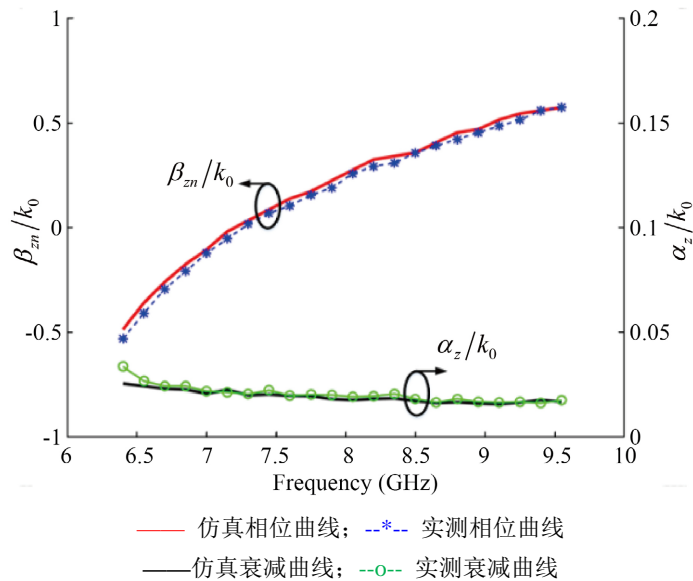


Figure 8. The simulated and measured normalized propagation constants

图 8. 仿真与实测归一化传播常数

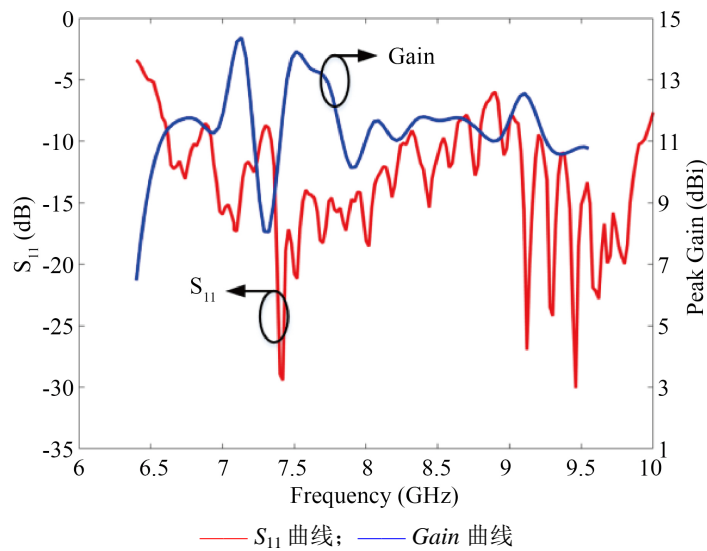


Figure 9. The measured S_{11} and normalized gain
图 9. 实测 S_{11} 与归一化增益曲线

4. 结论

本文提出了一种由不同单元级联组成的大周期漏波天线。由于主模一致性，该天线不仅保留与传统周期结构一致的色散特性而且展示出了更大的设计自由度。实测结果表明天线的工作频率从 6.4 GHz 到 9.5 GHz，其扫描角度从 -32° 到 37° 。与传统周期性漏波天线相比，这种新的周期漏波天线辐射波束更窄、结构设计更加灵活，可以应用于更加复杂且多变的系统。

参考文献

- [1] Oliner, A.A. and Lee, K.S. (1986) Microstrip Leaky Wave Strip Antennas. 1986 *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Philadelphia, 8-13 June 1986, 443-446. <https://doi.org/10.1109/APS.1986.1149629>
- [2] Jackson, D.R., Caloz, C. and Itoh, T. (2012) Leaky Wave Antennas. *Proceedings of the IEEE*, **100**, 2194-2206. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2187410>
- [3] Rudramuni, K., Majumder, B. and Kandasamy, K. (2020) Dual-Band Dual-Polarized Leaky-Wave Structure with Forward and Backward Beam Scanning for Circular Polarization-Flexible Antenna Application. *Microwave and Optical Technology Letters*, **62**, 2075-2084. <https://doi.org/10.1002/mop.32285>
- [4] Ranjan, R. and Ghosh, J. (2019) SIW Based Leaky-Wave Antenna Supporting Wide Range of Beam Scanning through Broadside. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **18**, 606-610. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2897836>
- [5] Shaw, R. and Mandal, M.K. (2019) Broadside Scanning Asymmetric SIW LWA with Consistent Gain and Reduced Sidelobe. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 823-833. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2882685>
- [6] Sarkar, A., Pham, D.A. and Lim, S. (2020) Tunable Higher Order Modes based Dual-Beam CRLH Microstrip Leaky-Wave Antenna for V-band Backward-Broadside-Forward Radiation Coverage. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 6912-6922. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2995300>
- [7] Karmokar, D.K., Chen, S.-L., Bird, T.S. and Guo, Y.J. (2019) Single-Layer Multi-Via Loaded CRLH LeakyWave Antennas for Wide-Angle Beam Scanning with Consistent Gain. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **18**, 313-317. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2889869>
- [8] Sengupta, S., Jackson, D.R., Almutawa, A.T., Kazemi, H., Capolino, F. and Long, S.A. (2020) A Cross-Shaped 2D Periodic Leaky-Wave Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 1289-1301. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2948524>
- [9] Sengupta, S., Jackson, D.R. and Long, S.A. (2018) Modal Analysis and Propagation Characteristics of Leaky Waves on a 2-D Periodic Leaky-Wave Antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **66**, 1181-1191.

-
- <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2783373>
- [10] Comite, D., Kuznetsov, M., Podilchak, S.K., Baccarelli, P. and Galli, A. (2021) Directive 2-D Beam Steering by Means of a Multiport Radially Periodic Leaky-Wave Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **69**, 2494-2506. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3030994>
- [11] Rahimi, M.R., Sharawi, M.S. and Wu, K. (2021) Stop-Band Radiation Properties of Higher-Order Space Harmonics-Enabled Broadside Multi-Beam Leaky-Wave Antenna. *15th European Conference on Antenna and Propagation*, Dusseldorf, 22-26 March 2021, 1-3. <https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411335>
- [12] Kumar, B., Ranjan, R. and Ghosh, J. (2019) Novel Printed Leaky-Wave Antenna with Suppressed OSB for Broad Angle Scanning. *International Conference on Microwave Integrated Circuits, Photonic and Wireless Networks*, Tiruchirappalli, 22-24 May 2019, 361-364. <https://doi.org/10.1109/IMICPW.2019.8933203>
- [13] Karmokar, D.K., Chen, S.-L., Thalakituna, D., Qin, P.-Y., Bird, T.S. and Jay Guo, Y. (2020) Continuous Backward to Forward Scanning 1-D Slot-Array Leaky-Wave Antenna with Improved Gain. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **19**, 89-93. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2953927>
- [14] Li, Y., Xue, Q., Yung, E.K.-N. and Long, Y. (2010) The Backfire-to-Broadside Symmetrical Beam-Scanning Periodic Offset Microstrip Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **58**, 3499-3504. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2071352>
- [15] Li, Y., Xue, Q., Yung, E.K.-N. and Long, Y. (2011) The Periodic Half-Width Microstrip Leaky-Wave Antenna with a Backward to Forward Scanning Capability. *IEEE Transactions on ANTENNAS and Propagation*, **58**, 963-966. <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2039304>
- [16] Li, Y., Xue, Q., Tan, H.-Z. and Long, Y. (2011) The Half-Width Microstrip Leaky Wave Antenna with the Periodic Short Circuits. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **59**, 3421-3423. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2161439>