

# 全向扫描的周期性半宽度微带漏波天线设计

刘菊华 李元新 龙云亮  
(中山大学信息科学与技术学院, 广州 510275)  
liyuanx@sysu.edu.cn

**摘要:**本文提出了一种周期性半宽度微带漏波天线的设计。天线由多个半宽度微带漏波天线组成, 10 个半宽度微带漏波天线对称排列在传输线的两侧。随着工作频率的增加, 传播系数中的相位系数由负转正, 天线主波束也同步由后向越过法线方向向端射方向偏移, 天线的主波束由 149° 扫描到 28°, 实现了主波束的全向扫描。这种周期性半宽度微带漏波天线结构简单, 成本较低, 波束扫描范围广, 具有广阔的应用前景。

**关键词:**周期, 半宽度微带漏波天线, 全向扫描

## The Periodic Half-width Microstrip Leaky-Wave Antenna with a Backward to Forward Scanning Capability

LIU juhua LI yuanxin LONG yunliang

(The Department of Electronics & Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510275)

**Abstract:** The periodic half-width microstrip leaky wave antenna (MLWA) with a backward to forward scanning capability is presented in this paper. The proposed antenna consists of a series of half-width MLWA. The radiating periods place on the different sides of the transmission line. The radiating period works in cut-off region of the first higher order mode, the periodic construction radiates the slow wave out along the edge. The experimental results show the main lobe scans electronically and continuously from 149° to 28° in H-plane (y-z plane) toward end fire (+z direction) when the operating frequency increases from 4.2 GHz to 8.9 GHz.

**Keywords:** Periodic, Half-Width Microstrip Leaky Wave Antenna, Backward to Forward

### 1 引言

近年来, 电控波束可调天线技术得到了充分的发展, 在雷达系统以及移动通信方面都有广阔的应用前景。微带漏波天线以其低剖面, 结构简单, 易于匹配的特点适宜于集成化生产, 特别是微带漏波天线的波束电控频扫特性, 使其已被广泛应用于汽车防撞雷达, 航空定位系统以及RFID系统等方面, 有成为可应用于移动通信系统中的新型智能天线的潜力。1979年, W. Menzel首先指出了可以利用微带在高阶模时的泄漏特性制造天线<sup>[1]</sup>。微带漏波天线辐射特性可以用漏波传播系数  $k_z = \beta_z - j\alpha_z$  来说明<sup>[2]</sup>, 其中  $\beta_z$  为漏波相位系数,  $\alpha_z$  为漏波衰减系数。  $\alpha_z$  说明天线单位长度向外辐射能量的多少,  $\alpha_z$  与天线主波束的半功率波瓣宽度  $\theta_{HPBW}$  有线性关系:

---

基金项目: 国家自然科学基金委员会 - 广东省人民政府联合基金 (U0635003)

$$\frac{\alpha_z}{k_0} = 0.18 \cdot \theta_{HPBW} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), \quad (1)$$

而当  $\beta_z / k_0 < 1$  ( $k_0 = 2\pi / \lambda_0$  为自由空间波数) 时, 微带漏波天线工作于第一高阶模  $TE_{01}$ , 能量以空间波的形式向外辐射。主波束在法线方向和端射方向之间扫描, 一般被称为微带漏波天线的电控频扫特性<sup>[3]</sup>。微带漏波天线的主波束方向角  $\theta$  可由下式给出:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{\beta_z}{k_0}\right), \quad (2)$$

另一方面, 在微带漏波天线一侧长边上添加短路结构, 可以在保持天线的电控频扫特性同时, 有效地减少天线的尺寸和抑制基模。这种天线尺寸只有传统微带漏波天线的一半, 所以被称为半宽度微带漏波天线<sup>[4]</sup>。而在前期工作中, 我们使用2个半宽度微带漏波天线组成的阵列, 实现了天线主波束2维扫描<sup>[5]</sup>。如前所述, 由于传统的微带漏波天线

传播系数  $k_z = \beta_z - j\alpha_z$  中的相位系数  $\beta_z$  一般大于零，天线主波束仅在法线方向和端射方向 ( $+z$  方向) 之间扫描，在后向方向上只存在与主波束方向角度对称的栅瓣。假若我们在保持天线结构简单，波瓣较窄等特性的同时，实现主波束的全向扫描，应可以大大提高微带漏波天线的应用范围。

