

串行角馈微带天线的理论分析和实验

Analysis and Experiments of Serial Corner-Fed Microstrip Antenna

高式昌 钟顺时

(上海大学通信工程系, 上海 201800)

GAO Shichang, ZHONG Shunshi

(Shanghai University, Shanghai 201800)

【摘要】 本文基于多端口网络模型、腔模理论和分片法,首次给出串行角馈微带天线输入阻抗的一种有效的理论分析方法,导出其闭合表达式。实验结果验证了理论的正确性。采用本方法计算方便,适于工程应用。

关键词: 微带天线, 多端口网络模型, 串行角馈

Abstract: Based on the multiport network model, the cavity theory and segmentation technique, an efficient method is developed for analyzing the input impedance of the serial corner-fed microstrip antenna. Closed form expressions are derived also. The experimental results validate the theory. The present method is convenient for computation, thus suitable for engineering applications.

Key terms: Microstrip antenna, Multiport network model, Serial corner-fed

一、引言

微带天线具有体积小、重量轻和造价低等优点,已在现代通信、雷达等各个领域得到广泛的应用。串行角馈的方形微带天线具有馈电方便、馈电网络小等优点,适用于低造价的天线阵列设计^[1]。但至今对于这种天线的设计仍是半经验性的。由于这种天线同时工作于两个正交的谐振模,不能直接用传输线理论来分析。在薄基片的情况下腔模理论虽然可以较准确地用于对通常的微带边馈(非角馈)贴片天线的分析,但对于串行角馈贴片,由于微带馈线与贴片连接关节处的特点,其计算结果与实测值差异较大。采用多端口网络模型虽然可较精确地考虑微带馈线与贴片的连接,但它将天线的辐射损耗、表面波损耗等归结为贴片边缘上若干细小端口的导纳值,而将微带贴片的边缘效应归结为各端口的电容值,实际上这些导纳和电容值很难精确定出,因而造成计算上的误差^[2]。基于分层介质并矢格林函数的全波分析法尽管严格,但须处理

若干包含奇点的二维无穷积分,计算量很大^(3,4)。本文从实际工程应用的角度出发,综合运用多端口网络模型、腔模理论和分片法,充分考虑了串行角馈时馈线与贴片连接关节处的特点,给出串行角馈方形微带天线的理论分析方法,导出其输入阻抗的闭合表达式。实验结果与理论值符合较好。

二、理论分析

图1(a)为本文所研究的串行角馈方形微带天线,其两条边长度均为 a 。假设基片厚度 d 远小于工作波长 λ ,故对此天线的分析可采用平面微波电路的模型,根据分片法,可将该天线分为三块,块1为一正方形,块2为等腰三角形,块3为微带传输线,分块后如图1(b)所示。由多端口网络模型和分片法可知,平面电路的边缘可看作由若干个具有一定宽度的端口组成,各相邻块之间通过公共边上的这些端口互连。在块1与块2连接处,块1上的各个端口统称为 p 端口,块2上的统称为 q 端口。在块2与块3连接处,块2上的各个端口统称为 e 端口,块3上的统称为 f 端口。块3上的输出端口为 r 端口。

