

船载 C+S 频段共面单脉冲天线设计与应用

李其福, 潘国平, 蒋知彧, 周承斌

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 航天测量船在执行海上测控任务时, 主要跟踪目标为 C 频段和 S 频段的航天器。受甲板面积限制, 测量船无法在甲板上安装多套不同频段的的天线, 设计 C+S 双频段共用天馈系统就显得尤为必要; 在 C+S 频段天馈系统的硬件选择上, C 频段初级辐射器采用单喇叭方式, 利用 TE01 模、TE21 模、TM01 模 3 个差模对目标实施跟踪; S 频段初级辐射器采用四喇叭方式, 利用四喇叭的信号合成对目标实施跟踪; 设计 C+S 双频段天馈系统时采用计算机辅助技术, 确定了天线反射面和馈源喇叭的形式及相对关系尺寸; 并通过仿真计算出天馈系统的增益、副瓣电平、差波瓣零深、差斜率等方向图关键指标均满足设计要求, 达到了双频段天线的小型化和合建的目的, 满足航天测量船船载设备的使用要求。

关键词: 单脉冲天线; 双频段馈源; 和差方向图

Design and Application of Ship-borne C/S Monopulse Antenna

Li Qifu, Pan Guoping, Jiang Zhiyu, Zhou Chengbin

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: The main tracking targets are C-band and S-band spacecrafts when TT&C ships carry out maritime tracking and control task. Due to the limited space on board, several sets of different bands antenna can't be installed wholly on the ship board. So it is necessary for the C-band and S-band antennas sharing the same feed system. For the C-band and S-band antenna feed system, the C-band primary radiator adopts a single horn, which products a differential mode consisted of TE01 mode, TE21 mode and TM01 mode; the S-band primary radiator four horns with the differential mode signal consisted of the signals produced by all horns. With computer-aided design, the geometries and sizes of the reflector and horn were determined. Simulation and measurement results show that the radiation patterns and the gain in dual bands can satisfy the specifications. Its compactness and miniaturization facilitate TT&C ships.

Keywords: monopulse antenna; dual frequency feed; sum and difference antenna pattern

0 引言

我国在航天飞行试验中要求有足够的测控通信覆盖率, 一些特征段必需由地面提供测控支持, 即便是考虑在全球陆地上布站, 也不一定选到合理的站点位置, 因此, 航天测量船作为海上活动测量站, 可以在海上灵活、合理地布置, 甚至可以在一次航天飞行中, 前后在两个点位完成任务, 所以测量船在航天测控网发展过程中起到了不可替代的作用^[1]。但是, 航天测量船在执行多个任务时, 需要跟踪不同的航天器, 而每个航天器均有着自己的测控频段, 其频段可从 S 频段可一直延伸至 Ka 频段, 但航天测量船受甲板面积及天线布局限制, 无法安装多副不同频段的的天线, 因此, 考虑多频段天线合建, 是解决该问题的一个便捷途径。

本文针对这一现状, 介绍了一种 C+S 频段共面单脉冲天线的设计, C 频段主要采用脉冲波的工作方式, 通过对脉冲信号的发射、接收和跟踪, 完成对航天器轨道的测量; S 频段采用连续波的工作方式, 主要完成对 S 频段遥测信号的接收、解调和跟踪测量任务。

1 C+S 双频段天馈系统组成

C+S 双频段天馈系统主要有三部分构成: 天线、多模组

合馈源和馈线组成。

天线采用修正卡塞格伦双镜天线^[2], 为 C+S 双频段共用; 多模组合馈源是该系统的关键部件, 天线的性能与它密切相关。双频馈源采用多喇叭体制, C 频段喇叭位于中心, S 频段 4 个扇形喇叭位于四周; 馈线主要由接收馈线和发射馈线组成, 主要部件有波导开关、定向耦合器、旋转关节等。

2 双频段天馈系统硬件设计

2.1 天线反射面方案

天线反射面采用卡塞格伦式, 其几何示意图如图 1 所示, 为保证天线在 C 频段的效率, 天线采用了主、副面修正技术, 通过计算机辅助设计确定天线的主要参数为:

主反射面直径: $D_m = 10\ 160\ \text{mm}$

主反射面焦径比: $F_m/D_m = 0.30596$

副反射面直径: $D_s = 1\ 100\ \text{mm}$

副面边缘照射角: $\theta = 20^\circ$

2.2 C+S 双频组合馈源

组合馈源设计的主要原则是: 首先要保证天线在 C 频段的工作效率, 同时兼顾 S 频段天线效率, 综合考虑天线的增益、副瓣电平、差波瓣零深以及差斜率等关键技术指标, 满足系统的使用要求。

根据对 C+S 双频段天线指标要求的分析, C+S 双频馈源可采用多喇叭体制, 即 C 频段喇叭采用单孔多模喇叭, 位于相位中心; S 频段采用 4 个扇形口面喇叭, 并位于 C 频段喇叭的四周。考虑到 C 频段喇叭必须达到一定尺寸的孔径才能

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2016-03-07。

作者简介: 李其福(1971-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天测量船船载测控设备方向的研究。

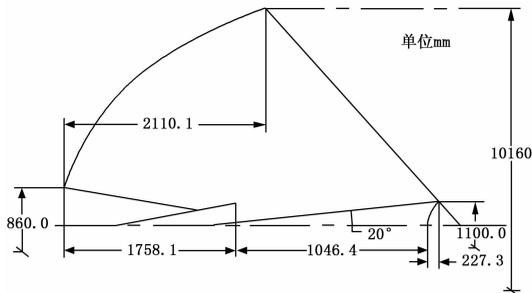


图 1 天线反射面几何示意图

获得足够大的天线效率，而 4 个 S 频段喇叭阵列的单元口径也不能太小，否则会导致 S 频段天线方向图畸变、天线效率下降。因此 S 频段喇叭阵列的口径及间距由中心 C 喇叭口径和结构厚度约束，选择合适的 C 喇叭结构和口径，从而兼顾两个频段的性能。

因为增加外围 S 喇叭，必须减小中心喇叭的口径。为保证 C 频段天线效率下降达到最小，选择变张角光壁多模喇叭，以减小 C 喇叭的口径。通过优化计算，筛选喇叭尺寸和方向图后，其实际尺寸如图 2 所示。其中 C 频段喇叭内口径尺寸 $D_h = 200$ mm。从理论计算的方向图得出，当喇叭对剖面边缘的照射角为 20° 时，边缘照射电平约为 -10 dB，这样可以最大限度的保证 C 频段照射效率^[3-4]。

S 频段喇叭阵列由 4 个扇形喇叭单元组成，垂直方向上 2 个喇叭单元形成俯仰和/差信号，水平方向上 2 个喇叭单元形成方位和/差信号^[5]。将俯仰/方位上的 2 喇叭和信号相加，形成 4 喇叭单元阵列的和信号。组合喇叭几何示意图和实物图如图 2 所示。

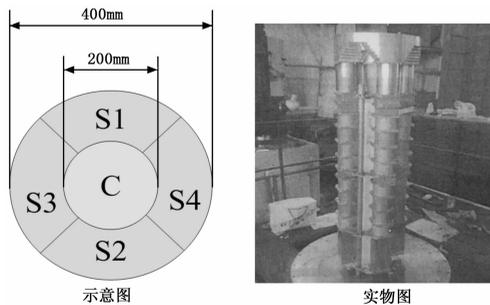


图 2 组合喇叭几何示意图及实物图

2.3 C+S 频段馈电网络

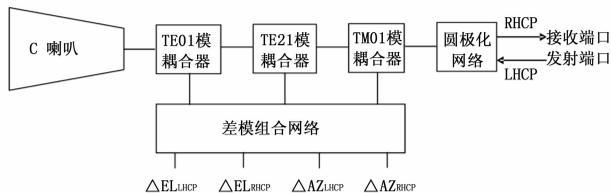
C 频段馈电网络部件主要有 TE01 模耦合器、TE21 模耦合器、TM01 模耦合器、差模合成网络、圆极化器、正交器等部件组成。

雷达发出的信号经过目标反射回来后，通过喇叭接收在圆波导中除了激励主模作为接收信号外，还可以激励起 3 种差模：TE01 模、TE21 模和 TM01 模，这 3 种差模经过合成可以和主模形成传统形式的三通道跟踪体制^[6]。

