

星载 DBF 多波束发射有源阵列天线

龚文斌

(上海微小卫星工程中心, 上海 200050)

摘 要: 低轨通信卫星大容量、终端小型化要求卫星采用多波束天线技术来实现高增益、宽覆盖. 本文针对低轨 CDMA 通信系统, 设计了具有近“等通量”覆盖的平面阵列多波束发射天线, 该天线由 61 微带单元天线阵、61 个发射射频通道和数字波束成形网络组成; 数字波束成形网络对输入的 16 个波束信号进行正交化、加权处理输出 61 路中频信号, 由发射射频通道完成上变频和信号放大, 最后通过天线阵辐射出去在空间形成期望的 16 个赋形波束覆盖. 文章详细介绍了天线的实现方法和试验结果, 通过对 16 波束发射天线原理样机的测试, 结果表明天线各指标都符合设计要求, 有效验证了天线系统设计的正确性.

关键词: 相控阵天线; 数字波束成形; 遗传算法; 多波束

中图分类号: TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2904-06

DBF Multi-Beam Transmitting Phased Array Antenna on LEO Satellite

GONG Wen-bin

(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China)

Abstract: To meet the requirements of large system capacity and miniaturized terminal of mobile satellite communication, Multi-beam array antenna is adopted to realize the high gain and wide coverage by LEO satellite. This paper presents a planar transmitter array antenna with equal flux density coverage according to CDMA standard utilized by LEO satellite. The phased array antenna consists of an array antenna with 61 micro-strip elements, 61 RF front ends, and digital beam forming network (BFN). Orthogonal transform and phase-amplitude adjustment are completed in digital BFN. The 61-channel IF signals outputted by digital BFN are up-converted and amplified by RF front ends, finally transmitted by array antenna to realize the desired shaped-beam coverage. The design methodology and measured results of DBF phased array antenna is discussed in the paper. The measurements demonstrate that all the parameters of array antenna are consistent with the predefined requirements, which validates the rationality of system design and project implementation.

Key words: phased array antenna; digital beam forming; genetic algorithm; multi-beam

1 引言

星载天线是卫星有效载荷的重要组成部分, 对整个卫星通信系统的性能有着极其重要的影响. 上世纪九十年代, 有源相控阵技术开始用于中、低轨道的星载多波束天线. 如全球星系统采用功分器和合成器方式的射频波束成形网络来形成 16 个波束, 铱星系统采用 Butler 矩阵的方式实现波束成形^[1]. 射频波束成形方式一旦波束成形网络确定之后, 波束形状、相邻波束的相交电平 and 波束指向等便固定了, 不容易改动. 特别是当要形成的波束数目较多时(几十个或上百个), 波束成形网络的实现将变得十分复杂, 且难以调整, 要形成低副瓣电平的多波束或实现自适应控制更为困难.

近十多年来, 采用数字技术实现波束成形受到了广泛关注. 目前, 数字波束成形(DBF)技术已经开始应用

于静止轨道的大型通信卫星, 例如 Inmarsat-4 卫星配置 DBF 有效载荷, 可以形成 228 个点波束. 与模拟波束成形网络相比, 数字波束成形网络容易实现多波束、可以灵活改变波束形状、通道幅相误差校正方便等优点.

基于数字波束成形技术的阵列天线技术由于其灵活、性能优越在地面智能天线和雷达中得到了应用^[2,3]. 国内基于数字波束成形技术的星载天线通过近期的发展取得了一定突破, 为实用化的星载 DBF 天线奠定了基础.

鉴于模拟波束成形网络在实现上仍然受到国内加工工艺技术的影响, 在集成实现上具有一定的难度; 上海微小卫星工程中心于 2004 年提出采用 DBF 实现低轨多波束通信天线, 并于 2009 年完成了同时产生 16 个发射波束的有源阵列天线原理样机研制与测试.

本文首先提出了基于 DBF 方式的发射天线实现架

构,采用遗传算法设计了多目标优化的相控阵天线综合,实现了发射波束“等通量”覆盖,提高频率复用效率;提出一种新型的波束成形网络成形系数复用的结构,简化波束成形网络复杂度,节省了 2/3 以上的资源;并给出了通道幅相一致性校正方法和实现方案.最后研制了 DBF 发射天线,通过暗室测量结果分析,有效实现了波束赋形和等通量覆盖的综合目标.

