

文章编号 1005-0388(2008)04-0694-05

# 一种新型定频波束可调微带漏波天线的 仿真研究\*

刘菊华<sup>\*</sup> 郭建炎 龙云亮

(中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

**摘要** 提出了一种新型的定频波束可调微带漏波天线。通过在微带漏波天线的辐射边缘周期性地加载微带电感, 可减小微带漏波天线的相位常数, 进而减小微带漏波天线的主波束方向角。微带电感是一末端短路的短微带线。应用时域有限差分法(FDTD)对这种加载微带电感的微带漏波天线进行仿真分析得出, 当频率为10.5 GHz, 未加载微带电感的微带漏波天线主波束方向角为53°, 加载微带电感可使得微带漏波天线主波束方向角减小到11°, 当减小微带电感的长度或减小微带电感间的距离时, 微带漏波天线主波束方向角会减小。本文FDTD仿真结果与软件HFSS仿真结果十分吻合。

**关键词** 微带漏波天线; 定频波束可调; 微带电感

**中图分类号** TN820.1+2      **文献标志码** A

## Simulation of a novel frequency-fixed beam-steering microstrip leaky-wave antenna

LIU Ju-hua GUO Jian-yan LONG Yun-liang

(Dept. of Electronics & Communication Engineering, Sun Yat-Sen University,  
Guangzhou Guangdong 510275, China)

**Abstract** A novel frequency-fixed beam-steering microstrip leaky-wave antenna (MLWA) is proposed. The phase constant of MLWA decreases with microstrip inductors loading along the leaky line, which results in the decrease of the main beam direction angle of MLWA. The microstrip inductor is a short microstrip with one end shorted. The effect of microstrip inductors loading on MLWA was analyzed with the finite difference time domain (FDTD) method. At frequency 10.5 GHz, the main beam direction angle of MLWA without microstrip inductors loading is 53°. With microstrip inductors loading on MLWA, the main beam direction angle of MLWA can be decreased to 11°. By decreasing the length of microstrip inductors or by decreasing the distance between microstrip inductors, the main beam direction angle of MLWA can be decreased. The FDTD results agree well with those from HFSS simulation.

**Key words** microstrip leaky-wave antenna; frequency-fixed beam-steering; microstrip inductors

\* 收稿日期: 2007-07-02.      基金项目: 国家自然科学基金(60571036), 国家自然科学基金—广东省联合基金(U0635003), 广东省自然科学基金(04009740)

☆E-mail: lijuhua@mail2.sysu.edu.cn

694

## 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<sup>[1~3]</sup>,已被成功地应用于汽车防撞雷达和车辆定位系统等<sup>[3]</sup>。另一方面,微带漏波天线简单紧凑的馈电结构,制造过程中对误差较大的容忍度,使得微带漏波天线更具有低成本和易制造的优点。所以微带漏波天线具有成为可应用于移动通信的新型智能天线的潜力。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可调将具有十分重要的现实意义。

1979年,Menzel<sup>[1]</sup>首先利用微带工作于第一高阶模的泄漏特性制造出微带漏波天线。1987年,Oliner<sup>[2]</sup>完整地阐述了微带在第1,2,3高阶模下电波的传播特性,并用横向谐振法计算了微带漏波天线不同高阶模下的漏波传播常数  $k_z = \beta_z - j\alpha_z$ ,微带漏波天线的理论体系得以完善。开始的微带漏波天线是通过控制频率来实现波束扫描的,后来在2000年,Luxey<sup>[4]</sup>提出了在微带漏波天线上加载电容实现微带漏波天线的定频波束可调,通过控制加载电容大小可以实现微带漏波天线主波束可调,但电容的变化引起的主波束偏移不大。2002年,Chen<sup>[5]</sup>在Luxey的基础上提出了另一种频率固定波束可调微带漏波天线,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<sup>[6]</sup>;或使用多端口馈电的微带漏波天线<sup>[7,8]</sup>,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。

微带漏波天线辐射特性可以用漏波传播常数  $k_z = \beta_z - j\alpha_z$  来说明,其中  $\beta_z$  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  $\beta_z < \beta_0$  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  $\theta_m$  由相位常数  $\beta_z$  决定( $\theta_m$  为主波束方向与y轴的夹角,如图1所示),其关系为  $\sin\theta_m = \beta_z/\beta_0$ <sup>[2]</sup>。1997年,Luxey<sup>[3]</sup>采用谐振腔模型法,不仅得到  $k_z$  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:

$$k_z = \beta_z - j\alpha_z = (\omega^2 \mu \epsilon_r - k_z^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\exp(jk_z W) = -(k_z - \omega \mu y_w)/(k_z + \omega \mu y_w) \quad (2)$$

