

卫星通信多波束天线综述

周乐柱¹, 李 斗¹, 郭文嘉²

(1. 北京大学电子学系, 北京 100871; 2. 北京卫星信息工程研究所, 北京 100080)

摘 要: 多波束天线广泛应用于各种卫星通信系统, 本文综述卫星通信多波束天线的有关问题, 比较了各种方案的优缺点, 指出了有待研究的有关课题。

关键词: 卫星通信, 多波束天线, 点波束覆盖

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 06-0824-05

Review of Multiple-Beam Antennas for Satellite Communications

ZHOU Le-zhu¹, LI Dou¹, GUO Wen-jia²

(1. Dept. of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Beijing Satellite Information Engineering, Beijing 100080, China)

Abstract: Multiple-beam antennas have found wide use in a variety of applications involving satellite communications. In this paper a summary of several structure schemes of multiple-beam antennas for satellite communications is presented, and a comparison about their advantages and drawbacks are also made. Some topics to be further researched are pointed out.

Key words: satellite communications; multiple beam antennas; spot beam coverage

1 引言

卫星通信技术始于六十年代, 七、八十年代得到蓬勃发展, 九十年代, 个人移动通信的应用又给卫星通信的发展注入了新的动力。天线技术是卫星通信的关键技术。多波束天线(MBA——Multiple Beam Antenna)由于其能够高增益地覆盖较大的地面区域而且又能根据需要调整波束形状而得到深入研究和广泛应用^[1-12], 表1给出了几个卫星通信系统的星载多波束天线。

表1 几个卫星通信系统的星载多波束天线

	Globalstar	IRIDIUM	Odyssey	MACSS-14
轨道高度(km)	1,401	785	10,354	10,355
天线类型	直接辐射 相控阵	直接辐射 相控阵	反射面式	直接辐射 相控阵
点波束数	16	3 × 16	上行 37, 下行 32	37

多波束天线是能够同时产生多个子波束(点波束), 从而覆盖地面上所关心的区域的天线系统, 根据不同的通信需要, 子波束和总波束的关系大致可分为几种情况: 固定区域点波束覆盖, 非固定区域点波束覆盖和赋形束覆盖。

(1) 固定区域点波束覆盖

固定区域点波束覆盖是指所有的点波束彼此独立地照射地面上不同的固定区域, 总的波束则覆盖有关国家和地区, 这种点波束方式往往用于同步卫星通信系统, 近年来也应用于非同步卫星通信系统, 称为所谓“凝视天线(staring antenna)”

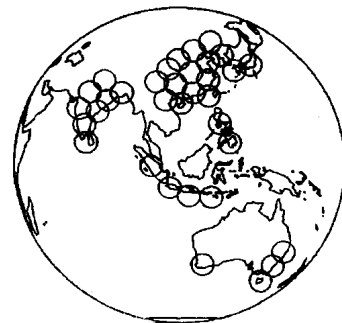


图1 SPACEWAYTM系统覆盖亚太地区的多点波束分布图^[7]

系统。这种系统, 当卫星移动时, 天线始终照射着某一固定区域并保持波束覆盖图不变, 直到该区域边缘的仰角小于最小仰角。图1给出了美国 Hughes 公司的 SPACEWAYTM系统中覆盖亚太地区的两颗通信卫星的天线的多点波束分布图^[7]。

(2) 赋形束覆盖

赋形束覆盖是指点波束在地面上相互迭加, 得到的辐射方向图形成所需要的图形。赋形束, 这种方式也往往用于同步卫星通信系统。

赋形束的概念在二十多年前就提出来了^[8], 其天线由反射面和单个馈元或由少量的馈元组成的馈元阵组成(后者可以看成多波束天线)。任何形状的方向图都可以通过设计反射面的形状, 在光学口面产生所需的振幅和相位分布来实现, 而

收稿日期: 2000-04-24; 修回日期: 2001-02-22

基金项目: 国家 863 计划项目 (863-317-03-06-99), 国防科工委卫星应用技术重点项目 (T97 # 04)

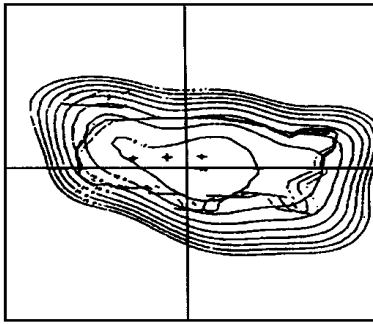


图 2 采用口面综合设计的赋形反射面天线覆盖美国大陆的方向图^[6]