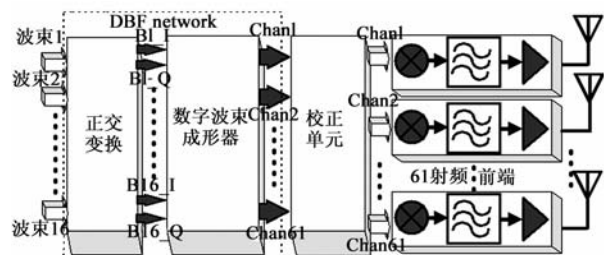


图1 多波束阵列发射天线原理框图

2 多波束发射天线的设计

2.1 天线架构

多波束相控阵发射天线可分为天线阵、射频单元和数字波束形成网络三个组成部分,图1为天线系统的原理框图.数字波束形成网络对输入的16个波束信号先进行正交变换,形成16个I/Q路正交信号,信号通过数字波束成形器的 16×61 矩阵加权计算,形成61路发射基带信号,经过校正单元来修正通道间的幅相不一致,送给61个发射射频通道,由发射组件完成信号的上变频、滤波、放大馈给天线,通过61个天线单元辐射出去,在空间形成所期望的16个波束^[4].

2.2 天线阵

陶瓷阵元材料的优点是温度和强度稳定性好,材料介电常数相对均匀(同一批次烧制),适用于星载实际应用环境,本天线方案选择陶瓷基片制作天线单元.介电常数8.85,阵元单独制造,表面以四氟材料的天线罩覆盖,天线阵组阵时将每个阵元连同天线罩固定安装在金属基板上,馈电探针穿过安装板,在天线阵面的另一侧与射频单元的SMA插座通过探针连接.单元按照正三角形栅格排列构成六边形61元阵列^[5].如图2所示.

本文的相控阵天线主要用在低轨通信卫星中,要



图2 61元阵列天线实物照片

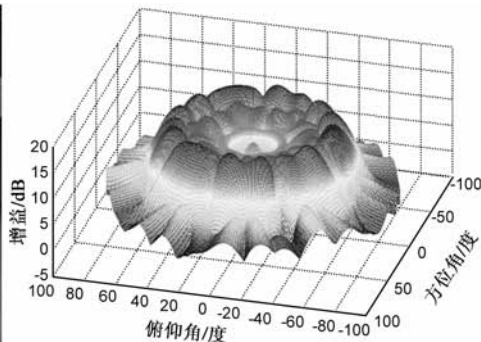


图3 16波束赋形效果图

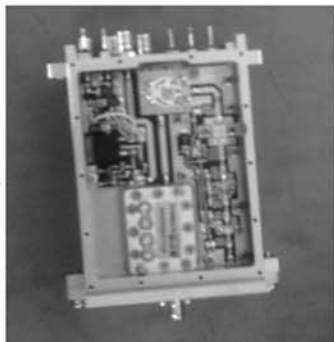


图4 RF模块实物图

求天线具有 106° 的波束宽度,最低天线增益要求接近11dB.由于采用CDMA通信体制,用户容量也受波束间的相互干扰的影响.为了增大系统用户容量,多波束覆盖需要满足近“等通量”覆盖要求^[6].

对于发射天线,天线激励权重在这里只选择相位因子.因为各个波束加入幅度激励的话,功放的非线性因素会导致附加的相位不一致性,影响波束的赋形效果.因此只能采用唯相综合方法^[7].

通过遗传算法的优化设计,以等通量赋形和同频波束旁瓣抑制为核心目标,得到61阵元相控阵天线16个波束的赋形图,如图3所示^[8].可见为了补偿边缘波束自由空间路径损耗,16个波束整体赋形为碗口状,具体第三层边缘波束增益比中心波束增益高6.5dB.

2.3 射频发射组件

发射射频模块把数字波束成形网络输出的模拟中频信号进行上变频、滤波、和功率放大之后馈给天线单元,由天线单元辐射出去.为了有效地抑制带外杂散,末级功率放大器之后还接有一个同轴腔体滤波器.

