

An Electrically Controlled CRLH-Inspired Circularly Polarized Leaky-Wave Antenna

Qunhao Zhang¹, Wan Chen², Bo Lv³, Xiaoqi Shao¹, Jiahui Fu¹

¹Microwave Engineering Department, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

²Space Environment Simulation and Research Infrastructure, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

³College of Science, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

Email: zhangqunhao321@foxmail.com, cwan@hit.edu.cn, lb19840313@126.com, sxq805761285@163.com, fjh@hit.edu.cn

Received: Aug. 2nd, 2019; accepted: Aug. 16th, 2019; published: Aug. 23rd, 2019

Abstract

An electrically controlled beam-scanning circularly polarized leaky-wave antenna is presented by cascading multiple unit cells of a composite right/left-handed transmission line (CRLH-TL) structure. The antenna unit cell consists of two parts: three varactor diodes, which enable beam electrically steerable at a fixed frequency and a square-shaped patch that is perturbed to stimulate circular polarization radiation. Moreover, a DC feeder of single-voltage bias, which allows all the unit cells to be simply controlled by a single uniform bias voltage, is introduced to steer the beam direction. The proposed antenna operates at 2.4 GHz and beam scans from +40° to -17° continuously. The axial ratio remains below 3 dB at different angles.

Keywords

Circular Polarization (CP), Composite Right/Left-Handed Transmission Line (CRLH-TL), Electrically Controlled, Leaky-Wave Antenna (LWA), Single-Voltage Bias

一种电控复合左右手圆极化漏波天线

张群豪¹, 陈 晚², 吕 博³, 邵晓琪¹, 傅佳辉¹

¹哈尔滨工业大学微波工程系, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院, 黑龙江 哈尔滨

³哈尔滨工程大学物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨

Email: zhangqunhao321@foxmail.com, cwan@hit.edu.cn, lb19840313@126.com, sxq805761285@163.com, fjh@hit.edu.cn

收稿日期: 2019年8月2日; 录用日期: 2019年8月16日; 发布日期: 2019年8月23日

摘要

本文设计了一种电控圆极化漏波天线，通过在复合左右手传输线结构加载变容二极管，实现波束扫描。天线单元结构由两部分组成：三个定频电扫二极管以及一个实现圆极化辐射的方形贴片。引入了单电压偏置的直流馈线结构，通过均匀偏置电压控制，实现圆极化波束扫描。该天线工作在2.4 GHz，并且实现了从+40°到-17°的连续波束扫描。在不同的扫描角度下，轴比保持在3 dB以下。

关键词

圆极化，复合左右手传输线，电控，漏波天线，单电压偏置

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

近些年来，复合左右手漏波天线由于其低剖面，高增益，可以进行从边射到端射的前后向连续波束扫描且不需要复杂的馈电网络等优点，受到了广泛关注[1] [2] [3] [4]。

大多数的现代通信系统一般需要定频工作和圆极化，以此来实现通信信号的稳定传输和接收。一方面，定频波束扫描可以通过加载电控元件或者可控基板材料来实现。例如加载开关二极管(PIN 二极管)，光敏开关，铁氧体基板和液晶等。通常在漏波天线上使用最多的电控元件是变容二极管。Lim 等人首先提出了定频扫描复合左右手漏波天线[5]，通过改变变容二极管的偏压实现了从端射到边射的连续波束扫描。Quiros 等人提出了两种变容二极管加载的一维 Fabry-Perot 漏波天线[6]，可应用于二维漏波天线。但是与加载复合左右手传输线的漏波天线进行比较，该天线需要较高的剖面。在这之后，一种半模 SIW 漏波天线通过引入串联和并联调谐电容元件，实现了定频扫描和圆极化辐射[7]，但是其加载的并非是可直接应用的变容二极管，而是某些定值电容，实现较为困难。

本文提出了一种通过变容二极管加载复合左右手传输线结构的电控扫描漏波天线。漏波天线由 25 个方形贴片单元组成，每个方形贴片进行切角和开缝及添加缝隙补偿结构实现圆极化辐射。该天线通过引入单电压偏置直流馈线结构控制变容二极管，实现了圆极化波束扫描。实测结果显示天线的扫描角度范围为-17°至+40°，且具有较为稳定的增益，最大增益约为 6.17 dB，轴比均小于 3 dB，满足圆极化辐射特性。