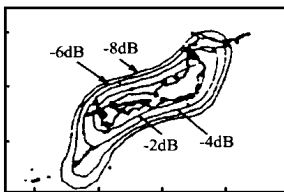


图 3 卫星通信天线系统 Ku 波段覆盖日本全境的赋形方向图^[11]
反射面的形状的设计,可用几何光学或物理光学方法^[9,10].这样得到的天线称为赋形天线.图 2 给出了采用口面综合设计的赋形反射面天线所得到的覆盖美国大陆的方向图^[6].

实现方向图调整,得到赋形束的另一方法是调整 MBA 的馈元阵各辐射元激励的相位和振幅^[11~13].图 3 给出了日本电报电话公司研制的多波段卫星通信天线系统 Ku 波段覆盖日本全境的赋形方向图^[11].它采用偏置 Gregorian 反射面系统以消除交叉极化,调整 7 个喇叭馈源的激励实现所需的方向图.

(3) 非固定区域点波束覆盖

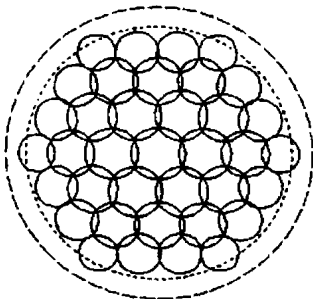


图 4 37 个点波束覆盖的示意图

非固定区域点波束覆盖是指所有点波束在 3dB 处彼此相互连接,总波束覆盖一定面积的区域,但覆盖区域随卫星的运动而移动.这种方式往往用于非同步(低,中轨)卫星通信系统.使用这种卫星通信系统,当地面终端由于卫星的运动(和由于地面终端本身的运动)从一个点波束下移动到另一个点波束下时,由于采用了波束切换技术,通信不会受到影响.图 4 给出了 37 个点波束覆盖的示意图,美国的 Odyssey, 欧洲航天局的 MAGSS-14 移动卫星通信系统就是采用这种 37 束的点波束覆盖.

MBA 有三种基本类型:反射式 MBA,透射式 MBA 和直接

辐射相控阵 MBA.一般来说,反射式 MBA 和透射式 MBA 重量较轻,结构简单,设计技术比较成熟,因而最先得到广泛应用;相控阵 MBA 随着 MMIC 技术和固态功率放大技术的发展也应用于卫星天线.它具有一系列好于前二者的优点,如较高的口面效率,没有泄漏损失,没有口面遮挡,可靠性高等;然而其重量较重,结构和制造工艺复杂,以及功率损耗较高等缺点也是不容忽视的.

本文简要论述几种 MBA 的结构,特点及有待研究的有关课题.全文分为四节,本节为引言,第二节介绍反射式 MBA 和透射式 MBA,第三节介绍相控阵 MBA,第四节指出了有待研究的有关课题.

2 反射式 MBA 和透射式 MBA

反射式 MBA 和透射式 MBA 具有相似的结构,通常由聚束器件(反射镜或透镜),初级辐射器阵列(喇叭或其他天线阵列)已及其他有关组件(如馈源阵相位振幅控制器(PAC),束形成网络(BFN)等)组成,有多种类型:

- 按聚束器件的数目可分为单口面式或多口面式;
- 按初级辐射器的数目可分为单喇叭式或多喇叭式;
- 按形成点束的方式可以分为基本成束法或增强型的成束法.

因此,实际的 MBA 可能有多种组成方案,如单口面多喇叭反射式 MBA,多口面多喇叭透射式 MBA 等等,基本目标是使最小覆盖区域(一个点波束内)的增益取极大值,同时兼顾低旁瓣和交叉极化电平的要求.以下着重阐述单口面设计和多口面设计、多喇叭阵列的基本成束法和增强型成束法以及反射式设计和透射式设计等几种最常用的类型的原理、结构、优缺点等有关问题.

2.1 单口面设计和多口面设计

MBA 的多个波束可以通过一个口面产生,也可以通过多个口面产生,分别称为单口面设计和多口面设计.近年来,已有不少作者对单口面设计和多单口面设计进行了比较研究^[14~16].研究表明,与单口面 MBA 相比,多口面 MBA 确实具有增益高,旁瓣电平低及抗干扰性能好的优点.

