

# 微带漏波天线实现定频波束扫描的一种新设计

刘菊华 郭建炎 李峰 龙云亮

中山大学电子与通信工程系

**摘要：**本文提出了一种实现微带漏波天线定频波束扫描的新设计。使用末端开路的短微带线作为微带电容加载在微带漏波天线的辐射边缘，可增大微带漏波天线的相位常数，进而增大微带漏波天线的主波束方向角。当频率为 10.5GHz，仿真结果显示未加载微带电容的微带漏波天线主波束方向角为 14°，加载微带电容后微带漏波天线的主波束方向角可增大到 63°。当增大微带电容的长度或减小小微带电容间的距离时，微带漏波天线主波束角会增大。本文应用时域有限差分法(FDTD)数值计算的结果与仿真软件HFSS的仿真数据非常吻合。

**关键字：**微带漏波天线，定频波束扫描，微带电容

## A new method to design frequency-fixed beam-scanning microstrip leaky-wave antenna

Liu Juhua, Guo Jianyan, Li Feng, Long Yunliang

Dept. of Electronics & Communication Engineering, Sun Yat-Sen University

**Abstract:** A new method to design frequency-fixed beam-scanning microstrip leaky-wave antenna (MLWA) is proposed. The phase constant of MLWA increases with microstrip capacitors loading along the leaky line, which results in the increase of the main beam direction angle of MLWA. At frequency 10.5GHz, the simulation shows that the main beam direction angle of MLWA without capacitors loading is 14° while the main beam direction angle of MLWA with capacitors loading can be increased to 63°. By increasing the length of microstrip capacitors or by decreasing the distance between microstrip capacitors, the main direction angle of MLWA can be increased. The numerical calculation results with the finite difference time domain (FDTD) method agree well with the data from HFSS simulation.

**Key Words:** microstrip leaky-wave antenna, frequency-fixed beam-scanning, microstrip capacitors

### 1 引言

随着个人通信技术的发展，对波束可调天线（智能天线）的需求也越来越多，不仅在移动通信基站需要采用智能天线技术，而且在移动通信终端机上也要求尽量采用智能天线技术。但传统的智能天线体积庞大，馈电系统和控制系统复杂。而微带天线的低剖面、轻重量、低成本和易集成的特点，特别适合于现代化大规模集成生产。微带漏波天线工作于第一高阶模(TE01)，产生空间漏波辐射，可以形成较窄的主波瓣，

其主波束方向依赖于频率，具有波束随频率扫描特性[1-3]，已被成功地应用于汽车防撞雷达和车辆定位系统等[3]。但是，对于个人移动通信而言，工作频率往往是固定的，无法利用微带漏波天线的频率扫描特性，因而研究微带漏波天线在频率固定下实现波束扫描将具有十分重要的现实意义。

在2000年，Luxey[4]提出在微带漏波天线上加载电容实现了微带漏波天线的定频波束扫描，通过改变电容的大小可以实现微带漏波天线主波束的偏移，但电容的变化引起的主波束偏移不大。2002年，Chen[5]在Luxey的基础上提出另一种定频波束扫描的微带漏波天线，该方法使用的是微槽线漏波天线，电容性元件加载于槽线上。接着，中山大学的李元新博士提出

基金项目：

国家自然科学基金(60571036)

广东省自然科学基金(04009740)

两种方法实现了微带漏波天线在频率固定下主波束的偏移：使用移相器控制微带漏波天线馈电端口间的相位差从而控制微带漏波天线主波束的偏移[6]；或使用多端口馈电的微带漏波天线[7][8]，通过控制微带漏波天线上馈电端口的位置，可以成功实现微带漏波天线主波束的偏移。

本文提出了一种新的实现微带漏波天线定频波束扫描的天线设计。该设计是使用末端开路的短微带线作为微带电容加载在微带漏波天线的辐射边缘，来使得微带漏波天线主波束发生偏移。

## 2 工作原理

微带漏波天线辐射特性可以用漏波传播常数  $k_z = b_z - j\alpha_z$  来说明，其中  $b_z$  为漏波相位常数， $\alpha_z$  为漏波衰减常数。当微带漏波天线满足  $b_z < b_0$  时，其能量将以空间波的形式向外辐射。微带漏波天线的主波束方向角  $q_m$  由相位常数  $b_z$  决定（ $q_m$  为主波束方向与  $y$  轴的夹角，如图 1 所示），其关系为  $\sin q_m = b_z / b_0$  [2]。1997 年，Luxey[3]采用谐振腔模型法，不仅可以得到  $k_z$  的解释表达式，给出明确的物理解释，而且计算结果在微带漏波天线的漏波区内与其他严格理论所得出的结果差别很小，其计算公式为：

$$k_z = b_z - j\alpha_z = (w^2 \mathbf{m} \mathbf{e}_r - k_x^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\exp(jk_x W) = -(k_x - w \mathbf{m} \mathbf{y}_w) / (k_x + w \mathbf{m} \mathbf{y}_w) \quad (2)$$

