

文章编号 1005-0388(2008)02-0267-05

渐变表面左手介质表面波天线 散射特性分析*

黄 萌^{*} 徐善驾

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027)

摘 要 利用严格的模匹配与多模网络相结合的方法以及阶梯近似和阻抗转移技术分析了不同渐变曲线形状的左手介质表面波天线的反射与辐射特性, 着重研究了不同渐变形状对天线反射与辐射特性的影响。从电磁波散射的角度将辐射问题转化为表面波和空间波的传输问题, 从而使分析过程得到了极大的简化。分析表明左手介质表面波天线的辐射特性与传统右手情形有很多不同, 说明了产生这种不同的原因。所给出的计算结果对左手介质表面波天线的设计有实际参考意义。

关键词 左手介质表面波天线; 消失表面波; 反射和辐射

中图分类号 TN82

文献标志码 A

Analysis of scattering characteristics for left-handed planar surface wave antenna with tapering profiles

HUANG Meng XU Shan-jia

(Department of EEIS, University of Science and Technology of China,
Hefei Anhui 230027, China)

Abstract By combining the rigorous mode-matching method with the multi-mode network theory and the techniques of staircase approximation and impedance transformation, the reflection and radiation characteristics of left-handed (LH) planar surface wave antennas with different tapering profiles are analyzed. Emphasis is laid on the investigation on the effects of the tapering profile on the reflection and radiation properties of the antenna. The radiation problem is transformed into a propagation problem so as to tremendously simplify the calculation procedure. Extensive calculation results are obtained for the first time to show the difference of the radiation patterns between the present antennas and the right-handed ones to establish useful guidelines for the design of new kind of antennas.

Key words LH planar surface wave antenna; evanescent surface wave; reflection and radiation

1 引 言

左手材料是指其介电常数和磁导率同时为负的材料, 1967年 V. G. Veselago 最早在理论上分析了它的电动力学性质^[1]。近年来, 随着人工合成左手

材料的实现, 左手材料成为电磁领域研究的新热点。包括左手材料中导行模式的色散特性和波的逆向传播和辐射等许多基本问题的研究^[2,3]。已有的研究证明, 被右手介质包围的左手介质平板波导可以支持两种表面波模式, 一种是普通表面波模式, 另一种

是消失表面波模式。在本文中,我们讨论后者为工作模式的情形。

对于各种由常规右手介质构成的微波与毫米波表面波天线,例如圆形和矩形介质棒天线,人们已经对它们有过详细的分析^[4]。由于此类天线增益高,体积小并且价格低廉,非常适用于集成电路,因此,它们是毫米波短距离通讯系统收发模块的理想选择。在这样的背景下,我们不禁要问当右手介质被左手介质代替时传统表面波天线的上述优点还能保留吗?此时,天线的渐变形状对反射与辐射特性有什么样的影响呢?这正是本文想要回答的问题。

首先给出左手介质表面波天线的反射和辐射特性的分析方法。在此基础上,计算了不同渐变形状左手介质表面波天线的反射特性与辐射方向图。并且指出左手情况下的天线辐射特性与传统右手天线有很大的区别,同时对产生这种区别的原因进行了解释。文中给出的结果,对设计新型左手介质表面波天线有一定的参考意义。

2 天线的反射与辐射特性

图1给出了左手介质表面波天线立体结构及其侧视图。由于该结构以 yo 面为对称面且沿 y 方向无限延伸,因此分析时我们只需在恰当的边界条件下分析天线一半的结构。图中辐射方向角 θ 位于 xoz 平面内,为辐射方向与 z 方向的夹角。我们在远离天线上下表面放置无限大理想导电平板以离散连续谱,从而把辐射问题转化为一列空间波的传输问题。实际计算表明,只要导电平板距离介质表面大于5个波长即可得到稳定收敛的数值解。侧视图中实线表示天线真实的渐变表面。对于这种复杂的结构,很难用精确的解析方法来研究其表面波的散射和辐射特性。为了解决这一困难我们引入阶梯近似,如图中折线所示。阶梯近似后的天线结构可以看成是由一系列部分介质填充的均匀平板波导段