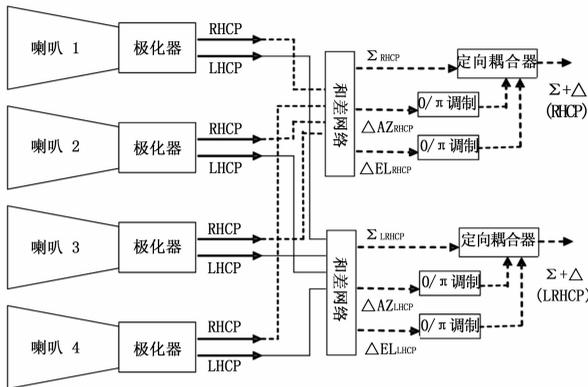
S 频段馈电网络部件主要有扇形口喇叭、圆极化器、和差网络、 $0/\pi$ 调制器、滤波器等组成。

C+S 频段多模自跟踪馈源的工作原理框图如图 3 所示。关于 C+S 频段各自角误差信号的具体运算原理，读者可查阅

相关文献，本文不再赘述。



C 频段馈源原理框图



S 频段馈源原理框图

图 3 多模自跟踪馈源的工作原理框图

3 天线辐射特性仿真计算和实测结果

3.1 天线辐射特性仿真计算

根据卡塞格仑天线的方向图计算公式，天线的远场方向图可由下式得出：

$$f(\theta', \varphi') = jE_0 \frac{1 + \cos\theta'}{2\lambda R} e^{-jkR} \int_0^{2\pi} \int_{\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} G(\theta, \varphi) e^{jkr \sin\theta' \cos(\varphi' - \varphi)} r dr d\varphi$$

其中： $G(\theta, \varphi)$ 为喇叭的方向图函数。

根据选定的天线几何参数，通过仿真计算了该天线的主要技术指标：天线增益、方向图第一副瓣电平、波束宽度、零深、差斜率等。仿真计算可选择不同的频点，在 C 频段选择 $f = 5.6$ GHz，在 S 频段选择 $f = 2.3$ GHz，具体计算结果见表 1 所示，其仿真方向图见图 4 示（该图只列举了一个方向和方向图的切面图）

表 1 C+S 双频段天线方向图指标估算结果

项目	设计要求		仿真结果	
	5.6 GHz	2.3 GHz	5.6 GHz	2.3 GHz
增益(dB)	≥ 51 dB	≥ 39	52.6	40.1
第一副瓣电平(dB)	≤ -16	≤ -16	-18.4	-17.2
半功率波束宽度($^\circ$)	$0.4 \times$ ($1 \pm 10\%$)	$1 \times$ ($1 \pm 10\%$)	0.38	1.1
差波瓣零深(dB)	≤ -30 dB	≤ -30 dB	57.88	54.35
差斜率(1/度)	≥ 3.5	≥ 1.5	3.65	1.55

3.2 天线辐射特性实测结果

在各部分生产完毕后，并对馈源各部分调试合格后，进行天线的装配、相位中心调整、天线反射面精度调整、以及方向图调整。为检验设计指标是否满足使用要求，必须对其进行测试。测试在满足远场的条件下和一定的天线仰角进行（仰角一

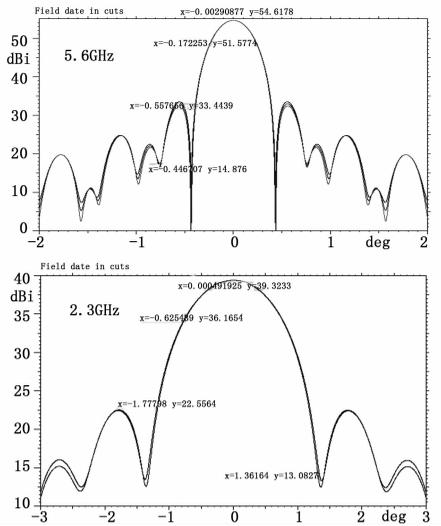


图 4 仿真方向图

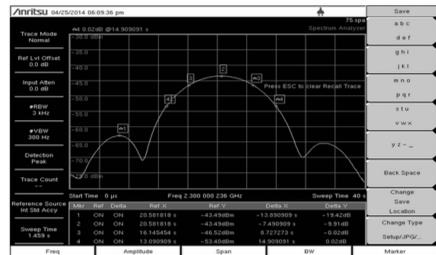
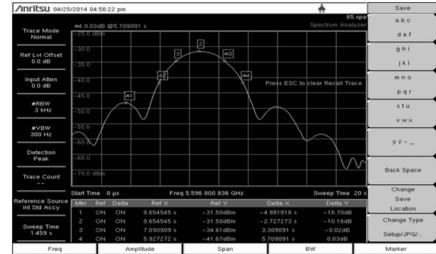