图 5 给出了单口面,三口面和四口面设计产生 19 个点波束的示意图.从图中可以看出,对单口面设计,所有的波束都是由同一个口面产生的,而对多口面设计,相邻的波束是通过不同的口面产生的.也就是说,同一口面产生的波束在地面是被其它口面产生的波束分隔开的.这样一来,对多口面设计,同一口面产生的波束的最小间隔(对应于两波束中心的距离或半功率宽度)就分别增加到单一一口面时的 $\sqrt{3}$ 倍(对三口面)或 2 倍(对四口面),如图所示.较大的束间隔使得我们可以扩大喇叭口径来减小泄漏,从而提高增益和改善旁瓣水平.加拿大的一个军事卫星通信系统采用了多口面 MBA,用四个介电透镜实现了全球覆盖^[14].

P. O. Iversen, L. J. Ricardi 和 W. P. Faust 比较了四透镜四喇叭 MBA 和单透镜多喇叭 MBA 的性能^[15].他们的理论分析表明,四透镜四喇叭 MBA 的增益比单透镜单喇叭 MBA 和单透镜三喇叭 MBA 的增益分别增加了 2.4dB 和 0.8dB,但比单透镜七喇叭 MBA 的增益仅增加 0.3dB. S. D. Gray 比较了单口面

MBA 和多口面 MBA 的成束和消束性能 (Nulling performance) [16]. 模拟计算表明, 在这方面多口面 MBA 要比单口面 MBA 优越得多. 例如, 在有用信号的精确到达方向 (DOA) 未知的普

遍情形下, 四透镜六十一喇叭 MBA 在小于 0.5 方位角或仰角范围内能有效地消除干扰信号, 而相同馈源数的单透镜 MBA 则需要 2.44°.

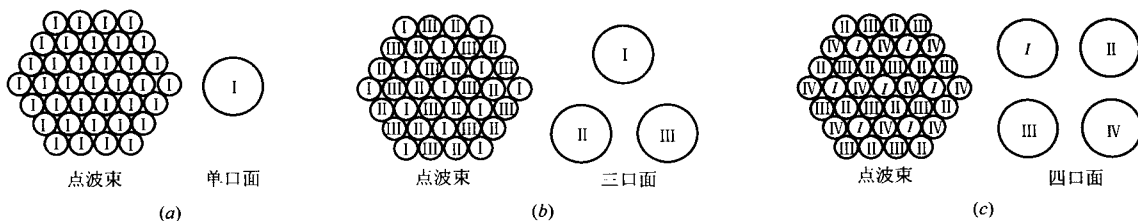


图 5 产生 19 个点波束的示意图: (a) 单口面设计, (b) 三口面设计, (c) 四口面设计

研究表明, 尽管多口面 MBA 具有增益高, 旁瓣电平低及抗干扰性能好的优点, 但其结构复杂, 质量重, 加工制造和卫星发射方面的费用较高, 还可能产生由于不同口面的瞄准误差不同所引起的覆盖失真. 因此, 在选择使用这两种设计时, 必需综合考虑各方面的因素.

多口面 MBA 的另一重要功能是提高卫星通信系统的频率利用率. 例如, 在图 5(b) 和 (c) 中, 和 分别代表使用不同频率的小区, 频率复用率分别为 3 和 4.

2.2 多喇叭阵列的基本成束法和增强型成束法

正如上节所述, 单口面多喇叭 MBA 的增益比多口面多喇叭 MBA 的增益低, 但具有结构简单, 重量轻, 造价低的优点, 因此仍然受到重视. 本节主要分析比较单口面多喇叭 MBA 的两种成束方法.

采用单口面多喇叭系统产生多波束有两种方法: 一种是比较简单的基本成束法, 另一种是较为复杂的增强型成束法. 图 6 给出了两种方法的示意图.