其中

$$y_w = \frac{h}{120\lambda} + j \frac{k_0 \epsilon_r \Delta L}{120\pi} \quad (3)$$

式中,W是微带漏波天线的贴片宽度;h,  $\epsilon_r$  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,  $\epsilon_r$ ,  $\Delta L$  等参数有关。一般来说,W, h,  $\epsilon_r$  难于改变,但改变  $\Delta L$  则相对要容易。Luxey<sup>[4]</sup>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。

本文提出使用末端短路的短微带线作为微带电感元件加载在微带漏波天线辐射边缘,来改变微带漏波天线的主波束方向。

## 2 工作原理

根据传输线理论,末端短路的短微带线输入导纳  $Y_{in}$  为<sup>[9]</sup>

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{jZ_c \tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} = -jY_c \cot\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \quad (4)$$

式中, $Y_c = 1/Z_c$  为短微带线的特征导纳; $\lambda$  为短微带线中传播的电磁波波长;l为短微带线的长度。

由(4)式可知,当  $l < \lambda/4$  时,短微带线的输入导纳  $Y_{in}$  是表现为电感性的,所以末端短路的短微带线可当作电感性元件来使用。这种微带电感加载在微带漏波天线的辐射边缘,会使得微带漏波天线的  $y_w$  虚部减小,等效使得  $\Delta L$  减小( $\Delta L$  变为负值),从而使得微带漏波天线的漏波相位常数  $\beta_z$  减小,微带漏波天线的主波束方向角  $\theta_m$  也减小。由(4)式可知,微带电感输入导纳  $Y_{in}$  的值与微带电感长度l有关,所以当这种微带电感加载在微带漏波天线的辐射边

缘,就可以通过调节  $l$  来调节微带漏波天线的漏波相位常数  $\beta_z$ ,从而调节微带漏波天线主波束方向。

### 3 天线设计

微带漏波天线的结构示意图和坐标系如图 1 所示,微带漏波天线长为  $L = 90 \text{ mm}$ ,宽  $W = 11 \text{ mm}$ 。介质基板的相对介电常数为  $\epsilon_r = 2.2$ ,厚度为  $h = 0.508 \text{ mm}$ 。微带漏波天线的馈电采用 50 欧姆的微带线馈电。在辐射边缘周期性地加载微带电感,设微带电感的长度是  $l$ ,微带电感间的距离为  $s$ ,微带电感通过金属探针接地短路,探针半径为 0.2 mm。

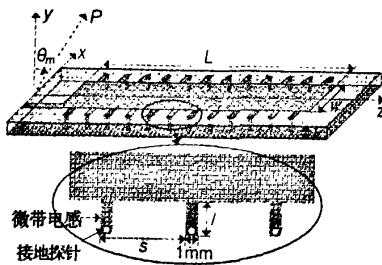


图 1 加载微带电感的微带漏波天线结构示意图

### 4 数值仿真

应用 FDTD 法对这种加载微带电感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感的微带漏波天线<sup>[10]</sup>,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 的仿真结果和文献[10]提供的测试数据吻合得很好(文献[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。

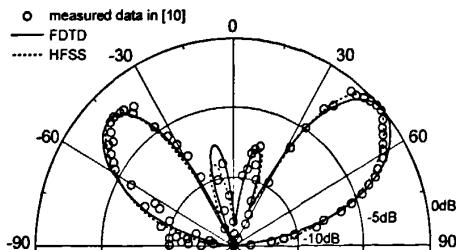
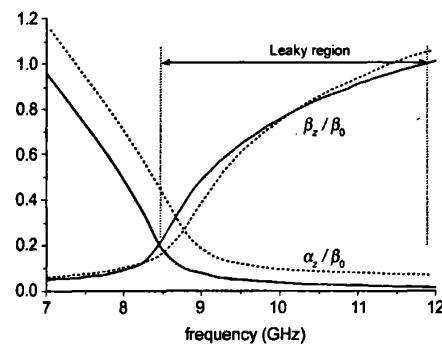
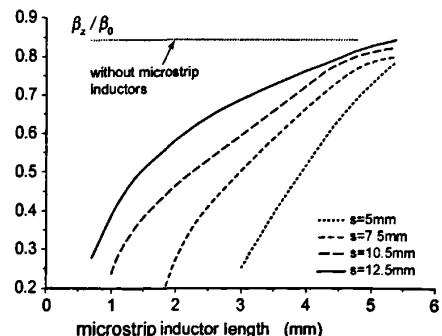


