

混合天线及基于散射矩阵的波束形成

王 静 郭陈江 丁 君 许家栋

(西北工业大学电子信息学院 西安 710072)

摘要:本文提出一种由横向馈源阵列放置在反射面顶端构成的混合天线系统,采用了并矢格林函数法对系统中阵列馈源面和反射面孔径面处的场进行计算,然后导出散射矩阵,并通过散射矩阵的计算、分析来研究混合天线系统中的波束形成问题。通过合理的分析与设计,可以使该天线的波束扫描范围达到数百个波束宽度,而所采用的阵列的单元数量较常规阵列天线少得多。从本文给出的实例可以看出,这种天线在 $\pm 20^\circ$ 扫描角范围内,波束形状基本保持不变,实现了较大角域内的波束扫描。

关键词:混合天线; 散射矩阵; 波束形成

中图分类号: TN919 文献标识码: A

Hybrid antenna and beam forming based on scatter matrix

Wang Jing Guo Chenjiang Ding Jun Xu Jiadong

(School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: In this paper, a hybrid antenna system which was composed by putting a feed array near the apex of a compound reflector has been discussed. The dyadic Green's function was used to compute the electric or magnetic field at the feed array and the reflector aperture which can be used to compute the scatter matrix of the system. The scatter matrix was then used to further analyze the beam forming of the system. Through proper design of the hybrid antenna system, the beam scanning can reach hundreds of beam width and the elements of feed array used are much less than the regular feed array. From the example given in this paper, we can find out that when the scanning angle is within $\pm 20^\circ$, the beam keeps the same and the system realizes wide-angle scan.

Keywords: hybrid antenna; scatter matrix; beam forming

0 引言

常规反射面天线采用点源馈电来产生窄波束,通过反射面修形或馈源的特殊设计产生特殊形状的波束。本文研究了利用阵列馈电的反射面天线系统,即混合天线系统。由文献[1]可知,通过合理的分析与设计可以使混合天线的波束扫描范围达到数百个波束宽度,而所采用的阵列的单元数量较常规阵列天线少得多。在对混合天线进行分析设计时常用散射矩阵法,这种方法将整个混合天线系统看作一个N端口网络,其中一些端口与物理馈源(阵列孔径)相关,其他端口与反射面孔径相关。散射矩阵提供了馈源孔径场和天线孔径场间的场量变换。本文将此技术应用于混合天线的分析,对散射矩阵进行数值计算,并对混合天线中波束形成进行了研究。

1 TCH 系统

横向混合合成系统(transverse compound hybrid, TCH)如图1所示。它是由放置在反射面顶端的一个横向馈源阵

列与反射面共同构成的混合天线系统:馈源平面平行于x轴($-15\lambda, 15\lambda$),反射面孔径面也平行于x轴($-30\lambda, 30\lambda$)。

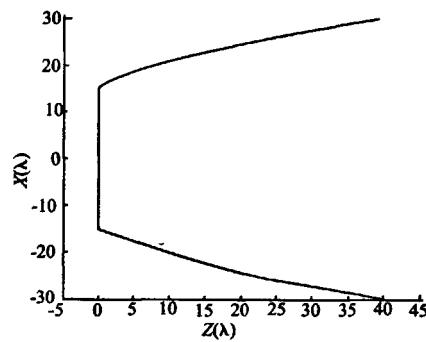


图1 TCH 系统

本文就文献[1]提出的TCH优化设计结果进行分析,优化后的上反射面方程为:

$$z(x) = -1.554 \times 10^{-23} x^{10} + 4.01 \times 10^{-21} x^9 - 2.519 \times 10^{-19} x^8 + 4.961 \times 10^{-17} x^7 + 2.108 \times 10^{-15} x^6 - 2.998 \times 10^{-11} x^5 + 2.922 \times 10^{-3} x^2 + 0.235 x - 118.8$$

下反射面方程为:

$$z(x) = z(-x)$$

本文处理的是二维情况,反射面 $y=0$,即在 xoz 平面上。

2 散射矩阵的计算

可将一 TCH 系统看作一个 N 端口网络,将该网络的

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^- \\ \vdots \\ \mathbf{a}_N^- \\ \mathbf{f}_1^- \\ \vdots \\ \mathbf{f}_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N_s 1} & \cdots & S_{N_s N_s} \\ S_{(N_s+1)1} & \cdots & S_{(N_s+1)N_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{NN_s} & \cdots & S_{NN_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^+ \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{N_s}^+ \\ \mathbf{f}_1^+ \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{N_s}^+ \end{bmatrix} \quad (1)$$

