

文章编号:1001-9014(2008)05-0393-04

## 基于加载电感传输线的高增益微带天线

汤杭飞, 介晓永, 赵晓鹏

(西北工业大学 应用物理系, 陕西 西安 710072)

**摘要:**利用加载电感传输线特殊的非线性色散关系设计了一种高增益矩形微带天线. 在保持中心工作频率几乎不变的条件下, 该天线的增益可以通过增大物理尺寸得到有效改善, 而且具有可调节性. 测量结果表明, 该天线的增益比普通微带天线提高了 1.88 dBi.

**关键词:**加载电感传输线; 微带天线; 增益

**中图分类号:** TN817, TN822+.4 **文献标识码:** A

## HIGH-GAIN MICROSTRIP ANTENNA BASED ON INDUCTOR-LOADED TRANSMISSION LINE

TANG Hang-Fei, JIE Xiao-Yong, ZHAO Xiao-Peng

(Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A high-gain rectangular microstrip antenna was designed based on the particular nonlinear dispersion relation of inductor-loaded transmission line. On the condition of keeping the center operating frequency almost unchanged, gain of the proposed antenna can be enhanced effectively by a simple enlargement of its physical size, and the gain is adjustable. It is shown that the measured gain of the proposed antenna increases by 1.88 dBi comparing with that of the conventional microstrip antenna.

**Key words:** inductor-loaded transmission line (IL-TL); microstrip antenna; gain

### 引言

左手材料由于其独特的电磁特性引起了国内外科技界的关注<sup>[1,2]</sup>. 2002 年, T. Itoh<sup>[3]</sup> 和 G. V. Eleftheriades<sup>[4]</sup> 等人分别利用传输线方法实现了一种左手材料的制备, 即复合左右手传输线 (composite right/left-handed transmission line, CRLH-TL). CRLH-TL 在微波与通讯特别是天线领域具有广泛的应用前景<sup>[5-7]</sup>, 其中大部分利用的是相位超前和特定频率点波长无限大这两个性质. 最近, Lai 等<sup>[7]</sup> 将 CRLH-TL 基本单元四个 LC 元件中的串联电容移去, 制成了加载电感传输线 (inductor-loaded transmission line, IL-TL), 并利用其特定频率点波长无限大的特性设计出了零阶谐振全向天线.

本文基于 IL-TL 在相位常数大于零的频率范围内特殊的非线性色散关系, 设计了加载电感传输线结构的矩形微带天线. 在保持天线中心工作频率基

本不变的情况下, 通过增大天线的物理尺寸来提高天线增益. 而且可以通过改变 IL-TL 基本单元的尺寸和个数, 实现天线增益的灵活调节. 加载电感微带天线高增益、易调节的优点弥补了普通微带天线的不足.

### 1 理论分析

#### 1.1 IL-TL 理论及实现方法

IL-TL 基本单元的等效电路模型如图 1(a) 所示, 其色散关系表示为<sup>[7]</sup>

$$\beta(\omega) = \frac{1}{p} \cos^{-1} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{L_R}{L_L} - \omega^2 L_R C_R \right) \right), \quad (1)$$

式中  $L_R$ 、 $C_R$  和  $L_L$  分别是串联电感、并联电容和并联电感,  $\beta$  是相位常数,  $p$  是基本单元的长度. 图 1(b) 是对应的色散曲线, 与普通传输线的线性色散关系<sup>[8]</sup>  $\beta(\omega) = \omega \sqrt{LC}$  相比, IL-TL 的色散关系是非线

收稿日期: 2008-02-21, 修回日期: 2008-06-18

Received date: 2008-02-21, revised date: 2008-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(50632030), 国家重点基础研究发展规划资助项目(2004CB719805)

作者简介: 汤杭飞(1984-), 男, 浙江杭州人, 西北工业大学在读研究生, 现主要从事左手材料的应用研究.