传统的波导型漏波天线，通过在波导壁上周期性开孔开槽，或者在矩形介质波导表面周期性覆盖矩形金属带，可以实现漏波传播系数的正负大小变化，天线主波束会随着工作频率的变化由后向向前向扫描<sup>[6]</sup>。传统的波导型漏波天线的传播系数可以由下式得到：

$$k_{zn} = k_z + \frac{2n\pi}{d}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3)$$

其中， $k_z$  为周期性漏波天线中一个单独结构的漏波传播系数， $d$  为周期系数， $n$  为空间系数。决定着天线是工作于快波区域 ( $|\beta_{zn}| < k_0$ ，即漏波区) 还是慢波区域 ( $|\beta_{zn}| > k_0$ ，即截止区)。当天线工作于快波区域，虽然单独一个周期结构中漏波相位系数  $|\beta_z| > k_0$ ，处于截止区，但是周期性结构使能量向外辐射形成波束，天线的主波束指向由下式可得：

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{\beta_{zn}}{k_0}\right) \\ &= \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{\beta_z - \lambda_0}{k_0}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

此时， $n = -1$ 。虽然传统的周期性波导型漏波天线可以实现主波束的全向扫描，但是基于金属波导的设计，天线结构一般比较复杂，天线剖面较高。

近年来，开始有研究提出使用左手媒质构造主波束全向扫描的漏波天线<sup>[6]</sup>。通过控制工作频率或微带线上附加的压控二极管，改变了介质板中相位系数  $\beta_z$  的正负大小，最终控制天线主波束的指向。在这些设计中，天线的主波束扫描的范围一般不大，基本上不超过  $50^\circ$ 。而且左手媒质的制作较复杂，需要附加一系列电子元件，成本较高。

在本文中，我们提出应用半宽度微带漏波天线构建周期天线。多个半宽度微带漏波天线对称排列在传输线两侧。测量了天线的远场方向图和回波损耗等数据，比较了实测相位系数与推导公式计算结果的异同。

## 2 周期性半宽度微带漏波天线传播系数的计算

如图1所示，我们把多个半宽度微带漏波天线周期性连续分布，组成周期性微带漏波天线。每个半宽度微带漏波天线的宽度为  $T = 11.6$  mm，长度为  $l = 21$  mm，每个天线外侧由连续均匀分布的多条金属棒作为短路结构，金属棒的间隔和半径分别为  $a = 3$  mm 和  $r = 0.5$  mm。10个半宽度微带漏波天线对称分布在一条宽为  $s = 2.2$  mm 的传输线两侧。整个周期性天线的长度为  $L + l' = 225$  mm，宽度为  $W = 21$  mm。介质板厚度和相对介电系数为  $h = 0.8$  mm 和  $\epsilon_r = 2.65$ 。

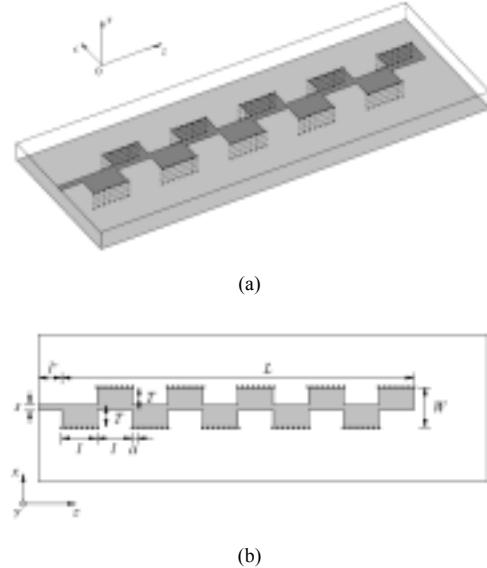


图1 周期性半宽度微带漏波天线结构 ( $L + l' = 225$  mm,  $W = 21$  mm,  $s = 2.2$  mm,  $T = 11.6$  mm,  $l = 21$  mm,  $a = 3$  mm,  $2r = 1$  mm,  $h = 0.8$  mm,  $\epsilon_r = 2.65$ )

在<sup>[5]</sup>中，我们已经得到计算半宽度微带漏波天线传播系数的公式，计算结果与实验结果吻合较好。使用连续均匀排列的多条金属棒作为半宽度微带漏波天线的短路结构，可由下式计算多条金属棒对微带天线等效宽度  $\Delta T$  的影响：