为了实现射频通道之间幅相一致性的测试,在射频通道的功放处耦合信号,该信号通过射频接收通道至中频,由数字波束成形网络通过AD采样后进行处理.其中一个功放耦合输出两路,一路输出至61选1开关,另一路输出至下变频通道1,该路作为标称通道;其余60个功放耦合输出至61选1开关的其它60个输入端;开关输出连接下变频通道2输入端.幅相校正是在系统初始化阶段单独进行,此时波束形成网络产生参考信号送给61路通道,这里分时校正各通道的功能由控制模块完成.控制模块通过发送一定的控制信号到射频通道电子开关,就可以选择其中一路射频通道计算其修正因子.控制模块还需要发送控制电平协调幅相修正因子计算模块、参考信号发生器、RAM以及61路通道幅相修正各模块的时序.当系统完成了对61路通道修正因子的计算后,参考信号发生器停止信号发生,这时幅相加权模块开始工作,它们对前端波束形成网络提供的61路信号进行加权修正,使其幅相一致,然后发送到61路通道,并馈送至天线.图4是发射射频通道模块实物图.

2.4 数字波束成形网络

数字波束成形网络主要完成信号采样、信道化、正交化、波束成形处理、幅相一致性调整和数模转换等. 如图5所示.

数字波束成形单元采用业界重构性能优越的 FPGA 作主体的架构. 利用 FPGA 分布式计算能力, 在中

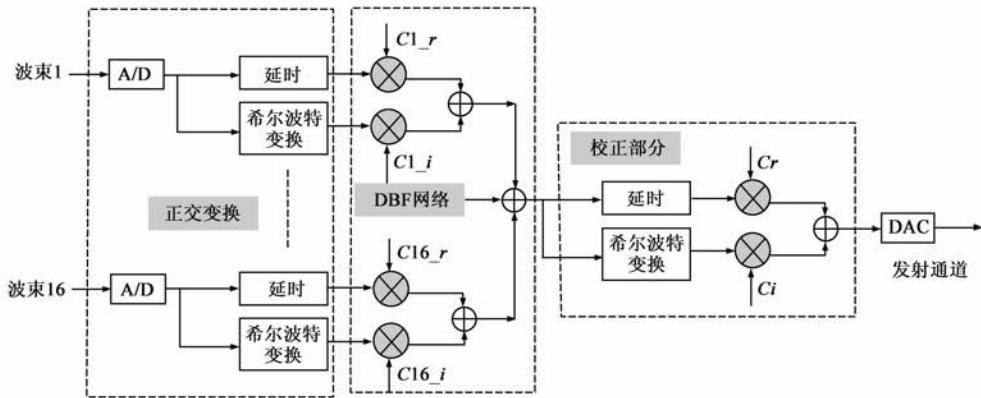


图5 最优信号流分配设计框图



图6 DBF基带机箱外形和内部结构图

2.4.1 正交变换

正交支路产生采用希尔伯特变换, 不采用接收天线常用的正交下变频处理. 因为各波束信号频率结构不对称, 若下变频到基带会造成上下边带频谱重叠, 影响通信质量. 而且正交和同相支路都需要混频滤波, 资源开销会更大.

由于各个波束信号为带通信号, 可设计奇数阶具有反对称结构特点的Ⅲ型希尔伯特变换器. 为了进一步节省资源设计具有半带结构的时域希尔伯特变换器^[10]. 其设计思路如下: 设各波束信号 $x(n)$ 的截止频点为 $2w_0$, 将其频谱向下搬移 w_0 , 然后用滤波器取出 $[-w_0, w_0]$ 的频谱, 最后再向上搬移 w_0 , 得解析信号 $x_c(n)$.