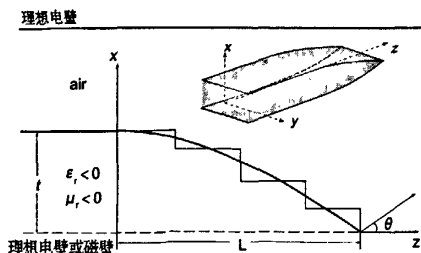


图1 左手介质表面波天线结构及其侧视图

级联而成,在每个连接面处存在阶梯不连续性。各个波导段都可以等效为一段传输线,将每段等效传输线级联就得到了表示整个天线结构的等效网络。这样,天线结构的反射和辐射特性的分析就变成了对导模在这个等效网络中的反射和传输问题的计算。

图2给出了处于 $z=z_i$ 和 $z=z_{i-1}$ 之间,长度为 l_i 的第 i 个波导段的截面图。在 $z=z_i$ 处它与第 $i+1$ 个波导段构成阶梯不连续性。从图2可以看到,每个阶梯不连续面处场的切向分量只在 x 和 y 方向上。这些场分量可以用一系列本征模展开。

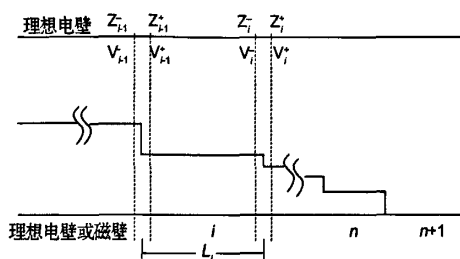


图2 阶梯级联结构截面图

第 i 个波导段中的TM模的电磁场可以写成如下形式

$$E_{iz}(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\epsilon_i(x)} \phi_n(x) V_{in}(z)$$

$$H_{iy}(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) I_{in}(z) \quad (1)$$

这里 ϕ_n 是第 i 个波导段中第 n 个本征模函数, V_{in} 和 I_{in} 分别代表其中第 n 个本征模的模式电压和模式电流。利用模匹配方法^[5],可以得到:

$$V_i^- = P_i V_i^+, \quad I_i^- = Q_i I_i^+ \quad (2)$$

其中 V_i 和 I_i 分别是第 i 个波导段中传输线电压、电流列向量, V_{in} 和 I_{in} 分别是它们的第 n 个元素。其上标的负、正号分别表示在不连续面的左、右侧。 P_i 和 Q_i 是不连续面两侧模式间的耦合矩阵。

由多模网络的阻抗定义,从 $z=z_i^-$ 面向右看去的输入阻抗矩阵 Z_i^- 可以由从 $z=z_i^+$ 面向右看去的输入阻抗矩阵 Z_i^+ 经过下面变换得到

$$Z_i^- = P_i Z_i^+ Q_i^{-1} \quad (3)$$

而从 $z=z_i^-$ 面向右看去的反射系数矩阵 Γ_i^- 可由下式确定:

$$\Gamma_i^- = [Z_i^- + Z_{oi}]^{-1} [Z_i^- - Z_{oi}] \quad (4)$$

然后利用阻抗转移公式,可以得到各段左侧端面向右看去的输入阻抗矩阵:

$$Z_{i-1}^+ = Z_{oi} [1 + H_i \Gamma_i^- H] [1 - H_i \Gamma_i^- H]^{-1} \quad (5)$$

这里 H_i 是第 i 个波导段的相移矩阵,它是一个对角矩阵,其对角元素表达如下。其中 β_i 为第 i 段传输线第 n 个模的传输常数, L_i 为第 i 段传输线的长度。

$$[H_i]_{nm} = e^{-j\beta_n L_i} \delta_{nm} \quad (6)$$

重复使用(3)~(5)式,就可以确定整个结构的反射系数矩阵,该矩阵的第一行第一列元素就是主模的反射系数,从而反射功率 P_{rfl} 可以很容易地求出。

第一个波导段的模式电压、电流列向量可以利用入射波矩阵表示,然后第 i 个波导段中模式电压、电流列向量即可由下式获得。式中 $[A_{mc}^+]$ 代表入射波矩阵。

