

全空域数字多波束天线技术研究*

翟江鹏^{✉1}, 尹继凯¹, 王金华², 齐 昕²

(1 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050000

2 北京卫星导航中心 北京 100094)

摘要: 针对航天领域全空域多目标管理使用需求, 设计了一种基于富勒烯结构的赋型数字多波阵列天线, 介绍了数字多波束信号收发处理工作原理及赋形阵列结构设计方案, 研究了基于赋型阵列天线的波束滑动行走模式、多波束工作模式、波束增强模式, 建立了赋形阵列天线数学仿真模型, 对阵列天线波束增益一致性、波束宽度一致性、多波束方向图、波束增强性能进行了仿真分析, 验证了赋形阵列天线的优异性能。

关键词: 全空域; 数字多波束; 球面赋型阵列; 波束增强

中图分类号: TN821+.8 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0010-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211130001

引用格式: 翟江鹏, 尹继凯, 王金华, 等. 全空域数字多波束天线技术研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 10–16.

Research on hemispherical coverage digital multi-beam antenna

ZHAI Jiangpeng¹, YIN Jikai¹, WANG Jinhua², QI Xin²

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050000, China;

2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the demand of multi-target management in aerospace, a hemispherical conformal antenna array based on fullerene structure is designed. The principle of transmit-receive signal processing in digital beamforming and the scheme of array structure designing is introduced. The operation modes of beam walking, simultaneous muti-beam and beam enhancement are studied. The mathematical model of the hemispherical conformal antenna array is established. Simulation results of beam consistence, muti-beam pattern and beam enhancement show the excellent performance of the antenna array.

Key words: Hemispherical coverage; Digital multi-beam; Hemispherical conformal array; Beam enhancement

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211130001

Citation: ZHAI Jiangpeng, YIN Jikai, WANG Jinhua, et al. Research on hemispherical coverage digital multi-beam antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 10–16.

引 言

在轨卫星数量的不断增加以及编队飞行卫星群的快速发展, 要求航天系统地面站具备单站多目标管理能力, 满足复杂星座运行管理使用需求。数字多波束是相控阵与数字信号处理技术相结合的一种技术, 同时具有相控阵天线波束电扫捷变和数字信号处理高精度灵活处理的优点。数字多波束天线能够产生多个独立作用波束, 同时完成对多个目标连续跟踪、测量和通信任务, 是解决航天领域多目标管理的一种有效途径^[1,2]。

传统平面阵列形式的数字多波束天线作用空域有限, 且存在在低仰角处性能下降问题。全空域数字多波束天线能够扩大作用空域范围, 实现对在轨卫星长弧段连续跟踪, 改善低仰角测量性能, 因此全空域数字多波束天线技术已逐渐成为当前研究热点^[3]。全空域数字多波束天线可采用多面体立体阵列或球

*基金项目: 河北省重点研发计划项目“北斗室内外无缝导航定位关键技术及安防机器人应用”(项目编号: 19210906D)

✉通信作者: 翟江鹏 (zhaijiangpeng@163.com)

收稿日期: 2021-11-30 收修改稿日期: 2022-01-03

面赋型阵列两种方式来实现，多面体立体阵列是对平面阵列的简单扩展，并无太多创新或技术难度；球面赋型阵列则是一种全新体制阵列天线技术，具有全空域覆盖、恒定波束宽度、稳定的波束增益、波束灵活控制特点，其阵列布局形式、波束形成方式、工作模式均同传统平面阵列天线存在较大区别^[4]。本文设计了一种球面赋型阵列天线，对其阵列形式、工作模式、工作性能进行了研究，并对其波束性能进行了仿真分析。

1 工作原理

相控阵波束形成所需幅度加权、移相可以在射频部分通过微波网络（衰减器和移相器）来实现，也可以在数字域通过控制基带信号实现对多通道信号幅度和相位控制，形成捷变电扫波束，即数字波束形成。数字波束形成同模拟波束形成相比具有精度高、灵活可扩展优势，尤其体现在同时作用波束数量扩展上。