2.4.2 分布式数字波束成形

DBF 相控阵天线是在波束成形单元对基带信号进行波束赋形和扫描的, 发射天线的波束成形网络数学模型如下. 接入单元发射 16 个波束信号, 以矢量表示: $(\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_{16})$; 相控阵天线共有 61 个阵元, 每个阵元通道的信号矢量 $(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_{61})$, 波束成形部分的成型矩阵为:

频、近零频段进行高速并行的数字运算. 而且 FPGA 提供大量的 DSPBlock 和 BlockRAM 资源, 可分别配置成乘法器硬核和软核, 满足波束成形单元需要进行大量复数乘法运算的要求. 数字波束成形网络的实现由一块背板和 4 块 PCIE 子板完成, 子板与背板通过 4 个 PCIE 插槽连接, 如图 6 所示^[9].

$$\mathbf{C}_{16,61} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \dots & C_{1,61} \\ C_{2,1} & \dots & \dots & C_{2,61} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{16,1} & \dots & \dots & C_{16,61} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中矩阵胞元 $C_{i,j}$ 代表在第 j 路射频通道中第 i 路波束信号幅相调整权重. 第 j 阵元通道信号为:

$$\mathbf{T}_j = \sum_{i=1}^{16} \mathbf{B}_i * C_{i,j} \quad (2)$$

需要进行 16 次复数乘累加运算. 可见波束、天线阵元数较多的相控阵天线, 其波束成形单元需要进行大量的并行乘累加运算. 如本文涉及的 16 波束 61 通道波束成形器, 需要 1952 个实数乘法器, 运算量为 39.04G 次复乘加/秒. 因此采用分布式算法设计分布式数字波束成形器, 以零硬件乘法器资源消耗完成高速并行的乘累加运算. 分布式算法(DA)适合应用于固定系数的乘累加运算, 它使用存储器来代替乘法器硬核实现乘累加功能. DA 算法的本质是将各个系数所有可能的和的结果存储起来, 然后用输入变量作为寻址地址, 查找到的数据就是乘累加结果.

正六边形相控阵天线本身关于 120 度的旋转对称性, 可以根据波束空间阵列分解结果设计复用结构, 以各波束为中心完成波束成形乘法运算, 然后以阵元为中心进行对应的累加运算, 完成波束成形操作. 这样可以极大利用各子阵间共用成形系数的特点节省资源.

2.5 幅相校正

相控阵天线波束成形效果的决定因素是各通道间群时延响应和幅频响应的不一致. 通道的动态校正采用单音校正方式^[11]. 幅相校正的基本框图见图 7. 各通道在

统一时钟延触发发送相同的单音信号,然后由幅相校正控制端控制电子开关对某一路射频信号的接入(信号从功放和天线间耦合),通过公共的下变频通道交给幅相校正单元处理.各路接收信号与发送信号对比,得到各个通道幅度、相位误差信息,幅相校正模块因此对各个通道进行校正.幅相误差计算通过最大似然估计算法计算得到.

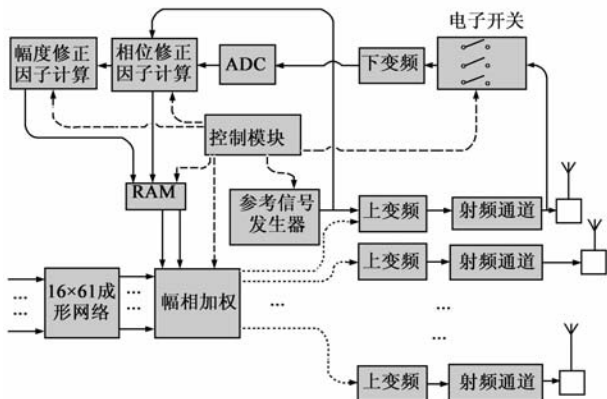


图7 校正算法示意图

通过校正后,通道间的相位一致性可以达到3度.其中各通道的反馈信号是从天线馈线点处耦合,不能反映天线互耦的影响^[12].在未来可以考虑天线远场校正方式.对于发射天线,也可以使用天线远场接收方式看各波束特征,地面计算调整好幅相校正系数后,通过星地环路上传给相控阵天线幅相校正单元.对于数字波束形成方式的相控阵天线,星地环路校正特殊测控指令支持下是可行的.

3 天线测试

针对 DBF 发射天线构成的特点,从测试效率、精度等因素考虑,选用 NSI2000 平面近场测量系统对天线阵列进行测试^[13].

DBF 天线包含射频和数字模块,只能在发射状态对 DBF 天线阵进行测量.增益测试采用比较法对 DBF 天线阵增益进行测量,通过与标准天线测试状态下接收探头的接收电平以及被测天线的通道增益联合计算,可以得到等效的被测天线增益.

