2017年4月

文章编号: 2095-4980(2017)02-0258-05

一种相位中心稳定的星载 GNSS 掩星阵列天线设计

周云林,谢欢欢

(中国电子科技集团公司 第20研究所, 陕西 西安 710068)

摘 要:介绍了一种适用于星载(GNSS)掩星探测的新型阵列天线,可覆盖 GPS L₁/L₂和 BD2 B₁/B₂ 频段。该天线采用双层空气腔式圆极化单元,整体为变形工字型阵列形式。通过计算机仿真,并采用差分进化算法对天线单元的幅度、相位进行优化设计,展宽了阵列天线方位面波束宽度。在保证天线电性能的同时,减少了阵元数量,降低了网络设计的复杂度并减轻了天线重量。实测结果在工作频段内 10 dBic 方位面波束宽度≥±42.2°,俯仰面波束宽度≥±6.4°,相位中心稳定度在方位±40°内最大为±1.67 mm。表明该设计在工程应用中是可行的。

关键词:工字型;圆极化;相位中心稳定度;差分进化算法

中图分类号:TN82 文献标志码:A doi:10.11805/TKYDA201702.0258

Design of spaceborne radio-occultation array antenna with stable phase for GNSS

ZHOU Yunlin, XIE Huanhuan

(No.20 Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Xi an Shaanxi 710068, China)

Abstract: An antenna array applied to spaceborne Global Navigation Satellite System(GNSS) radio occultation has been discussed. It can cover GPS L_1/L_2 and BD2 B_1/B_2 frequency bands. The array unit is built up by double-layered air chamber circular polarized antennas. Construction of this array is formed of an H-type. Its elements amplitude and phase are optimized in the design with simulation and differential evolution algorithm, thus broadening the azimuth beamwidth, reducing the number of array and its weight, simplifying the network design without any effect on its electrical performance. As is shown in the test results, the azimuth beamwidth $\geq \pm 42.2^{\circ}$, the elevation beamwidth of $\pm 6.4^{\circ}$, phase center stability up to ± 1.67 mm within $\pm 40^{\circ}$ azimuth. Simulation and experimental results demonstrate the design is practical in engineering.

Keywords: H-shape; circular polarization; stability of phase center; differential evolution algorithm

基于全球导航卫星系统(GNSS)的大气掩星探测技术可以遥感探测 0~60 km 全球大气折射率、温度、密度、 压强和水汽廓线等基本气象参数,是当前最具发展潜力的地球大气探测手段之一^[1-2]。该技术具有高精确度、高 垂直分辨力、全天候观测、全球覆盖、低成本、近实时、自校准和长期稳定等诸多优势,对于精确研究平流层和 全球气候长期变化具有显著优势。

星载 GNSS 无线电掩星大气探测采用 GNSS 无线电掩星技术,利用低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星上的 GNSS 接收机接收正在被大气遮掩的 GNSS 卫星信号^[3]。GNSS 卫星信号在穿越地球大气层时受到大气折射影响,传播路径发生弯曲,导致接收机接收到的信号相位产生延迟,通过测量这些延迟量可以反演出电离层电子密度剖面和中性大气层的温度、压力、密度和水汽剖面等信息。

作为星载掩星探测系统必不可少的一部分,天线性能的好坏直接影响整个系统的性能。为了充分利用多元化 的空间资源,减少载波相位观测误差,保证载波相位测量精确度,天线应设计为具备多频段使用、宽波束覆盖和 高相位中心稳定度等特性的高精确度测量型天线。

星载掩星阵列天线通常采用一维线阵^[4-5]或者矩形阵列^[6],一维线阵对方位波束的覆盖较窄,而矩形阵列规

模较大,减重难以实现。本文提出了一种新型的双频段天线阵列,工作频率为卫星导航的 GPS L₁/L₂和 BD2 B₁/L₂ 频段,圆极化工作。阵列辐射单元采用双层空气腔式圆极化天线形式,2 层金属片各自谐振于一个频段,天线采 用正交两馈电点馈电;天线阵列采用变形工字型阵列设计。在阵列设计中采用了差分进化算法对天线阵元相位和 激励幅度进行优化设计,拓展了阵列方位波束宽度。这种设计在保证天线性能的同时,减少了阵元数量,减轻了 质量。

1 单元天线设计

1.1 单元天线结构

为了实现天线的双频段、圆极化工作,单元天线采用一种双层空气腔式天线设计^[7],结构组成如图1所示。 整个天线主要由金属结构腔体和上下腔体内的金属辐射片和微带板等组成。这种单元结构较为简单,且可以有效 保护天线。

2 层金属辐射片各自谐振于一个频段,上层金属辐射片谐振于高频段(覆盖 L₁,B₁ 频段),下层金属辐射片谐振 于低频段(覆盖 L₂,B₂ 频段),天线分频段谐振,效率高,相位更加稳定。2 层辐射片和天线腔体之间通过中心的金 属螺钉和四周的介质螺钉固定,既保证了天线的电性能,又明显增强了天线的结构强度。天线采用两馈电点形式, 正交放置的 2 根馈电插针上部与上层辐射片直接连接,穿过下层辐射片(不与下层辐射片接触,下层辐射片通过 耦合馈电),下部与馈电腔内有 90°相差的一分二功分馈电网络相连接。