2. 天线结构的分析与设计

2.1. 漏波天线结构及原理

不同于我们熟知的振子天线，微带天线和口径天线驻波天线等，漏波天线是一种行波天线。所谓行波天线指的是，馈入的电磁场会呈现行波状态分布的天线。行波天线一般都需要在终端连接匹配负载，以消除反射波，而由于行波天线中的电磁波呈行波状态，各处反射一般很小，因此行波天线在其输入端的输入阻抗近似于纯电阻，因而一般拥有较宽工作频带。漏波天线便继承了行波天线宽带的优点，并且具有主瓣波束随频率扫描的特性。

漏波天线的原理框图如图 1 所示，电磁波在沿天线方向传播的过程中，逐渐向自由空间泄露。现假

设电磁波沿 z 方向传播, 在漏波口面($y=0$)处, 电场表达式为

$$E_x(0, z) = E_0 e^{-jk_z z} \quad (1)$$

其中 E_0 为电场幅度, k_z 为沿波导 z 方向的复传播常数, 有

$$k_z = \beta_z - j\alpha_z \quad (2)$$

式中, β_z 为沿 z 方向的相位常数, α_z 为沿着 z 方向的衰减常数。则漏波天线中电场为

$$E_x(y, z) = E_0 e^{-jk_z z} e^{-jk_y y} \quad (3)$$

其中 $k_y = \sqrt{k_0^2 - k_z^2}$, 为沿 y 方向的波数。图中, 自由空间中的波数 $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$ 。

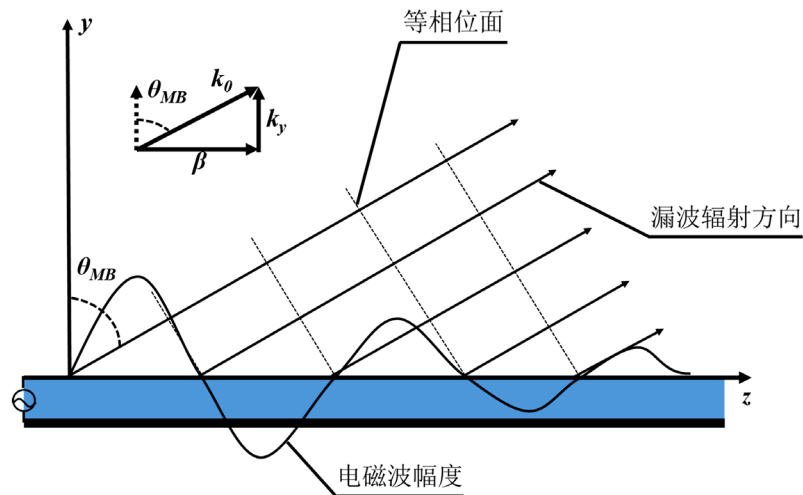


Figure 1. Schematic of leaky wave antenna

图 1. 漏波天线原理图

由图 1 和上述公式可知, 若相位常数 $\beta > k_0$, 则天线中传播慢波, k_y 为虚数, 电磁波沿 y 方向衰减, 无法形成空间波辐射; 若相位常数 $\beta < k_0$, 则天线中传播快波, k_y 为实数, 电磁波可沿 y 方向不断向外辐射, 实现漏波辐射。这就是漏波天线的快慢波辐射机制。

复传播常数 kz 包括漏波结构的两个基本参数, 波导内电磁波的相位常数 β 决定了主波束的辐射角

$$\theta_{MB} = \arcsin(\beta/k_0) \quad (4)$$

其主瓣宽度为

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{(l/\lambda_0)\cos(\theta_{MB})} = \frac{1}{(l/\lambda_0)\cos[\arcsin(\beta/k_0)]} \quad (5)$$

由公式(4)可以看出, 可以通过改变工作频率改变相移常数, 进而改变辐射方向, 也可以通过加载移相器改变相移常数从而改变辐射方向。

2.2. 复合左右手传输线结构

复合左右手传输线结构如图 2 所示。正常的传输线是为右手结构, 其等效电路由串联电感和并联电容组成, 复合左右手传输线的等效电路除了右手部分的等效串联电感和并联电容之外, 还有存在串联的电感和并联的电感。合理选择上述四个参数, 并构造对应传输线单元, 即可通过微调其中某个参数, 使

