

文章编号:1005-6122(2006)06-0013-04

一种分析平板锥角喇叭天线辐射特性的新方法*

侯圣伟 徐善驾 王 峰

(中国科学技术大学电子工程信息科学系, 合肥 230027)

摘要: 给出了一种分析平板和平板锥角喇叭天线辐射特性的新方法。这种方法把天线辐射问题转换为波导不连续性结构的传输问题, 从而避免了传统天线分析方法中求解场源问题的困难, 大大简化了分析过程。同时, 采用将模匹配和多模微波网络理论相结合的方法来计算相关波导不连续性的传输问题, 使计算结果有较高的精度。通过计算值与理论值的比较, 证实了本文方法的有效性和精确性。

关键词: 平板天线, 平板锥角喇叭天线, 模匹配, 多模网络理论

A New Approach for Analysis of the Radiation Characteristics of Parallel-Plate Tapered Horn Antennas

HOU Sheng-wei, XU Shan-jia, WANG Feng

(Department of Electronic Engineering & Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: A new approach is presented to analyze the parallel-plate and tapered horn antennas, in which the radiation problem is transformed to solve the related discontinuity problem in waveguides, so that the difficulty caused by field-source problem of the traditional antenna analysis is avoided and the analysis procedure is tremendously simplified. Meanwhile, the method that combines the mode-matching approach with the multimode microwave network theory is used to solve the discontinuity problem obtained in the modeling for getting higher accuracy results. The validity and accuracy of the present approach are verified by the comparison between the computed and the theoretical results.

Key words: Parallel-plate antennas, Tapered horn antennas, Mode-matching, Multimode microwave network theory

引 言

平板天线和平板锥角喇叭天线是两种结构简单, 使用方便的天线结构, 对其辐射特性的分析在天线工程设计中具有重要的实际意义。文献[1]对平板天线采用积分方程法进行了分析, 分析过程比较复杂, 而且所得到的结果只有在天线口径尺寸小于工作波长时才足够精确, 存在较大的局限性。传统上, 往往把天线辐射特性的分析归结为对复杂的开域场源问题的求解, 为了避免求解场源问题的困难, 本文采用如图1和图2所示的处理方法, 在离平板和平板锥角喇叭天线两侧足够远的地方引入理想导电板, 计算表明, 只要对称理想导电板的间距大于5个传输波的波长就能够在工程上可以接受的精度内

把天线的辐射问题转化成相应不连续性结构的传输问题。这是因为外加电壁使得电磁波谱离散化为波导模, 其中的传输模就对应于连续谱中的辐射模; 当两个外加理想电壁距离逐渐变大时, 空间传输模个数不断增多而趋近连续谱, 下一节将说明: 此时对传输模传输特性的分析可以很好地趋近于实际的天线辐射情况。为了获得较高的计算精度, 文中使用多模网络与模匹配方法相结合的方法来求解所得到的导波不连续性的传输问题。另外, 在对平板锥角喇叭天线的分析中, 我们对锥形波段进行阶梯近似, 使用多模网络阻抗转移技术对此多级阶梯结构进行分析, 进一步简化了求解过程。通过计算结果和理论结果的比较, 证明了本文方法具有简单有效的优点。

* 收稿日期: 2005-07-11; 定稿日期: 2005-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60471037)

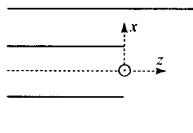


图1 平板天线对应的阶梯不连续性

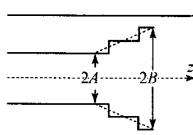


图2 平板锥角喇叭天线对应的阶梯不连续性

1 平板天线辐射特性的分析及数值结果

1.1 理论分析

我们以E面平板天线为例来说明整个分析和计算过程。为简化分析,我们设定只有主模TEM模入射,而且入射面为 xoz 平面,即 $k_y=0$ 。对E面天线而言,内部的横向电场沿 x 方向,所以图1中的 yoz 面可视为电壁,即可以简化为图3所示结构。求解区域2、3中各传输模的功率及其相应的辐射方向,就可以得到天线的功率辐射方向图。