(a)  $F = 4.4$  GHz,  $F = 4.9$  GHz, 和  $F = 5.3$  GHz

(b)  $F = 6.2$  GHz,  $F = 6.7$  GHz, 和  $F = 8$  GHz.

$$\Delta T = 0.412h \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \frac{l/h + 0.262}{l/h + 0.813} + \Delta, \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{a}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{1}{\pi r}\right) - \frac{4\pi^2 r^2}{a^2} + 0.601 \frac{a^2 \epsilon_r}{\lambda_0^2} \right], \quad (6)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{5h}{T}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

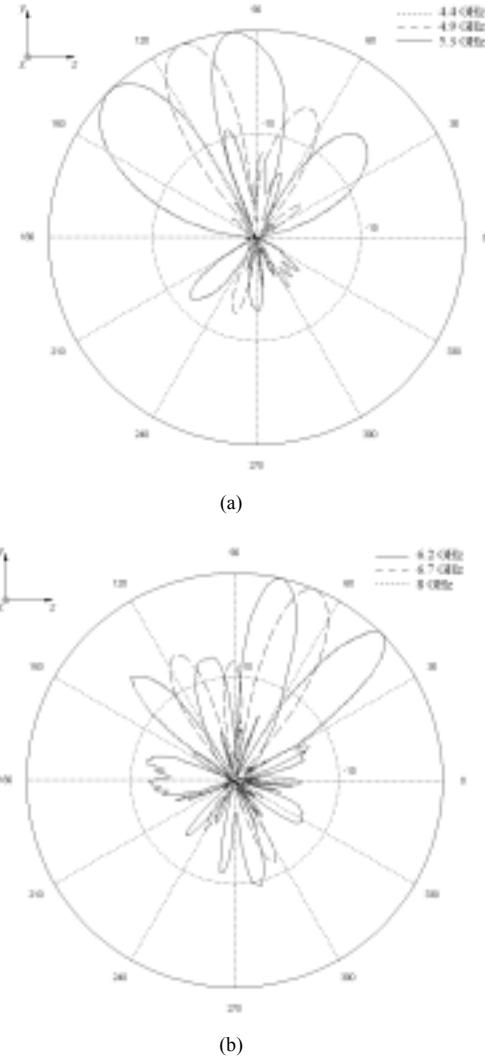


图2 周期性半宽度微带漏波天线实测方向图

那么我们可以得到半宽度微带漏波天线传播系数 ( $k_z = \beta_z - j\alpha_z$ ) 的计算公式：

$$y_\omega = \frac{h}{120\lambda_0} + j \frac{k_0\epsilon_r \Delta T}{120\pi}, \quad (8)$$

$$\exp(jk_x 2T) = -\frac{k_x - \omega \mu y_\omega}{k_x + \omega \mu y_\omega}, \quad (9)$$

$$k_z = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon_r - k_x^2}, \quad (10)$$

结合公式(3)和(10)就可以得到周期性半宽度微带漏波天线传播系数的相位系数  $\beta_{zn}$  计算公式：

$$\frac{\beta_{zn}}{k_0} = \frac{\beta_z}{k_0} - \frac{\lambda_0}{d} = \operatorname{Re} \left[ \frac{\sqrt{\omega^2 \mu \epsilon_r - k_x^2}}{k_0} - \frac{\lambda_0}{d} \right] \quad (11)$$

当  $|\beta_{zn}| < k_0$  时, 周期性微带漏波天线处于漏波区, 虽然此时周期性天线一个独立结构处于第一高阶模的截止区域 ( $\beta_z > k_0$ ), 但是连续的周期性结构使能量向外辐射。当工作频率增加的时候, 相位系数  $\beta_{zn}$  由小于零增加到大于零, 天线的主波束也随之由后向方向越过法线方向向端射方向扫描。

### 3 周期性半宽度微带漏波天线的实验结果

实验结果表明, 随着工作频率的变化, 周期性半宽度微带漏波天线的主波束由后向前扫描。在图2中可见, 当工作频率为4.4 GHz, 5.3 GHz, 6.2 GHz 和8 GHz时, 天线的主波束分别指向135°, 97°, 76° 和45°。根据实验测量结果, 当工作频率由4.2 GHz 增加到8.9 GHz时, 主波束在H平面上连续由149°偏移到28°。在图3中, 我们分别给出了实测的漏波相位系数, 漏波衰减系数以及使用(11)计算的相位系数, 此时  $d = 42$  mm,  $n = -1$ 。实测的相位系数和衰减系数分别由(2)和(1)通过主波束方向角  $\theta$  和半功率波瓣宽度  $\theta_{HPBW}$  计算得到。由图3可见, (11)计算所得相位系数与实测值十分吻合, 证明公式(11)有效。衰减系数在波束接近法线方向时接近于0, 此时周期性天线由行波天线变为驻波天线, 几乎不向外辐射能量。