其中

$$y_w = \frac{h}{120I} + j \frac{k_0 \mathbf{e}_r \Delta L}{120p} \quad (3)$$

式中  $W$  是微带漏波天线的贴片宽度， $h$ 、 $\mathbf{e}_r$  分别是微带漏波天线的介质基板厚度和相对介电常数， $y_w$  是由于末端开口效应引入的等效导纳， $\Delta L$  是由于末端开口效应而导致的微带漏波天线贴片宽度的等效延伸。从上面公式中可以看出，微带漏波天线的主波束方向，除了与频率有关外，还与  $W$ 、 $h$ 、 $\mathbf{e}_r$ 、 $\Delta L$  等参数有关。一般来说， $W$ 、 $h$ 、 $\mathbf{e}_r$  难于改变，但改变  $\Delta L$  则相对要容易。Luxey[4]分析了在微带漏波天线的辐射边缘加载电容和加载电感对  $\Delta L$  的影响，并对边缘加载电容的方法进行了定性的实验研究，通过在微带漏波天线边缘加载电容性元件，可使得微带漏波天线主波束发生偏移。

本文使用末端开路的短微带线作为微带电容加载在微带漏波天线的辐射边缘，来增大微带漏波天线的漏波相位常数。根据传输线理论，末端开路的短微

带线的输入导纳  $Y_{in}$  为[9]

$$Y_{in} = jY_c \tan\left(\frac{2p}{I}l\right) \quad (4)$$

式中  $Y_c = 1/Z_c$  为短微带线的特征导纳， $I$  为短微带线中传播的波长， $l$  为短微带线的长度。由(4)可知，当  $l < I/4$  时，短微带线的输入导纳是表现为电容性的。所以末端开路的短微带线可当作电容性元件来使用。这种微带电容加载在微带漏波天线的辐射边缘，会等效使得  $\Delta L$  增大（ $\Delta L$  为正值），且  $\Delta L$  可通过  $l$  来调节，这样就可很方便地增大微带漏波天线的相位常数  $b_z$ ，从而使得微带漏波天线主波束方向角  $q_m$  也增大。

## 3 天线设计

新设计的微带漏波天线的结构示意图和坐标系如图 1 所示，微带漏波天线的长为  $L=90mm$ ，宽为  $W=8.7mm$ 。介质基板使用 RT/Duroid5880 材料，其相对介电常数为  $\epsilon_r=2.2$ ，基板厚度为  $h=0.508mm$ 。微带漏波天线的馈电采用 50 欧姆微带线馈电。微带电容是一末端开路的短微带线，设微带电容的长度为  $l$ ，加载微带电容的间隔为  $s$ 。设定频率为  $f=10.5GHz$ 。

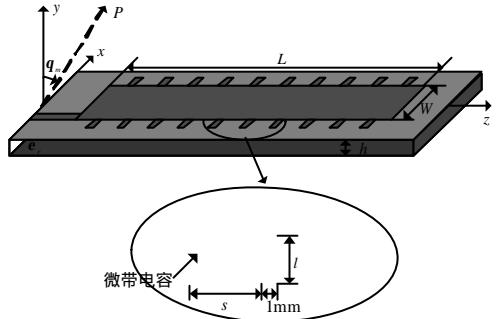


图1 加载微带电容的微带漏波天线结构示意图

## 4 数值仿真

本文应用 FDTD 法对本文的微带漏波天线进行数值仿真，使用完全匹配层（PML）作为 FDTD 的吸收边界。为验证本文 FDTD 程序的正确性，这里先用该 FDTD 代码仿真与本文结构类似而未加载微带电容的微带漏波天线[10]，仿真结果如图 2 所示。由图 2 可以看到，FDTD 仿真结果与仿真软件 HFSS 的结果，[10] 提供的测试数据都吻合得很好（[10] 中的角度是波束方向与  $z$  轴的夹角，这里的角度是波束方向与  $y$  轴的夹角），由此可见本文使用的 FDTD 程序还是比较精确可靠的。