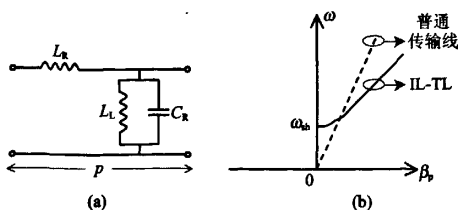


图1 加载电感传输线,(a)基本单元的等效电路图,(b)色散关系图

Fig.1 IL-TL, (a) equivalent circuit model for the unit cell, (b) dispersion diagram

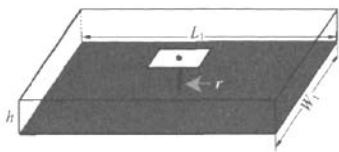


图2 加载电感微带线基本单元的三维示意图

Fig.2 Schematic view of the unit cell for inductor-loaded microstrip line

性的,在并联谐振频率 $\omega_{sh}$ 处满足相位常数 $\beta=0$ 。在大于 $\omega_{sh}$ 的一定频率范围内,IL-TL的相位常数 $\beta$ 小于普通传输线,也即其传播波长 $\lambda_g$ 比普通传输线的大;且越靠近 $\omega_{sh}$ (即频率越低),两种传输线传播波长 $\lambda_g$ 的差值越大。

在普通微带线的金属导带和接地板之间周期性地加载并联电感实现加载电感微带线。加载电感微带线基本单元中的金属贴片通常取为矩形,而并联电感可利用金属化导通孔(via hole)实现,一般位于贴片中心,上下分别连接金属贴片和接地板,如图2所示。通过改变金属贴片的长度 $L_1$ 和宽度 $W_1$ ,可以调节 $L_R$ 和 $C_R$ 的大小;通过改变金属化导通孔的半径 $r$ 和长度 $h$ ,能够调节 $L_L$ 的大小。因此,可以通过选取基本单元的几何参数方便地调节加载电感微带线的色散关系。

## 1.2 利用IL-TL提高增益

矩形微带天线的方向性系数为<sup>[9,10]</sup>

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_E \theta_H}, \quad (2)$$

其中,

$$\theta_E = 2\sin^{-1}\left(\frac{7.03}{3k_0^2 L^2 + k_0^2 h^2}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\theta_H = 2\sin^{-1}\left(\frac{1}{2 + k_0 W}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中 $\Omega_A$ 为波束范围, $\theta_E$ 、 $\theta_H$ 分别是天线辐射方向图

中E、H平面半功率波瓣宽度, $k_0$ 为空气中的相位常数, $L$ 和 $W$ 分别为矩形微带天线辐射贴片的长度和宽度。由公式(2)、(3)可知,在保持 $k_0$ 不变(即保持天线中心工作频率不变)的情况下增大 $L$ 和 $W$ ,可以减小 $\theta_E$ 和 $\theta_H$ ,从而增大方向性系数 $D$ 和提高增益 $G$ 。

由文献[10],矩形微带天线的长度 $L$ 约等于 $0.49\lambda_g$ ,且长度 $L$ 和宽度 $W$ 之间满足 $1 < W/L < 2$ 。由前面的分析知,在大于 $\omega_{sh}$ 的一定频率范围内,IL-TL的传播波长 $\lambda_g$ 比普通传输线的大。所以在中心工作频率和介质基板都相同时,加载电感微带天线辐射片的面积大于普通微带天线。加载电感微带天线在保持中心工作频率不变的条件下增大了物理尺寸,从而能够提高增益。而且频率越低, $\lambda_g$ 的增加量越大,进而增益的提高幅度也越大。同时,通过改变加载电感微带线基本单元的几何尺寸及其沿天线长、宽两个方向的数目,实现天线增益 $G$ 的可调节性。

## 2 天线设计与结果分析

### 2.1 HFSS 仿真设计

利用Ansoft公司的高频电磁仿真软件HFSS设计了A、B两组天线,其中A-0、B-0是作为对比的普通微带天线,其余是加载电感微带天线。基板选用厚度1.5 mm,介电常数2.65和正切损耗0.001的聚四氟乙烯板。馈电方式采用微带侧馈,利用 $\lambda/4$ 阻抗变换器实现阻抗匹配,图3是加载电感微带天线的几何尺寸示意图(以A-2为例)。A、B两组天线采用相同的基本单元,其几何参数为 $L_1 \times W_1 = 6.6 \times 6.6 \text{ mm}^2$ , $h = 1.5 \text{ mm}$ 及 $r = 0.4 \text{ mm}$ 。

HFSS仿真结果如表1所示,其中 $m$ 、 $n$ 分别表示沿天线长度 $L$ 和宽度 $W$ 方向的单元个数。由表1知,在中心工作频率几乎保持不变时,A-1、A-2与A-0相比,长度 $L$ 均增大了47.5%,宽度 $W$ 分别增加了7.3%、61.0%,增益分别提高了2.28 dBi和2.56 dBi;B-1、B-2与B-0相比,长度 $L$ 均增大了一倍,宽度 $W$ 分别增加了52.3%、103.1%,增益分别提高了