最后, 在图4中我们给出了这个周期性半宽度微带漏波天线的回波损耗。由试验结果可见, 虽然  $S_{11}$  在整个工作频段内并未全部小于-10dB, 但是在大多数频率点, 天线匹配良好。

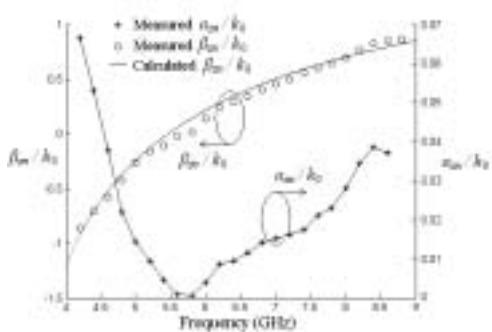


图3 天线实测的相位系数, 衰减系数以及计算的相位系数  
( $d = 42$  mm,  $n = -1$ )

计算的相位系数  $\beta_{zn}/k_0$  by (11),

实测的相位系数  $\beta_{zn}/k_0$ ,

\* 实测的衰减系数  $\alpha_{zn}/k_0$ .

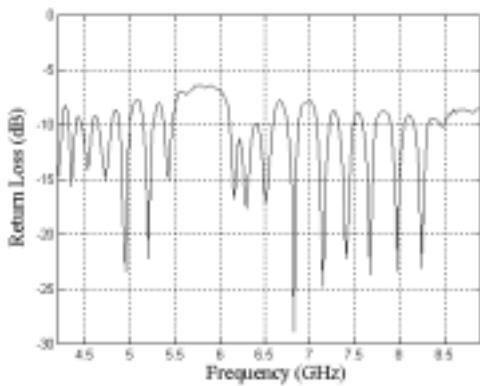


图 4 周期性半宽度微带漏波天线实测回波损耗

#### 4 结论

在本文中，我们提出了一种周期性半宽度微带漏波天线的设计方案，通过实验证明了该结构可以使天线主波束在H平面全向扫描，扫描范围可由149°到28°。相比起周期性波导型漏波天线，该设计结构简单，剖面较低。而相对于左手材料漏波天线，本设计不涉及附加电子元件，成本较低。该波束全向可调的微带漏波天线在移动通信系统中具有极大的应用前景。

#### 参考文献

- [1] W. Menzel, "A new travelling-wave antenna in microstrip," *AEU*, vol. 33, no. 4, pp. 137-140, 1979.
- [2] A. A. Oliner, "Leaky waves: basic properties and applications," *APMC '97*, vol. 1, pp. 397-400, 2-5 Dec. 1997.
- [3] Y.D. Lin and J.W. Sheen, "Mode distinction and radiation-efficiency analysis of planar leaky-wave line source," *IEEE MTT*, vol. 45, n. 10, pp. 1672-1680, Oct. 1997.
- [4] G.M. Zelinski, G.A. Thiele, M.L. Hastriter, M.J. Havrilla, and A.J. Terzuoli, "Half width leaky wave antennas," *IET Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol. 1, no.2, pp. 341 – 348, Apr. 2007.
- [5] Yuanxin Li, Quan Xue, Edward Kai-Ning Yung and Yunliang Long, "Quasi Microstrip Leaky-Wave Antenna with a 2-Dimensional Beam-Scanning Capability," accepted for publication in *IEEE Transactions on Antennas Propagation*.
- [6] David R. Jackson and A.A. Oliner, "Leaky-wave antennas" in *Modern Antenna Handbook*, Constantine A. Balanis, Eds. John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- [7] C. Caloz, T. Itoh, and A. Rennings, "CRLH Metamaterial Leaky-wave and Resonant Antennas," *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, vol. 50, no. 5, pp. 25 – 39, Oct. 2008.

作者简介：刘菊华，男，博士研究生；李元新，男，讲师，主要研究领域为天线理论与设计等；龙云亮，男，教授、博士生导师，主要研究领域为电磁数值计算、天线理论与设计等。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>