发射数字多波束形成工作原理如图 1 所示。以单个发射通道为例分析，每个通道基带信号处理终端产生多个波束基带信号，分别进行信息调制、扩频调制、波束加权，并将多个波束基带信号求和输出至 D/A 模块，D/A 模块对多个波束合路信号进行数模转换并输出至发射信道，发射信道对模拟信号进行上变频、功率放大、滤波后传输至单元天线，单元天线将发射信号以电磁波形式在空间辐射输出，在波束权值作用下，全阵天线输出信号在空间同时形成多个携带不同调制信息的发射波束，分别指向不同目标，实现对多目标跟踪、测量与通信。

接收数字多波束形成工作原理如图 2 所示。以单个接收通道为例分析，接收单元天线将接收的空间电磁信号传输至接收信道，接收信道对此信号进行放大、滤波、下变频处理后传输至 A/D 模块，A/D 模块将接收的信号进行离散采样变换至数字域，数字多波束形成器为全部通道接收数据分配多组权值并进行加权求和，即可获得多个波束输出信号，将多个波束信号送至接收基带信号处理终端进行解扩、解调即可获得伪距观测量和数据信息。

2 球面赋型阵列天线设计

理想球面阵列天线，从空间任何角度观察，其视在口径都是同样大小圆形阵面，该特点确保了阵列天线低仰角波束能够同法线方向波束性能保持一致。在一定波束优化准则的约束下，球面阵列天线波束在滑动过程中能够保持恒定波束宽度和增益，是实现全空域覆盖的最佳阵列形式。理想球面阵列在结构加工、组装、单元天线均匀布放等方面面临着较大困难，在工程实现中存在一定限制^[5,6]。

工程应用中通常采用多个平面多边形子阵拼接来逼近理想球面阵列，本文采用富勒烯结构（又称碳 60）阵列形式，由 12 个正五边形、20 个正六边形子阵拼接成球面赋型阵列天线，如图 3 所示。该阵列天线从整体上来看是一个近似球型几何体，具体到局部每个子阵，则是平面阵列。单元天线在正五/六边形平面子阵上等间距均匀分布，在正五/六边形平面子阵拼接的球面上，阵元亦是均匀分布，此特征确保

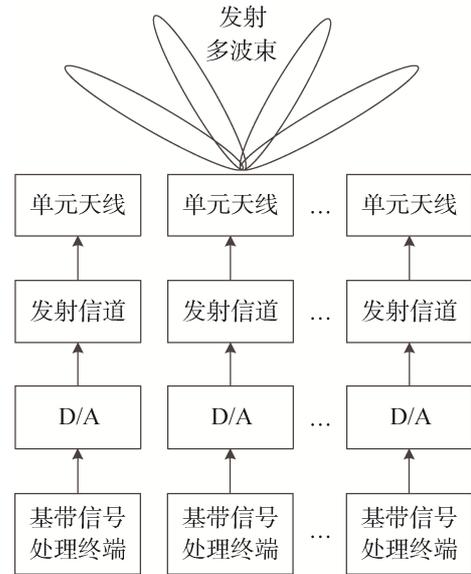


图 1 发射数字多波束工作原理
Fig. 1 Principle of transmitting digital multi-beam

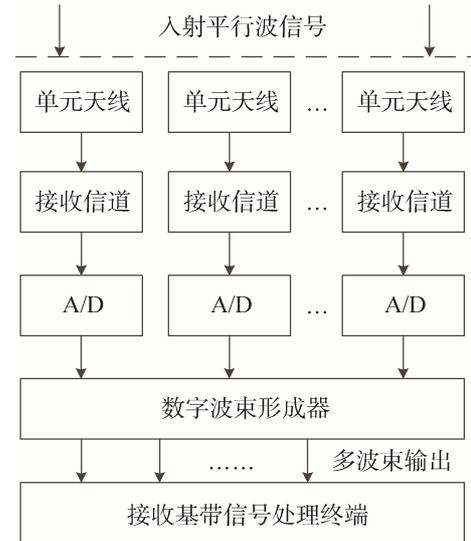


图 2 接收数字多波束工作原理
Fig. 2 Principle of receiving digital multi-beam

了赋型阵列天线在空间不同指向波束性能具有一致性, 区别于平面阵列天线波束随扫描仰角降低而性能下降的特点。该赋型阵列天线具备球面阵列天线特性的同时, 也兼具平面子阵成熟、简易加工特点, 使得球面阵列天线在工程实现上变得经济可行。工程应用过程中, 卫星可视范围通常在 10° 仰角以上空域, 因此需要对富勒烯结构进行截取, 本方案对底部正五边形及其周边 5 个正六边形进行截断舍去, 保留截断部分以上平面子阵, 球心距离截断平面距离约 $0.49R$ (R 为球体半径), 保留球心下面的部分子阵结构是为了满足低仰角指向的波束合成需求。

