

赋形天线研究

谢苏隆, 钟 鹰

(中国空间技术研究院西安分院 人力资源部, 陕西 西安 710000)

摘 要: 介绍了赋形天线的研究现状, 并对赋形天线的分类及所用到的分析方法做了简介与分析对比, 简要阐述了赋形天线在国内的发展情况和面临的问题, 并做了简单展望。

关键词: 赋形天线; 几何光学; 物理光学; 几何绕射理论; 物理绕射理论

中图分类号: TN015

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)10-0001-04

The research of shaped antenna

XIE Su Long, ZHONG Ying

(The Personnel Department of Xi'an Division of Chinese Institute of Space Technology, Xi'an 710000, China)

Abstracts: The research situation and sorts of shaped antenna is introduced. Then, different analysis methods are described and compared. Finally, the development situation of shaped antenna in china is described in brief and the future problems are forecasted.

Key words: shaped antenna; GO; PO; GTD; PTD

卫星通信具有覆盖范围广、可利用的频带宽、网络建设速度快、成本低等特点, 使其在通信领域得到了广泛的应用。随着卫星通信的发展, 为满足一定的地面服务区的有效全向辐射功率(EIRP)要求, 迫使通信天线必须采用多馈源赋形或反射面赋形天线, 这就极大地促进了多馈源赋形或反射面赋形天线的发展。这样就能减小覆盖区域以外的地面站对卫星系统所产生的干扰, 提高系统的频谱利用率和信道容量, 提高有效全向辐射功率(EIRP)和接收系统品质因数 G/T 值, 并能使卫星地面站终端设备得到简化和降低成本。

当覆盖区域是中国政区图时, 考虑到中国西部地区的地域辽阔、人口稀少、降雨量小, 而东部地区人口稠密、经济发达、降雨量大, 雨衰是卫星通信必须要考虑的一个重要问题。因此, 必须既考虑到全国有适当的功率覆盖, 又应对东部地区华北地区有所偏重, 使之具有较高的功率分配; 而对西部地区略有降低, 以便充分利用卫星资源。这样, 对天线赋形后所产生的通信波束既能覆盖全国, 又能突出东部。为了防止信号干扰, 对邻国方向上的天线的主、交叉极化增益应该足够小。总之, 对不变的区域, 只要把一些主要因素考虑进去, 就可以得到大致的期望分布。

1 赋形天线概述

赋形天线按反射面是否可变分为两类: (1) 单次赋形
《微型机与应用》2010年第10期

天线和重构赋形天线。(1) 单次赋形天线是指天线的用途单一, 装配成型发射后, 用途不再改变的天线。该天线的覆盖区域和天线所处的空间位置均不再改变, 其覆盖的目标区增益分布是确定不变的。这类天线的设计通常是预期覆盖区域增益分布分析设计反射面, 反射面一经确定后不再改变。(2) 可变赋形天线有两种情况: 一是根据天线轨道位置的改变, 调整工作系统, 从而得到相应的赋形波束; 二是通过调整系统, 对不同形状的地域产生相应的赋形波束覆盖^[1]。

赋形天线按使用的馈源数目分为两类: 多馈源天线和单馈源天线。在传统的卫星通信中, 通常使用阵馈抛物天线(如图1(a)), 馈源阵列放在反射面或微波透镜的焦平面上, 按一定方式排列的馈源天线组成。馈源阵列位于焦平面上, 各馈源除中心处的馈源外, 都相对于焦点有一个横向偏移, 且偏移方向和偏移量大小各不相同, 这样各馈源所产生的波束经反射面的反射或透镜的聚焦后, 就会在远场区域形成一组彼此相互独立、波束宽度近似相等、均匀分布的子波束。这种天线的赋形设计的重点在于优化馈源的激励系数和几何排列等参数。其中一个重要组成部分是波束成形网络(BFN), 用来调整馈源的激励情况。但它们存在着固有的缺点: 天线系统的大量开销将花费在设计 and 调整波束形成网络上, 并且复杂的波束形成网络会引起射频损耗, 降低天线系统的总

