

基于子阵列的低轨星载多波束相控阵天线的设计与实现

梁 广^{①②} 龚文斌^① 余金培^{①②}

^①(上海微小卫星工程中心 上海 200050)

^②(中科院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

摘 要: 该文针对采用 CDMA 通信体制的低轨通信卫星, 设计了具有“等通量”覆盖的平面阵列多波束天线, 克服了卫星波束大角度扫描带来的“边缘问题”和“远近效应”。采用遗传算法对正六边形天线阵列进行综合, 结合“子阵”分割理论, 在波束空间和阵元空间进行子阵分割, 简化了波束赋形的参量数目, 同时还提出了一种波束成形网络复用结构, 节省了 2/3 的资源。最后研制了 16 波束相控阵发射天线, 其平面近场测试结果表明天线各指标都符合设计要求, 有效验证了算法的正确性。

关键词: 相控阵天线; 数字波束形成; 遗传算法

中图分类号: TN927; TN821+.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1435-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00695

The Design and Implementation of Sub-arrayed Phased Array Antenna for LEO Satellite

Liang Guang^{①②} Gong Wen-bin^① Yu Jin-pei^{①②}

^①(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China)

^②(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

Abstract: This paper presents a practical scheme of equal flux beams coverage and frequency multiplex according to CDMA standard utilized by LEO satellites, which can reduce the effect of “corner problem” and “near and far problem”. Genetic algorithm is adopted to realize the synthesis of hexagonal antenna, based on “sub-array” theory. The partition of sub-array in beam-space or element-space can reduce the number of beam-forming coefficients. A multiplex structure for beam-forming network is proposed, which can reduce the resource consumption by 67%. Ultimately a phased array antenna (TX) is designed. The experiment result demonstrates that all the parameters of phased array antenna are consistent with the target of design, which validates the rationality and feasibility of genetic algorithm.

Key words: Phased array antenna; Digital Beam Forming(DBF); Genetic algorithm

1 引言

由于模拟波束形成方式在波束数目需求很多时, 需要设计结构非常复杂的功分网络, 因此在基带或中频数字域处理的数字波束形成技术(DBF)成为相控阵天线的发展趋势。DBF 技术具有波束形成配置灵活, 支持动态在轨重构等优势。当前国外有许多大型通信卫星都采用数字方式实现波束数目要求较多的相控阵天线, 如 EADS 的 Inmarsat-4 卫星。但国内基于数字波束形成方式, 特别是波束数超过 10 个的星载多波束相控阵天线还没有相关应用的报道。本文涉及的“十一五”重大预研项目“星载多波束相控阵天线”, 已经完成一个 16 波束

发射天线原理样机的研制与测试。

2 波束覆盖方案设计

本文涉及的相控阵天线应用在低轨卫星(LEO)有效载荷中, 通信体制采用码分多址(CDMA)制式。不同于传统的频分复用和时分复用方式, CDMA 是一个干扰受限的系统。其用户容量不仅受限于相同波束(小区)内的用户干扰, 而且也受限于波束间的相互干扰。为了增大系统用户容量, 本文提出等通量覆盖和频率间隔复用的波束覆盖方案。

2.1 等通量覆盖

对于 LEO 卫星, 由于波束扫描角很大, 星下各扫描方向的路径传输损耗差异很大。星地通信环路信道环境主要为莱斯信道^[1], 路径损耗主要为自由空间路径损耗, 路径损耗会随扫描角 θ 增大而增大。本文涉及的相控阵天线波束边缘点和星下点的路径传播损耗差达到 7 dB。这些传输损耗差异会给卫星通信前向和反向链路分别带来较强的“边缘问题”

2009-05-08 收到, 2009-10-28 改回

上海市科委重大科技攻关项目(03DZ15009)和上海市自然科学基金(09ZR1430400)资助课题

通信作者: 梁广 hnlg219@163.com

和“远近效应”的影响，这给卫星有效载荷功率控制提出了很大的难度。为了减轻载荷设计的复杂度，提高系统容量，必须要求天线产生的波束增益特性能够补偿从卫星到地面的传播损耗差异，实现在地球表面“等通量”覆盖。因此波束覆盖整体赋形为球冠形状，曲率和地球相当。