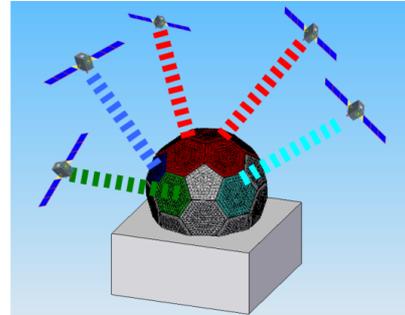


图 3 球面赋型阵列天线

Fig. 3 Hemispherical conformal antenna array

3 球面赋型阵列天线工作模式

3.1 波束滑动行走

全空域数字多波束天线系统运行过程中, 根据卫星空间位置, 选通阵列天线一定区域内通道, 形成工作状态天线阵面, 天线阵面形成指向空间卫星的波束。随着卫星空间位置变化, 波束控制单元控制球面阵列通道选通和关闭, 不断有阵列通道从工作通道中切入切出, 维持工作通道动态更新, 以“波束滑动行走”方式, 使波束始终指向卫星, 实现对卫星连续跟踪, 如图 4 所示。波束行走过程中, 选通区域口径大小保持不变, 维持波束增益恒定、波束性能稳定。

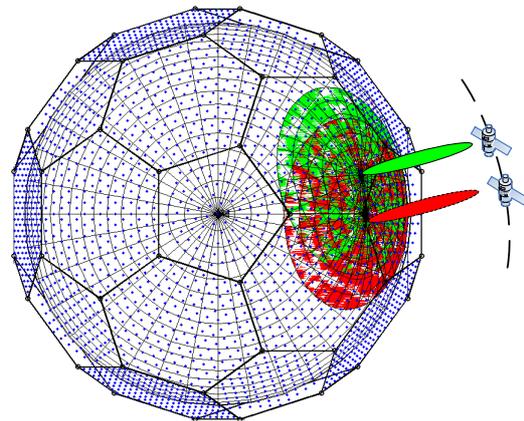


图 4 波束滑动行走

Fig. 4 Beam walking

3.2 多波束工作模式

多波束工作模式下, 阵列天线根据空间目标位置分布, 分别选通阵面上的不同区域的工作通道, 形成指向不同目标的波束。随着不同波束在球面阵表面“滑动行走”, 会产生两个或更多波束相交情况, 如图 5 所示, 即参与上述波束形成的阵元通道相互重叠, 重叠部分通道需要同时参与到两个或多个波束形成任务中。

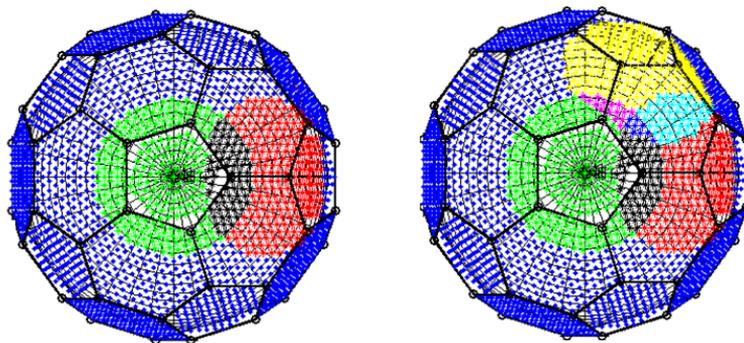


图 5 多波束模式下工作通道重合

Fig. 5 Overlap of the active elements in multi-beam mode

采用数字波束形成技术, 发射模式下, 每个发射通道中同时产生多路针对不同目标的发射信号, 对多路信号加权求和传输至单元天线, 单元天线将合路信号在空间辐射输出, 在权值幅相调整作用下即可

在空间形成多个独立作用波束；接收模式下，对参与波束形成通道采集的数字信号分配多组不同权值并分别求和输出，可以同时获得多个不同指向波束信号。数字波束形成技术为解决球面赋型阵列多波束形成过程中工作通道重叠问题提供了有效解决手段，相比于模拟波束形成方式，该技术在工程实现上具有灵活、便捷、可扩展性强的特点。