图 5 实测方向图

一般在 3 度以上即可)。根据满足远场条件公式: $\frac{2D^2}{\lambda}$, 经过计算, 5.6 GHz 和 2.3 GHz 频段远场分别应大于 3 730 米和 1 530 米, 因此, 必须选择在距离大于 3.7 公里、高度大于 200 米的高大建筑 (或标校塔) 上搭建信标或信号源。具体测试结果均满足指标要求, 见表 2 所示。其实测方向图见图 5 所示。

表 2 C+S 双频段天线方向图指标实测结果

项目	C 频段		S 频段	
	方位	俯仰	方位	俯仰
第一副瓣电平/dB	-16.7	-16.6	-19.4	-19.0
半功率波束宽度/°	0.36	0.36	0.87	0.89
差波瓣零深/dB	34.2	31.1	40.2	38.0
差斜率/(1/度)	1.55	1.50	3.74	3.87
增益/dB	51.9		41.8	

4 结语

本文给出了一种船载新型 C+S 双频段抛物面反射天线设

(上接第 136 页)

[13] Yunsheng F, Xiaojie S, Guofeng W, et al. On fuzzy self-adaptive PID control for USV course [C]. Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese. IEEE, 2015: 8472-8478.

[14] Velagic J, Vukic Z, Omerdic E. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping [J]. Control engineering practice, 2003, 11 (4): 433-443.

[15] Bao X, Nonami K, Yu Z. Combined yaw and roll control of an autonomous boat [A]. Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on. IEEE [C]. 2009: 188-193.

[16] 孙巧梅, 任光. 自适应逆控方法的无人艇航向控制 [J]. 中国航海, 2013, 35 (4): 17-21.

[17] Alfaro-Cid E, McGookin E W, Murray-Smith D J, et al. Genetic algorithms optimisation of decoupled Sliding Mode controllers: simulated and real results [J]. Control Engineering Practice, 2005, 13 (6): 739-748.

[18] 张显库. 船舶航向保持的非线性逆推鲁棒控制算法 [J]. 大连海事大学学报: 自然科学版, 2007, 33 (2): 80-83.

[19] Roberts G N, Sutton R, Zirilli A, et al. Intelligent ship autopilots

计技术, 通过对该天线方向图的仿真计算结果和实测结果表明, 该天线两个频段的增益、第一副瓣电平、波束宽度、零深、差斜率等均满足设计要求。该天线适合舰船、车载等物理空间相对狭窄的移动平台安装使用。

参考文献:

[1] 江文达, 陈道桂, 杨仁清. 航天测量船 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[2] 仁波, 吴鸿超, 朱瑞平等. 渐变槽线天线参数分析与设计 [J]. 现代雷达, 2010, 32 (11): 58-62

[3] 崔卫东, 钟华. 单脉冲雷达多模馈源分析与设计 [J]. 雷达科学与技术, 2013, 11 (1): 107-108

[4] 黎娜. 一种双频段喇叭馈源的相位中心分析 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (7): 99-100.

[5] 孙浩. 圆极化/双极化四喇叭单脉冲馈源设计 [J]. 舰船电子对抗, 2012, 35 (5): 84-86.

[6] 赵业福, 李进华. 无线电子跟踪测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

- A historical perspective [J]. Mechatronics, 2003, 13 (10): 1091-1103.

[20] Yunsheng F, Zenglu G, Yongsheng Z, et al. Design of information network and control system for USV [C]. Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2015 54th Annual Conference of the. IEEE, 2015: 1126-1131.

[21] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型: 机理建模与辨识建模 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.

[22] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

[23] Witkowska A, Smierchalski R. Nonlinear backstepping ship course controller [J]. International journal of automation and computing, 2009, 6 (3): 277-284.

[24] 杨盐生, 郭子瑞. 船舶在非定常风中的舵力保向 [J]. 大连海运学院学报, 1993, 19 (2): 145-152.

[25] Yang Y. Study on ship manoeuvring mathematical model in ship handling simulator [J]. 1996.

[26] 杨承恩, 贾欣乐, 毕英君. 船舶舵阻横摇及其鲁棒控制 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2001.