得天线方向图在第二象限与第一象限之间扫描，从而实现前向辐射与后向辐射。本设计通过加载变容二极管实现改变串联电容的大小，从而改变传输线的相移常数，实现了前后向波束扫描。

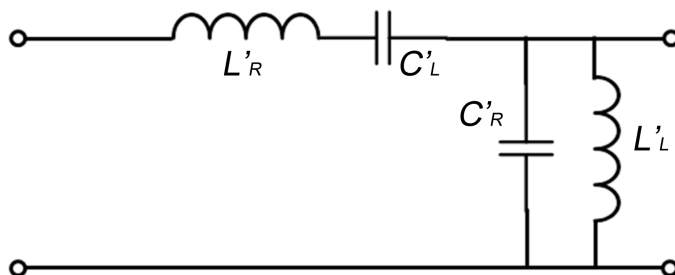


Figure 2. Composite left and right hand transmission line structure
图 2. 复合左右手传输线结构

根据图 2，复合左右手传输线的串联部分的谐振频率为

$$\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L'_R C'_L}} \quad (6)$$

并联部分的谐振频率为

$$\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L'_L C'_R}} \quad (7)$$

因此，不同于正常的右手传输线，复合左右手传输线漏波天线漏波单元的相移常数 β 为

$$\beta = \frac{1}{p} \left(\omega \sqrt{L'_R C'_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L'_L C'_L}} \right) \quad (8)$$

其中 p 为漏波天线周期长度，即单个单元长度。

2.3. 复合左右手漏波天线设计

本文所设计的基于复合左右手传输线结构的圆极化电扫漏波天线的结构如图 3~6 所示，主要由这几个部分组成：a.漏波天线单元；b.阻抗匹配网络；c.直流馈线结构。

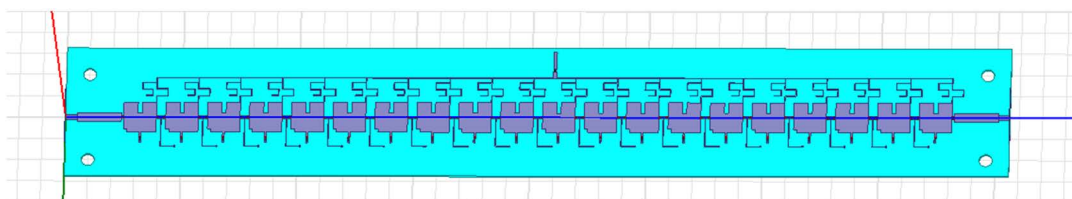


Figure 3. Structure of the whole antenna structure
图 3. 天线整体结构图

天线结构如图 3 所示，天线制作在 PTFE 介质基板上，(其厚度为 1 mm，介电常数为 3.5，损耗角正切为 0.0031)。天线单元结构如图 4 所示，主体是正方形贴片($a = 14$ mm)，其上进行正方形切角($\text{cut} = 1.5$ mm)并开矩形缝隙($l_{sa} = 5$ mm, $w_{sa} = 1.8$ mm)，同时添加一个矩形缝隙的电流补偿结构($L_3 = 2$ mm, $w_2 = 0.8$ mm)。切角的作用是实现圆极化辐射，但是过孔的存在将破坏传输线单元上的圆极化电流。为了补偿过孔结构引入的电流，本设计在单元上构造电流补偿结构，电流补偿结构可修正过孔结构对圆极化特性的干扰。