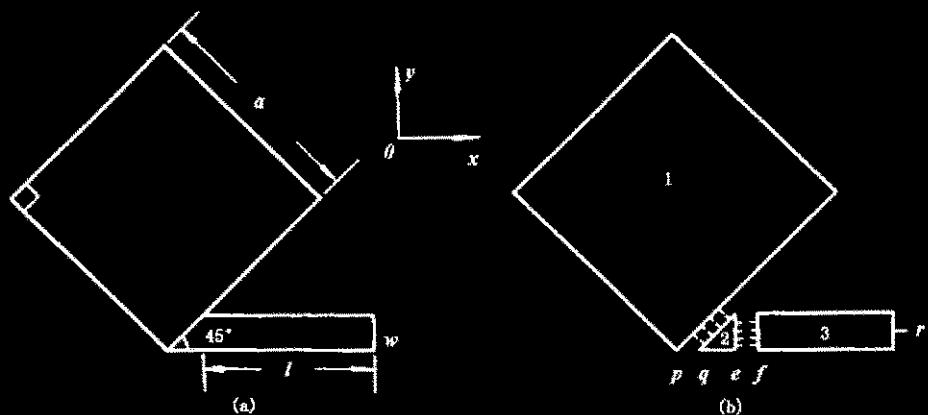


图1 串行角馈方形微带天线

先求块1的格林函数。由多端口网络模型得其格林函数的方程为

$$(\nabla_T^2 + k^2)G_1(r|r_0) = -j\omega\mu d\delta(r - r_0)$$

由边界条件 $\frac{\partial G_1}{\partial n} = 0$ 得

$$G_1(x, y|x_0, y_0) = \frac{j\omega\mu d}{a^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma_m \sigma_n \cos(k_x x_0) \cos(k_y y_0) \cos(k_x x) \cos(k_y y)}{k_x^2 + k_y^2 - k^2} \quad (1)$$

式中

$$k_x = \frac{m\pi}{a}, k_y = \frac{n\pi}{a}, \sigma_i = \begin{cases} 1 & i = 0 \\ 2 & i \neq 0 \end{cases}$$

d 为基片厚度。为考虑天线的辐射损耗、表面波损耗等效应,同时避免多端口网络模型中确定边缘各端口电导的困难,这里采用了腔模理论中已被实验证明是较成功的方法,即用 k_{eff} 代替 k ;类似地,为避免多端口网络模型中确定边缘各端口电容的困难,计算中采用 a_c 代替 a ,则有

$$k_{eff} = k_0 \sqrt{\epsilon_r(1 - j\tg\delta_{eff})}, \quad \tg\delta_{eff} = \frac{P_r + P_e + P_d + P_{sw}}{2\omega W_c}$$

$$\alpha_e = a + 0.824d \left(\frac{\epsilon_{re} + 0.3}{\epsilon_{re} - 0.258} \right) \left(\frac{a + 0.264d}{a + 0.8d} \right)$$

P_r, P_c, P_d, P_{sw} 分别为天线的辐射损耗、导体损耗、介质损耗和表面波损耗, W_e 是谐振时空腔的时间平均电储能, ϵ_{re} 为等效相对介电常数。可用 $k = k_0 \sqrt{\epsilon_r(1-jtg\delta)}$ 为初值, 利用叠代法确定 k_{eff} 。块 1 上的端口 i 和端口 j 之间的互阻抗为

$$Z_{ij} = \frac{1}{w_i w_j} \int \int G_1(s|s_0) ds ds_0 \quad (2)$$

w_i 和 w_j 分别为端口 i 和端口 j 的宽度, ds 和 ds_0 分别为沿端口 i 和 j 的积分。由式(2)可求出块 1 的阻抗矩阵, 使电压矩阵 $[V_p]_{N \times 1}$ 和电流矩阵 $[I_p]_{N \times 1}$ 满足 $[V_p]_{N \times 1} = [Z_{pp}]_{N \times N} [I_p]_{N \times 1}$ 对块 2, 利用本征展开后得出格林函数为

$$G_z(x, y | x_0, y_0) = \frac{j\omega\mu d}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma_m \sigma_n T(x, y) T(x_0, y_0)}{(m^2 + n^2) \pi^2 - \omega^2 k^2} \quad (3)$$

式中 $T(x, y) = \cos \frac{m\pi x}{w} \cos \frac{n\pi y}{w} + (-1)^{m+n} \cos \frac{n\pi x}{w} \cos \frac{m\pi y}{w}$

w 为微带线的宽度。类似式(2)的步骤, 可求出块 2 的阻抗矩阵, 使电压矩阵和电流矩阵间满足

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_q \end{bmatrix}_{(M+N) \times 1} = \begin{bmatrix} Z_{ee} & Z_{eq} \\ Z_{qe} & Z_{qq} \end{bmatrix}_{(M+N) \times (M+N)} \begin{bmatrix} I_e \\ I_q \end{bmatrix}_{(M+N) \times 1}$$