图 2 文献[10]中的微带漏波天线方向图

当图 1 中的微带漏波天线没有加载微带电感时,应用 FDTD 计算其漏波传播常数与频率的关系如图 3(a)实线所示,图 3(a)虚线为应用公式(1)~(3)计算的漏波传播常数(公式计算的归一化漏波衰减常数  $\alpha_z/\beta_0$  一般都比数值计算的结果偏大<sup>[3]</sup>)。设定频率为  $f = 10.5 \text{ GHz}$ ,应用 FDTD 计算加载微带电感后微带漏波天线相位常数  $\beta_z/\beta_0$  与微带电感长度  $l$  的关系如图 3(b)所示。由图 3 可见,加载微带电感会使得微带漏波天线的归一化漏波相位常数  $\beta_z/\beta_0$  减小。且当微带电感的长度  $l$  减小时,  $\beta_z/\beta_0$  会减小;当微带电感间的距离  $s$  减小时,  $\beta_z/\beta_0$  会减小。



(a) 未加载微带电感的微带漏波天线

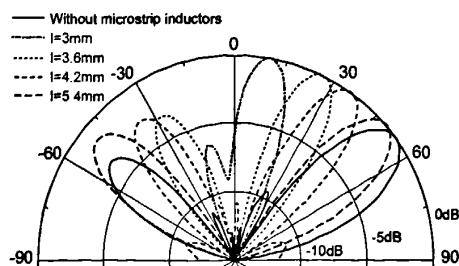


(b) 加载了微带电感的微带漏波天线

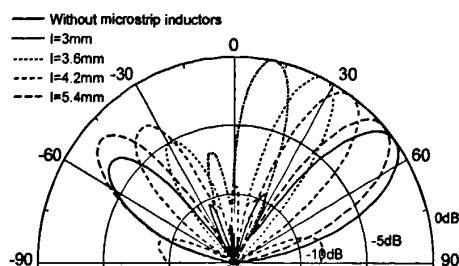
图 3 微带漏波天线的漏波传播常数

当微带电感间的距离  $s = 5 \text{ mm}$  时,应用 FDTD 仿真加载不同长度微带电感的微带漏波天线,得到的天线方向图如图 4(a)所示,图中实线为没有加载微带电感的微带漏波天线方向图。由图 4(a)可见,没有加载微带电感的微带漏波天线主波束方向角  $\theta_m = 53^\circ$ ,加载微带电感( $s = 5 \text{ mm}$ ,  $l = 3 \text{ mm}$ )后,微带漏波天线主波束方向角减小到  $\theta_m = 11^\circ$ 。图 4(b)为应用 HFSS 软件仿真得到的对比数据。图 5 为应用 FDTD 仿真加载微带电感( $s = 5 \text{ mm}$ ,  $l = 3 \text{ mm}$ )

的微带漏波天线电场分布图。



(a) FDTD 仿真得到的方向图



(b) HFSS 仿真得到的方向图

图4 加载微带电感的微带漏波天线方向图

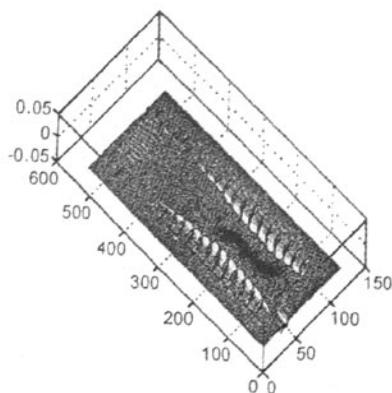
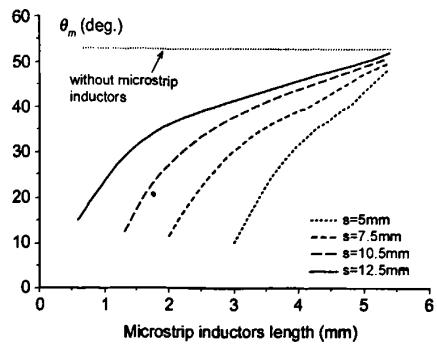
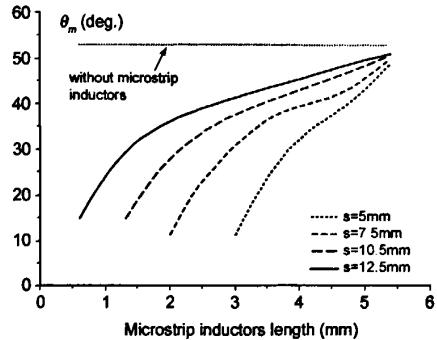