3.3 波束增强模式

阵列天线波束增益主要取决于参与波束形成的通道数量。球面赋型阵列天线工作过程中通常选取一定球扇形锥角球冠表面阵列通道参与波束形成，随着锥角角度增大，参与波束形成的通道数量也逐渐增多。球面赋型阵列天线在波束增强模式下时，通过增大选通区域锥角角度可实现阵列天线参与波束形成的通道数量增加及工作口径扩大，以此来获得性能更加优异的波束，表现为波束增益增加、波束功率增大、波束宽度变窄、指向性增强等。

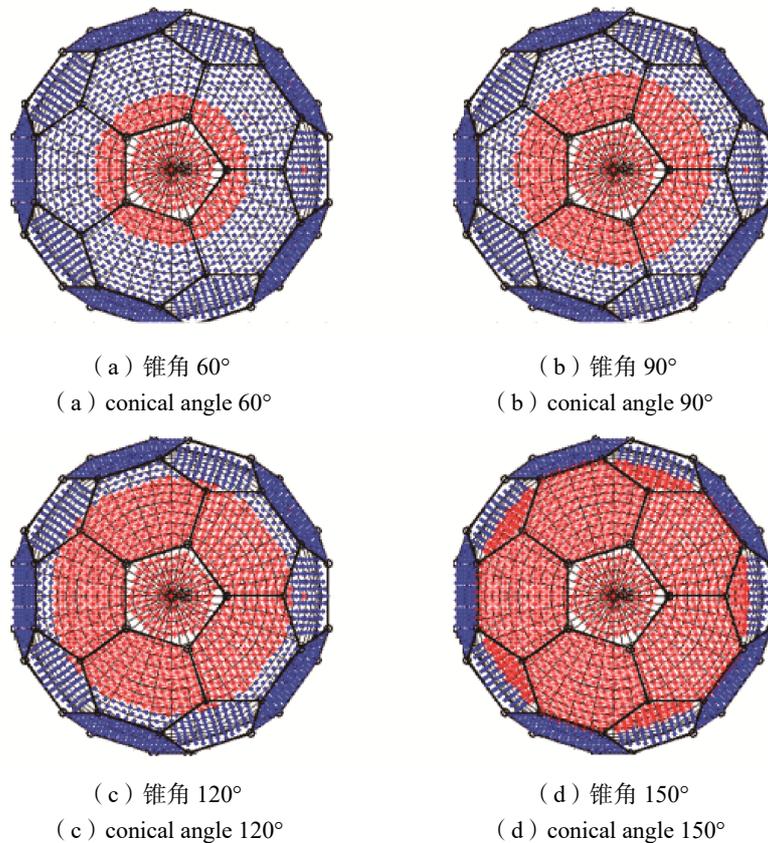


图6 波束增强模式

Fig. 6 Beam enhancement mode

4 仿真分析

建立球面赋型阵列数学模型，对阵列天线波束性能进行仿真分析。

仿真条件：以 L 频段阵列天线为例，中心频点为 1 200 MHz，球型阵列天线直径为 5 m，阵元中心间距选取为 0.6 倍波长，工作区域球扇形锥角设置为 120°。

以接收波束形成为例对波束形成原理进行介绍。假设阵列天线工作区域内共有 N 个阵元参与波束形成，其中第 m 个阵元空间坐标 p_m 可表示为 (p_{xm}, p_{ym}, p_{zm}) 。远场条件下期望信号 $S(t)$ 以平面波形式从 (θ, φ) 方向入射至球面赋形阵列天线，工作区域内 N 个接收通道接收到的信号可表示为：

$$\mathbf{r}(t) = [r_1(t) \cdots r_N(t)]^T = \mathbf{A}(\theta, \varphi, p_m) \cdot S(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{n}(t)=[n_1(t) \cdots n_N(t)]^T$ 为各个阵元上独立不相关的高斯白噪声, $\mathbf{A}(\theta, \varphi, p_m)=[a_1(\theta, \varphi, p_1) \cdots a_N(\theta, \varphi, p_N)]$ 为阵列流行向量, 该向量包含了阵列天线的空间特征, 其第 m 个元素 $a_m(\theta, \varphi, p_m)$ 代表阵列天线第 m 个通道对 (θ, φ) 方向入射信号的期望响应, 可表示为:

$$a_m(\theta, \varphi, p_m) = e^{j2\pi/\lambda(\sin\theta\cos\varphi p_{xm} + \sin\theta\sin\varphi p_{ym} + \cos\theta p_{zm})} \quad (2)$$