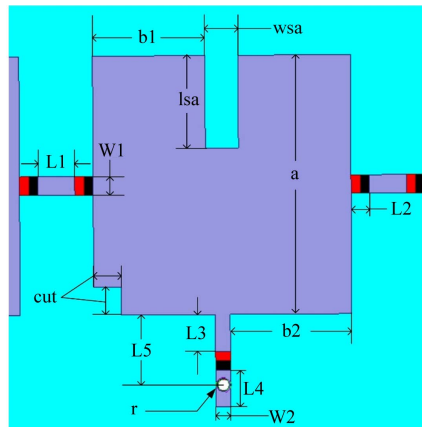


Figure 4. Structure of unit cell
图 4. 天线单元结构图

为简化所需电压种类，降低对直流供电模块要求，同时降低横向变容二极管加载电压，保护变容二极管，本文采用了一种接地中继式馈电结构。即每个天线单元之间由两个方向相反的变容二极管连接。信号从天线一端馈入，另一端接匹配负载从而实现行波传输。在每个单元的 3 个二极管上施加的电压大小是相同的，实现单电压控制。变容二极管的直流馈线结构在天线贴片单元的右上角接入，通过一个集总电感接入天线贴片，电感的作用是隔离微波信号传输，仅允许直流信号通过。该隔离结构不同于以往的四分之一开路线隔离结构，其尺寸较小，且隔离性能良好。如图 5 所示，天线一部分通过半径为 r_2 的过孔接地，另一部分通过半径为 r 的过孔接地(L4 处)。最后，在天线信号的输入和输出端设计了基于布洛赫阻抗的阻抗匹配器，实现天线的 S 参数的调节，如图 6 所示。

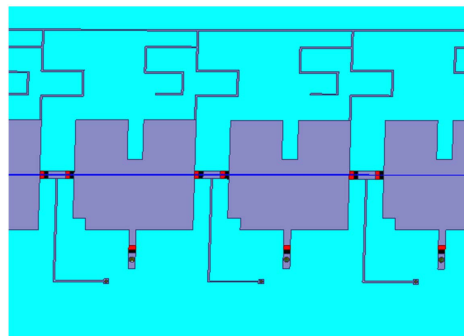


Figure 5. Structure of DC feeder
图 5. 直流馈线结构

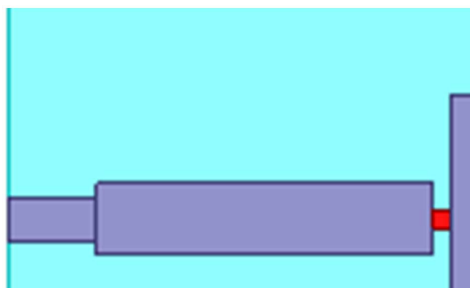


Figure 6. Impedance matching network
图 6. 阻抗匹配网络

3. 仿真结果与实测结果分析

首先对漏波天线贴片模型进行仿真,模型如图3所示。不添加直流馈线的时候,图7为其加载不同电容下的回波损耗(S11)曲线。从图7中可以看出,在电容为2~2.5 pF,天线在2.4 GHz时,S11几乎均低于-10 dB,仅有电容值为2.2 pF时S11略高于-10 dB,整体具有良好的回波损耗。图8为其不同电容值下的方向图,可以从图8中看出,天线的扫描角度为-30°到+29°,且具有较为稳定的增益,最大增益约为9.8 dB,实现了稳定的前后向扫描。图9为其轴比扫描图,而表1列出了该天线贴片模型在不同电容值下的扫描角度、增益和轴比。从表1可以看出,该天线实现了从-30°到+29°的前后向扫描,增益较为稳定,且轴比均小于4.3 dB,符合圆极化辐射特性。而天线整体效率不高,其原因是该天线是行波天线,如果要提高效率,可以考虑继续增加天线单元个数。