2.2 频率复用

低轨卫星移动通信系统中的某波束通信总是受到其他波束的干扰，其干扰总合为 $I = \sum_{i=1}^{K-1} P \cdot D_i$ 。

其中 P 是各个波束的发射功率， D_i 是其它波束在该波束范围内的方向性增益， K 是总的波束数^[2]。

在采用小区覆盖的地面移动通信(如 IS-95)体制，由于小区间的干扰，某一小区用户其平均差错概率为 $P_b = Q\left(\sqrt{\frac{3fDG}{K-1}}\right)$ ^[3]，其中 D 为该用户点的天

线相对方向性增益， G 为 CDMA 系统的扩频增益， f 为 CDMA 系统实际上频率复用因子。 $f = N_0 / (N_0 + N_{k-1})$ ，其中 N_0 是该小区中其他用户的干扰总和， N_{k-1} 是其他 $K-1$ 个小区干扰总和。在实际地面移动通信体制的小区优化覆盖策略中，也采用一定的频率间隔复用。

应用于低轨卫星移动通信的相控阵天线，特别是阵列天线数目有限，波束旁瓣抑制制度较低时，波束间的干扰极大影响了整个通信系统的性能。在此借鉴地面移动通信的频率复用策略，相同频率在各波束间间隔复用。为了降低波束对同频波束的旁瓣干扰和影响，将同频波束位置设为干扰零陷，从而提高整个通信系统的误码性能。16 波束采用双频间隔复用，频率复用覆盖方案示意图见图 1。

3 遗传算法唯相综合

天线综合的目标通过调整天线各单元的相位激励权重，使得实际天线方向图与理想天线方向图一致。所以首先需要对理想天线方向图进行建模：对理想全向天线整个波束空间扫描，补上星地空间的

自由路径损耗，得到各个波束在各个方向的主瓣增益。同时结合 16 个波束的频率覆盖方案，将某波束设为其同频波束的零陷，尽量压低波束的旁瓣，从而得到各个波束在整个扫描空间的方向图分布。然后对相控阵天线在整个扫描空间的理想辐射方向图进行数学建模。以天线辐射中心为坐标原点，建立坐标系。设第 i 个天线单元坐标为 $[x_i, y_i]$ ，其幅相激励权重因子为 $A_i \exp(w_i)$ ，俯仰角 θ ，方位角 φ 处相控阵天线理想方向图函数 $D(\theta)$ 为

$$D(\theta) = 20 \lg \left(\left| \sum_{i=1}^J A_i e^{j \cdot w_i + \frac{2\pi(\sin \theta(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi))}{\lambda}} \right| \right) / J + P(\theta) \tag{1}$$

其中 J 是天线单元总数， $P(\theta)$ 是天线单元的 5 阶拟和的方向图。天线单元的方向图是在暗室远场通过单个测试单元馈电而其它单元接负载匹配的条件下测试得到的，这在一定程度上反映天线单元间的互耦效应的影响^[4]。值得注意的是对于发射天线，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相位调制如 QPSK 的相位模糊，进而影响卫星通信质量。因此只能采用唯相综合方法^[5]，减少了 1 维权重系数，对遗传算法提出了更高的要求。

遗传算法是 Holland 教授创立的优化搜索技术，它将生物原理应用于多参量优化过程^[6]。遗传算法可以实现并行运算，这极大提高了算法收敛速度和全局搜索能力。遗传算法中一个关键点是构造目标函数，特别是对于大规模阵列天线方向图的多目标约束优化问题。从天线综合目标可以看出主要考虑主瓣的等通量赋形和旁瓣抑制，以及同频波束间的零陷设定。在此我们构造目标函数如下：

$$F(\theta, \varphi) = -[k_1 \cdot |G(\theta, \varphi) - G_0| + k_2 \cdot |S_G(\theta, \varphi) - S_G_0| + k_3 \cdot |N_G(\theta, \varphi) - N_G_0|] \tag{2}$$