$$[V_i^-] = ([I] + [I_i^-])[A_{mc}^+] \quad (7)$$

$$[I_i^-] = ([I] - [I_i^-])[A_{mc}^+] \quad (7)$$

$$[I_{i-1}^+] = [Q_{i-1}][I_i^-]$$

$$[V_{i-1}^+] = [Z_{i-1}^+][I_{i-1}^+] \quad (8)$$

$$[V_i^-] = 1/2([H_i] + [H_i]^{-1})[V_{i-1}^+] + 1/2([H_i] - [H_i]^{-1})[Z_{oi}][I_{i-1}^+] \quad (9)$$

$$[I_i^-] = 1/2([H_i] - [H_i]^{-1})[Z_{oi}]^{-1}[V_{i-1}^+] + 1/2([H_i] + [H_i]^{-1})[I_{i-1}^+]$$

经过上面推导,可以得到天线右端模式电压和电流列向量如下

$$[I_n^+] = [Q_n]^{-1}[I_n^-] \quad (10)$$

$$[Z_n^+] = [Z_{o(n+1)}]$$

$$[V_n^+] = [Z_n^+][I_n^+]$$

这样第 n 个模携带的辐射功率可以用天线右端与其对应的模式电压、电流计算得到

$$P_n = 1/2 \operatorname{Re}(V_n^+ (I_n^+)^*) \quad (11)$$

其辐射方向角由下式计算

$$\theta_n = \cos^{-1}(\beta_n/k_0) \quad (12)$$

最终,天线的辐射方向图可以由各个辐射模的功率及其对应的辐射方向角描绘出来。

3 数值结果

阶梯近似后的天线结构是由如图1所示的一系列左手介质平板所构成,在我们过去的工作(文献[6])中分析并给出了该平板波导结构的色散特性。分析证实该结构可以支持两种表面波模式:普通表面波模式和消失表面波模式,其中后者是左手平板结构下特有的表面波模式。它们之间的本质区别表现在左手介质板内波的横向传播波数 k_{zm} 上。前者的 k_{zm} 为实数($k_{zm} = \beta_{zn}$);后者的 k_{zm} 为正的纯虚数($k_{zm} = j\alpha_{zn}$)。而二者在板外区域中波的横向传播波数

k_{zm} 均为负的纯虚数($k_{zm} = -j\alpha_{zm}$)。这决定了消失表面波场沿 x 方向两侧均是衰减的,而不像普通表面波那样场在介质板内沿横向震荡,在板外沿 x 方向衰减。

文献[6]中图2的色散曲线,可知消失表面波的相速和群速是反向的,该表面波模式具有左手特性。图3给出了本文天线结构中传播常数随左手介质板厚度的变化关系。图中实线表示普通表面波,虚线表示消失表面波模式。由图3可见当 $d/\lambda \leq 0.674$ 时,除消失表面波外,其它所有的普通表面波模式均截止,这表明当厚度 $t \leq 0.674\lambda$ 时,天线是工作在单模消失表面波区域的。

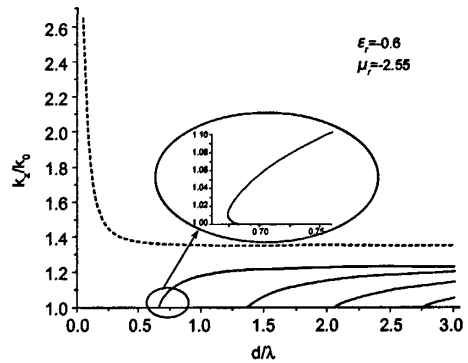


图3 左手介质板色散曲线

为了研究不同曲线形状渐变左手介质表面波光线的反射和辐射特性,我们选择了直线型 $[x=t(1-z/L)]$,抛物型 $[x=t\sqrt{1-(z/L)^2}]$ 和椭圆型 $[x=t\sqrt{1-(z/L)^2}]$ 三种渐变形状。图4给出了三种渐变形状 TM 模入射时天线的反射功率随 R 的变化曲线。横坐标 $R=L/t$ 反映了渐变曲线的形状比,其中 $t=0.5\lambda$ 。