通过平面近场的发射波束测试,得到中心波束和第二层、第三层波束的近场幅相分布及远场方向图,图8是中心波束的近场幅相分布.

从图9的仿真和图10测试结果可以看出中心波束赋形能达到较为理想的赋形效果.图11的测试结果剖面图表面中心波束的同频波束零陷可以达到16dB左右,主旁瓣平均抑制度可以达到10dB.但由于发射组件器件温度漂移导致的幅相误差和阵列天线互耦效应,跟理想赋形剖面图相比在边缘赋形上还是有些差距.

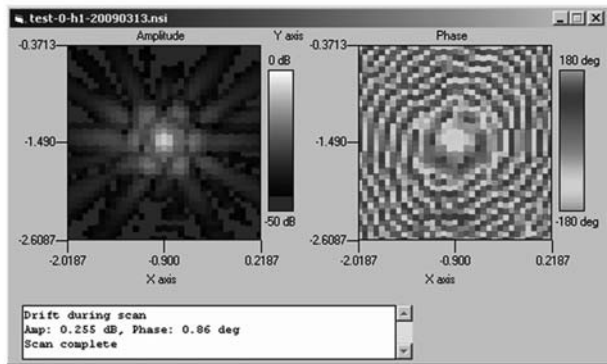


图8 中心波束赋形的近场幅相分布图

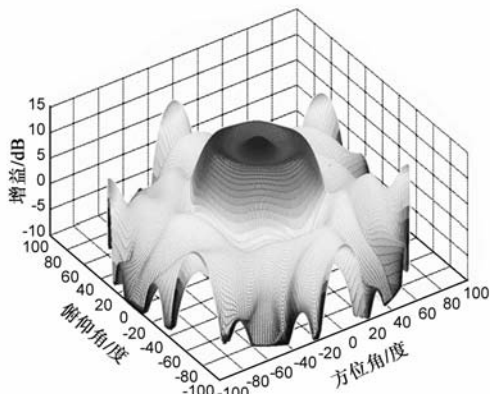


图9 中心波束赋形仿真结果图

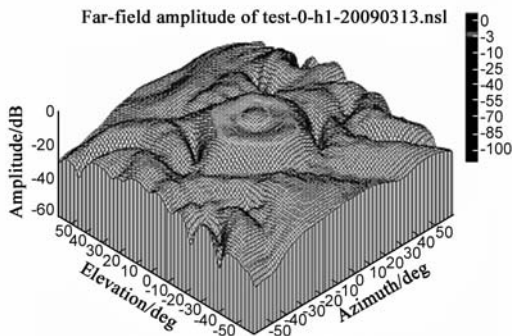


图10 中心波束赋形实测图

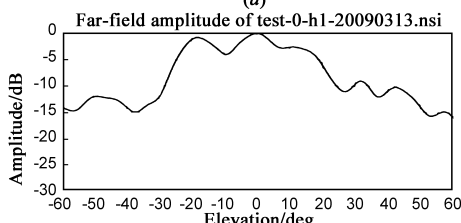
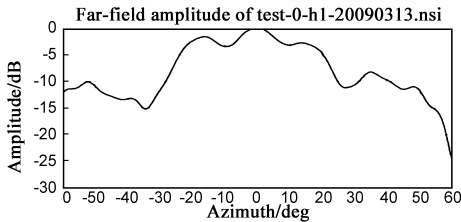


图11 61单元中心波束赋形实测剖面图

图 12、图 13 和图 15、图 16 分别是第二层和第三层波束的仿真和实测三维图,图 14 和图 17 是这两层波束的实测剖面图.从仿真结果和实测结果可以看出利用遗传算法得到较好的波束赋形效果.