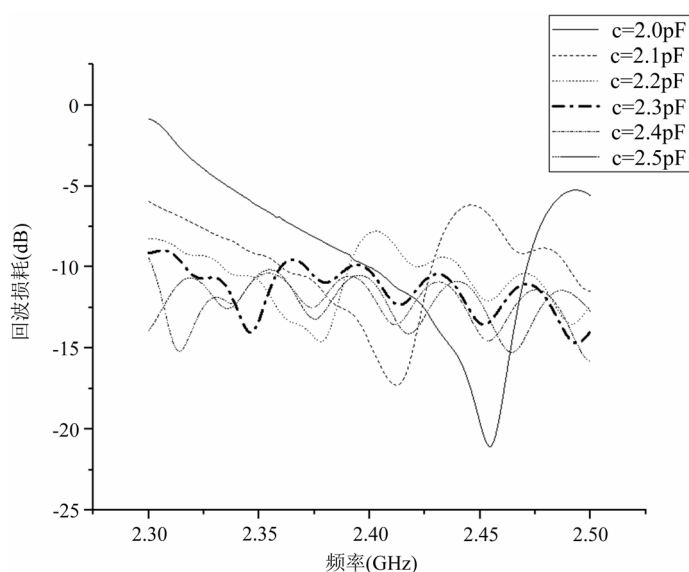


Figure 7. S11 of patch structure of antenna with different capacitance

图7. 不同电容值下天线贴片模型的回波损耗

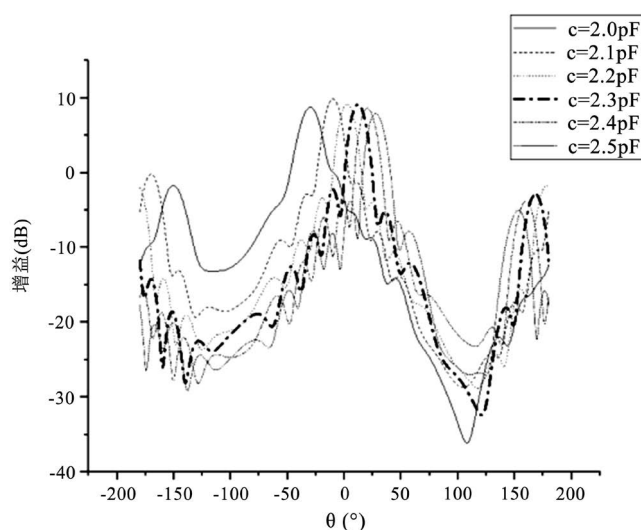


Figure 8. Radiation pattern of patch structure of antenna with different capacitance

图8. 不同电容值下天线贴片模型的方向图

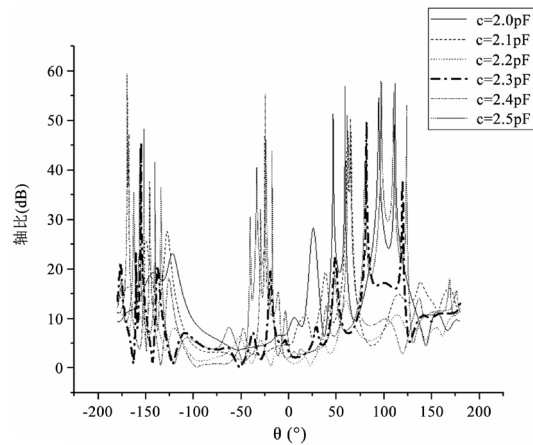


Figure 9. Axial ratio of patch structure of antenna with different capacitance
图 9. 天线贴片模型的轴比

Table 1. Simulation results of patch structure of antenna with different capacitance
表 1. 不同电容值时天线贴片模型的仿真结果

电容值(pF)	扫描角(°)	增益(dB)	轴比	效率(%)
2	-30	8.78	4.34	54.21
2.1	-9.5	9.88	4.41	53.72
2.2	3	9.12	1.05	50.85
2.3	12	9.14	2.34	47.72
2.4	21	8.65	3.09	44.18
2.5	29	7.91	3.66	40.59

而后进行了加工测试，得到如下测试结果。图 10 为天线整体的回波损耗。从图 10 可以看出，在电容为 2~2.5 pF，天线在 2.4 GHz 时，S11 低于 -10 dB，具有良好的回波损耗。图 11 是二极管添加不同的偏置电压下的方向图。可以从图 11 中看出，天线的扫描角度为 -17° 到 +40°，且具有较为稳定的增益，最大增益约为 6.17 dB，仍能实现稳定的前后向扫描。表 2 列出了该天线在不同电压下的扫描角度、增益、轴比和效率。从表 2 可以看出，仿真与实测较为吻合，该天线仍能实现从 -17° 到 +40° 的前后向扫描，增益较为稳定，且轴比均小于 3 dB。