简记为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}^- \\ \mathbf{f}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{aa} & \mathbf{S}_{af} \\ \mathbf{S}_{fa} & \mathbf{S}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}^+ \\ \mathbf{f}^+ \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{a}^+ , \mathbf{f}^+ 分别为孔径面和馈源面上的输入等效流(电流 J_s ,磁流 M_s)或切向场(电场 E 或磁场 H); \mathbf{a}^- , \mathbf{f}^- 分别为孔径面和馈源面上的输出等效流(电流 J_s ,磁流 M_s)或切向场(电场 E 或磁场 H)。

式(2)中散射矩阵给出当物理阵列不存在时,反射面孔径面和馈源面孔径面上场量之间的转换,因为场的变化是由反射面形状引起的,与阵列或互耦无关。发射时,反射面孔径面上的输入信号 $\mathbf{a}^+=0$,则没有接收信号返回到反射面孔径面,即: $\mathbf{S}_{aa}=0$,有:

$$\mathbf{a}^- = \mathbf{S}_{af} \mathbf{f}^+ \quad (3)$$

接收时,在馈源面上的发射信号 $\mathbf{f}^+=0$,且没有发射信号返回到发射端,则 $\mathbf{S}_{ff}\approx 0$,则有:

$$\mathbf{f}^- = \mathbf{S}_{fa} \mathbf{a}^+ \quad (4)$$

在输入端任意假设等效流或切向场 \mathbf{a}^+ , \mathbf{f}^+ ,根据文献[5]中并矢格林函数法来计算输出的等效流或切向场 \mathbf{a}^+ , \mathbf{f}^+ ,进而利用式(3)和式(4)编程计算散射矩阵 \mathbf{S}_{af} , \mathbf{S}_{fa} 。其中,用等效电流(或切向磁场)计算的散射矩阵记为: \mathbf{S}_{af}^J , \mathbf{S}_{fa}^J ;用等效磁流(或切向电场)计算的散射矩阵记为: \mathbf{S}_{af}^M , \mathbf{S}_{fa}^M 。根据编程计算结果,有: $\mathbf{S}_{fa}^J = (\mathbf{S}_{af}^M)^T$, $\mathbf{S}_{fa}^M = (\mathbf{S}_{af}^J)^T$ 。

3 混合系统的波束形成

将在馈源处的入射矢量记为 \mathbf{f}^r ,反射面孔径面上的接收信号记为 \mathbf{a}^r 。若将原入射信号取共轭后再入射,即: $\mathbf{f}'=\mathbf{f}^{r*}$,则在孔径面上的接收信号为: \mathbf{a}' ,利用散射矩阵的关系,有:

$$\mathbf{a}' = \mathbf{S}_{af}^M \mathbf{f}' = \mathbf{S}_{af}^M \mathbf{f}^{r*} \quad (5)$$

端口分为 2 组,其中 N_s 个端口表征反射面孔径面, N_f 个端口表征阵列孔径面,利用散射矩阵可以描述反射面孔径面与阵列口面之间的场量关系。

本文在混合系统的馈源面和反射面孔径面每隔 0.5λ 采样,即 $N_f=61$, $N_s=121$ (包括 2 个端点),则有散射矩阵 \mathbf{S} 的下列关系:

$$\mathbf{a}^r = \mathbf{a}'^* = \mathbf{S}_{af}^{M*} \mathbf{f}^r \quad (6)$$

$$\text{混合系统孔径面上的波束形成输出为:} \quad \mathbf{u} = \mathbf{W}^T \mathbf{a}^r \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{N_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 e^{-j2x_1 \sin \theta_s} \\ t_2 e^{-j2x_2 \sin \theta_s} \\ \vdots \\ t_{N_s} e^{-j2x_{N_s} \sin \theta_s} \end{bmatrix}$$

为权向量;其中, N_s 为口径面上的采样点个数, θ_s 为波束指向角, t_i 为第 i 个采样点的相位加权, t_i 的值可以根据对波束的具体要求自行设计。文中的 t_i 取值满足三角窗分布。利用式(6)和式(7),可得:

$$\mathbf{u} = \mathbf{W}^T \mathbf{S}_{af}^* \mathbf{f}^r = (\mathbf{S}_{af}^H \mathbf{W})^T \mathbf{f}^r = \mathbf{W}_h^T \mathbf{f}^r \quad (8)$$

在宽度分别为 60λ 、 30λ 的孔径面和馈源面上每隔 0.5λ 采样,利用式(8)编程分析波束形成。分别取波束指向角 θ_s 为 0° 、 10° 、 -10° 、 20° 、 -20° ,其波束形成如图 2~6 所示。

