

文章编号:1001-893X(2012)06-0835-05

宽频带低轴比双圆极化频率复用天馈系统设计^{*}

王万玉¹,李娟妮²,张宝全¹,王 强¹,李 凡¹

(1.中国科学院对地观测与数字地球科学中心,北京 100094;

2.中国电子科技集团公司第三十九研究所,西安 710065)

摘 要:分析了影响卫星数据地面接收系统交叉极化鉴别率的主要因素,提出了天馈系统的体系结构和设计方案。该方案已用于频率复用高码速率遥感卫星数据接收系统工程中,并成功实现了国内首颗双圆极化频率复用遥感卫星(“资源三号”卫星,数据速率 450 Mbit/s $\times$ 2)的数据接收。

关键词:遥感卫星;数据接收系统;双圆极化;频率复用;天线馈源;低轴比

中图分类号:TN927 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.001

Design of the Dual Circular Polarization Frequency Reuse Antenna and Feed System with Wide Band and Low Axial Ratio

WANG Wan-yu¹, LI Juan-ni², ZHANG Bao-quan¹, WANG Qiang¹, LI Fan¹

(1.Center for Earth Observation & Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2.The 39th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: The main factors that affect the system cross-polarization discrimination are analysed, the architecture and design of antenna and feed system are presented. Accordingly designed and realized system has successfully received data from ZY-3 satellite(China's first remote sensing satellite with dual circular polarization frequency reuse and data rate of 450 Mbit/s $\times$ 2).

Key words: remote sensing satellite; data receiving system; dual circular polarization; frequency reuse; antenna feed; low axial ratio

1 引 言

随着在轨卫星数量的不断增加,以及卫星有效载荷分辨率(包括高时间分辨率、高空间分辨率、高辐射分辨率、高光谱分辨率等)的不断提高,频率资源更为紧缺。利用频率复用(极化复用)技术可以使传输容量加倍,提高频谱利用效率,在频谱资源如此紧张的今天,频率复用(极化复用)技术是提高频谱利用率的一种既实用又经济的方法,在国内外遥感卫星高码速数据传输中也得到越来越多的应用(如 WorldView1&2、Geoeye-1、ZY-3、GF 系列卫星等)。

采用双圆极化频率复用技术的极轨卫星对地数

传采用点波束,且卫星(含星上天线)和地面接收站天线是不断运动的,星地天线的对准偏差造成星地合成轴比下降^[1],加之空间传播链路对电磁波去极化的影响^[2-3],给遥感卫星频率复用带来了技术难点。国外已有 X 频段(8.0~8.5 GHz)交叉极化鉴别率为 30 dB 的 S/X 遥感卫星数据地面接收系统,并成功接收 WorldView1&2(码速率 400 Mbit/s $\times$ 2)、Geoeye-1(码速率 370 Mbit/s $\times$ 2)等卫星数据。国内将在极轨卫星中采用该技术,但目前国内遥感卫星数据地面接收系统均不是针对 X 频段频率复用设计的, X 频段典型的交叉极化鉴别率一般小于 24 dB,不能满足卫星对地面接收系统 X 频段交叉极化鉴别率

^{*} 收稿日期:2012-05-09;修回日期:2012-06-04

为 30 dB 的技术需求。

为满足 ZY-3、GF 系列卫星的需求,中科院对地观测中心与中国电子科技集团公司第三十九研究所合作,在“陆地观测卫星数据全国接收站网建设项目”和“高分数据地面接收系统先期攻关项目”中开展了频率复用关键技术的研究及试验,完成了宽频带(7.95~8.95 GHz)、低轴比(小于 0.5 dB)、双圆极化频率复用天馈系统的设计、研制加工、测试等工作。该天馈系统已应用于频率复用高码速率遥感卫星数据接收系统的工程建设中^[4],并成功实现了国内首颗双圆极化频率复用遥感卫星(“资源三号”卫星,双圆极化频率复用,码速率 450 Mbit/s × 2)的数据接收。

2 主要技术指标

依据 ZY-3、GF 系列卫星的星地接口技术规范,经分析论证,双圆极化频率复用天馈系统的主要技术指标的设计要求如下。

(1) 工作频率

7.95~8.95 GHz(X 频段), 2.2~2.3 GHz(S 频段)。

(2) 系统 G/T 值

$G/T \geq 35$ dB/K(X 频段), $G/T \geq 21.5$ dB/K(S 频段)。

(3) 极化方式

X 频段:数据 LHCP、RHCP 同时工作;