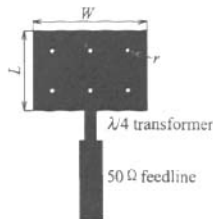


图3 加载电感微带天线的几何尺寸示意图

Fig.3 The geometrical dimension sketch of IL-TL antenna

表 1 A、B 两组天线物理尺寸和仿真结果

Table 1 The dimensions and simulated results of the antennas

Antennas	m	n	L (mm)	W (mm)	Frequency (GHz)	Return loss (dB)	Peak gain (dBi)
A-0	—	—	8.95	12.3	9.08	-34.41	6.98
A-1	2	2	13.2	13.2	9.14	-29.34	9.26
A-2	2	3	13.2	19.8	9.14	-21.60	9.54
B-0	—	—	9.9	13.0	8.26	-36.20	7.29
B-1	3	3	19.8	19.8	8.24	-34.63	9.98
B-2	3	4	19.8	26.4	8.32	-19.12	10.50

2.69 dBi 和 3.21 dBi. 同时,与普通微带天线相比,B 组中加载电感微带天线的增益提高幅度大于 A 组. 这是由于 B-1、B-2 与 A-1、A-2 相比沿天线长度方向增加了一个基本单元,长度增大导致中心工作频率移向低频,而由前面分析知,频率越低,增益的提高幅度越大.

图 4 是天线 A-0、A-2 和 B-2 辐射方向图的仿真结果. 可以发现,与普通微带天线相比,加载电感微带天线的 E 平面和 H 平面的辐射方向图都得到了改善,且随着天线 L 方向单元个数 m 和 W 方向单元个数 n 的增加,效果更加明显. 进一步的仿真结果表明,通过改变基本单元的尺寸大小和个数,可以灵活地调节加载电感微带天线的中心工作频率和增益,以更好地满足工程需要.

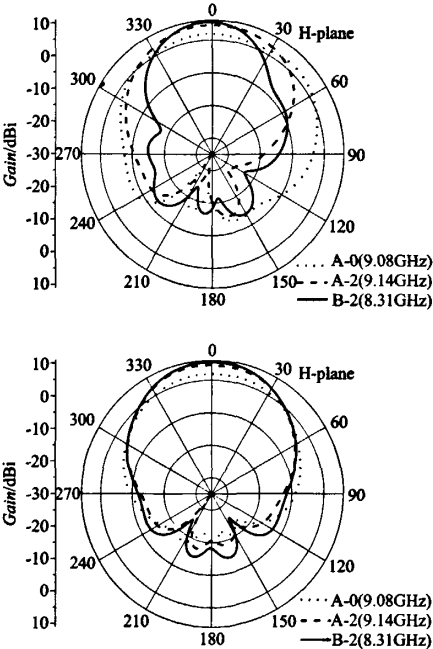


图 4 天线 A-0、A-2 和 B-2 的辐射方向图(仿真结果)  
Fig. 4 Simulated radiation patterns of A-0、A-2 and B-2