欢迎网上投稿 www.pcachina.com

1

综述与评论 Review and Comment

增益。这些缺陷会随着频率的升高而更加严重,因此多馈源赋形技术一般用于 Ka 波段(4 GHz~7 GHz)以下^[2-6]。

对单个反射面进行赋形(如图 1(b))得到赋形波束是一种更加可行的方案。在对一个固定区域进行波束赋形的情况下,可以不用波束成形网络,而是作反射面成形设计,采用单馈成形反射面天线,这种赋形反射面天线具有机械加工简单,结构不复杂,以及由于没有波束成形网络,损耗小,增益更高的优势^[6-10]。

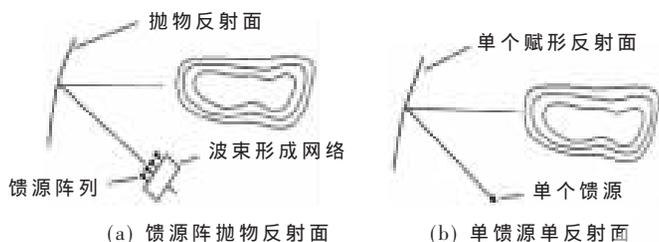


图 1 赋形天线

按照天线的反射器类型,可以分为单赋形反射面天线和多赋形反射面(通常是两个反射面)天线。在赋形天线设计中,单反射面天线一般多采用偏馈反射面天线,图 2(a)所示为一偏馈抛物面天线,它由一个带有一定偏转角的圆锥面去切割标准抛物面而得。与其他天线形式相比,具有结构简单、质心低的特点,同时它也很好地解决了馈源的遮挡问题。基于此,该天线广泛地运用于卫星通信中。在赋形反射面天线设计中,常见的多反射面天线为双偏置反射面天线。如图 2(b)所示,通过对偏置卡赛格伦或格里高利天线的两个反射面的形状赋形(从设计加工等方面考虑,一般只对副反射面进行赋形设计),来达到赋形设计的目的。

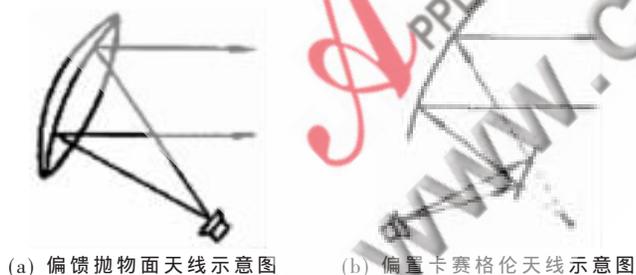


图 2 两种常见的赋形反射面天线的示意图

2 赋形中常用的设计方法

从赋形方法的角度看,可以分为直接法和间接法。早在 1975 年,KATAGI T 和 TAKEICHI Y 就提出了一种成形反射面的设计方法,即波前分析方法,随后北美和欧洲的研究人员在此基础上,根据几何光学(GO)、物理光学(PO)、几何绕射理论(GTD)和物理绕射理论(PTD)等方法,提出了成形反射面的直接和间接综合方法。直接方法^[11-12]的优化对象是反射面本身的形状,用各种函数展开式直接方法的优化对象是反射面本身的形状,用各

种函数展开式表示反射面,通过优化函数的系数进行反射面综合。一般说来,根据要求寻找得到这样的基底函数是非常困难的,这种方法多数都是级数的形式表示。而间接方法的优化对象是成形反射面天线的一些特性参数,如波前、口径面场分布等,通过优化这些参数来满足赋形要求,确定一些反射面的节点,从而进行拟合,确定反射面的形状。无论是直接方法还是间接方法,都只是一种优化的过程,这样,寻求一种最佳的优化方法就是其中的关键问题,检验某种方法的优化结果可以从后来的误差分析中得出。检验方法在实际中是否可行,还必须用严格的物理方法进行验证。