跟踪 LHCP/RHCP 可选;

S 频段:LHCP/RHCP 可选。

(4) 和通道电压轴比

$Ar \leq 0.5$ dB(波束中心 $\pm 0.02^\circ$ 范围内)(X 频段), $Ar \leq 1.5$ dB(S 频段)。

(5) 电压驻波比

$VSWR \leq 1.25:1$ (X 频段), $VSWR \leq 1.5:1$ (S 频段)。

3 影响地面接收系统交叉极化鉴别率的因素分析

反射面天线的交叉极化性能取决于天线辐射系统(馈源喇叭及反射面)和馈电系统的性能。采用圆极化频率复用的反射面天馈系统产生交叉极化的因素很多,基本上可以分为以下几个方面。

3.1 喇叭辐射方向图不对称

馈源喇叭是天线系统的核心,馈源喇叭辐射方

向图的对称性强烈影响天馈系统的效率和交叉极化性能,因此馈源喇叭的选择和设计是决定天馈系统性能的关键。

对于口径辐射,要求其辐射方向图具有轴对称性(波瓣等化)。严格来讲,光壁喇叭内不能维持这样的场分布,而波纹喇叭、介质加载喇叭内部能够实现平衡混合模式的场分布^[5]。相关分析研究表明,普通圆锥喇叭其交叉极化最大值相对于主极化 -10 dB 波束宽度内为 -18 dB 左右;波纹喇叭和介质加载多模喇叭在宽频带内可获得轴对称波束和低旁瓣,同时可以将交叉极化分量抑制在 -30 dB 以下。

3.2 主副反射面不对称

在需要高增益天线时,通常使用在宽频带内可获得良好辐射特性的反射镜天线。结构旋转对称的反射面天线在一定波束宽度内产生的交叉极化波非常小。但实际上制造、装配误差等因素不仅会影响天线结构的对称性,而且也会使口面场能量分布发生变化,从而使交叉极化特性会降低。因此,必须要严格控制双反射面天线的制造公差,使得由双反射面天线本身产生的交叉极化分量控制在 -35 dB 以下,才不会对圆极化轴比产生太大的影响。

如果反射面设计得比较理想,则旋转对称的卡塞格伦天线的交叉极化特性就决定于馈源喇叭。

3.3 天线曲率

理论分析表明,抛物面天线焦平面归一化交叉极化分量与抛物面的焦距 F 对其口径 D 之比的平方成反比即与 $(F/D)^2$ 成反比^[6],而且抛物面轴线方向不存在交叉极化。由此可见,同样口径的天线,选用焦距比 (F/D) 大的结构有利于降低交叉极化分量。

当然,焦距比的选择还需综合考虑副反射面的位置、口径,以及结构情况等。焦距比过大,副面支撑杆的加长和自重引起的变形,给整个天线系统的电气性能的实现造成困难。对卡塞格伦双反射面天线,焦距比一般取 0.3~0.5。

3.4 馈源结构

实现 S/X 双频工作主要有两种形式的馈源网络系统,即双频共用喇叭形式和五喇叭形式。双频共用喇叭形式实测结果显示,在 S 频段,馈源方向图等化良好,但在 X 频段,馈源方向图与理论计算的结果有一定差距。分析表明,由于 X 频段中在辐射主模的基础上叠加了高次模,造成了辐射方向图的幅度起伏、电平抬高及不等化。

X 频段高次模的来源是由 S 频段差模及和模的耦合孔造成的,由于耦合孔的存在,必然造成波纹槽的不连续。在每个耦合孔处都设计有起滤波作用的扼流槽,对 X 频段的信号在波纹槽底提供一个等效的短路面,由于耦合孔较大,该扼流槽所能提供的对 X 频段的抑制度有限,X 频段的信号会有少量传输到 S 频段的网络中,如果后面的 S 频段网络调整的不对称,会对 X 频段的轴比产生较大的影响。

五喇叭体制 S/X 双频馈源实际上是一种组合馈源,两个频段的信号之间并不直接产生关联。外围的 4 个 S 频段切角喇叭通过组合产生 S 频段所要求的和差信号,为减小体积,S 频段的组合网络可采用带状线形式。X 频段的信号走中间的单独通道,这样就避免了单喇叭体制中出现的 X 频段信号干扰问题。