其中 G_0 是相控阵天线某波束理想的主瓣增益， S_G_0 是设置的该波束平均旁瓣电平， N_G_0 是该波束在同频波束范围内设置的零陷。 $[k_1, k_2, k_3]$ 是调整权重系数，这样可以灵活调整各项指标对于理想目标函数的贡献，使得天线各项性能都能趋于优化设计。

将波束扫描理论和遗传算法结合起来，具体就是将中心扫描波束扫描至已划分的外层波束指向，在该波束进行一定的赋形。这也就是在已知的给定指向位置赋以遗传算法一个合理的初始值，避免了单纯遗传算法的盲目性。这对大角度波束扫描非

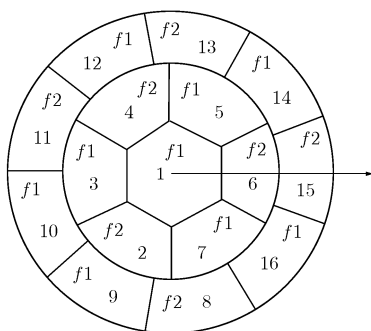


图 1 16 波束频率复用示意图

常重要, 因为波束的半功率带宽和增益之间存在一定矛盾, 避免遗传算法在一些不合理的增益区间陷入局部最优。

4 综合优化

星载相控阵发射天线波束成形的数学模型是这样的。波束成形部分的成型矩阵 $C_{M,N}$ 为

$$C_{M,N} = \begin{pmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & \cdots & C_{1,N} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & \cdots & C_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{M,1} & C_{M,2} & \cdots & C_{M,N} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中矩阵元 $C_{i,j}$ 代表在第 j 路射频通道中第 i 路波束信号的延时, 也就是上面用遗传算法得到的相位权重因子; M, N 分别为相控阵天线波束数和阵元数。成型矩阵某行各矩阵元代表各射频通道对某一特定波束赋形因子的贡献, 各行即为相控阵天线的波束空间; 成型矩阵某列各矩阵元代表某一射频通道对各个波束赋形的贡献, 各列即为相控阵天线的阵元空间。

4.1 波束空间的阵列分割

遗传算法以波束赋形为目标得到各个波束的赋形因子, 它直接面对对象是成型矩阵的波束空间。遗传算法有较好的全局搜索能力, 但是当计算中变量数目超过了一定数目, 大大超出算法本身的全局搜索能力时, 搜索效率就变得很低并且很快就停滞在局部最优点附近, 因而得不到全局最优解^[7]。

因此这里可以采取大规模天线阵中常见的“子阵”分割技术, 来精简权值变量数目^[8]。分割的原则主要取决于天线阵的阵元分布和目标赋形波束的形状。具体来说, 就是将相互距离比较近的几个阵元看成平面阵的一个子阵, 其他子阵和当前子阵相同位置阵元给予相同的加权(不同于传统子阵分割中子阵内各单元采用相同权值)。将平面阵划分成若干个子阵, 权值变量数目就是子阵内阵元数目, 从而遗传算法参数变量得到了精简, 有效提高了遗传算法收敛的速度。

整个天线阵列采用 61 个天线单元, 天线单元等三角形栅格排列组成一个正六边形平面阵。具体如图 2 所示。正六边形天线分布具有很多其他天线构型不具备的优势。如在文献[9]Sharp 证明了如果主波束需要在一个和阵列正交的锥形区域内扫描时, 采用六边形分布将使阵元数目降低 13.4%。

以中心波束为例, 鉴于中心波束关于扫描中心对称, 而正六边形相控阵天线关于天线中心的 60° 旋转对称性, 所以可将天线阵列分割为 6 个子阵(见三角形子阵一, 二, ..., 六), 各个子阵相同权值阵元