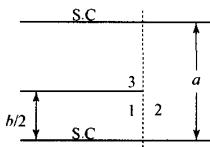


图3 E面平板天线分析简化图

首先求解区域2和区域3中各个传输模的功率。取区域1、3的复合电压、电流模向量: $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_3]^T$, $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1 \mathbf{I}_3]^T$, 可以证明有:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Q}\mathbf{I}_2 \text{ 和 } \mathbf{V} = \mathbf{Q}\mathbf{V}_2$$

其中, $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_{12} \mathbf{Q}_{32}]^T$ 是区域1、3相对于区域2的复合耦合系数矩阵, \mathbf{Q}_{12} 和 \mathbf{Q}_{32} 分别是区域1、2间以及区域3、2间的耦合系数矩阵, 因篇幅所限, 其元素表达式从略。由此, 可推得区域1、3的复合负载导纳矩阵为: $\mathbf{Y} = \mathbf{Q}\mathbf{Y}_{02}\mathbf{Q}^T$, 进而得到区域1、3的复合终端反射系数矩阵

$$\Gamma = (\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y})^{-1}(\mathbf{Y}_0 - \mathbf{Y})$$

其中 \mathbf{Y}_{02} 为区域2的特征导纳矩阵, $\mathbf{Y}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{01} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{03} \end{bmatrix}$ 为区域1、3的复合特征导纳矩阵。

按上述方法求得复合反射系数矩阵之后, 就可以按下述步骤得到各个模的传输功率:

(1) 计算区域3的模电压向量 \mathbf{V}_3

$$[\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_3]^T = [\mathbf{I} + \mathbf{F}] \mathbf{V}^+$$

其中 $\mathbf{V}^+ = (1, 0, 0, \dots)^T$ 为入射波的复合电压列向量, \mathbf{V}_1 对应于区域1的终端模电压列向量, \mathbf{V}_3 对应于区域3的模电压列向量。

(2) 计算区域2的模电压向量 \mathbf{V}_2

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{Q}^T [\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_3]^T$$

(3) 计算区域2和区域3的传输功率

$$\mathbf{P}_{im} = \varepsilon_m \mathbf{V}_{im}^T \mathbf{V}_{im} \mathbf{Y}_{0im}$$

其中 $i = 2, 3$ 对应于区域2和区域3。 m 对应于模数。常系数 $\varepsilon_m = \begin{cases} 2 & m = 0 \\ 1 & m \neq 0 \end{cases}$ 。

第二步就是确定传输模的辐射方向。由于入射波由1区沿正 z 方向输入,因此区域2中传输模沿正 z 方向传输,而区域3中传输模沿负 z 方向传输。区域2、3中传输模的辐射方向可由 kx 和 kz 来决定。

区域2中传输模的辐射方向为 $\theta_n = \arctan \frac{k_{nx}}{k_{nz}}$, 区域

3中传输模的辐射方向为 $\theta_m = \pi - \arctan \frac{k_{mx}}{k_{mz}}$ 。区域2、3中各传输模的功率大小和辐射方向都确定后,就可以描绘出天线的功率辐射方向图。

上述分析过程同样适合于对H面平板天线特性的计算,只是由于H模的场分布与E模的不同, yoz 平面应等效为理想磁壁,同时在计算各个耦合系数矩阵元素时应使用适合H模的归一化正交基函数。

1.2 数值结果

图4所示为E面、H面平板天线功率方向图的数值计算值和理论值的比较。其中E面、H面天线口径尺寸分别为2.73个波长和3.73个波长;实线为数值计算得到的结果,圆点为理论值^[2]。数值结果和理论值吻合得非常好,证明了本文方法的有效性。

2 平板锥角喇叭天线辐射特性的分析及数值结果

2.1 理论分析

我们仍以E面平板锥角喇叭天线为例来说明分析过程。基于和第1节分析E面平行平板天线时相同的假设,图2中的对称面 yoz 等效为理想电壁,如图5所示。

首先求出传输模功率。为此:

(1) 计算 $z = z_{ml}$ 处区域1、3的复合负载导纳矩阵 \mathbf{Y} :

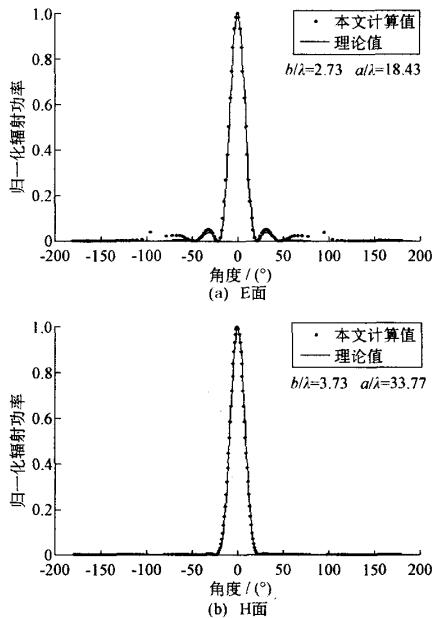


图4 平板天线功率方向图数值计算值与理论值比较

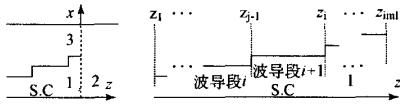


图5 E面平板锥角喇叭天线分析的简化图

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Q} \mathbf{Y}_{02} \mathbf{Q}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11 M \times M} & \mathbf{Y}_{13} \\ \mathbf{Y}_{31} & \mathbf{Y}_{33 N \times N} \end{bmatrix}, M \text{ 和 } N \text{ 分别}$$

表示区域1、3中选取的模数。

(2) 计算 $z = z_{iml}$ 处的区域1的负载导纳矩阵 \mathbf{Y}_{iml} 和反射系数矩阵 $\mathbf{\Gamma}_{iml}$:

$$\mathbf{Y}_{iml} = \mathbf{Y}_{11} - \mathbf{Y}_{13} (\mathbf{Y}_{33} + \mathbf{Y}_{03})^{-1} \mathbf{Y}_{31}$$

$$\mathbf{\Gamma}_{iml} = (\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}_{iml})^{-1} (\mathbf{Y}_0 - \mathbf{Y}_{iml})$$

(3) 由 $\mathbf{\Gamma}(z_i^-)$ 求出 $\mathbf{\Gamma}(z_{i-1}^+)$ 和 $\mathbf{\Gamma}(z_{i-1}^-)$, 从 z_{iml} 开始逐级计算阶梯处的反射特性。

$$\mathbf{\Gamma}(z_{i-1}^+) = \mathbf{H}_i \mathbf{\Gamma}(z_i^-) \mathbf{H}_i$$

$$\mathbf{Y}(z_{i-1}^+) = \mathbf{Y}_{0i} (\mathbf{I} - \mathbf{H}_i \mathbf{\Gamma}(z_i^-) \mathbf{H}_i) (\mathbf{I} + \mathbf{H}_i \mathbf{\Gamma}(z_i^-) \mathbf{H}_i)^{-1}$$

$$\mathbf{\Gamma}(z_{i-1}^-) = (\mathbf{Y}_{0(i-1)} + \mathbf{Y}(z_{i-1}^+))^{-1} (\mathbf{Y}_{0(i-1)} - \mathbf{Y}(z_{i-1}^+))$$

其中, $\mathbf{Y}_{0i} = \text{diag}\{k_0^2 / \omega \mu \beta_m\}$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ 为第 i 段波导的特征导纳矩阵; $\mathbf{H}_i = \text{diag}\{e^{-j\beta_{im} l_i}\}$ 是第 i 段波导的相移矩阵。