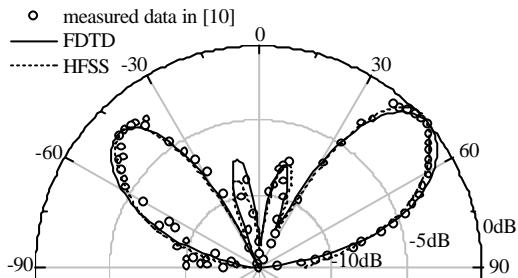


图2 文献[10]的微带漏波天线方向图

在微带漏波天线的辐射边缘加载微带电容。当加载微带电容间的距离为 $s=5\text{mm}$ , 微带电容的长度为 $l=0.5\text{mm}$ ,  $l=1\text{mm}$ ,  $l=1.5\text{mm}$ ,  $l=2\text{mm}$ 和 $l=2.5\text{mm}$ 时, 应用FDTD法仿真得到的微带漏波天线方向图如图3所示。图3的实线为应用FDTD法仿真没有加载微带电容的微带漏波天线得到的天线方向图。图4为应用HFSS仿真软件仿真得到的对比数据。由图3和图4可以看出, 加载了微带电容会使微带漏波天线主波束方向 $q_m$ 变大, 且 $q_m$ 会随加载微带电容的长度 $l$ 增大而增大。其中用FDTD仿真加载微带电容( $s=5\text{mm}$ ,  $l=2\text{mm}$ )的微带漏波天线得到的电场场强图如图5所示。

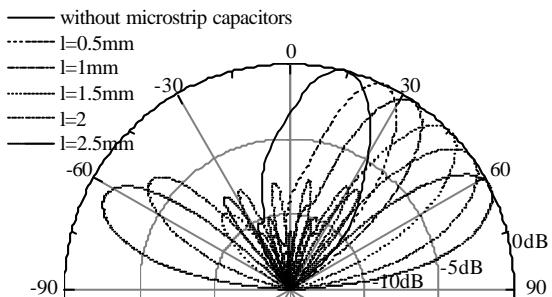
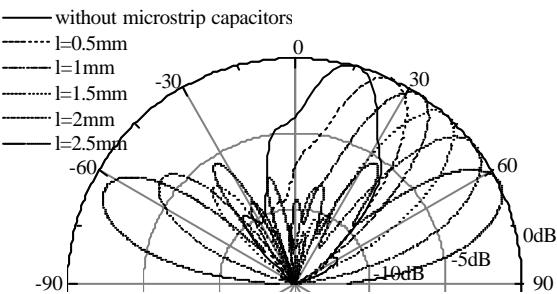
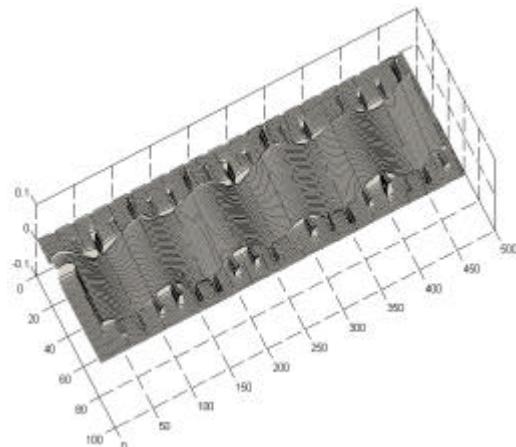
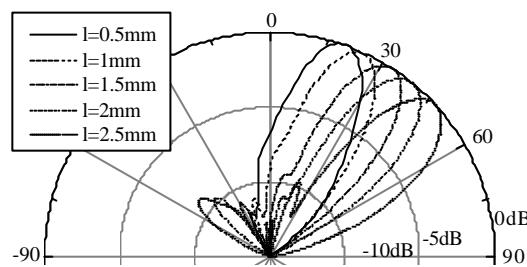
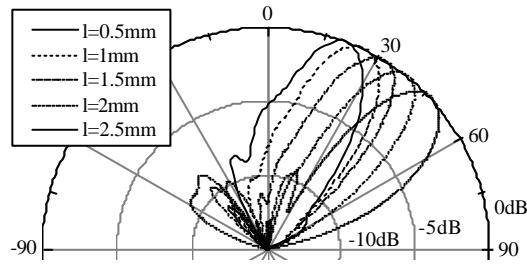
图3 加载微带电容( $s=5\text{mm}$ )的微带漏波天线方向图(FDTD)图4 加载微带电容( $s=5\text{mm}$ )的微带漏波天线方向图(HFSS)

图5 加载微带电容的微带漏波天线电场场强图

当加载微带电容间的距离为 $s=10\text{mm}$ , 微带电容的长度为 $l=0.5\text{mm}$ ,  $l=1\text{mm}$ ,  $l=1.5\text{mm}$ ,  $l=2\text{mm}$ 和 $l=2.5\text{mm}$ 时, 应用FDTD仿真得到的微带漏波天线方向图如图6所示。应用HFSS仿真软件仿真得到的对比数据如图7所示。

图6 加载微带电容( $s=10\text{mm}$ )的微带漏波天线方向图(FDTD)图7 加载微带电容( $s=10\text{mm}$ )的微带漏波天线方向图(HFSS)

