

文章编号: 2095-4980(2018)02-0294-04

星载 Ka 频段波束赋形波纹喇叭天线设计

马 炳^{1,2}, 俞笔奇^{1,2}, 张 涛^{1,2}, 周傲松^{1,2}, 杨 帆^{1,2}

(1.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2.北京市电磁兼容与天线测试工程技术研究中心, 北京 100094)

摘 要: 提出一种具有稀疏波纹结构的波纹喇叭天线, 仅有 2 圈波纹, 结构简单, 易于设计加工。通过对天线参数的设计优化, 可实现平顶波束赋形, 在 $\pm 40^\circ$ 的波束赋形范围内增益优于 5 dBi, 天线副瓣优于 -30 dB, 整个工作频段内驻波比(VSWR)优于 1.8, 适用于高轨卫星星间通信。通过对一个 Ka 频段样品的加工、测试和结果比对, 验证了该设计方案的正确性。

关键词: 卫星通信; Ka 频段; 波束赋形; 波纹喇叭

中图分类号: TN823

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201802.0294

Design of a Ka band corrugated horn with shaped-beam for satellite communications

MA Bing^{1,2}, YU Biqu^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, ZHOU Aosong^{1,2}, YANG Fan^{1,2}

(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

(2.Beijing Engineering Research Center of EMC and Antenna Test Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: A corrugated horn antenna with sparse ripple structure is proposed. The antenna with only 2 ripples is simple in structure and easy to design and process. By optimizing the parameters of the antenna, a wide beam forming of $\pm 40^\circ$ and a gain above 5 dBi can be realized. The side-lobe levels are lower than -20 dB and the Voltage Standing Wave Ratio(VSWR) is lower than 1.8. It is suitable for inter satellite communication of high orbit satellites. Through the processing, testing and comparison between measured and predicted radiation patterns of a Ka-band sample, the correctness of the design is verified.

Keywords: satellite communications; Ka band; shaped-beam; corrugated horn

近年来, 在卫星通信中, 为对特定区域进行有效覆盖, 减少邻区干扰和提高效率, 对星载天线的辐射方向图提出了与服务区形状匹配的要求, 赋形天线越来越受到学者重视。能实现星载赋形的天线通常有反射面天线^[1-2]、阵列天线^[3-5]、喇叭天线^[6-8]等。反射面天线主要有两方面应用, 一是用于对地数据传输, 往往要求具有马鞍型的地球匹配波束; 二是可以对中国版图进行完美赋形的特殊赋形波束天线。阵列天线由于具有较高的波束自由度, 在卫星通信中也大量应用, 如螺旋阵列天线与相控阵天线等。然而, 反射面天线和阵列天线成本较高, 实现起来难度较大; 而喇叭天线具有成本低、尺寸小的优点, 适用于天线尺寸要求苛刻的卫星通信中。另一方面, 由于 Ka 频段卫星通信具有低成本、高通量与小型化的优势, 成为卫星通信的一个重要发展方向^[9], 研制适用 Ka 频段的卫星天线具有重要意义。

喇叭天线包括光壁喇叭天线与波纹喇叭天线, 光壁喇叭天线结构简单, 加工实现较易, 但难以达到很宽的频带, 难以实现波束赋形。对于宽频带应用, 波纹喇叭天线可以得到更好的性能, 如超低副瓣及超低交叉极化。波纹喇叭天线还可以实现波束赋形, 但结构复杂, 波纹数很多, 对加工提出了很高要求。

本文创新地设计了一种只有 2 圈波纹的波纹喇叭天线, 通过样品的加工、测试与结果比对, 对设计进行了验证, 可以实现 $\pm 40^\circ$ 宽的波束赋形, 应用于高轨卫星的星间通信中, 具有现实意义。

1 天线设计

星载 Ka 频段波束赋形天线的设计指标如表 1 所示, 可以看出, 天线的工作频带要求为 22.5~26.3 GHz, 频带

较宽,在整个频带内天线增益要求为 $\pm 40^\circ$ 波束范围,增益 ≥ 5 dBi,组阵天线实现起来难度较大。天线所处卫星环境较为恶劣,需对天线进行架高,以减小其他设备对天线的影

响。通过任务分析,工作重点是研制工作频带宽、增益性能好的天线单元。对于天线单元的选择,根据星载特点和技术要求,天线单元需要具备以下特点:体积小,质量轻,辐射部件不使用介质材料, $\pm 40^\circ$ 波束覆盖且主向增益高,工作频带宽,线极化。综合各种能够提供宽角度波束覆盖的天线形式,对 Ka 频段,最终优选喇叭形式天线。根据 Ka 天线的技术要求,该天线需由以下几部分组成:

1) 喇叭天线单元。作为该辐射产生的核心组件,该天线的各项电性能指标主要取决于良好的设计以及高精度加工。考虑到波束赋形与带宽的要求,设计了稀疏波纹的波纹喇叭天线。

2) 矩形-圆形波导转换。作用是为辐射体馈电,其设计与加工直接决定了天线的驻波比(VSWR)及辐射性能。

3) 天线支架。起到将天线架高的作用,以减小星体对天线的影

响。要实现平顶的赋形方向图,根据经典的远场方向图和口径分布的关系,口径分布必须满足 $J_1(x)/x$ 的分布关系($J_1(x)$ 表示一阶 Bessel 函数)。具体到波纹喇叭天线本体设计中,口径分布必须满足^[6]:

$$f(2\pi\rho/\lambda) = \frac{2J_1(2\pi\rho\sin\theta_0/\lambda)}{2\pi\rho\sin\theta_0/\lambda} \quad (1)$$

式中: ρ 表示圆柱坐标系中的半径; θ_0 表示平顶的半张角。

根据式(1),赋形喇叭的第 1 个波纹位置 ρ_1 对应一阶 Bessel 函数的第 1 个零点 $x_1=3.85$,也即 $2\pi\rho_1\sin\theta_0/\lambda=3.85$,可以算出 ρ_1 。依此类推,由 $x_2=7.01, x_3=10.18, x_4=13.3, x_5=16.5, x_6=19.61$ 可以算出 $\rho_1\sim\rho_6$,也即确定了波纹的初步位置。选取合适的波纹深度,以产生连续的 180° 相移,波纹底部的高度差取为 $\lambda_0/4$,这就确定了波纹的初步深度与位置。

以上方法是针对无限大口径的,具体到本工程应用中,由于喇叭天线本体要架高 500 mm 以上,对天线的体积、质量提出了苛刻要求,天线外包络不能超过 42 mm,无法设计采用多个波纹的形式,天线波纹只能采用 2 圈,通过前述经典算法设计的天线方向图副瓣会恶化较多,需进一步优化尺寸。同时,还需要对圆波导进行方圆变换,以匹配同轴馈电的要求。为此,利用全波算法仿真软件 Ansoft HFSS,对图 1 所示天线进行建模,模型包括天线本体辐射部分、圆波导过渡段、方圆波导变换段和矩形波导过渡段,矩形波导过渡段最后连接标准波同轴转换器实现同轴馈电。具体仿真时,首先对各部分进行单独优化,以保证具备良好的阻抗特性,最后再进行联合仿真。经过优化设计,最终确定了天线本体尺寸,如图 2 所示。

表 1 天线主要技术指标
Table1 Main technical indices

parameter	value
frequency/GHz	22.5~26.3
VSWR	≤ 1.5 , (exceptional ≤ 1.8)
gain/dBi	≥ 5 ($\pm 40^\circ$)
polarization	linear

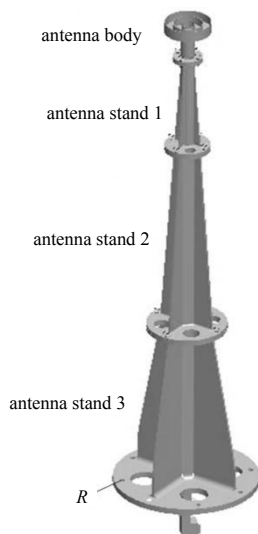


Fig.1 3D model of the proposed antenna
图1 Ka 天线三维模型

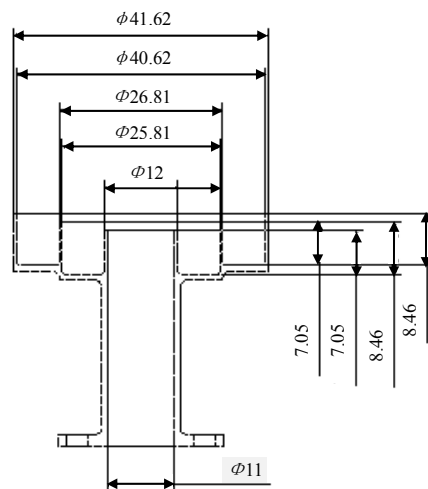


Fig.2 Geometry of the proposed antenna
图2 天线本体基本结构尺寸

2 天线仿真和测试验证

根据设计结果,采用机加方式加工了天线样品,如图3所示。由于该天线工作在Ka频段,对加工精确度要求很高,为实现 ± 0.02 mm的容差,加工中使用了高精度的数控机床,采用电火花、线切割等工艺保证加工精确度。为确保天线本体和3个波导支架间波导对位的准确性,在波导的连接面上增加了定位销来控制安装精确度。最后对天线进行了实测,驻波比如图4所示,增益方向图如图5~图7所示。从实测驻波比曲线可以看出,3个工作频点的驻波比均优于1.3,大部分频带内驻波比小于1.5,个别频点的驻波比大于1.5但小于1.8,与仿真结果吻合较好。从实测和仿真增益方向图的对比可以看出,实测和仿真增益方向图吻合较好,实测天线副瓣优于-30 dB,同时满足 $\pm 40^\circ$ 波束范围内增益不小于5 dBi的设计要求,可应用于卫星通信等工程应用中。