(4) 由 $\mathbf{\Gamma}(z_1^-)$ 求 $\mathbf{V}(z_1^-)$, \mathbf{V}_{in}^+ 表示入射波模电压向量:

$$\mathbf{V}(z_1^-) = (\mathbf{I} + \mathbf{\Gamma}(z_1^-)) \mathbf{V}_{in}^+$$

(5) 由 $\mathbf{V}(z_{i-1}^+)$ 求 $\mathbf{V}(z_i^-)$, 由 $\mathbf{V}(z_i^-)$ 求 $\mathbf{V}(z_i^+)$,

从 z_1 开始,逐级求解得到 z_{iml} 处区域1的模电压向量 \mathbf{V}_{iml} 。

$$\mathbf{V}(z_i^-) = (\mathbf{I} + \mathbf{\Gamma}(z_i^-)) \mathbf{H}_i (\mathbf{I} + \mathbf{\Gamma}(z_{i-1}^+))^{-1} \mathbf{V}(z_{i-1}^+)$$

$$\mathbf{V}(z_i^+) = \mathbf{Q}(z_i) \mathbf{V}(z_i^-)$$

(6) 由 \mathbf{V}_{iml} 计算 \mathbf{V}_2 和 \mathbf{V}_3 :

$$\mathbf{V}_2 = (\mathbf{I} + \mathbf{Q}_{23}^T \mathbf{Z}_{03} \mathbf{Q}_{23} \mathbf{Y}_{02})^{-1} \mathbf{Q}_{12}^T \mathbf{V}_{iml}$$