图5 加载微带电感的微带漏波天线场强图

逐级增大微带电感间的距离  $s$ , 应用 FDTD 仿真这种加载微带电感的微带漏波天线, 得到微带漏波天线主波束方向角  $\theta_m$  与微带电感长度  $l$  的关系如图 6(a) 所示。图 6(b) 为应用仿真软件 HFSS 仿真得到的对比数据。由图 6 可见,  $\theta_m$  随  $l$  减小而减小, 且当微带电感间的距离  $s$  减小时,  $\theta_m$  会减小。



(a) FDTD 仿真得到的关系图



(b) HFSS 仿真得到的关系图

图6 加载微带电感长度 l 与  $\theta_m$  的关系图

## 5 结论

提出使用末端短路的短微带线作为微带电感加载在微带漏波天线的辐射边缘, 可以减小微带漏波天线的主波束方向角。应用 FDTD 仿真得出, 当频率为 10.5 GHz, 未加载微带电感的微带漏波天线主波束方向角为 53°, 加载微带电感后可使得微带漏波天线主波束方向角减小到 11°, 减小微带电感的长度可使得微带漏波天线主波束方向角从 49° 减小到 11°, 减小微带电感间的距离也可使得微带漏波天线主波束方向角减小。本文还应用 HFSS 对这种加载微带电感的微带漏波天线进行仿真, 其结果与应用 FDTD 计算的结果十分吻合。

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(若没有寄生电感的作用加载电容会使微带漏波天线主波束方向角增大<sup>[4]</sup>), 当电容从 3.3 pF 增大到 10 pF 时, 微带漏波天线主波束方向角只增大 3°~5°。本文在微带漏波天线加载微带电感可以较容易用数值仿真计算出加载微带

电感后微带漏波天线的主波束，而且加载微带电感可使得微带漏波天线主波束有较大偏移。若能使用电子开关元件控制微带电感与微带漏波天线之间电流的通断，则可实现电控微带漏波天线主波束的偏移。本文的研究在理论上为实现微带漏波天线定频波束可调提供了一条新的途径。

### 参考文献

- [1] W MENZEL. A new travelling-wave antenna in microstrip [J]. AEU, 1979, 33(4): 137-140.
- [2] A OLINER. Leakage from higher modes on microstrip line with application to antennas [J]. Radio Science, 1987, 22(6): 907-912.
- [3] C LUXEY, et al.. Simple design of dual-beam leaky-wave antennas in microstrips [J]. IEE Proceedings Microwaves, Antennas & Propagation, 1997, 144 (6): 397-402.
- [4] C LUXEY, et al.. Effect of reactive loading in microstrip leaky wave antennas [J]. Electronics Letters, 2000, 36(15): 1259-1260.
- [5] C -C CHEN, et al.. Phase-shifterless beam-steering micro-slotline antenna [J]. Electronics Letters, 2002, 38(8): 354-355.
- [6] 李元新,龙云亮,钟期洪. 新型频率固定相控波束扫描微带漏波天线的研究[J]. 电波科学学报, 2004, 19 (6): 735-738.  
Li Y X, Long Y L, Zhong Q H. Novel frequency-fixed beam-scanning microstrip leaky-wave antenna with phase-shifter[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6): 735-738.
- [7] 李元新,龙云亮. 定频波束扫描的多端口微带漏波天线[J]. 微波学报, 2004, 20(4): 86-89.
- [8] LI Yuanxin, LONG Yunliang. Frequency-fixed Beam-scanning Microstrip Leaky-wave Antenna with Multi-terminals [J]. IEE Electronics Letters, 2006, 42(1): 10-11.
- [9] J-S Hong, M J Lancaster. Microstrip filters for RF/microwave applications [M]. 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 [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2005, 53(7): 2220-2225.



刘菊华 (1981—),男,广东人,中山大学电子与通信工程系博士生,主要研究方向为天线理论和移动通信。

郭建炎 (1982—),男,福建人,中山大学电子与通信工程系博士生。

龙云亮 (1963—),男,重庆人,中山大学教授、博士生导师,电子与通信工程系主任,IEEE 高级会员,中国电子学会微波分会委员会委员,广州市RFID专业委员会主任。主要研究方向为天线理论与设计、复杂环境中的电波传播理论和电磁数值计算等。

(上接第 650 页)



王伟 (1980—),男,安徽人,博士生,主要研究方向为大型天线反射面精度调整与机电耦合等。



段宝岩 (1955—),男,河北人,教授,博士生导师,中国电子学会会士,主要研究方向为电子装备机电耦合理论与应用、天线结构与伺服系统、工程结构优化设计等。  
E-mail: byduan@xidian.edu.cn

马伯渊 (1961—),男,江苏人,教授,硕士生导师,主要研究方向为运动控制与远程控制、天线结构 CAD/CAE 等。

E-mail: boyuanma@126.com

## 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>