Fig.3 Photo of the proposed antenna
图3 天线实物照片

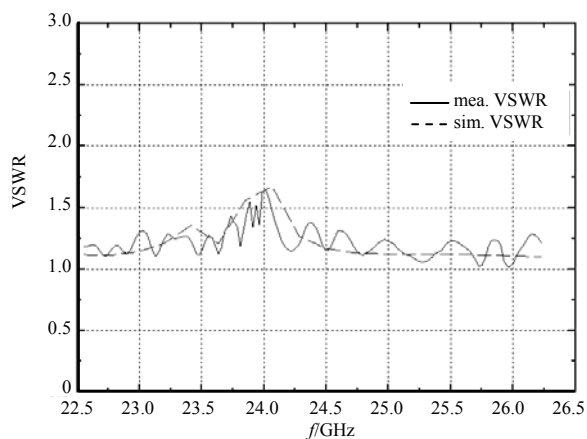


Fig.4 Measured and simulated VSWR
图4 仿真和实测驻波比结果

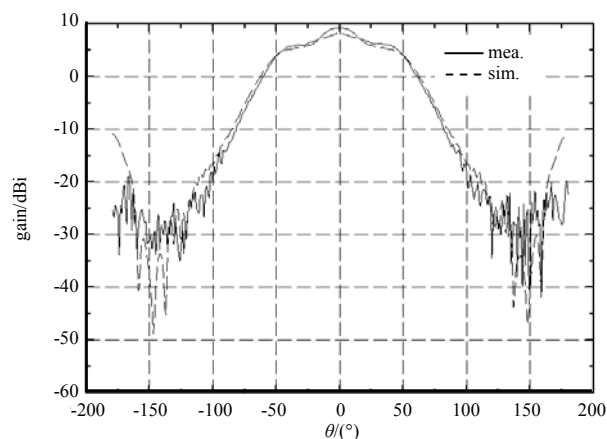


Fig.5 Measured and simulated patterns($f=22.5$ GHz)
图5 仿真和实测增益方向图($f=22.5$ GHz)

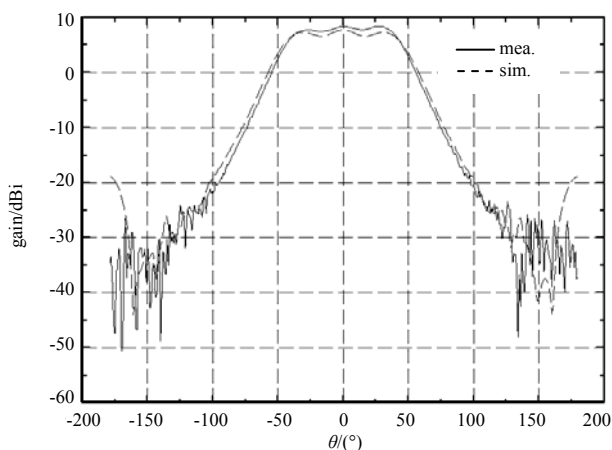


Fig.6 Measured and simulated patterns($f=25.3$ GHz)
图6 仿真和实测增益方向图($f=25.3$ GHz)

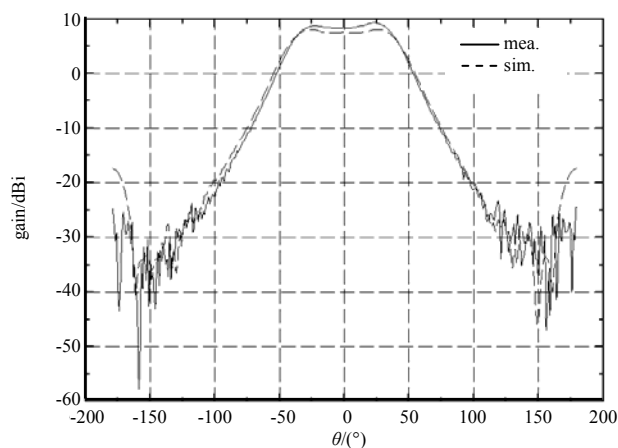


Fig.7 Measured and simulated patterns($f=26.3$ GHz)
图7 仿真和实测增益方向图($f=26.3$ GHz)