综合比较两种体制的馈源系统,我们认为,要想实现极化复用功能,采用五喇叭体制是可行的方案。在该形式的馈源设计中,可以不考虑两个频段之间的相互影响,有利于设计出性能优越的馈源。

3.5 移相量偏差和幅度传输系数偏差对交叉极化的影响

移相量偏差和幅度传输系数偏差是影响天线交叉极化的两项主要参数,而影响这两项参数最主要的因素是线圆转换极化器本身的差相移和差衰减的偏差。

假设交叉极化源使两个极化分量的相移差的偏差为 $\Delta\Phi$,幅度传输系数偏差为 ΔA ,则反旋极化分量

$$b = \frac{\sqrt{(\Delta k)^2 + (\Delta\Phi)^2}}{2}$$

式中, $\Delta k = 1 - k$, $\Delta A = 20\lg k$, $\Delta\Phi$ 为弧度(弦)。

圆极化器有螺钉移相器、介质移相器、差分移相器、隔板极化器和空腔谐振式圆极化器等。根据频带范围和轴比的要求,采用介质加载移相器是一种较好的选择,这种极化变换器在 X 频段上的极化隔离度可以达到 35 dB 左右。

3.6 正交模耦合器的隔离度对交叉极化的影响

用于频率复用馈电网络中的正交模耦合器都是对同频正交信号起作用,当两个正交信号通过正交模耦合器时,总有一部分分量耦合到另外一个端口,引起交叉极化分量。正交模耦合器隔离度的大小直接影响系统的交叉极化性能,通常要求正交端口的隔离度应大于 30 dB。

3.7 天馈系统驻波的去极化影响

馈源(馈源喇叭和馈电系统)的驻波也影响系统的交叉极化性能,一般要求整个馈电系统的驻波不得大于 1.2。天线各部件如副反射面、支杆等的反射将使系统的电压驻波比增大,因此需统筹考虑馈源口面尺寸、副反射面口径,及支杆的形状、位置等,以使系统的电压驻波比小于 1.3。

4 天馈结构及技术方案设计

4.1 技术需求分析

对技术指标分析可知,系统具有如下技术需求:

- (1)S/X 双频工作,具有 S/X 双频段的数据接收、自动跟踪功能;
- (2)X 频段需实现宽频带、低轴比,具备双圆极化频率复用功能;
- (3)优良的天线品质因素(G/T 值)。

4.2 天线结构设计

天线采用结构旋转对称的卡塞格伦双反射面天线。在统筹考虑天线效率、极化性能、旁瓣特性等关键指标后,天线的几何参数选取如下:主反射面口径 $D_m = 12\ 000\ \text{mm}$,副反射面口径 $D_s = 1\ 480\ \text{mm}$,焦距比 $F/D_m = 0.366\ 7$,馈源照射角 $\theta_m = 16^\circ$ 。

4.3 馈源结构设计^[4]

采用五喇叭体制的 S/X 组合馈源。中间为 X 频段喇叭,外围的 4 个 S 频段切角喇叭通过组合产生 S 频段所要求的和差信号。X 频段喇叭采用高性能小张角的波纹喇叭,S 频段的馈源组合网络采用带状线形式。

这种组合馈源结构避免了单喇叭体制中出现的 X 频段信号干扰问题,有利于实现 X 频段宽频带低轴比的技术要求,以及设计出性能优越的馈源。

4.4 X 频段部件设计

4.4.1 高性能波纹喇叭的设计

要在整个 X 频段内实现低轴比,同时确保高 G/T 、低旁瓣性能,馈源喇叭种类的选择和优化设计是关键。波纹喇叭因具有频带宽、交叉极化分量低、电压驻波比好、在整个使用带宽内近于不变的旋转对称的波束宽度等优良性能而成为首选。

一般设计的波纹喇叭其纵向和横向尺寸均大于以往所采用的光壁圆锥喇叭,由于在它的外围紧密排列着 4 个 S 频段的切角喇叭,如果尺寸变化较大,

为避免二次遮挡效应,势必要减小外围喇叭的尺寸,从而影响到 S 频段的整体性能。所以,设计出满足要求的小尺寸波纹喇叭是本课题的关键技术之一。

X 频段波纹圆锥喇叭对副面边缘的照射角为 16° ,频段范围为 7.95 ~ 8.95 GHz,选用两段结构的波纹喇叭,即波纹喇叭由过渡段和辐射段组成。过渡段完成光壁波导中 TE₁₁ 模到波纹波导中 HE₁₁ 模的变换,并且实现光壁波导和波纹喇叭辐射段之间的阻抗变换,完成阻抗匹配以减小输入端的反射。过渡段为赋形曲线,以实现宽频带匹配,选择性能优良的波纹环加载过渡。