图 6(a) 所示的为基本成束法, 其特点是每一波束来源于一个喇叭. 这种设计的优点是结构简单, 缺点是增益不高, 通常要比单个喇叭时的优化峰值增益低 2~3dB, 这是因为要提高增益, 就需要较大的喇叭口径, 然而大的口径又使旁瓣水平和相邻束覆盖性能变坏. 文献 [14] 研究了喇叭口径对天线特性的影响, 指出要满足 3dB 的相邻束覆盖的要求将导致 -19dB 的高旁瓣水平; 而要实现 -30dB 的低旁瓣水平设计又会产生 -23dB 的相邻束覆盖. 因此, 基本成束法不能同时满足低旁瓣水平和好的相邻束覆盖的要求.

迭加而成的复合束. 例如波束 2 是由喇叭 1, 2, 3, 7, 8, 9, 19 所产生的分波束的迭加. 这里, 由六个喇叭 (7, 8, 9, 19, 3, 1) 成圆环状绕一个喇叭 (2) 组成的七元阵喇叭群是 MBA 常用的一种馈源阵. 这种七元阵的优点在于它比基本成束法具有更多的自由度来调节优化 MBA 的各种性能. 例如, 它可以通过调节七元阵中处于圆周上的某些喇叭的振幅和相位在围绕中心束的 360 度方向上控制旁瓣水平, 它可以通过改变各喇叭的激励来实现所需要的方向图以消除干扰和阻塞.

2.3 反射式设计 and 透射式设计

MBA 采用反射式设计还是透射式设计要按要求和所能实现的条件而定, 目前两种设计都被应用. 一般地说, 多口面 MBA 较多地采用透射式设计, 单口面 MBA 既可采用反射式设计也可采用透射式设计. 但是, 文献 [14] 认为, 对单口面 MBA, 透射式系统的重量至少是反射式系统的两倍, 因而更多地采用反射镜式设计.

反射式设计又多采用偏置结构. 采用偏置结构, 不仅避免了反射面对馈源的反作用, 也避免了馈源对反射面的遮挡, 有利于提高天线增益和降低旁瓣水平. 但是由于采用了偏置, 反射面必不对称, 交叉极化电平会有所提高.

反射面有抛物线型, 双曲线型, 赋型等. 采用偏置双曲面镜作 MBA, 其缺点是口径较大, 交叉极化电平较高, 还有由于偏焦所引起的扫描束方向图畸变 [18]. 目前应用较多的是辐射元置于焦面上的偏置抛物面反射镜和赋型反射镜.

1995 年, 加拿大国防部资助研制的一个工作于 45GHz 的军事卫星通信系统 [14], 采用 121 个 Potter 圆喇叭组成的馈源阵, 利用单个偏置抛物面反射镜, 形成 70 个点波束, 覆盖地面 8 度直径的圆形区域. 每个点波束中心峰值增益为 43.8dBi, 半功率宽度为 1 度, 旁瓣电平小于 -30dB, 交叉极化好于 -26dB.

2.4 MBA 的设计

MBA 的设计和性能分析是复杂而繁琐的, 需要反复迭代. 但是若能给出一些简单的计算公式进行初步的估算是有益的. 这里给出一个单口面 MBA 的例子: 首先, 根据卫星高度和最低仰角要求可大致确定覆盖面积 A(°). 而单反射面多喇叭 MBA 的喇叭总数 N (也即点波束数) 则决定于所覆盖的面积 A(°) 及口面直径与波长比 (D/λ), 文献 [17] 给出了一个计算公式:

$$N = A^2 / [2746(\lambda / D)^2]$$

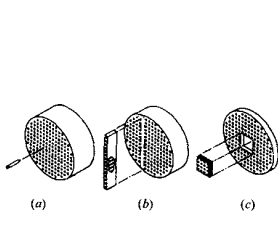
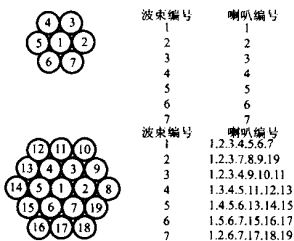


图 6 产生多波束的两种方法: (a) 基本成束法, (b) 增强型成束方法
图 7 直接辐射相控阵 MBA: (a)、(b) 瓦式结构, (c) 砖式结构

增强型成束方法如图 6(b) 所示. 每一波束是由一组喇叭产生, 即每一波束是由一组喇叭中的每个喇叭产生的分波束

对单抛物面反射式 MBA, 口面直径与波长比 (D/λ) 又依赖于半功率宽度 $\theta_p(\circ)$ 和峰值旁瓣水平 $S_L(-\text{dB})$. 文献[19]给出了一个计算公式:

$$D = (33.2 - 1.55S_L) / \theta_p$$

通过这两个关系式, 可以确定任意两个量, 例如给定 $A(\circ)$ 、 $S_L(-\text{dB})$ 和 $\theta_p(\circ)$, 可确定 N 和 D . 焦距 F 通常选择为口径 D 的 0.8~1.7 倍, 较大的 F/D 值使 MBA 有较好的扫描性能和交叉极化水平. 这样就得到了 MBA 的基本参量.