2.1 波前法

早在 1975 年,KATAGI T 和 TAKEICHI Y 提出了一种成形反射面的设计方法,即波前分析方法,这种方法是假定远场辐射图的波前由两部分组成:内部是限制在所需辐射图的一个角形范围内的球面波;外部是一个以内部边界轮廓作准线的控制表面。馈源波前假定为球面波,这样,用几何光学方法根据入射和反射波前就可以确定反射面。从几何光学意义上讲,波前与波束剖面对应,波前决定反射面的成形。根据初始馈源在反射面上产生的面电流分布来计算天线方向图,将天线方向图的计算值与期望值相比较,如果计算值逼近期望值的结果并不理想,则重新调整决定波前和反射面的参数,计算天线方向图,直至满意为止^[5,13]。

波前法的原理是:抛物面天线将馈源汇聚成的球形波前转换成平面波前。当平面波前、馈源和反射面上的一点给定时,由光路定律可以确定反射面上的所有点;同理,当赋形波前、馈源和反射面上的一点给定时,成形反射面也可由光路定理确定。这种方法比较粗略,可对边界地形不是很复杂的覆盖区进行赋形,但对天线的一些远场特性无法确定。这一方法无法解决与反射波前的外部有关的几何光学焦散问题。因此,在现代的赋形反射面天线的设计中,这种方法已经很少被使用了。

2.2 口径面场优化法^[13-17]

这种方法是通过优化口径面场的分布,来获得特定的远场覆盖模式。在优化过程中,假设口径面场的辐度分布不变,相位分布以三角函数等为基底函数展开。优化对象是这些三角函数或其他基函数的系数,可以采用最小二乘法或者其他非线性优化方法(如 Minmax 法)建立目标函数,使远场增益逼近目标值。根据优化后口径面场的相位分布,通过几何光学原理,可以计算出反射面的表面形状。

JOENSEN R 于 1980 年提出了一种更为严格的口径相位综合技术。在这种方法中,口径相位分布直接由远场方向图优化得到,再用几何光学方法确定反射面形状。口径相位综合技术消除了焦散问题,能更方便地控制方向图特性,但是这种方法不能同时优化口径幅度分

综述与评论 Review and Comment

布。这就是后来在改进技术中为什么要先假定反射面的电场强度是大小不变的原因之一。JOESENSEN R 在分析中假定了一个固定的高斯幅度分布,对复杂的方向图设计是不实用的。表示反射面,通过优化函数的系数进行反射面综合。间接方法的优化对象是成形反射面天线的一些特性参数,如波前、口径面场分布等,通过优化这些参数来满足赋形要求,进而确定反射面的形状。

这种方法能够取得较好的图形效果,可以根据采样点的增益分布控制主瓣与副瓣。但是在优化过程中,假设口径面场的幅度分布不变,而副瓣电平主要由起始的边缘照射决定。实际上口径面相位的变化会引起反射面表面形状的变化,从而导致口径面幅度分布有所变化,尽管这种变化不明显,但也会影响远场计算的精度。另外,有些基函数的选取并不能保证边界形状很复杂的覆盖区有很好的赋形效果。

2.3 口径面栅格的场相位优化法

口径面栅格的场相位优化法^[2-5]基本上是口面场优化法的改进。为克服口面场相位优化方法的缺点,将口径面分成很多小栅格,优化前认为每个小栅格上的场分布为等幅同相,这样,口径面上场的相位分布不再用三角函数展开式表示,而是一个个独立的值。其优化思想是,优化口径面场的相位分布,使远场增益逼近目标值。通过口径面场的相位分布,确定反射面的形状;通过反射面的形状,馈源的幅值相位分布来确定口径面场的幅度分布,作为下一次相位优化时的幅度分布。由于这种方法考虑了口径面场幅度变化对远场的影响,与口面场优化法相比较,其精度相应提高,在参考文献[5]中通过优化反射面上各个网格在抛物面焦轴方向上的变形量,提出网格变形时相位影响因子的概念,对相位加以优化,同时附加变形限制条件,改善了反射面表面不连续的问题。