阵列流行向量的共轭结果即为波束形成权值 $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{A}^*(\theta, \varphi, p_m)$ 。将权值向量同阵列流行相乘求和, 即可获得阵列天线在 (θ, φ) 方向的接收功率数值。改变 (θ, φ) 取值, 重复上述过程即可求得阵列天线在全部作用空域内的接收功率变化特性, 即阵列天线方向图。

$$\mathbf{B}(\theta, \varphi) = \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{A}(\theta, \varphi, p_m) \quad (3)$$

依据上述波束形成原理对球面赋形阵列天线的波束特性进行仿真分析如下, 主要包括波束增益、波束宽度、同时多波束方向图及波束增强模式下的阵列增益。

4.1 赋型阵列天线波束增益/宽度随波束仰角变化分析

选取 0° 方位轴, 俯仰方向上以 10° 为间隔, 依次进行球面赋型阵列天线在 $10^\circ \sim 90^\circ$ 仰角方向上的波束方向图仿真, 比较不同仰角情况下波束增益、波束宽度变化特性, 仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可以观察到, 球面赋型阵列天线波束在 $10^\circ \sim 90^\circ$ 仰角变化过程中, 波束增益、波束宽度基本维持稳定, 波束增益变化小于 0.15 dB , 波束宽度变化小于 0.16° , 由此证明赋型球面阵列天线不同指向波束具有良好的一致性。

4.2 多波束方向图仿真分析

以发射多波束为例, 同时在 $(0^\circ; 90^\circ)$ 、 $(90^\circ; 30^\circ)$ 、 $(180^\circ; 45^\circ)$ 、 $(270^\circ; 60^\circ)$ 四个离散方向形成四个独立波束, 多波束三维立体方向图如图 8 所示, 各离散方向二维方向图如图 9 所示。

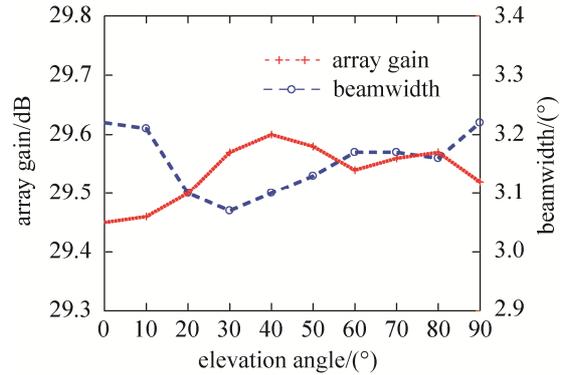


图 7 波束增益宽度随波束俯仰角变化

Fig. 7 Beam gain and beam width change versus beam elevation angle

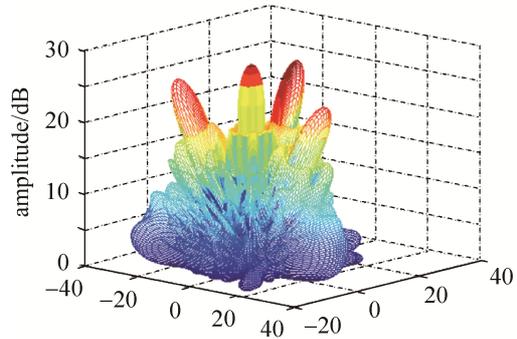
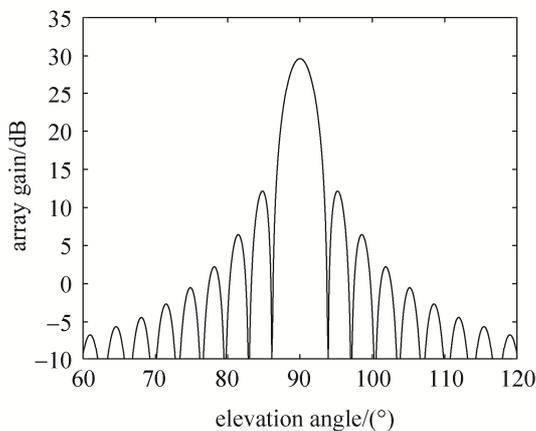
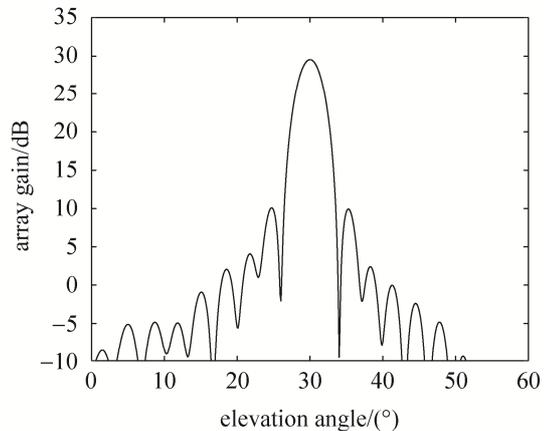