波纹槽参数包括波纹周期 P 、波纹槽宽度 d (或者齿厚 t)、波纹槽深度 h 等。波纹喇叭的优越性主要体现在 HE₁₁ 混合模在平衡混合状态的辐射特性比光壁喇叭 TE₁₁ 模式好,但除了 HE₁₁ 主模以外,波纹喇叭中还会有其他模存在,会对喇叭 HE₁₁ 主模的辐射特性产生影响,尤其是对交叉极化影响较大的 EH₁₂ 等有害模,必须得到有效的抑制,因此在波纹参数确定时应尽量避免高次模被激励。

根据理论和经验,每波长选 4 ~ 6 个波纹周期,波纹齿厚度 t 的选取必须能够实现制造,同时要考虑波纹壁厚和槽深对 HE₁₁ 模传输特性的影响;在波纹喇叭段,为了不产生有害的高次模,参数的选择必须使 HE₁₁ 模归一化波纹槽表面导纳 Y/ka 不变,同时在传输 HE₂₁ 跟踪模式的情况下,还应使喇叭的输入过渡段尽可能少产生有害高次模,以避免有害模进入喇叭辐射段,影响辐射性能。在确定波纹参数时,需要计算出表面导纳 Y 。

综合考虑 S/X 双频段天线的效率和旁瓣特性,选取喇叭对副面边缘照射电平在 X 频段 7.95 GHz 为 -7.2 dB,边缘相差在 20° 以内,喇叭的口径为 67.796 mm,半张角 4.276° 。波纹周期为 6.0 mm,波纹槽宽度为 4.5 mm,口面槽深为 9.2 mm。小张角的波纹喇叭与大张角的波纹喇叭相比,其反射特性和交叉极化性能更加优良。

4.4.2 跟踪器设计

X 频段跟踪器的作用是提取跟踪所需的差模信号,并对 TE₁₁ 模进行有效地抑制(抑制度要达到 40 dB 以上)。根据耦合波和小孔耦合理论,在能传输 TE₁₁、TE₂₁ 模的圆波导壁上设计 8 条均匀分布的耦合线,每条耦合线上有若干个大小不同的耦合孔,通过一定尺寸的矩形波导使 TE₂₁ 模从圆波导中有效地耦合出来,并设计相应的馈电网络,实现左、右旋

圆极化跟踪。

差组合网络是用 6 个 3 dB 功率分配器和一个 3 dB 90°电桥进行组合,它是一种简单的带状线连接器件,体积小、重量轻,满足 X 频段跟踪性能及指标要求。

4.4.3 高性能移相器的设计

要实现低的圆极化轴比,必须采用高性能的移相器件。微波器件的性能是设计、加工、安装、调试等多个环节共同作用的结果。高性能移相器的设计在综合分析技术需求、各类移相器的性能及加工、安装、调试等因素后,采用介质加载移相器。介质加载波导移相器要求在工作频带内有平坦且对称的相移曲线,本系统相移偏差 δ 控制在 $|90^{\circ} \pm 1.8^{\circ}|$ 。介质片采用损耗小、不易变形、不易破碎、易于调试的材料。

4.4.3 正交器的设计

正交器完成公共端口中两个相互正交的线极化信号的分离,并将它们传给相互正交的两个单一模式的信号端口。选用的正交器的驻波、隔离度实测结果为:在 7.95 ~ 8.95 GHz,反射系数小于 -28.2 dB(电压驻波比 1.081:1),隔离度小于 -53.11 dB。

5 测试结果

已完成 3 套频率复用高码速率遥感卫星地面接收系统的研制、安装调试、测试验收工作,并已投入运行,系统工作正常。主要技术指标测试结果如表 1 ~ 3 所示。

表 1 系统 G/T
Table 1 System G/T

频点 /MHz	G/dB		T_A/K		T_{LNA}/K		$(G/T)/(dB/K)$	
	LHCP	RHCP	LHCP	RHCP	LHCP	RHCP	LHCP	RHCP
2 200	44.82	44.80	104.9	106.9	51	51	22.89	22.81
2 250	44.85	44.82	106.6	107.4	52	52	22.84	22.79
2 300	45.12	45.12	94.7	94.4	52	52	23.45	23.46
7 950	57.18	57.16	59.95	62.4	69	69	36.07	35.97
8 450	57.67	57.69	58.7	58.1	72	72	36.50	36.54
8 950	58.03	57.89	55.3	56.2	76	76	36.84	36.67