3 结论

根据星载通信的实际需求,设计了一种具有稀疏波纹结构的波纹喇叭天线,通过HFSS仿真软件进行了优化设计,并加工了天线样品,最后进行了测试。通过实测结果可以看出,天线在整个工作频段内电压驻波比小于1.8,在 $\pm 40^\circ$ 的波束范围内增益优于5 dBi,且与仿真结果较好吻合。该天线具有结构简单、易于加工、质量轻等优点,具有现实的参考意义和较高的工程推广价值。

参考文献:

- [1] CHERRETTE A R, LEE S W, ACOSTA R J. A method for producing a shaped contour radiation pattern using a single reflector and a single feed[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1989, 37(6):698-702.
- [2] 孙雷洪, 郭文嘉, 李正军. 单馈源赋形反射面天线研究[J]. 空间电子技术, 1995(2):27-37. (SUN Leihong, GUO Wenjia, LI Zhengjun. Research of single horn shaped reflector antenna[J]. Space Electronic Technology, 1995(2):27-37.)
- [3] THURSBY M, KISUCK Y, GROSSMAN B. Neural control of smart electromagnetic structures(patch antennas)[J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(4):1341-1347.
- [4] MA M T. Theory and application of antenna arrays[M]. New York:Wiley, 1974.
- [5] STEINBERG B D. Principles of aperture and array system design including random and adaptive array[M]. New York:Wiley, 1976.
- [6] BRACHAT P. Sectoral pattern synthesis with primary feeds[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propag., 1994, 42(4):484-491.
- [7] ABBAS-AZIMI M, MAZLUMI F, BEHNIA F. Design of broadband constant-beamwidth conical corrugated-horn antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(5):109-114.
- [8] KUHN E, FASOLD D, KLEFENZ F. Design, optimization and test of high-performance circular corrugated feed horns for full V-band(50 to 75 GHz) coverage[C]// 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin, Germany:IEEE, 2009: 3462-3466.
- [9] VALENZIANO L, CUTTAIA F, ROSA A, et al. Planck-LFI: design and performance of the 4 Kelvin reference load unit[J]. Journal of Instrumentation, 2009, 12(12):T12006.

作者简介:



马 炳(1986-), 男, 甘肃省静宁县人, 硕士, 工程师, 主要从事微波通信、天线设计等研究工作。
email:mbingm@163.com.



2018 全球智能工业创新大会(GIIC)暨全球创新技术成果转移大会

2018 年 5 月 21~22 日 中国 北京会议中心

<http://www.globaliic.com/>

主办单位: 中国工程院、中国科学院

承办单位: 中国工程院信息与电子工程学部、中国光学工程学会

会议征文: **大会正火热征文中, 截稿时间: 2 月 28 日**, 诚挚欢迎相关领域研究院所的科研人员以及大专院校的师生、研究生等踊跃投稿, 并欢迎应用领域文章。会议邀请作者将原创的论文投往本会议, 请作者登陆投稿系统提交文章。

- 中英文兼收, 论文经组委会初审后, 择优推荐到合作期刊(SCI, EI, 中文核心, 科技核心等收录)。论文格式无严格要求, 收到组委会发的录用通知后, 请按推荐期刊格式要求修改论文并将论文全文提交至推荐期刊网站, 由期刊编辑部审核录用后正式发表。
- 若文章希望发表在 SPIE 文集(EI 全文收录), 截止日期前提交英文摘要即可。会后提交英文全文至 spie 官网, 会后半年左右全文可在 EI 数据库检索到。
- 若不发表文章, 只希望做粘贴/口头交流, 可在投稿系统上传报告摘要, 题目后注明交流类型(粘贴/口头交流)

联合征稿期刊: Journal of Electronic Imaging(SCI); Journal of Applied Remote Sensing(SCI); Optical Engineering(SCI); Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS(SCI); 红外与激光工程(Ei); 光学精密工程(Ei); 信息与控制(中文核心); 飞航导弹(中文核心); 现代防御技术(中文核心); 电光与控制(中文核心); 战术导弹技术(中文核心); 太赫兹科学与电子信息学报(科技核心)

征文方向(稿件提交链接): 人工智能技术专题研讨会 <http://events.kjtxw.com/tougao/AI2018.html>; 智能制造高峰论坛之智能检测装备 <http://events.kjtxw.com/tougao/IM2018.html>; 工业机器人与智能控制 <http://events.kjtxw.com/tougao/IRIC2018.html>; 智能无人系统大会 <http://events.kjtxw.com/tougao/US2018.html>; 新能源汽车与电磁兼容研讨会 <http://events.kjtxw.com/tougao/EMC2018.html>; 识别技术与智慧城市创新发展论坛 <http://events.kjtxw.com/tougao/SM2018.html>; 工业控制系统产业峰会 <http://events.kjtxw.com/tougao/ICS2018.html>

组委会联系人: 中国光学工程学会, 蔡方方, 022-58168541, 58168520, cai_ff@csoe.org.cn