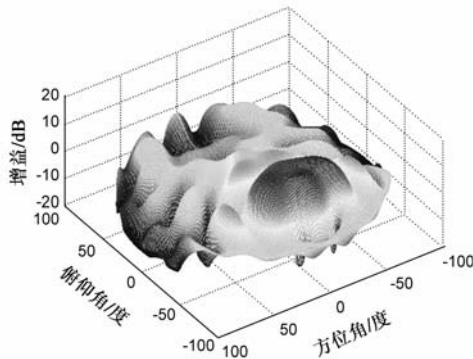


图12 第二层波束赋形仿真结果图

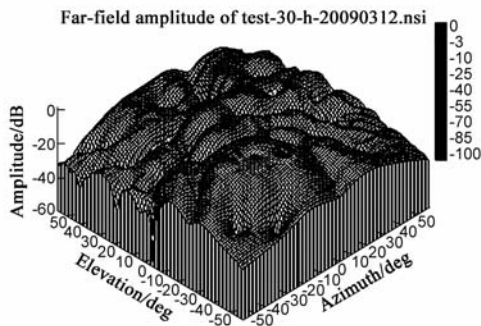


图13 第二层波束赋形实测图

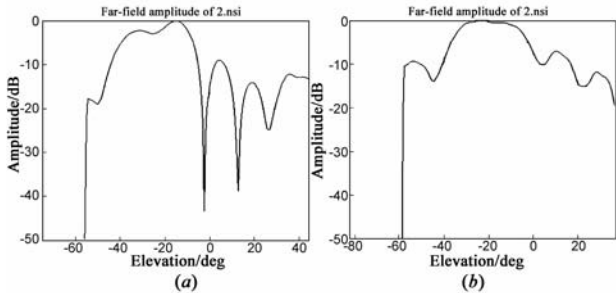


图14 第二层波束赋形实测剖面图

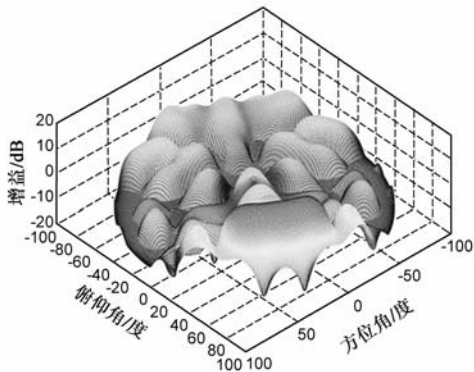


图15 第三层波束赋形仿真图

由测试结果可以推算得到中心波束峰值增益为 10.5dB,第二层波束峰值增益为 13dB,第三层波束峰值

增益达到 16.8dB 以上,中心波束指向误差为 0.4 度,完全达到近“等通量”覆盖的设计指标要求.

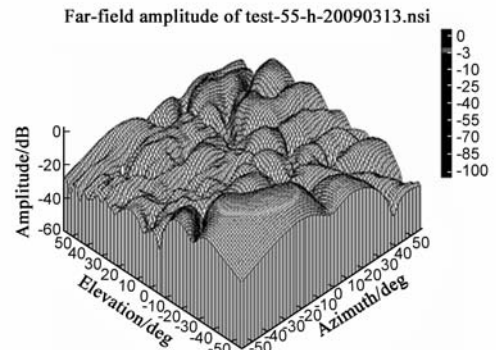


图16 第三层波束赋形实测图

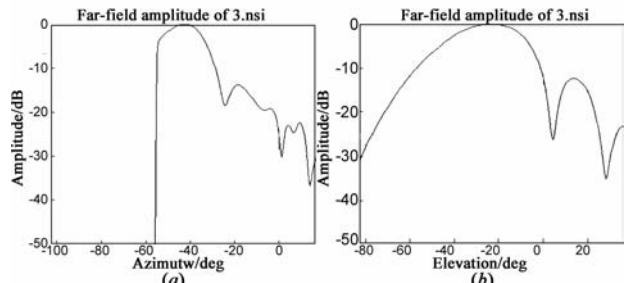


图17 第三层波束赋形实测剖面图

表 1 是三个波束增益与旁瓣测试结果与仿真结果的比较,测试分析结果表明,三层波束赋形的实测结果与仿真结果基本吻合,证明多波束相控阵天线系统整机性能良好,波束形状满足设计要求.