表 2 轴比
Table 2 Axial ratio

极化方式	轴比/dB		
	7.950 GHz	8.212 GHz	8.950 GHz
LHCP	0.38	0.37	0.47
RHCP	0.32	0.47	0.44

表 3 电压驻波比
Table 3 Voltage standing wave ratio

指标要求	测试结果	
	左旋	右旋
S 频段 $\leq 1.5:1$	1.143:1	1.228:1
X 频段 $\leq 1.25:1$	1.144:1	1.163:1

测试和运行结果表明,天馈系统的电气和结构设计合理,系统性能指标满足技术需求。

6 结 论

设计的宽频带低轴比双圆极化频率复用天馈系统在宽频带内实现了低轴比,主要性能指标达到了国际先进水平,具备接收双频率复用(4 下行通道)的卫星信号的能力。

该天馈系统已用于 3 套频率复用高码速率遥感卫星地面接收系统的工程项目中,并已成功接收了国内首颗双圆极化频率复用遥感卫星(“资源三号”)卫星,双圆极化频率复用,码速率450 Mbit/s $\times$ 2)数据的接收。

参考文献:

[1] 沈民谊,蔡镇元.卫星通信天线、馈源、跟踪系统[M].北京:人民邮电出版社,1993:9-10.
SHEN Min-yi, GAI Zhen-yuan. Satellite Communications Antenna, Feed and Tracking System[M]. Beijing:People's Posts & Telecommunications Press,1993:9-10.(in Chinese)

[2] Roddy D. Satellite Communications[M]. 3th ed. Beijing: Tsinghua University Press,2003:115-118.

[3] Vassear H. Degradation of Availability Performance in Dual-Polarized Satellite Communications System[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000,48(3):465-472.

[4] 王万玉,张宝全,刘爱平,等.频率复用高码速率遥感卫星数据接收系统设计[J].电讯技术,2012,52(4):423-428.
WANG Wan-yu, ZHANG Bao-quan, LIU Ai-ping, et al. Design of Data Receiving System for Frequency Reuse High Data Rate Remote Sensing Satellites[J]. Telecommunication Engineering,2012,52(4):423-428.(in Chinese)

[5] 吕洪生,杨新德.实用卫星通信工程[M].成都:电子科技大学出版社,1994:97-99.
LV Hong-sheng, YANG Xin-de. Practical Satellite Communication Engineering[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1994: 97-99. (in Chinese)

[6] 杨可忠,杨智友,章日荣.现代面天线技术[M].北京:人民邮电出版社,1993:9-10.
YANG Ke-zhong, YANG Zhi-you, ZHANG Ri-rong. New Technology of Modern Antenna[M]. Beijing: People's Posts & Telecommunications Press, 1993:9-10.(in Chinese)

作者简介:

王万玉(1962—),男,安徽当涂人,1990年获硕士学位,现为研究员、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理;
WANG Wan-yu was born in Dangtu, Anhui Province, in 1962. He received the M.S. degree in 1990. He is now a senior engineer of professor and also the instructor of graduate students. His research direction is signal and information processing.

Email:wywang@ceode.ac.cn

李娟妮(1979—),女,陕西人,2002年获学士学位,现为工程师,主要从事天线及微波技术研究;

LI Juan-ni was born in Shaanxi Province, in 1979. She received the B.S. degree in 2002. She is now an engineer. Her research concerns antenna and microwave.

张宝全(1966—),男,河北人,1988年获学士学位,现为高级工程师、硕士生导师,主要研究方向为信号与信息处理;

ZHANG Bao-quan was born in Hebei Province, in 1966. He received the B.S. degree in 1988. He is now a senior engineer and also the instructor of graduate students. His research direction is signal and information processing.

王 强(1983—),男,北京人,2006年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为信号与信息处理;

WANG Qiang was born in Beijing, in 1983. He received the B.S. degree in 2006. He is now an engineer. His research direction is signal and information processing.

李 凡(1981—),男,北京人,2004年获学士学位,现为工程师,主要研究方向为信号与信息处理。

LI Fan was born in Beijing, in 1981. He received the B.S. degree in 2004. He is now an engineer. His research direction is signal and information processing.