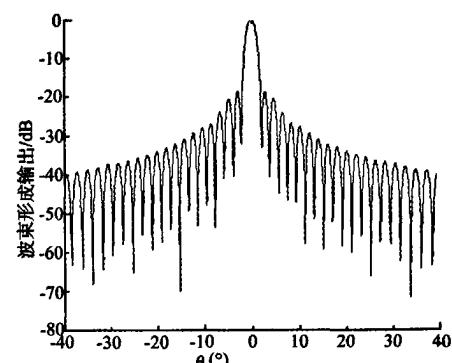
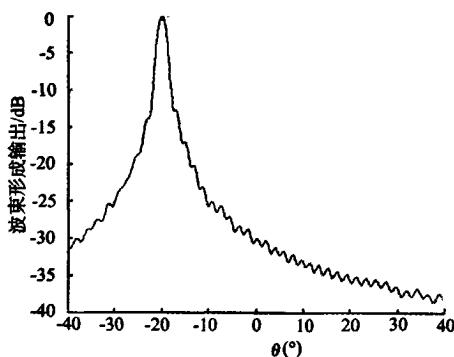
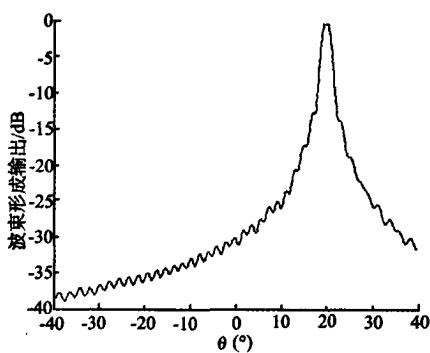
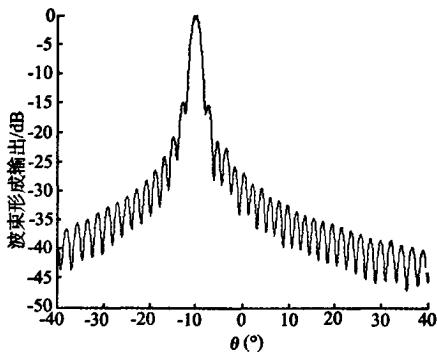
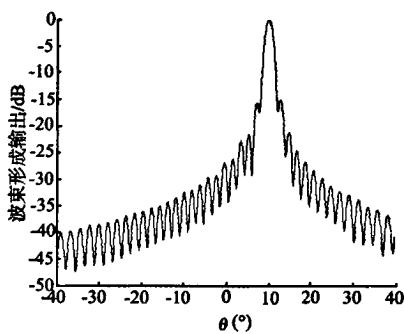


图 2 $\theta_s=0^\circ$ 时的波束形成输出

图3 $\theta_s = -20^\circ$ 时的波束形成输出图4 $\theta_s = 20^\circ$ 时的波束形成图5 $\theta_s = -10^\circ$ 时的波束形成图6 $\theta_s = 10^\circ$ 时的波束形成

4 结 论

在混合天线的波束形成中,根据要求的天线方向图,可以利用常规的波束形成方法得到反射面孔径上的权值,再利用散射矩阵得到阵列权值 \mathbf{W}_h 。从本文给出的实例可以看出,这种天线在 $\pm 20^\circ$ 扫描角范围内,波束形状基本保持不变,实现了较大角域内的波束扫描。

参 考 文 献

- [1] DETWEILER P L. Wide-angle scanning with reflector antennas: a new design technique [C]. IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference, 2000.
- [2] 符果行. 电磁场中的格林函数法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [3] 林昌禄, 陈海, 吴为公. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990.
- [4] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] 吕雪峰, 董维仁, 杨晶, 等. 喂源阵面排列对偏置多波束天线特性的影响[J]. 电波科学学报, 1999, 14(1): 19-24.
- [6] 杨晶, 王爵棋, 董维仁. 喂源大范围偏焦的星载多波束天线辐射特性分析[C]. 中国电子学会天线年会论文集, 1991.
- [7] WELFORD W T, WINSTON R. The Optics of Nonimaging Concentrators[M]. New York: Academic Press, 1978.
- [8] STEPHEN J B, WILLIAM A I. Array feed synthesis for correction of reflector distortion vernier beamsteering [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1998, 36(10): 1351-1358.

作 者 简 介

王静,女,1981年12月30日出生,硕士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术。

E-mail: hadia_smile@sina.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)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>