1.2 单元天线仿真结果

利用电磁场仿真软件对天线单元的结构尺寸进行了优化设计,确定了单元天线的外形尺寸,天线长宽高为: 131 mm×131 mm×38 mm,其他设计参数见表 1。图 2 为单元天线驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)仿 真结果,在使用频段内驻波小于 1.55;图 3 为方位面方向图仿真结果,图 4 为俯仰面方向图仿真结果,低频段轴 向增益大于 7.46 dBic,高频段轴向增益大于 8.07 dBic。

天线方位面、俯仰面波束左右不对称,且较明显,在阵 列设计中需对这种情况进行有针对的考虑。

2 阵列设计

在星载有限载荷的条件下,为了实现掩星天线阵列 较高的电性能指标,天线设计为变形的工字型阵列形式, 在一维阵列两端的两边添加几个阵元,以实现阵列的方 位宽波束覆盖,外形如图 5 所示。

变形的工字型阵列是在矩形阵列(n×m 阵列)的基础 上去掉两边的部分单元而成。与中间一列阵列单元相比, 两旁附加单元为小电流反相激励,以形成在阵列方位面





的宽波束覆盖。这样设计的天线阵列规模明显减小,质量减轻,馈电网络设计难度降低。阵列两旁单元与阵列俯仰中心轴距离为L,当两旁单元与中间一列的最外单元平齐时,为工字型阵列;随着L的减小,工字型阵列演变为 世形,极限状态下,为十字形阵列。



图 6、图 7 为十元变形工字型阵列(中间一列为六元,旁边 四元)GPS L1 频率工作,不同距离 *L* 时(从十字形阵列演变至工 字型阵列)的优化计算结果。从图 6 来看,*L* 的变化对天线的方 位宽波束覆盖影响较小;从图 7 的计算数据来看,随着 *L* 的变 大, 在阵列方位±40°波束内相位起伏分别为 2.61°,2.73°,3.94°,4.26°和 5.84°,即随着距离的增大,相位中心 稳定度变差;另外,对于阵列天线馈电网络设计来说,随着 *L* 的减小,设计和布线难度相应增加。变形工字型阵列设计中, 需综合考虑馈电网络设计的复杂度和距离*L* 对阵列天线相位稳 定性的影响。

考虑到阵列天线的电性能设计和网络设计的复杂度,本设 计中阵列天线共 10 个单元,采用变形工字型阵设计,阵元间 距为 131 mm,中间一列 6 个单元为近似均匀阵列分布,馈电





Fig.5 Configuration of the proposed antenna array 图 5 变形工字型阵列示意图

幅度、相位接近;两边的2个单元为耦合馈电,小电流反相激励。阵列设计中采用了差分进化算法对天线阵元相 位和激励幅度进行优化设计,以拓展阵列方位波束宽度。



 Fig.6 Simulated results of radiation pattern on the horizontal for variation of location of additional element at 1 575.42 MHz
 图 6 不同 L 时变形工字型阵列 1 575.42 MHz 的方位幅度方向图





受馈点数量、天线高度的影响,单元天线方位面、俯仰面方向图并不对称,为改善阵列天线方向图的对称性, 提高相位稳定性,变形工字型阵列为旋转对称结构,即下半部分的5个单元为上半部分5单元旋转180°得到。

2.1 阵列远场波束优化

为了取得最优仿真结果,在分析阵列时使用了差分进化算法^[8]对天线单元激励相位和幅度进行优化设计。

差分进化算法是一种基于种群的随机优化算法,它始于一个随机选择的初始种群向量,主要过程包括变异、 交叉和选择3种操作。通过重复这3种操作,选择优化个体。仅当满足目标条件或达到设定的最大迭代次数,重 复过程才中止。设计中将差分进化算法和高频电磁仿真软件 HFSS 相结合,充分考虑了阵列中每一单元互耦的影 响。天线阵列的电场方向图计算见式(1):

$$\boldsymbol{E}(\theta) = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{E}_{i}(\theta), \quad (N \neq \mathcal{K} \notin \mathbb{H} \mathbb{T} \mathbb{X})$$
(1)

式中 E_i(θ) (i = 1, 2, ···, N) 是每个单元的电场方向图。对 3-D 方向图的俯仰面和方位面进行采样取点。设定方位面 要求的位置 $(p_1 \leq \varphi \leq p_2)$ 和俯仰面要求的位置 $(p_3 \leq \Theta \leq p_4)$ 。设置优化增益目标 G_0 ,则其适应度函数 $S(\theta, \varphi)$ 表示为:

$$S(\theta,\varphi) = \int_{p_1}^{p_2} T_1(\theta) \mathrm{d}\theta \Big|_{\varphi=0} + \int_{p_3}^{p_4} T_2(\theta) \mathrm{d}\theta \Big|_{\varphi=90}$$
(2)