图 8 同时多波束方向图

Fig. 8 Simultaneous multi-beam pattern



(a) $(0^\circ; 90^\circ)$



(b) $(90^\circ; 30^\circ)$

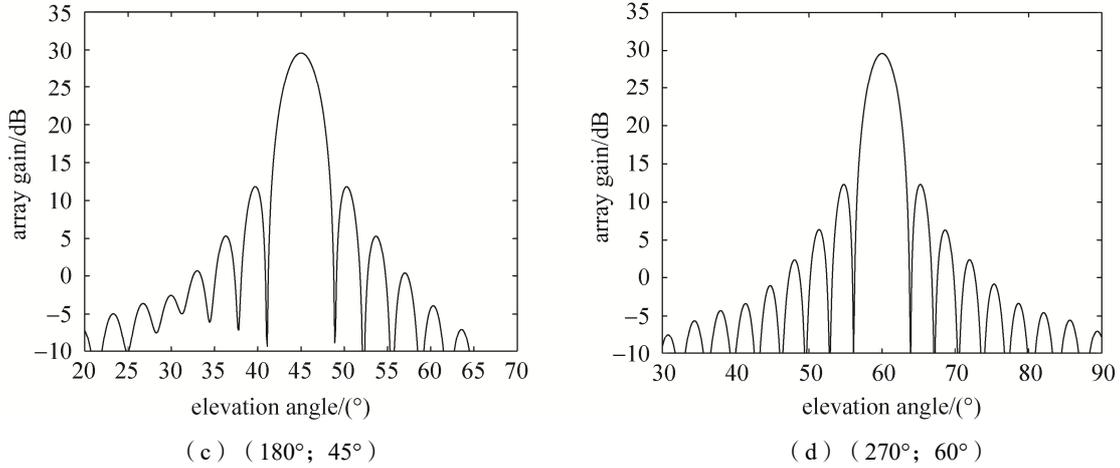


图9 离散指向二维方向图
Fig. 9 Discrete direction 2D beam pattern

多波束形成过程中，当两个波束相邻较近时，其中一个波束第一副瓣会进入另一个波束主瓣区域，对该波束目标接收会造成一定干扰影响，可通过采用一定窗函数加权算法来降低副瓣电平，减少对其他波束目标影响^[7]。

4.3 波束增强模式性能分析

设置球面赋型阵列天线工作区域球扇形锥角从 90°逐步增大至 165°，通过仿真计算求得不同锥角角度下球面赋型阵列天线参与波束形成通道数量及相应阵列增益，仿真结果分别如图 10 和图 11 所示。