在多口面反射式 MBA 的设计方面, 文献[24]给出了一种快速、精确的设计方法. 它通过对高斯束天线方向图的近似, 导出了一系列性能估算和设计公式, 使原来需要几周时间的计算机设计过程变为几十分钟的计算器设计过程, 设计结果与用严格方法得到的结果符合很好; 设计和分析方法还可应用于透射式 MBA 及赋形束天线.

3 直接辐射相控阵 MBA

直接辐射相控阵天线应用于 MBA 原来一直受到束形成网络(BFN)结构复杂, 损耗大, 重量重和造价高等条件的限制. 随着 MMIC 技术的进展, 固态功率放大器, 低噪声功率放大器等有源器件都可以作到辐射元的水平上, 这就为有源相控阵用于 MBA 创造了条件.

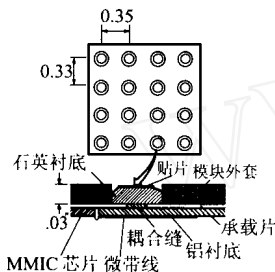


图 8 采用微带-缝耦合圆贴片作辐射元的瓦式 MBA

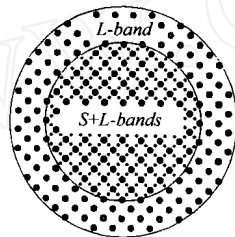


图 9 双频微带天线示意图

有两种基本形式的相控阵 MBA^[20~22]. 一种是单片法(monolithic approach), 它是把整个阵或子阵都集成在单块芯片上. 另一种是混合单片法(hybrid monolithic approach), 它把制作在不同芯片上的天线阵或子阵组合在一起. 混合单片法更有能效地使用天线辐射口面, 因而得到更广泛的运用. 混合单片法又可分为砖式结构和瓦式结构, 如图 7 所示^[22]. 在图 7(a)中, MMIC 模块是垂直于天线辐射口面的, 它应用天线阵的深度来安排 MMIC 电路. 在图 7(b)中, 一些 MMIC 模块及其 RF 混合和信号分配网络集成成一行(或一列或一个子阵), 但是这些器件仍然是垂直于天线辐射口面的, 因而仍然是砖式结构. 在图 7(c)中, 有源器件和分配网络集成在天线辐射口面背后并与其平行的薄层中. 这种结构由于应用了高密度集成技术实现了体积、重量和成本的降低. 图 8 是一个典型的瓦式结构的剖面图, 它采用微带-缝耦合的腔基圆贴片作辐射元^[20]. 用这样的 16 个辐射元组成的相控子阵, 工作在 29.6GHz, 大小为 3.2 × 3.2 × 0.75cm³, 增益 5dB, EIRP 可实现 75W. 把 N 个这样的子阵联结到一个具有 RF/DC/LOGIC 的母板上, EIRP 可按 N^2 倍数增加.

相控阵 MBA 的辐射元一般是印制在衬底上的贴片、缝隙或带缝隙的贴片. 辐射元可排列成三角点阵或矩形点阵; 相位子阵也可按三角方式或矩形方式或其他形式排列. 辐射元间距和子阵元间距决定于工作波长. 把两种不同间距的辐射元迭加制作在同一个辐射口面上, 可实现收发频率不同时的收发共用天线. 图 9 给出了一个双频微带天线的示意图, 其中, 接收(L波段)元间距为 1.25 λ , 发射(S波段)元间距为 1.1 λ ^[23].

4 有意义的研究课题

多波束天线已有二十多年的历史, 已经得到广泛应用和研究, 但仍有不少问题需要解决, 存在一些有意义的研究课题.