位置如图 2 所示。这样遗传算法参数变量就由 61 个减少为 11 个。

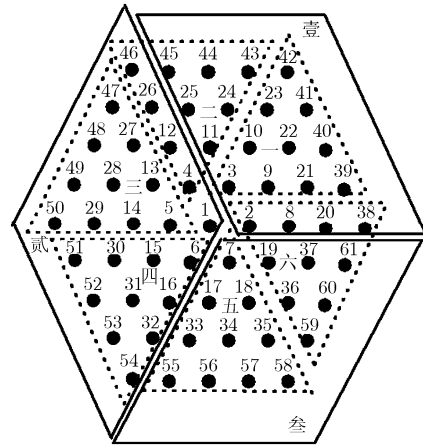


图 2 正六边形天线分割

当然采用“子阵”分割技术, 在减少变量数的同时, 也可能造成波束无法精确赋形到理想要求, 这是每个阵元权值没有自由独立取值的缘故。因此需要合理考虑子阵的规划, 使得赋形波束的效果尽量符合理想要求, 同时又能大幅度减少权值变量数目。

4.2 阵元空间的阵列分割

从图 1 的波束覆盖方案可以看出 16 个波束 3 层覆盖: 中心波束, 第 2 层 6 个波束, 第 3 层 9 个波束。因为波束和天线具有一定的旋转对称性, 从阵元空间来看, 各射频通道的成形因子也满足一定的对称关系。

中心波束是圆形, 第 2 层波束间关于阵列天线中心 60° 旋转对称, 第 3 层波束间关于阵列天线中心 40° 旋转对称。也就是说整个波束覆盖旋转 120° 能维持原样。而采用的 61 阵元三角形栅格排列组成的正六形阵, 也有关于天线中心的 120° 旋转对称性。

因此将阵列天线分为 3 个大子阵组合(见四边形阵壹、贰、叁), 具体见图 2。子阵组合壹对波束 5 的贡献和子阵组合贰对波束 3 的贡献应该是相同; 子阵组合壹对波束 15 的贡献和子阵组合贰对波束 12 的贡献也是相同的。总之只要阵元 $[M, N]$, $[M', N']$ 之间, 和波束甲、乙之间有相同角度的旋转对称关系, 则阵元 $[M, N]$ 对波束甲的成形因子, 与阵元 $[M', N']$ 对波束乙的成形因子应该是相同的。

按照这种思路, 将 3 个大子阵具有相应对称关系的阵元列为一组, 总计 20 组, 见表 1。各组 3 个阵元的阵元空间之间满足表 2 的对称关系。

这样整个波束成形矩阵元素只有 $1/3$ 的自由

表 1 阵元空间 20 组分解

分组	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	组 6	组 7	组 8	组 9	组 10
位置 1	2	3	8	9	10	11	20	21	22	23
位置 2	4	5	12	13	14	15	26	27	28	29
位置 3	6	7	16	17	18	19	32	33	34	35
分组	组 11	组 12	组 13	组 14	组 15	组 16	组 17	组 18	组 19	组 20
位置 1	24	25	38	39	40	41	42	43	44	45
位置 2	30	31	46	47	48	49	50	51	52	53
位置 3	36	37	54	55	56	57	58	59	60	61

表 2 同组阵元加权系数对应关系

	对应波束															
位置 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
位置 2	1	6	7	2	3	4	5	14	15	16	8	9	10	11	12	13
位置 3	1	4	5	6	7	2	3	11	12	13	14	15	16	8	9	10

度，对天线综合和数字波束成形网络设计都带来了极大的便利。从天线综合角度来讲，只需知道各层几个特定波束如中心波束、第 2 层 2/3 波束、第 3 层 8/9/10 波束就可以推知其他 10 个波束，极大减少了遗传算法的运算量。

对于大规模的相控阵天线，其波束成形网络的设计复杂度一直是个很棘手的问题，因为波束成形需要大量的乘累加运算，以 16 波束 61 通道相控阵天线为例，需要 1952 个实数乘法器。这对 FPGA 等芯片载体提出了很高的要求。因此采用资源复用方式是大规模阵列天线综合的一条可行路径，每组 3 个射频通道复用一個波束成形网络。发射天线的复用结构示意图如图 3。16 波束经过波束空间交换，得到 3 种新结构的波束空间子集合，然后以采用相同成形因子的波束复用的原则，将 3 个波束空间子集合复用为一体，通过预先设计的波束成形网络。最后波束成形结果再解复用，分别送往各个射频通道。采用复用结构的波束成形网络的复杂度较常规节省 2/3 的资源消耗。