总之,上述三种方法都是采用几何光学分析方法,其中,口面场优化法和口径面栅格的场相位优化法通过优化得到口径面上栅格的幅值和相位来确定反射面的形状。这些方法都有一个缺点,即在优化口径面场相位时,可能使反射面表面不连续,导致反射面加工较困难,所以在优化过程中,必须解决不连续问题。

2.4 反射面直接展开法

为了得到连续光滑的赋形反射面,Y.Rahmat-Sami 等用特殊函数展开式来表示反射面表面的形状,将展开式系数视为天线系统的优化特性参数,直接进行反射面成形。这种方法的特点体现在正交全局函数展开式的选取上,可以选为 Zernike 函数展开式、三角函数展开式、贝塞尔函数展开式、傅里叶级数等。最终成形的反射面是光滑连续的,边界定义严格,且具有一阶连续导数。在理论方法上可选用几何光学、物理光学、几何绕射、物理绕射等理论技术,且能够准确地控制副瓣电平和交叉极

化等天线远场特性。

2.5 上述方法的分析比较

就天线分析和综合方法而言,几何光学成形技术比较成熟、精确度较高,但是它的一个主要缺点是在反射面成形时并未考虑绕射效应。被忽略的绕射效应既包括反射面表面和边缘的绕射、馈源与反射面的近场效应,还包括主反射面与次反射面之间的相互影响(在设计双反射面和多反射面的情况下)。采用几何绕射分析技术计算几何光学成形反射面天线的远场辐射模式时,一些特性参数(如副瓣)会与期望值产生很大的偏差,因为几何光学成形要求天线系统的相对波长足够大,以满足射线轨迹近似条件。前三种方法都是采用几何光学法,所以都要考虑这个问题。对于小型天线系统的设计,需要采用更为精确的分析和综合程序,如物理光学法。几何光学成形算法常用于综合口面场而不是直接用于综合远场,口面场与远场之间的相互关系可由几何光学方法确定,通过几何光学算法导出的成形反射面是由一系列点表示的,这些点可能导致反射面的表面不连续和周界不规则,因此在进行成形反射面加工制造之前,必须对这些分离的点进行插值拟合。

在最后一方法中,由于反射面直接展开,不需要几何光学综合方法,而是采用了物理光学分析方法,无需满足射线轨迹近似条件,对于小型天线系统也适用,比几何光学分析方法精确,但是当考虑一些远场参数(如旁瓣电平、交叉极化等)的精度时,物理光学方法仍不够精确,必须选用物理绕射理论技术,考虑物理绕射理论边缘场。

因而从理论上讲,几何光学方法较简单直观,而且发展较成熟;物理光学方法精确度高,适用范围广泛;物理绕射理论方法则能够提高远场参数的精度。

3 国内研究现状

近十几年来在国外,成形反射面已经成为星载天线一项极为重要的技术,已有许多星载成形反射面被成功设计、制造并投入使用。国内在赋形天线的研究中,多波束赋形天线的研究较多,但理论和模拟仿真的较多,实际应用的较少。关于赋形反射面天线的研究较少,其中,中国空间技术研究所西安分院设计并加工了在 Ku 波段覆盖中国版图的通信卫星成形反射面天线。在理论上采用几何光学法进行分析,在实践中使用进口程序 POS 进行设计和加工;北京邮电大学比较计算了覆盖中国版图的单馈成形反射面和阵馈反射面天线。北京空间飞行器总体设计部采用全域基 Zernike 函数展开反射面,运用 PO 方法,将展开式各项的系数作为优化对象,带入反射面天线的远场辐射积分中,采用信赖域法对非线性最小二乘问题进行优化,从而确定了单馈源单反射面天线的反射面。由于所研究的对象同为单馈源单反射面天线的赋形问题,其研究成果具有一定的借鉴性^[18]。