4.1 有关天线反射面的研究

众所周知, 对标准的旋转反射面或柱形反射面, 只要馈源处于曲面的焦点(对旋转曲面和点源)或焦线(对柱形曲面和线源)上, 其波束经反射面反射后就会在反射面的口面上形成平面波. 现在 MBA 的馈源一般不再是点馈源或线馈源, 而是二维的面馈源, 而且尺寸较大, 有的甚至可以和反射面同一数量级. 在这种情形下, 如何设计反射面的形状, 如何修正二维面源的影响来实现理想的波束, 是一个重要的理论和实际课题.

4.2 有关天线馈源的研究

传统的馈源是喇叭馈源, 包括多模喇叭和波纹喇叭^[14]. 近年来, 微带平面天线的研究十分活跃, 它具有体积小, 重量轻, 馈电方便等优点, 应用它来发射和接受单波束的天线系统已经用于移动卫星通信和直接接收卫星电视^[15~20]. 但是把它作为多波束天线的初级辐射器的研究仍是一个十分重要而尚待解决的课题.

4.3 有关天线波束成型馈电网络(BFN)和相位振幅控制器的研究

对先进的增强型波束成形方法, 一个波束实际上是多个初级辐射器元产生的分波束的迭加, 通过分别地、独立地调整这些初级辐射器元的振幅和相位^[21]或者仅仅调整其相位^[22], 就可以实现所需要的波形. 因而如何实现振幅相位的控制和异幅异相的分配, 也是 MBA 的一个关键课题.

4.4 相控阵 MBA 的研究

利用相控阵技术、数字信号处理技术和电控有源元件实现波束指向控制和波束赋形是非同步轨道卫星实现固定区域点波束覆盖的重要课题^[26,27].

4.5 地面段 MBA 的研究

本文主要论述星上 MBA 的有关问题. 实际上 MBA 也可应用于地面段, 如车载式高增益天线或多波束基站天线, 它可以改善捕捉和跟踪卫星信号的性能, 从而提高通信质量和容量^[25].

参考文献:

- [1] L J Ricardi. Communication satellite antennas [A]. in Proceedings of the IEEE. [C], Mar. 1977, 65(3): 356 - 369.
- [2] W Rotman. Optimization studies of multiple-beam antennas for EHF