从图4中可以看出,在介质板厚度相同的情况下,直线型渐变天线的反射功率随 R 的减小最快。为了达到最低的反射,天线渐变曲线形状在初始阶段的过渡应尽量平滑,例如椭圆型渐变;而天线末端变化应该尽量尖锐,譬如直线型渐变。左手介质表面波光线的这个特性与传统表面波光线的情形相类似,可参见[7]中图3。然而,左手介质表面波天线在 R 大于6时其反射功率已经小到可以忽略的程度,这比传统表面波天线(文献[7]中图3)为达到同样小的反射功率则 R 必须大于12的要求减小了一半。这是因为本文讨论的左手介质表面波天线工作于消失表面波模式,其场更多地集中于介质表面,从

而使得由介质表面的弯曲所造成的辐射更强,这不仅提高了辐射效率而且减小了反射。这个特性表明,本文所讨论的左手介质表面波天线与传统表面波天线相比,可以做到体积更小且更可靠。

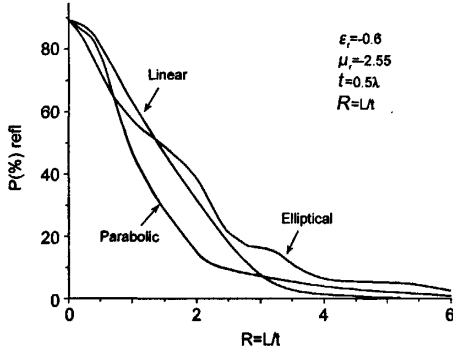


图4 不同渐变形状天线反射功率随 R 的变化

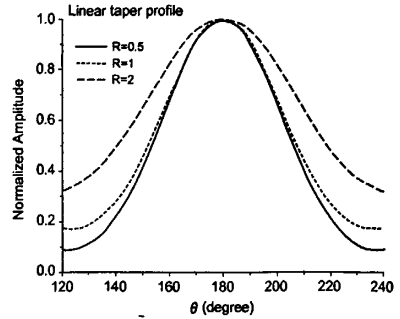
图5和图6给出了不同渐变形状左手介质表面波天线的辐射方向图。图中横坐标 θ 代表辐射方向角,它是辐射方向与 z 轴的夹角。由于天线工作在具有左手特性的消失表面波模式下,因此天线应具有后向辐射的特性。图5和图6所示的天线辐射方向图清楚地表明了左手天线这一独特的性质。

图5分别给出了三种渐变形状天线在厚度固定为 $t=0.2\lambda$ 时天线辐射方向图随 R 的变化。随着天线长度的增加,天线的3 dB波束宽度也跟着增大。这个特点与传统的表面波天线刚好相反。这是因为本文天线工作于消失表面波模式,其传播常数随着天线厚度的减小而增加,这与传统表面波天线的情形也刚好相反。这就是说, t 越小(也即 R 越大),传播常数(有效介电常数)也越大,此时电磁场更向介质内部集中,天线的有效口径变小,3 dB波束宽度也就跟着增大。

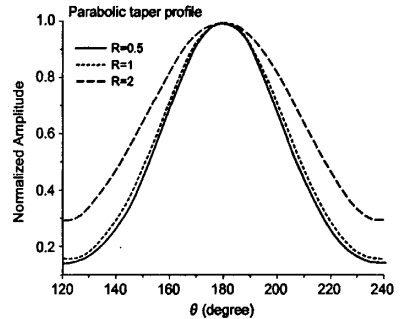
图6给出了在固定天线厚度 $t=0.2\lambda$ 且 $R=2$ 时不同渐变形状天线辐射方向图的比较。随着渐变表面从直线型向更平滑的椭圆型过渡,天线的3 dB波束宽度也逐渐减小。这是因为直线型左手介质表面波天线的有效介电常数最大,它的有效口径最小,因此有最宽的3 dB波束宽度。

由图5和图6可见为了获得尖锐的天线方向图,即小的3 dB波束宽度,必须选取较小的 R 值;而为了使天线的反射尽量小,必须选取较大的 R 值。这在左手渐变表面波天线设计中是一个矛盾,因此必须在 R 值的选取上做一个折衷的考虑,从而使设计最优化。

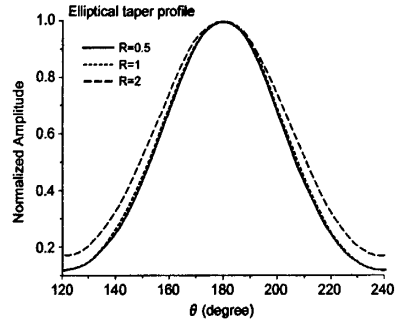
万方数据



(a)