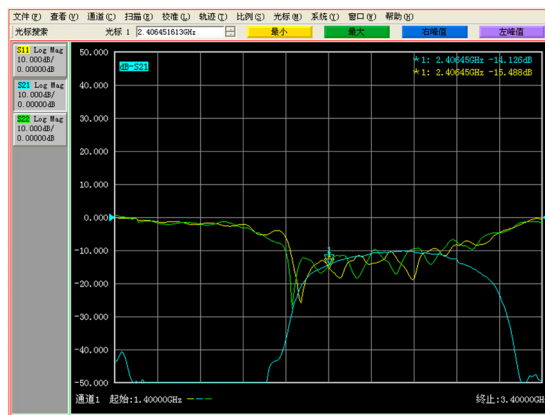


Figure 10. S11 of the whole antenna
图 10. 天线整体回波损耗

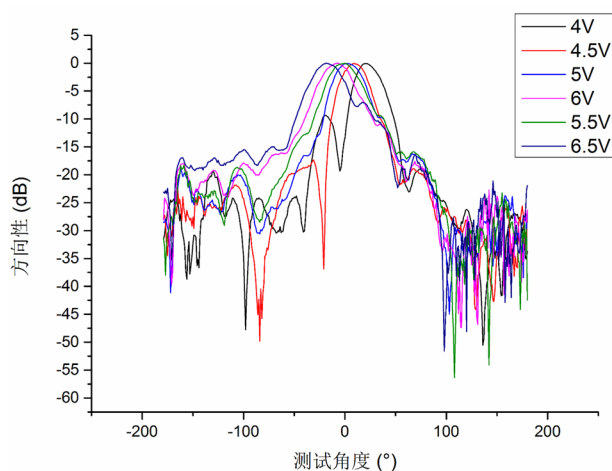


Figure 11. Radiation pattern of the whole antenna with different voltage
图 11. 不同电压下天线整体的方向图

Table 2. Simulation results of the whole antenna with different capacitance

表 2. 不同电容值时天线整体模型的仿真结果

电压(V)	扫描角(°)	增益(dB)	轴比(dB)
3.5	+40	3.08	0.60
4.0	+26	4.01	1.13
4.5	+15	4.33	1.81
5.0	+8	6.17	1.47
5.5	-3	5.09	2.07
6.0	-7	4.99	1.36
6.5	-17	4.17	1.30

4. 结论

本文提出了一种复合左右手传输线结构加载变容二极管的电控扫描漏波天线。漏波天线由 25 个方形贴片单元、阻抗匹配网络和直流馈线结构组成。每个方形贴片进行切角、开缝和添加缝隙补偿结构，其中切角实现了圆极化辐射。开缝和添加缝隙补偿结构使天线的圆极化较为稳定。引入了单电压偏置直流馈线结构，以此控制变容二极管，实现了良好的前后向波束扫描，扫描角度范围为 $+40^\circ$ 到 -17° 。实测结果与仿真结果较为吻合，具有较为稳定的增益，最大增益约为 6.17 dB，且轴比均小于 3 dB，满足圆极化辐射特性。

参考文献

- [1] Liu, L., Caloz, C. and Itoh, T. (2002) Dominant Mode Leaky-Wave Antenna with Backfire-to-Endfire Scanning Capability. *Electronics Letters*, **38**, 1414-1416. <https://doi.org/10.1049/el:20020977>
- [2] Dong, Y. and Itoh, T. (2012) Metamaterial-Based Antennas. *Proceedings of the IEEE*, **100**, 2271-2285. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2187631>
- [3] Jin, C. and Alphones, A. (2012) Leaky-Wave Radiation Behavior from a Double Periodic Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 1727-1735. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2186248>
- [4] Zhou, C., Wang, G., Wang, Y., Zong, B. and Ma, J. (2013) CPW-Fed Dual-Band Linearly and Circularly Polarized

-
- Antenna Employing Novel Composite Right/Left-Handed Transmission-Line. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **12**, 1073-1076. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2013.2279689>
- [5] Lim, S., Caloz, C. and Itoh, T. (2004) Metamaterial-Based Electronically Controlled Transmission-Line Structure as a Novel Leaky-Wave Antenna with Tunable Radiation Angle and Beamwidth. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **52**, 2678-2690. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.838302>
- [6] Guzman-Quiros, R., Gomez-Tornero, J.L., Weily, A.R. and Guo, Y.J. (2012) Electronic Full-Space Scanning with 1-D Fabry-Pérot LWA Using Electromagnetic Band-Gap. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **11**, 1426-1429. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2228624>
- [7] Suntives, A. and Hum, S.V. (2012) A Fixed-Frequency Beam-Steerable Half-Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 2540-2544. <https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2189726>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-2227, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ja@hanspub.org