- satellite communications [A]. in 1988 Antennas Propagat. Soc. Int. Symp. Dig. [C], Syracuse, NY, 1988:1306 - 1309.
- [3] M A Mitchell, et al. Multiple-beam multiple-frequency spherical lens antenna system providing hemispherical coverage [A]. in Proc. of 6th Int. Conf. Antennas Propagat. [C], GA, 1989:394 - 398.
- [4] A I Zaghoul, Y Hwang, R M Sorbello and F T Assal. Advances of multibeam communications satellite antennas [A]. Proc. IEEE [C], July 1990, 78(7):1214 - 1232.
- [5] P O Iversen, and L J Ricardi. Emulation of a 37-beam MBA using a 265-beam MBA [A]. in Proc. 1991 Nat. Telesyst. Conf. [C], Atlanta, GA, 1991:157 - 161.
- [6] Y Hwang. Satellite antennas [A]. Proc. IEEE. [C], Jan. 1992, 80(1):183 - 193.
- [7] E J Fitzpatrick. SPACEWAY system summary [J]. Space Communication, 13 (1995)7-23. IOS press:7 - 23.
- [8] T Katagi, and Y Takeichi. Shaped beam horn-reflector antennas [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., Nov. 1975, AP-23, 11:757 - 763.
- [9] B S Westcott. Shaped Reflector Antenna Design [M]. Letchworth, Hert, England: Research Studies Press Ltd, 1983.
- [10] V Galindo-Israel, W A Imbriale, and R Mitra. On the theory of the synthesis of single and dual offset shaped reflector antennas [J]. 1987, IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-35:887 - 986.
- [11] K Ueno, T Iitanami, H Kumazawa and I Ohtomo. Design and characteristics of a multiband communication satellite antenna system [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems, April 1995, 31(2):600 - 606.
- [12] E C DuFort. Optimum Network for simultaneous multiple beam antennas [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation. Jan. 1992, 40(1):1 - 7.
- [13] D C Chang, C N Hu, and K T Ho. Pattern synthesis of the offset reflector antenna system with less complicated phase array feed [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., Feb. 1994, 42(2):240 - 245.
- [14] K S Rao, G A Morin, M Q Tang, S Richard, and K K Chan. Development of a 45 GHz multiple-beam antenna for military satellite communications [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., Oct. 1995, 43(10):1036 - 1047.
- [15] P O Iversen, L J Ricardi, and W P Faust. A comparison among 1-, 3- and 7-horn feeds for a 37-beam MBA [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation. Jan. 1994, 42(1):1 - 8.
- [16] S D Gray. A nulling performance comparison between a single- and multiple-aperture multiple-beam antenna [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., Nov. 1995, 43(11):1319 - 1324.
- [17] G S Gupta, M Tang, K S Rao, and C K Mbik. Design and trade-off study for intersat 7 c-band antenna system [A]. SBMO Int. Microwave Symp. [C], Sao Paulo, Brazil, July, 1989:202 - 212.
- [18] P Ingerson, and C A Chen. The use of non-focusing aperture for multiple-beam antenna [A]. IEEE Antennas Propagat. Symp. [C], 1983:330 - 333.
- [19] K S Rao, and H J Moody. Modeling of shaped beam satellite antenna patterns [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., June 1987, 35(6):639 - 642.
- [20] J F McIlvanna. Monolithic phased arrays for EHF communication terminals [J]. Microwave J. Mar. 1988:113 - 125.
- [21] R J Mailloux. Phased array architecture for mm-wave active arrays [J]. Microwave J., July, 1986:117 - 124.
- [22] S Sanzgiri, D Bostron, W Potterger, R Q Lee. A hybrid tile approach for Ka Band subarray models [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., Sept. 1995, AP-43(9):953 - 959.
- [23] P Rastrilla, I Stojkovic, J Benedicto and P Rinous. Medium altitude payload concepts for personal satellite communications [A]. American Institute of Aeronautics and Astronautics [C], AIAA-94-1092-CP:1186 - 1193.
- [24] K S Rao. Design and analysis of multi-beam reflector antennas [J]. IEEE Antennas and Propag. Magazine, Aug. 1999, 41(4):53 - 58.
- [25] R Miura, T Tanaka, I Chiba, A Horie and Y Karasawa. Beamforming experiment with a DBF multibeam antenna in a mobile satellite environment [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat., April 1997, 45(4):707 - 713.
- [26] Zaghoul, Gupta R J, Kohl E C, Kilic O. Design and performance assessment of active phased arrays for communications satellites [A]. IEEE Int. Symp. On Phased Array Systems and Technology [C], May 21-25, 2000:193 - 196
- [27] Karmakar N C, Bialkowski M E. Electronically steerable array antennas for mobile satellite communication: a review [A]. IEEE Int. Symp. On Phased Array Systems and Technology [C], May 21-25, 2000:81 - 84.

作者简介:



周乐柱 男, 1944 年生于贵州贵阳。北京大学教授、博士生导师, IEEE 高级会员。1968 年毕业于北京大学物理系, 1981 年获北京大学无线电电子学系理学硕士学位, 毕业后留校任教至今, 1991 年 8 月~1993 年 2 月在英国伦敦大学学院作高级访问学者。1994 年 10 月~1997 年 3 月在英国曼彻斯特科技大学 (UMIST) 作研究教授。长期从事电磁场及微波理论与技术方面的科研和教学工作, 已发表论文, 专著和教材等五十多篇本。近年来主要从事计算电磁学及其应用和卫星通信方面的研究工作。曾获得国家教委科技进步二等奖, 北京大学自然科学优秀成果奖二等奖。



李斗 女, 1967 年生于吉林长春。北京大学电子学系讲师。分别于 1989 年和 1992 年在北京大学电子学系获理学学士和理学硕士学位, 毕业后留校任教至今。参加了 VSAT 卫星通信系统的研制、第三带移动通信系统方案评估、基于通用小卫星平台的高中低轨道通信卫星系统的研究, 以及国家 863 计划卫星移动通信方案和设计等项目。目前正在攻读博士学位。

郭文嘉 男, 1942 年生于上海。北京卫星信息工程研究所研究员。1964 年毕业于中国科技大学。1967~1997 年任西安空间无线技术研究所研究员, 曾负责研制多种通信卫星 (例如东方红-3-F2) 的天线和其他多项研究课题, 发表过二十多篇科技论文。当前的研究领域包括卫星赋形束天线、多波束天线和有源天线等。