根据微带线的平面波导模型, 块 3 可视为一矩形, 格林函数为

$$G_3(x, y | x_0, y_0) = \frac{j\omega\mu d}{l w} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma_m \sigma_n \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_x x_0) \cos(k_y y_0)}{k_x^2 + k_y^2 - k^2} \quad (4)$$

式中

$$k_x = \frac{m\pi}{l}, k_y = \frac{n\pi}{w}$$

计算中用 w_{eff} 代替 $w^{[5]}$

$$w_{eff} = \frac{120\pi d}{Z_0(f) \sqrt{\epsilon_{re}(f)}}, \quad \epsilon_{re}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{re}}{1 + G(f/f_p)^2}$$

$$Z_0(f) = Z_0 - \frac{Z_{0T} - Z_0}{1 + G(f/f_p)^2}, \quad G = (\frac{Z_0 - 5}{60})^{1/2} + 0.004Z_0, f_p = \frac{15.66Z_0}{d}$$

Z_0, ϵ_{re} 分别为微带线的特性阻抗和等效相对介电常数, Z_{0T} 为基片厚度 $2d$, 宽 w 的微带线特性阻抗的两倍。类似地可求出块 3 的阻抗矩阵, 满足

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_f \end{bmatrix}_{(M+1) \times 1} = \begin{bmatrix} Z_{rr} & Z_{rf} \\ Z_{fr} & Z_{ff} \end{bmatrix}_{(M+1) \times (M+1)} \begin{bmatrix} I_r \\ I_f \end{bmatrix}_{(M+1) \times 1}$$

先合并块 1 和块 2, 连接处各端口的互连条件为

$$[V_p]_{N \times 1} = [V_q]_{N \times 1}, \quad [I_p]_{N \times 1} + [I_q]_{N \times 1} = 0$$

由此得出块 1、2 合并后的阻抗矩阵为

$$[V_e]_{M \times 1} = ([Z_{ee}] - [Z_{eq}]([Z_{pp}] + [Z_{qq}])^{-1} [Z_{qe}]) [I_e]_{M \times 1}$$

再与块 3 合并, 利用连接处各端口的互连条件推导得块 1、2、3 合并后的一维阻抗矩阵元素为

$$Z_r = Z_{rr} + [Z_{rf}] \{ [Z_{ff}] + [Z_{ee}] - [Z_{eq}]([Z_{pp}] + [Z_{qq}])^{-1} [Z_{qe}] \}^{-1} [Z_{fr}] \quad (5)$$

通常取 $l = \lambda_g/4$, 故天线的输入阻抗为

$$Z_{in} = Z_0^2 / Z_r \quad (6)$$

其中 Z_0 为微带线的特性阻抗。利用该分析模型可导出贴片天线四条边上各端口的电压值, 从而进一步得出天线的方向图等, 详细步骤见文献[3]。

三、串行角馈微带天线的设计与实验

基于前面的理论分析, 用 Fortran 语言编制了相应的设计软件。利用该软件设计并实际制作了一副天线。此串行角馈微带天线的设计参数为 $\epsilon_r = 2.8$, $d = 0.8\text{mm}$, $w = 0.4\text{mm}$, $a = 15.0\text{mm}$ 。用 HP-8510B 网络分析仪对其进行测量, 图 2(a), (b) 分别为天线阻抗实部 R 和虚部 X 随频率 f 变化的情况, 给出本文理论方法的计算值与实验值的比较, 以及利用腔模理论的计算结果。可见, 对这种天线直接使用腔模理论方法计算时的谐振电阻为 600Ω , 而实测的谐振电阻仅为 170Ω , 相差甚远; 谐振频率的理论值亦与实测相差约 0.11GHz , 因此在串行角馈微带天线的工程设计中, 直接利用腔模理论会导致设计的严重偏差, 这点应加以重视。用本文理论计算的天线谐振电阻和谐振频率均与实验值基本符合, 从而验证了本方法的有效性。