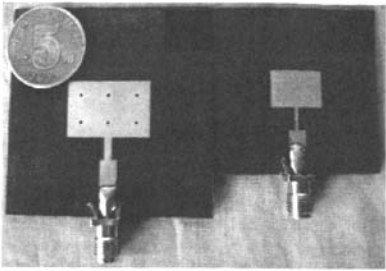


图 5 天线样品照片  
Fig. 5 Photograph of the prototypes

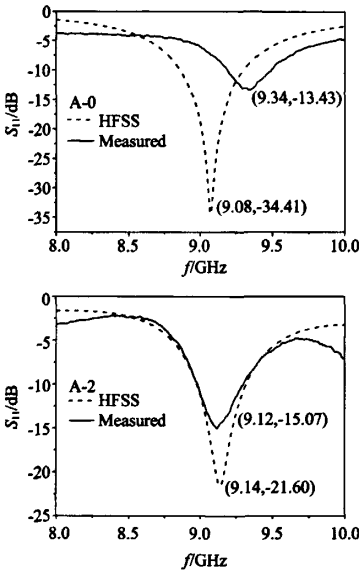


图 6 天线 A-0、A-2 的回波损耗  
Fig. 6 Simulated and measured return loss of A-0 and A-2

2.2 实验结果与分析

为了验证上述理论分析和仿真结果,采用电路板蚀刻技术加工了天线样品 A-0、A-2,样品照片如图 5 所示. 利用 AV3618 矢量网络分析仪测量了天线的回波损耗(图 6),并与仿真结果比较. 由测量结果可知,尽管 A-2 的尺寸比 A-0 大得多,但它们的中心工作频率相近. 对比测量和仿真结果发现,天线 A-0 的实测中心工作频率向高频移动了 260MHz,A-2 的实测与仿真结果几乎一致. 微带馈线上焊接的标准 SMA 接头引起了天线的输入阻抗改变,导致回波损耗有所恶化.

图 7 给出了在吸波暗室中测量的天线辐射方向图,A-2 的辐射方向图与 A-0 相比得到了改善. 另外测得 A-0、A-2 在端射方向的增益分别为 7.10 dBi

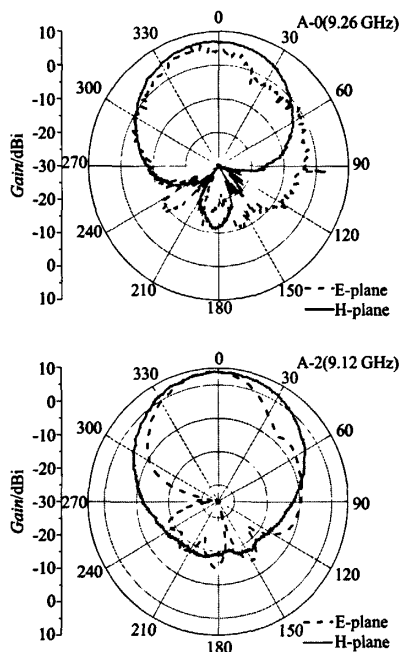


图7 A-0、A-2 辐射方向图(实测结果)

Fig.7 Measured radiation patterns of A-0 and A-2

和 8.98 dBi, A-2 的增益值比 A-0 提高了 1.88 dBi. 天线辐射方向图及增益的测量和仿真结果基本吻合, 证明了天线分析设计的正确性.

### 3 结论

本文在理论分析的基础上设计了一种基于加载电感传输线的高增益微带天线, 仿真和测量结果都表明: 与普通微带天线相比, 加载电感微带天线在中心工作频率保持不变的情况下辐射方向图得到了改善, 增益也得到了明显提高并具有可调性. 该种天线造价低廉、结构简单, 在工程上具有重要的应用价值.

### REFERENCES

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292: 77—79.
- [2] FANG Wei-Hai, XU Shan-Jia. New frequency selective surface composite of left-handed materials [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (方维海, 徐善驾. 由左手媒质构成的新的频率选择表面. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 121—124.
- [3] Caloz C, Itoh T. Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH transmission line [J]. *IEEE-AP-SUSNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Antonio, TX, 2002, 412—415.
- [4] Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(12): 2702—2712.
- [5] ZHANG Zhong-Xiang, ZHU Qi, XU Shan-Jia. Application of left-handed microstrip transmission line in the design for millimeter wave microstrip array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张忠祥, 朱旗, 徐善驾. 左手微带传输线在毫米波天线阵中的应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 341—343.
- [6] Li Yan, XU Shan-Jia, ZHANG Zhong-Xiang. Novel microstrip antenna array fed with left-handed transmission line [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李雁, 徐善驾, 张忠祥. 新型左手传输线馈电微带阵列天线. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 137—140.
- [7] Lai A, Leong Kevin M K H, Itoh T. Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(3): 868—876.
- [8] Pozar D M. *Microwave Engineering*, 3<sup>rd</sup> [M]. New York: John Wiley & Sons, 2005. (张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等. 微波工程, 第三版. 北京: 电子工业出版社(译), 2006.)
- [9] Kraus John D, Marhefka Ronald J. *Antennas: For All Applications*, 3<sup>rd</sup> [M]. New York: McGraw-Hill, 2002. (章文勋. 天线, 第三版. 北京: 电子工业出版社(译), 2005.)
- [10] Garg R, Bhartica P, Bahl I, et al. *Microstrip antenna design handbook* [M]. Boston: Artech House, 2001.

## 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,一直致力和专注于微波、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>