应用FDTD仿真加载微带电容的微带漏波天线, 得到微带漏波天线主波束方向角 $q_m$ 与微带电容长度 $l$ 的关系如图8所示。应用HFSS仿真得到的对比数据如图9所示。由图8和图9可以看出, 微带漏波天线主波束方向角 $q_m$ 随加载微带电容长度 $l$ 增大而变大, 且当加载微带电容间的距离 $s$ 减小时,  $q_m$ 也会增大。

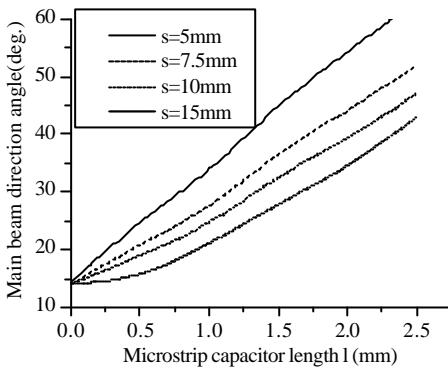


图8 微带漏波天线主波束方向角与微带电容长度的关系图 ( FDTD )

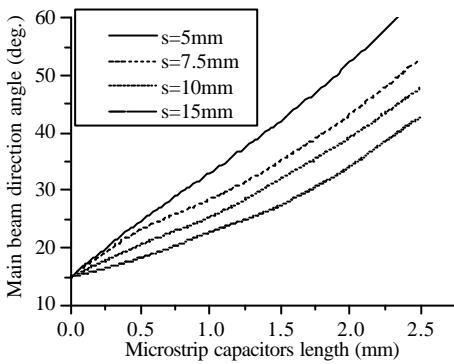


图9 微带漏波天线主波束方向角与微带电容长度的关系图 ( HFSS )

## 5 结论

使用末端开路的短微带线作为微带电容加载在微带漏波天线的辐射边缘，可增大微带漏波天线的相位常数，从而增大微带漏波天线的主波束方向角。当频率为10.5GHz，仿真结果显示未加载微带电容的微带漏波天线主波束方向角为14°，加载微带电容后微带漏波天线的主波束方向角可增大到63°。当增大微带电容的长度或减小微带电容间的距离时，微带漏波天线主波束角会增大。本文应用FDTD法仿真得到的结果与仿真软件HFSS的仿真数据非常吻合。

文献[4]也是在微带漏波天线的辐射边缘加载电容，但加载不是本文里的微带电容。文献[4]加载的电容因为一端连接地板，所以会引入寄生电感，而且寄

生电感的作用超过了电容的作用，以至于加载电容后微带漏波天线的主波束方向角没有增大反而减小了，而且当电容从3.3pF增大到10pF时，微带漏波天线的主波束方向角只增大了3°~5°。本文加载的微带电容只是一个末端开路的短微带线，所示成本较低，较易于加工，而且调节微带电容的长度可使得微带漏波天线主波束有较大偏移。本文的研究为设计微带漏波天线实现预定频波束扫描提供了一条新的途径。

## 参考文献

- [1] W. Menzel, "A new traveling-wave antenna in microstrip," Archiv. Elektronik. Ubertrag Tech., band 33, pp. 137–140, Apr. 1979.
- [2] A. A. Oliner, "leakage from higher modes on microstrip line with application to antennas," Radio Science, vol. 22, No. 6, pp. 907-912, Nov. 1987.
- [3] C. Luxey and J. M. Laheurte, "Simple design of dual-beam leaky-wave antennas in microstrips," IEE Proc. –Microw. Antennas Propag., vol. 44, no. 6, pp. 397–401, Dec. 1997.
- [4] C. Luxey and J.-M. Laheurte, "Effect of reactive loading in microstrip leaky wave antennas," Electronics Letters, vol. 36, no. 15, pp. 1259-1260, Jul. 2000.
- [5] Chih-Chiang Chen, Ching-Kuang C. Tzuang, "Phase-shifterless beam-steering micro-slotline antenna," Electronics letters, vol. 38, No. 8, pp. 354-355, Apr. 2002.
- [6] 李元新, 龙云亮, “一种新型频率固定相控波束扫描的微带漏波天线,”微波学报, vol. 19, No. 4, pp. 67-69, Dec. 2003.
- [7] 李元新, 龙云亮. 定频波束可调的多端口微带漏波天线. 微波学报, vol. 20, No. 4, pp. 86-89, Dec. 2004.
- [8] Yuanxin Li, Yunliang Long, "Frequency-fixed Beam-scanning Microstrip Leaky-wave Antenna with Multi-terminals," IEE Electronics Letters, Vol. 42, No. 1, pp. 10-11, Jan., 2006.
- [9] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. New York: Wiley, 2001.
- [10] I-Yu Chen, et al., "Studies of suppression of the reflected wave and beam-scanning features of the antenna arrays," IEEE trans. AP, vol. 53, No. 7, pp. 2220-2225, Jul. 2005.

## 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>