表 1 实测结果与仿真结果比较

| 内容 | 实测 | 仿真 |
|-----------|---------|---------|
| 中心波束最大增益 | 10.5dB | 10.6dB |
| 中心波束第一旁瓣 | -8dB | -9dB |
| 第二层波束最大增益 | 13dB | 13.1dB |
| 第二层波束第一旁瓣 | -7.5dB | -10dB |
| 第三层波束最大增益 | 16.8dB | 16.5dB |
| 第三层波束第一旁瓣 | -12.5dB | -12.5dB |

4 小结

本文设计了 16 波束 DBF 相控阵发射天线,利用遗传算法对相控阵天线进行了唯相激励的天线综合,实现了近“等通量”覆盖;最后提出了一种实用的波束成型网络的复用结构,节省了硬件资源.通过天线暗室测试,对 3 层赋形波束的形状、波束指向、旁瓣、零陷等指标与理想赋形效果进行了对照分析,有效验证了天线系统设计的正确性.

波束形成的幅相加权可以在信号产生至天线阵元之间整个传输通道的任意一级实现.经典的相控阵天线通常是在射频段通过衰减器和移相器来实现幅相加权,本文论述的天线系统多波束形成在数字部分实现.

基于 DBF 的有源天线阵具有以下优点:控制精确,有利于在轨实现通道一致性的校正和波束重构;增加波束数不会影响天线整体架构,只需在数字波束成形网络中增加相应的波束成形处理;无需专用射频网络、校准系统及移相器,避免多层射频网络加工工艺实现难度。

参考文献:

- [1] 余金培, 李国通, 梁旭文, 杨根庆. 现代通信小卫星技术的发展与对策[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 100 - 105.
YU Jin-pei, LI Guo-tong, LIANG Xu-wen, YANG Gen-qing. Development and tactic of modern small satellite technology [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 100 - 105. (in Chinese)
- [2] 姜永权, 魏月. 基于 QPSK 的智能天线固定多波束基带 DBF 算法[J]. 电子学报, 2003, 31(7): 1114 - 1117.
JIANG Yong-quan, WEI Yue. The baseband digital beamforming algorithm for smart antenna fixed beams based on QPSK [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(7): 1114 - 1117. (in Chinese)
- [3] 鲁加国, 吴曼青, 靳学明, 方正新. 基于 DDS 的有源相控阵天线[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 199 - 202.
LU Jia-guo, WU Man-qing, JI Xue-ming, FANG Zheng-xin. Active phased-array antenna based on DDS[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 199 - 202. (in Chinese)
- [4] Dreher, A Niklasch, N Klefenz. Antenna and receiver system with digital beam forming for satellite navigation and communications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(7): 1815 - 1821.
- [5] Ouyang J. A novel radiation pattern and frequency reconfigurable microstrip antenna on a thin substrate for wide-band and wide-angle scanning application[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2008, 4: 167 - 172.
- [6] J C Liberti, T S Rappaport. Analytical results for capacity improvements in CDMA [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(3): 680 - 690.
- [7] Mahanti, et al. Phase-only and amplitude-phase only synthesis of dual-beam pattern linear antenna arrays using floating-point genetic algorithms[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2007, 68: 247 - 259.
- [8] Li W T, Shi X W, Xu L. Improved GA and PSO culled hybrid algorithm for antenna array pattern synthesis [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 80: 461 - 476.
- [9] Pellon A, Carvalho N, Lucke O. Design of cost-optimised active receive array antenna for mobile satellite terminals [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications [C]. Torino, Italy: IEEE, 2007. 719 - 722.
- [10] Ronald E, Crochiere, Lawrence. Multirate Digital Signal Processing [M]. New Jersey: Prentice-Hall Press, 2001. 219 - 237.
- [11] Raviraj S Adve, Tapan Kumar Sarkar. Compensation for the effects of mutual coupling on direct data domain adaptive algorithms [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2000, 48(1): 86 - 94.
- [12] Yuan J, Qiu Y, Liu Q Z. Fast analysis of multiple antennas coupling on very electrical large objects via parallel technique [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2008, 22(8): 1232 - 1241.
- [13] Sukharevsky O I, Shramkov A Y. High-frequency method of antenna directional pattern calculation [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2007, 21(14): 2009 - 2023.

作者简介:



龚文斌 男, 1975 年 12 月生, 浙江玉环人. 2003 年获得解放军理工大学通信工程学院博士学位, 现为上海微小卫星工程中心通信技术研究室副主任、研究员, 主要从事相控阵天线技术、卫星通信与导航技术等方面的研究工作. 主持完成了多波束发射天线原理样机的研制.
E-mail: gongwb@mail.sim.ac.cn