$$\mathbf{V}_3 = -\mathbf{Z}_{03} \mathbf{Q}_{23} \mathbf{Y}_{02} \mathbf{V}_2$$

在此基础上就可以按照和第1节完全相同的方法确定平板锥角喇叭天线结构中各个传输模的功率。各传输模辐射方向的确定和第1节的结论也完全相同。

上述分析过程也完全适合于H面平板锥角喇叭天线,差别也只是归一化正交基函数的不同。

2.2 数值结果

图6和图7分别给出了不同参数下平板锥角喇

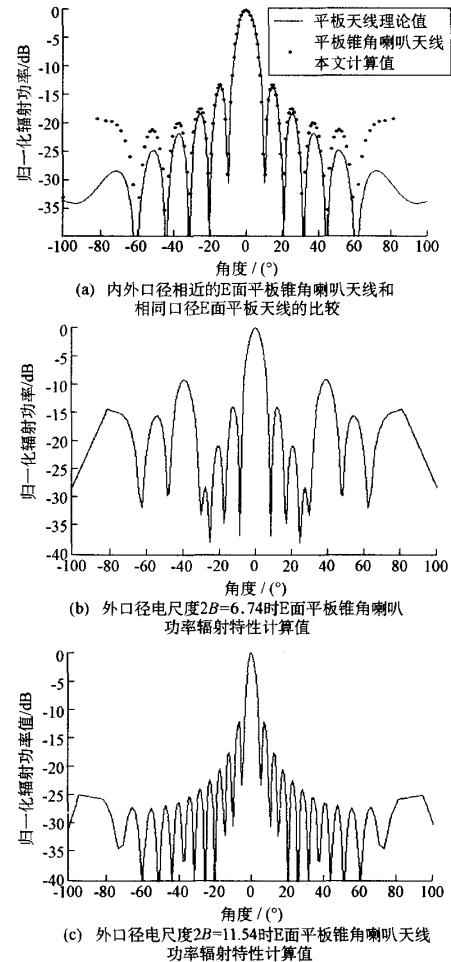


图6 不同参数下E面锥角喇叭天线功率方向图

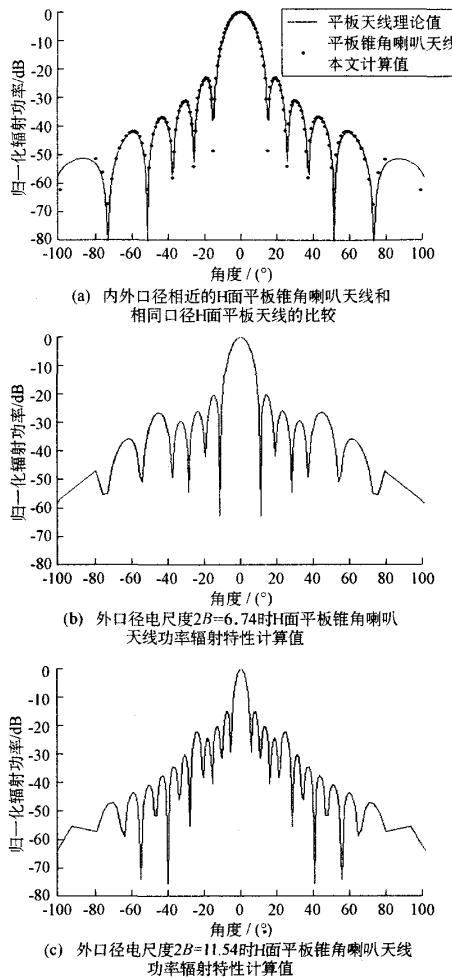


图7 不同参数下H面平板锥角喇叭天线功率方向图

喇叭天线E面和H面功率方向图。图中具体说明了E面和H面平板锥角喇叭天线功率方向图随参数的变化情况。其中内口径尺度 $2\bar{A}$ 设定为5.74个波长,喇叭长度 \bar{L} 设定为4.54个波长,由小到大地改变天线外口径电尺度 $2\bar{B}$ 。图6(a)和图7(a)中的圆点显示的是口径电尺寸为5.74的E面(H面)平板天线的功率辐射特性,实线是外口径电尺度为5.76的E面(H面)平板锥角喇叭天线的功率辐射特性。由图可见,在E面(H面)喇叭的内外口径尺寸差别不大时,E面(H面)平板锥角喇叭的辐射特性和E

面(H面)平板天线相近,这和物理事实是相符的。由图6和图7还可以看到,随着外口径的逐渐增大,方向图主瓣的宽度总的趋势是逐步变窄,但对比前两幅子图可见,在小的变化范围内观察时,主瓣不会明显变窄,而主要是旁瓣电平的变化。通过对比图6和图7各自前两幅子图旁瓣电平的变化情况,可以发现H面天线旁瓣电平明显弱于E面天线,这和文献[2]中分析的结果也是完全一致的。对比三幅子图还可以看出,随着 $2\bar{B}$ 的增大,旁瓣数目会跟着增多。这些特性和理论分析的结果均是一致的。数值计算结果所显示出的变化趋势和文献[2]的理论分析的一致性,再次证明了本文方法的有效性。

3 结论

本文通过将天线辐射问题转换为波导不连续性结构的传输问题来分析平板锥角喇叭天线辐射特性,简化了分析过程。使用多模网络与模匹配法相结合的方法求解所得到的导波不连续性的传输问题,提高了计算精度。通过比较计算结果和理论结果,证明了本文方法的有效性和精确性。

参 考 文 献

- [1] Marcuvitz N. Waveguide Handbook, New York: McGraw-Hill, 1951
- [2] 顾瑞龙, 沈民谊, 等. 微波技术与天线. 北京: 国防工业出版社, 1979
- [3] 张 钧. 导波中不连续性问题. 长沙: 国防科技大学出版社, 1990
- [4] 徐善驾, 王 峰. 张角圆锥喇叭天线反射特性的模匹配法分析. 电子学报, 1996, 24(12): 17~20
- [5] 徐善驾, 张利军. 渐变平板表面波天线反射和辐射特性的分析. 通信学报, 1997, 18(10): 22~26
- [6] Schwinger J, Saxon D S. Discontinuities in Waveguides, New York: Gordon and Breach, 1968

侯圣伟 男, 2005年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 获工学学士学位, 现于新加坡国立大学电气计算机工程系攻读博士学位, 研究方向为阵列信号处理、多天线通信技术。

徐善驾 男, 中国科学技术大学教授、博导。

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)，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>