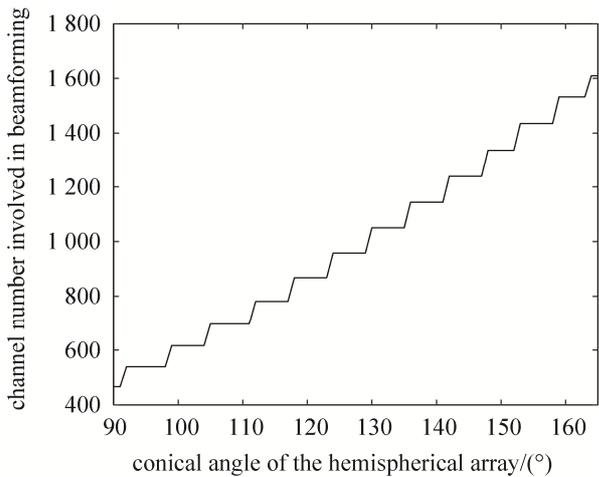


图 10 工作通道数量随工作区域锥角度数变化
Fig. 10 Active elements number versus cone angle

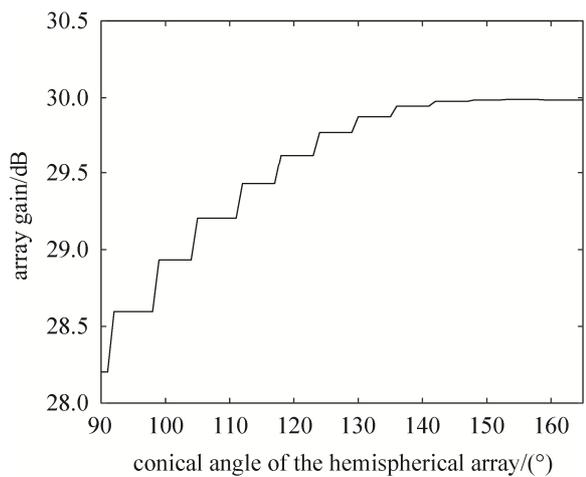


图 11 阵列增益随工作区域锥角度数变化
Fig. 11 Gain of the array versus cone angle

由图 10 可知，球面赋型阵列天线工作通道数量随工作区域球扇形锥角度数线性增加，这主要是由于球扇形上表面积同锥角为线性变化关系，锥角度数越大，球扇形上表面积越大，球冠表面所能铺设阵元数量越多。由图 11 可知，阵列增益随锥角度数增大而逐渐增加，到达一定程度之后，阵列增益则基本维持不变，这主要是由于锥角增加到一定程度后，新增加通道单元天线仅有低仰角部分参与到波束形成中，单元天线低仰角增益通常比法线方向增益低 8 dB~10 dB 左右，尽管参与波束形成的通道数量不断增加，但是对整个阵列增益几乎没有贡献，因此波束增强模式下工作区域球扇形锥角度数建议不大于 150°。

5 结束语

基于富勒烯结构的球面赋型阵列天线能够实现全空域覆盖，有效扩大了阵列天线作用空域，且该赋

型阵列天线产生的波束在全空域扫描过程中能够保持波束增益、波束宽度的一致性, 为波束的测量性能一致性奠定了基础。球面赋型阵列天线采用数字波束形成方式, 可实现同时多波束模式和波束增强模式, 能够完成多目标管理及波束增益、波束性能提升, 具有灵活可扩展的特点, 能够为航天领域多目标管理提供有效解决方案。

参考文献

- [1] 宋广怡. 全空域测控系统数字波束形成技术研究[J]. 无线电工程, 2016, 46(3): 41–44.
SONG Guangyi. Research on digital beam forming technology in whole air space TT&C system[J]. Radio Engineering, 2016, 46(3): 41–44.
- [2] 王晓波, 王轶, 李铁, 等. 数字多波束相控阵天线在测控系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2018, 39(1): 35–40.
WANG Xiaobo, WANG Yi, LI Tie, et al. Research on application of digital multi-beam array antenna in aerospace TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(1): 35–40.
- [3] 肖遥, 蔚保国, 翟江鹏. 全空域球面数字多波束天线波束控制方法研究[J]. 无线电工程, 2017, 47(3): 39–42.
XIAO Yao, YU Baoguo, ZHAI Jiangpeng. Research on beam control of spherical digital multi-beam antenna in hemispherical coverage[J]. Radio Engineering, 2017, 47(3): 39–42.
- [4] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 47–53.
- [5] LARS J, PATRIK P. Conformal array antenna theory and design[M]. New York: Wiley, 2006: 57–60.
- [6] RANDY L H. Antenna arrays: a computational approach[M]. New York: Wiley, 2010: 316–319.
- [7] HARRY L V T. Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory[M]. New York: Wiley, 2002: 97–107.

[作者简介]

翟江鹏 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星导航、相控阵天线。

尹继凯 1972 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为卫星导航、相控阵天线。

王金华 1977 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航工程。

齐昕 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航工程。

(本文编辑: 杨秀丽)