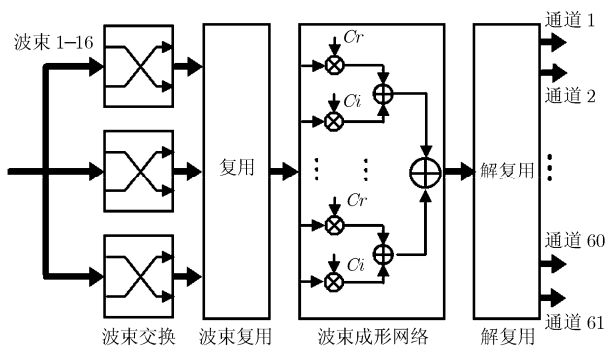


图 3 波束成形网络复用结构

5 综合结果与天线测试

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 4 所示。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，第 3 层边缘波束增益比中心波束增益高 6.5 dB。

在天线综合的基础上，研制了采用 DBF(数字波束形成方式)的星载多波束相控阵发射天线。天线阵列为采用陶瓷复合介质材料加工的贴片天线。天线中心频点为 2 GHz，频带宽度为 10 MHz。为了减少插入损耗，增大天线的 EIRP，射频部件(包括时钟、功率分配网络)紧贴天线下方。最底下为 DBF 相控阵天线的数字处理单元，正交化处理、波束成型、幅相调整等功能都在数字处理单元实现^[9]。卫星有效载荷接入部分发射 16 个波束信号，经过正交化处理，送波束成形单元。正交化处理可以根据信号特点选择合适的算法，如希尔伯特处理、DFT 分析滤波器组等。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。幅相调整单元紧跟波束成形单元之后，可加入射频通道预失真、预加重处理。最后在天线暗室平面近场测量整个天线阵列的方向图，将其与相控阵天线各波束理想方向图的对照分析如下。

从图 5 可以看出中心波束赋形能达到理想的“墨西哥”帽式的赋形效果。测试结果剖面图(图 6)也表明中心波束的同频波束零陷可以达到 16 dB 左右，主旁瓣平均抑制制度可以达到 12 dB。但由于发

射组件器件温度漂移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。

从图 7、图 8 也看出遗传算法得到的波束成形因子，赋形效果良好。由测试结果可以推算得到中心波束峰值增益为 10.5 dB，第 2 层波束峰值增益为 13 dB，第 3 层波束峰值增益达到 16.8 dB 以上，中心波束指向误差为 0.4°，完全达到等通量覆盖指标要求。

6 结束语

本文在设计 16 波束 DBF 相控阵天线过程中，针对低轨卫星大角度波束扫描带来的 7 dB 自由空间路径损耗，提出了“等通量”覆盖的设计要求；

同时借鉴地面移动通信体制，给出了波束间频率复用方案。最后针对 16 波束的理想波束赋形和正六边形阵列天线(阵元三角形栅格排列)，利用遗传算法对相控阵天线进行了唯相激励的天线综合。同时结合“子阵”分割理论，在波束空间和阵元空间进行子阵分割，这对减少遗传算法参变量数目和简化波束成型网络的复杂度带来了极大的便利，最后提出了一种实用的波束成型网络的复用结构，节省了 2/3 的硬件资源。通过平面近场的测试，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，有效验证了遗传算法天线综合的正确性。