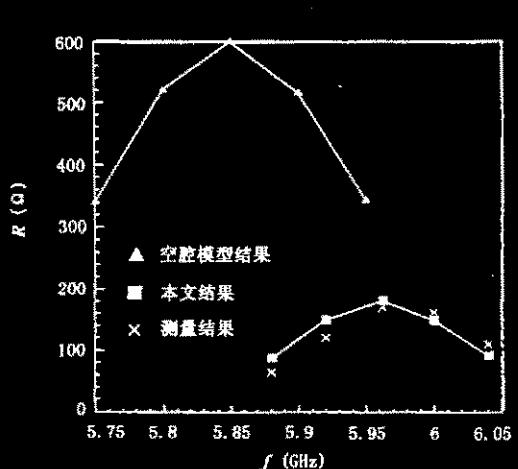
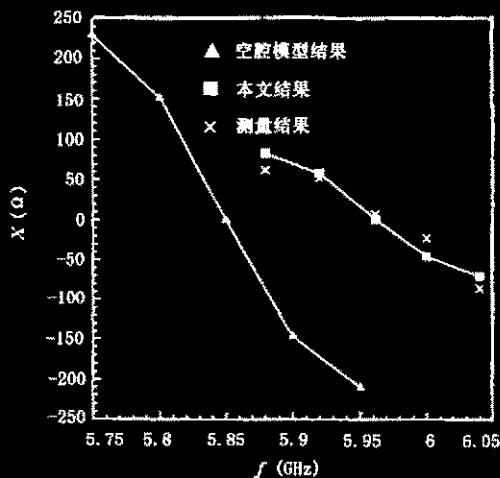
(a) 实部 R 与频率关系(b) 虚部 X 与频率关系

图 2 天线输入阻抗的理论计算与实验结果的比较

四、结 论

由于串行角馈微带天线馈线结构的特点, 对其输入阻抗至今尚没有适合工程应用的理论分析方法。用腔模理论直接进行计算的结果与实测值相差较远, 而利用并矢格林函数的全波分析方法则计算量很大。本文综合运用多端口网络模型、腔模理论和分片法, 给出薄基片条件下串行角馈微带天线的理论分析方法, 导出其输入阻抗的闭合表达式。实验结果与理论值比较一致。本方法计算方便, 适合于实际工程应用。基于此方法, 已成功地设计了一副高隔离度的双极化天线阵^[6]。

参 考 文 献

- [1] J. P. Daniel, et al. Design of low cost printed antenna array. *Proc. ISAP'85*, Kyoto, Aug., 1985: 121~124.
- [2] K. C. Gupta. Multiport network modeling approach for computer-aided design of microstrip patches and arrays. *IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Sym. Dig.*, 1987: 786~789.
- [3] J. R. James, P. S. Hall. *Handbook of Microstrip Antennas*, P. Peregrinus Ltd., London, 1989: 647~679.
- [4] 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [5] K. C. Gupta, R. Garg, L. J. Bahi. *Microstrip Lines and Slotlines*, Dedham, MA: Artech House, 1979.

- [6] S. C. Gao, S. S. Zhong. Dual-polarized microstrip antenna array with high isolation fed by coplanar network. *Microwave and optical technology letters*, 1998, Oct, 20.

高式昌 1972 年生, 分别于 1993 和 1995 年获得理学学士和工学硕士学位。1993 至 1996 年在中国电波传播研究所通信系统工程研究室从事移动通信电波传播和通信系统设计等研究工作, 现为上海大学通信工程系博士生, 曾获上海市创造发明奖, 震旦奖和 SBT 奖学金。研究方向为有源微带天线阵列和电磁场数值计算方法。

钟顺时 上海大学通信与信息学院教授, 博士生导师, 1960 年西安军事电信工程学院毕业, 1980—1982 年美国华盛顿大学和伊利诺伊大学访问学者, 长期从事电磁场与微波技术专业的教学与科研。曾获国家和部省级科技进步奖 7 项, 部省级优秀教材奖 3 项, 专利 2 项, 著译 4 部, 论文约 100 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>