综述与评论 Review and Comment

当前赋形反射面天线的研究热点是反射面直接展开法。这种方法的优点在于所要优化的参数较少,如采用网格优化相位的方法,表示一个反射面通常需要上万个相位参数进行优化,而反射面展开法则只需对十几个到几十个基函数的系数值进行优化,这样将大大加快计算的速度。另外,这种方法优化完毕,反射面的表达式也就随之确定下来。无需再进行数据的拟合来得到反射面的表达式,且反射面上任一点的法向或切向方程也容易确定,从而给天线的制造、加工与测量带来了便利。研究的重点主要集中在使用什么样的基函数或表达式来表示反射面、在物理光学法分析中采用什么样的方法来加快计算的速度,以及采用何种优化方法来优化得到这些基函数的系数值上。其中,反射面的展开采用 Zernike 基函数来展开(如在 grasp 软件中)较为广泛。此外,宽带优化、隔离站的优化等在工程实践中也经常遇到,我国在这方面的研究还较少,值得进一步关注研究。

参考文献

- [1] 陈志华,关富玲.星载反射面天线赋形技术研究[J].空间电子技术,2007,4(1).
- [2] ALAN R, SHUNG-WU LEE. A method for producing a shaped contour radiation pattern using a single shaped reflector and a single feed, ROBERTO J. ACOSTA. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1989.
- [3] BERGMANN J, BROWN R C, CLARRICOATS P J B, et al. Synthesis of shaped-beam reflector antenna. IEE Proceedings, 1988,135(1).
- [4] 张亦希,傅君眉,汪文秉.卫星阵馈反射面多波束天线赋形波束的性能分析[J].电子与信息学报,2003,25(4).
- [5] 马晓勤.金属拱型波纹屋盖结构的有限元分析及星载抛物面天线的赋形设计.浙江大学硕士论文,2004.
- [6] KILIC O, ZAGHLOUL A I. A method for shaped reflector antenna design. IEEE,1998.
- [7] POULTON G T, Efficient design of shaped reflectors using successive projections. Electronic Letters,1991,27(23).
- [8] SEARLE A D. Fast synthesis of shaped reflector antennas. Antennas and Propagation, 1995.4.4.
- [9] VISKUM H H. Synthesis and analysis of single shaped reflector antennas. Electromagnetics Institute Technical University of Denmark Dk-2800 Lyngby, Denmark.
- [10] LEE C S. Direct far-field go synthesis of single-reflector antennas. Space and Communications Group Hughes Aircraft Company. IEEE,1989.
- [11] WILHELMUS H T, WALTER D B. Contoured beam reflector antenna for wireless applications. IEEE Transactions on A P, 2002 15 0(2):205-210.
- [12] SAMI Y, MUMFORD J, Reflector diffraction synthesis using global Coefficients optimization techniques. IEEE AP-SI Intl.Symp,1989:1166-1169.
- [13] BAKER L. Reflector shaped by optimization of wavefront shapes. National Astronomy and Ionosphere Center Cornell University, IEEE, 1991.
- [14] WESTCOTT, BRICKELL F. Go synthesis of reflector using complex coordinates.
- [15] BUCCI O M, FRANCESHETTI G, PIERRI R. Reflector antennas field-an exert aperture approach, IEEE, Transactions on Antennas and Propagat. 1981,AP 29(7).
- [16] ISRAEL G, MITTRA R, CHA A G. Aperture amplitude and phase control of offset dual reflectors. IEEE, Trans. Antenn. Propagat.1979,Ap-27(2):154-164.
- [17] DUAN D W, SAMI Y R. A generalized three-parameter (3-P)aperture distribution for antenna applications. IEEE Proc.H,1989,136(5):361-366.
- [18] 侯沁芳,阎鲁滨.星载反射面天线全域基设计的研究[J].航天器工程,2007,16(2).

(收稿日期:2010-01-30)

作者简介:

谢苏隆,男,1977年生,在读博士,主要研究方向:航天器设计。

钟鹰,男,1944年生,研究员,主要研究方向:卫星天线的设计。