(b)



(c)

图5 以 R 为参量的不同渐变形状天线辐射方向图

(a) 直线型 (b) 抛物型 (c) 椭圆型

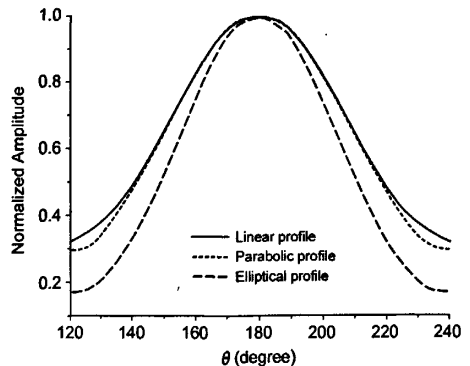


图6 不同渐变形状天线辐射方向图的比较 $t=0.2\lambda, R=2$

4 结论

提出了一种左手介质表面波天线,并利用严格的模匹配与多模网络相结合的方法分析了不同渐变曲线形状天线的反射与辐射特性。计算结果证实了左手天线的后向辐射特性。文中详细讨论了不同渐变形状对左手介质表面波天线反射特性和辐射方向图的影响,并与传统表面波天线的特性进行了比较,说明了产生不同结果的原因。这些研究结果对此类天线的设计具有实际指导意义。

参考文献

- [1] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Usp. Fiz. Nauk., 1967, 92: 517-526.
- [2] A Alú N Engheta. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or doublepositive (DPS) layers[J]. IEEE Trans on MTT, 2004, 52(1): 199-210.
- [3] Paolo Baccarelli, *et al.*. Fundamental Modal Properties of Surface Waves on Metamaterial Grounded Slabs[J]. IEEE Trans on MTT, 2005, 53(4): 1431-1442.
- [4] Wu Jianqiang, Xiong Caidong, Liu Shenggang. Excitation of microwave by an annular electron beam in a plasma-filled dielectric lined waveguide[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 16(9): 1573-1581.
- [5] S T Peng, A A Oliner. Guidance and leakage properties of a class of the open dielectric waveguides. Part I: Mathematical formulation[J]. IEEE Trans on MTT, 1981, 29(9): 843-855.
- [6] Meng Huang, Shanjia Xu, Ke Wu. Scattering and radiation characteristics of step discontinuity in left-handed slab waveguide operating in evanescent surface-mode[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 27(9): 1293-1306.
- [7] Shanjia Xu, S T Peng. Reflection Analysis for Planar Surface Antennas with Different Tapering Profiles[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 16(12): 2195-2208.

黄 萌 (1982—),男,河北人,中国科学技术大学电子工程与信息科学系博士生,主要从事介质导波结构不连续性问题研究。



徐善驾 (1939—),男,浙江人,中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授,博士生导师,IEEE Fellow。长期从事微波、毫米波和光波理论和技术方面的教学和科研工作。在国内外共发表论文520余篇。



(上接第238页)



丁大志 (1979—),男,江苏人,南京理工大学讲师,博士,2004年7月至2005年7月在香港城市大学电子工程系无线通信研究中心进修深造,担任 Research Assistant。从事电磁场与微波技术专业教学与科研工作。在国内外期刊及会议发表相关论文30多篇,其中18篇被SCI、EI收录。



陈如山 (1965—),男,江苏人,南京理工大学教授,博士生导师,现为中国电子学会高级会员,江苏省天线与微波专业委员会副主任委员,中国电子学会电磁兼容委员会委员,中国兵工学会电磁技术委员会委员,南京理工大学学报编委会委员,2004年获国家杰出青年基金,2007年被聘为教育部“长江学者奖励计划”特聘教授。研究领域包括第四代移动通信理论、通信与信息系统中的快速智能算法、微波毫米波集成电路与系统、电磁脉冲与瞬态电磁场、雷达与电磁兼容技术、计算电磁学。在国内外期刊杂志上发表了论文170多篇,SCI收录的论文90余篇,EI收录的论文80余篇。

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)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)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),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>