

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.08.017

S/X/Ka 频段天伺馈系统关键技术分析^{*}

王永华¹,王万玉^{2,**}

(1.中国电子科技集团公司第三十九研究所,西安 710065;2.中国科学院 遥感与数字地球所,北京 100094)

摘 要:采用 Ka 频段进行星地数据传输是解决数据传输频带资源紧张的有效技术途径,将成为星地数据传输的发展方向。针对目前国内外对 S/X/Ka 地面接收系统缺乏深入的技术研究和工程化产品的问题,分析研究了 S/X/Ka 天伺馈系统的关键技术,提出了主要技术指标需求及关键技术实现途径。研究结果可为系统的设计、研制加工等提供技术参考。

关键词:遥感卫星;数据接收系统;S/X/Ka 天伺馈系统;面精度;三频馈源;动态性能

中图分类号:TN927;TN82 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1058-06

Analysis of Key Technology for S/X/Ka-band Antenna Feed and Servo System

WANG Yong-hua¹,WANG Wan-yu²

(1.The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,Xi'an 710065,China;
2.Institute of Remote Sensing and Digital Earth,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100094,China)

Abstract:Using Ka-band to transmit satellite data is an effective technology way to increase available bandwidth of satellite data transmission, and will become the development direction of satellite data transmission. For the lack of in-depth technical research on S/X/Ka-band ground receiving system at home and abroad, this paper analyzes the key technology of S/X/Ka-band antenna feed and servo system, and presents the main technical specification demand and technical realization way. Research results can provide technical reference for system design and development.

Key words:remote sensing satellite; data receiving system; S/X/Ka-band antenna feed and servo system; surface accuracy; tri-band feed; dynamic performance

1 引 言

随着对地观测技术的进步以及人们对地球资源和环境认识的不断深化,星地链路需要传输的信息速率越来越高,占用的带宽也越来越宽,宽带高速传输已经成为星地数据传输发展的必然趋势。星地链路信息传输速率的增长,使得采用 Ka 频段进行星地数据传输成为其发展方向。未来的航天任务将由现在的 S/X 频段向 Ka 频段转变,我国也将在遥感卫星上采用 Ka 频段双圆极化频率复用下传卫星数据。

目前,国内外 Ka 频段主要用于天基测控及中继

卫星,在遥感卫星(极轨卫星)上仍未使用 Ka 频段下传卫星数据,相应的地面数据接收系统仍采用 S/X 频段,用于接收极轨遥感卫星数据的 S/X/Ka 三频段地面接收系统也缺乏深入的技术研究和工程化产品。采用 S/X 双频馈源双圆极化频率复用实现 X 频段宽频带高码速数据接收的卫星数据地面接收系统,技术成熟,工程化产品也成功应用于相关的工程项目中^[1-2],而极轨遥感卫星使用 Ka 频段下传卫星数据对地面接收系统提出了更高、更新的技术要求,涉及的技术需求、关键技术及实现途径尚未开展深入的研究。所以,尽快开展 Ka 频段极轨卫星地面接

^{*} 收稿日期:2013-07-02;修回日期:2013-07-31 Received date:2013-07-02;Revised date:2013-07-31
^{**} 通讯作者:wywang@ceode.ac.cn Corresponding author:wywang@ceode.ac.cn

收系统中相关关键技术的研究是非常必要的。

本文以实现 S/X/Ka 三频段卫星信号的捕获跟踪、X/Ka 频段双圆极化频率复用、宽频带高码速数据接收等工程应用需求和实现为目标,从 S/X/Ka 天伺馈系统的优化设计、研制、加工、装配、检测、标校等环节对 S/X/Ka 天伺馈系统所涉及的关键技术和主要技术指标需求进行了分析研究。采用 S/X/Ka 三频段组合馈源、X/Ka 双频段分波器等技术实现高性能宽频带低轴比的 S/X/Ka 三频段馈源;采用修正型卡氏天线、碳纤维蜂窝夹层结构并优化天线主反射面的分层、分块设计,实现天线的高刚度、轻量化和反射面高精度需求;采用 S 频段双通道跟踪模式、复合控制技术、提高测角数据的采样率等技术实现 S/X/Ka 频段的高动态高精度捕获跟踪需求,提出了技术可行、工程可实现的关键技术解决方案。