式中 $T_1(\theta)$ 和 $T_2(\theta)$ 为:

$$T_{1}(\theta) = \begin{cases} 5 \times \left| G_{0} - G(\theta) \right|, & G(\theta) < G_{0}, \ \theta \in [p_{1}, p_{2}] \\ 0, & G(\theta) \ge G_{0}, \ \theta \in [p_{1}, p_{2}] \end{cases}$$
(3)
$$T_{2}(\theta) = \begin{cases} 5 \times \left| G_{0} - G(\theta) \right|, & G(\theta) < G_{0}, \ \theta \in [p_{3}, p_{4}] \\ 0, & G(\theta) \ge G_{0}, \ \theta \in [p_{2}, p_{2}] \end{cases}$$
(4)

 $G(\theta)$ 是由电场方向图 $E(\theta)$ 得到的归一化增益方向图。使用差分进 化算法进行优化,使适应度函数 S(θ)=0。则天线波束覆盖达到了要求 的指标。

2.2 阵列的加工验证

利用单元天线的仿真计算结果以及差分进化算法对阵列单元 激励幅度、相位的优化结果设计加工了掩星阵列天线。天线辐射 片位于金属结构腔体的上腔中,微带馈电网络位于金属结构腔体 的下腔中。为了减轻天线质量,天线腔体、金属辐射片均采用铝 合金材质。加工得到的阵列天线如图 8 所示。

2.3 阵列的测试结果

对阵列天线样品的幅度、相位中心相位方向图和驻波进行了 测试,结果如图 9~图 13 所示。

Fig.9 Measured VSWR of the proposed antenna array 图 9 测试的变形工字形阵列驻波图

从阵列天线的测试结果来看,阵列方位、俯仰方向图基本对称,方位面波束宽度大于±42.2°,俯仰波束宽度 大于±6.4°。由相位中心的相位方向图换算得到的±40°内相位中心稳定性≤±1.67 mm。

10



图 10 测试的变形工字型阵列 4 个频率的方位面幅度方向图



Fig.8 Photograph of the proposed antenna array 图 8 变形工字型阵列实物图





图 11 测试的变形工字型阵列 4 个频率的俯仰面幅度方向图



3 结论

本文介绍了一种变形的工字型天线阵列,这种设计在拓展天线方位波束宽度,满足高相位中心稳定度的同时,减少了阵元数量,降低了网络设计的复杂度,减轻了天线质量。实测结果表明,在 GPS L₁/L₂和 BD2 B₁/B₂频段 取得了较好的电性能结果,具有一定的应用价值。

参考文献:

- HAJJ G A,ROMAS L J. Ionospheric electron density profiles obtained with the global positioning system:results from the GPS/MET experiment[J]. Radio Sciences, 1998,33(1):175-190.
- [2] RIUS A, RUFFINI G, Romeo A. Analysis of ionospheric electron density distribution from GPS/MET occulations[J]. IEEE Trans, Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(2):382-394.
- [3] 张建军,袁洪,王宪. GNSS 无线电掩星大气探测系统干扰抑制的子空间投影方法[J]. 测绘学报, 2009,38(5):422-427. (ZHANG Jianjun, YUAN Hong, WANG Xian. The subspace projection in interference suppression of GNSS radio obscuration atmosphere detection system[J]. Acta Geodaetion et Cartographica Sinica, 2009,38(5):422-427.)
- [4] ZIN A,ZAGO S,LANDENNA S,et al. Current achievements and future evolution of the ROSA radio-occultation receiver[C]// Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing(NAVITEC). [S.I.]: IEEE Xplore. 2010:1-8.
- [5] VECCHIARELLI G,GUIDI R,VALLE P,et al. Control and minimization of multi-path problems on the GPS R.O.S.A. antenna installed onboard oceansat-2 spacecraft[C]// Antennas and Propagation,2007.EuCAP 2007. The Second European Conference Antennas & Propagation. [S.I.]:IEEE Xplore. 2007:1–6.
- [6] INGVARSON Per. GPS receive antennas on satellites for precision orbit determination and meteorology[C]// Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2008. MIKON 2008.17th International Conference. [S.L]:IEEE Xplore, 2008:1-6.
- [7] 周云林. 一种相位中心稳定的层叠双频导航天线的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):596-598.
 (ZHOU Yunlin. Design of dual-band stacked navigation antenna with stable phase center[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(6):788-791.)
- [8] 谢欢欢,杨伯朝. 基于差分进化算法的阵列天线波束赋形研究[J]. 现代导航, 2012,6(3):219-224. (XIE Huanhuan, YANG Bochao. Study of array antennas beamforming based on differential evolution algorithms[J]. Modern Navigation, 2012,6(3):219-224.)

作者简介:



周云林(1978-),男,湖南省湘潭市人,高级工程师,主要研究方向为天馈线设计. email:1506976333@qq.com. 谢欢欢(1984-),男,湖南省永州市人,高级 工程师,主要研究方向为智能算法、电磁场应用、 相控阵天线、阵列天线分析.