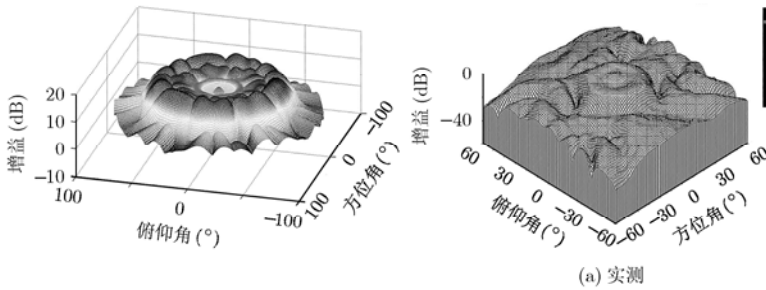


图 4 16 波束赋形效果图

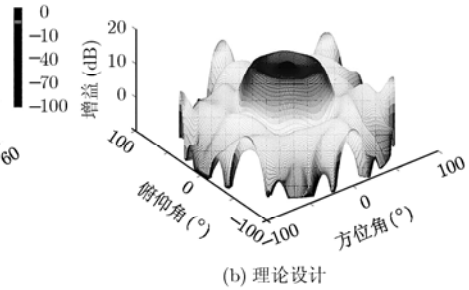


图 5 中心波束 3D 效果图

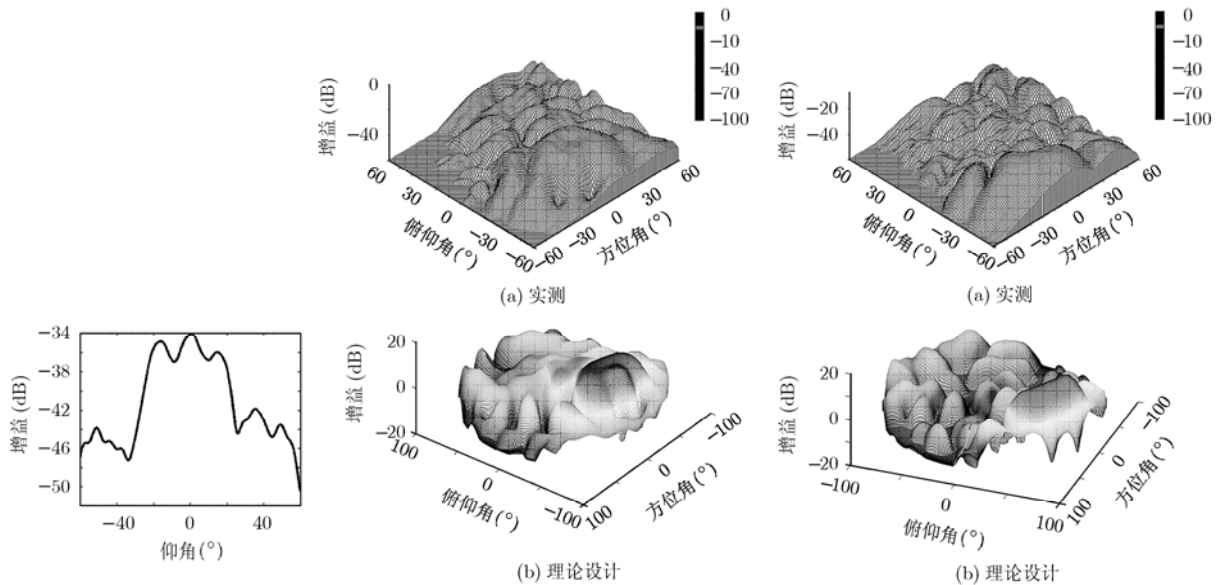


图 6 中心波束 $\varphi=0^\circ$ 剖面图

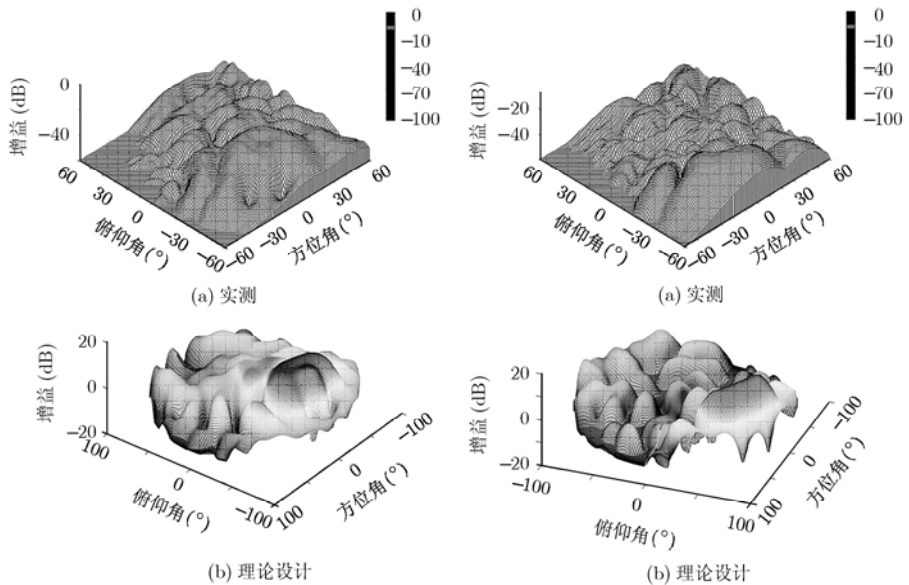


图 7 第 2 层波束 3D 赋形效果

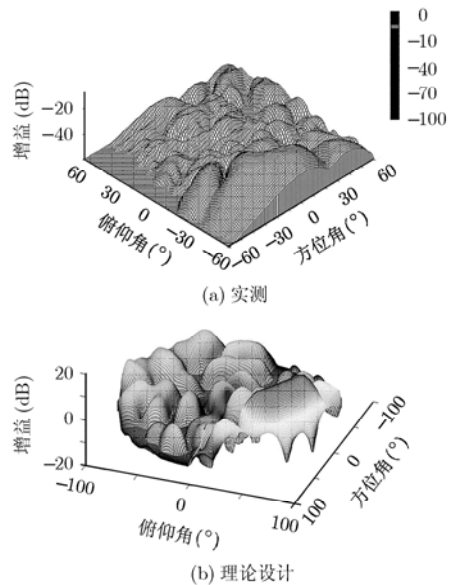


图 8 第 3 层波束 3D 赋形效果

参 考 文 献

[1] Rappaport T S. Wireless Communications Principles and Practice[M]. Second Edition. New Jersey: Prentice Hall. Inc, 2004: 107-110.

[2] Kuhwald T and Boche H. A constrained beam forming

algorithm for 2D planar antenna arrays[C]. IEEE 50th Vehicular Technology Conference, Amsterdam, 1999, Vol. 1: 1-5.

[3] Roy S D and Kundu S. Performance analysis of cellular CDMA in presence of beam forming and soft soft hand off[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, 88(3):

- 73-80.
- [4] Coetzee J C and Yantao Yu. Port decoupling for small arrays by means of an eigenmode feed network [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(6): 1587-1593.
- [5] Mahanti G K, Chakrabarty A, and Das S. 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(12): 247-259.
- [6] Xu Z, Li H, Liu Q Z, and Li J Y. Pattern synthesis of conformal antenna array by the hybrid genetic algorithm[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, 79(9): 75-90.
- [7] 晋军, 王华力. 基于遗传算法的部分自适应波束形成方法[J]. *通信学报*, 2006, 27(12): 92-96.
- Jin Jun and Wang Hua-li. Partially adaptive beam-forming methods based on genetic algorithms [J]. *Journal on Communication*, 2006, 27(12): 92-96.
- [8] Rocca P and Manica L. A hybrid approach to the synthesis of subarrayed monopulse linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(1): 280-283.
- [9] Harry L and Van Trees. Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: John Wiley & Sons. Inc, 2008: 222-231.
- [10] Pellon A, Carvalho N, and Lucke O. Design of cost-optimised active receive array antenna for mobile satellite terminals [C]//IEEE International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Torino, Italy, IEEE, 2007: 719-722.
- 梁 广: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为相控阵天线与卫星通信技术.
- 龚文斌: 男, 1975年生, 博士, 研究员, 研究方向为相控阵天线与卫星通信技术.
- 余金培: 男, 1965年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为卫星通信技术.