2 关键技术及需求分析

2.1 天线面精度

天线的表面精度是衡量评价天线质量的重要指标,它不仅直接影响天线的口面效率,还影响天线方向图的主瓣宽度和旁瓣特性等。大口径天线由多块面板拼装而成,天线的表面精度取决于单块面板的制造精度、检测精度,天线的总装精度、总装检测精度,及重力、风、温度等结构变形造成的精度下降。

反射面的表面精度要求与工作频率有关,工作频率越高,对表面精度要求就越严。一般要求表面精度是天线工作波长的 $1/32$,而测量精度要达到表面精度的 $1/3 \sim 1/5$ 。因此,Ka 频段给天线面精度的设计、加工、装配及检测等方面提出了更高的技术需求,同时减小结构变形也是高精度天线研究中的重要环节。

对于 Ka 频段,如按 28 GHz 分析,则要求反射面的表面精度优于 0.335 mm,检测精度优于 0.11 mm。

2.2 S/X/Ka 天馈系统

接收 Ka 频段卫星数据的接收系统还需兼顾接收其他卫星 X 频段下传数据的能力,以提高地面接收系统的利用率,因此需研制工作于 S/X/Ka 3 个频段的天馈系统。

S/X/Ka 三频段各工作频带之间跨度大,每个频段带宽均较宽,且每个频段的效率等性能指标要求都较高,每个频段都要求自跟踪,X/Ka 频段需实现双圆极化频率复用,因此高性能、多频段、宽频带低

轴比的 S/X/Ka 三频自跟踪天馈系统研制的技术难度较大,如何保证馈源所有频段满足要求是一个关键技术。

(1)天线结构的设计需考虑天馈效率等性能指标和地面接收系统动态性能需求等。综合考虑,天线采用修正型卡氏天线,天线口径选用 12 m。

(2)为实现大口径天线对极轨卫星的高精度跟踪,S/X/Ka 频段都需具备高跟踪精度能力,同时需用 S 频段进行跟踪引导后转 X 或 Ka 频段自动跟踪,因此要保证天线 S、X、Ka 频段天线的电轴一致性。对 S、X、Ka 频段天线的电轴一致性需要达到 0.01° 。

(3)为实现 X/Ka 频段双圆极化频率复用,X/Ka 频段需具有高极化鉴别率。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^[3],加之空间传播链路对电磁波去极化的影响^[4-5],使得星、空间传输链路、地合成轴比下降。因此,在卫星和地面天馈系统设计时,需尽可能提高天馈系统的轴比。依据目前技术水平,X 频段轴比可实现 0.5 dB,Ka 频段可实现 0.8 dB。

(4)馈源是天线系统的核心,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,因此馈源的结构和馈源喇叭的优化设计是决定天馈系统性能的关键。

2.3 跟踪能力

地面接收系统自动跟踪模式需求为:程序引导,S 或 X 频段直接捕获、跟踪目标;程序引导,S 频段捕获跟踪后转 X 或 Ka 频段捕获、跟踪目标。

X 频段直接捕获跟踪要求高于 S 频段直接捕获跟踪,S 频段捕获跟踪后转 Ka 频段捕获跟踪要求高于 S 频段捕获跟踪后转 X 频段捕获跟踪,因此将以 X 频段直接捕获跟踪和 S 频段捕获跟踪后转 Ka 频段跟踪进行分析。

2.3.1 X 频段直接捕获

在跟踪信号满足捕获门限情况下,影响 X 频段直接捕获目标的因素主要为天线指向误差。天线指向误差是影响系统捕获卫星信号的关键因素。

X 频段捕获条件为波束中心方向与目标方向偏差小于半功率波束宽度的一半,即 12 m 天线 X 频段波束中心方向与目标方向偏差需小于 0.1° 。采用二行根数和 SGP4 预报当天的卫星轨道,轨道预报误

差约为 0.05° 。依据目前工程系统,以方位 - 俯仰 + 斜转台(7° 倾角)三轴天线座架,伺服带宽为 1 Hz,加速度误差系数 K 为 3.5 分析,300 km 轨道高度目标正过顶时的动态误差为 0.065° 。因此,为确保 X 频段直接捕获,静态指向误差需小于 0.057° 。

从以往工程和目前的研制水平看,通过优化设计,且严格控制加工、装配、检测、标校等环节,X 频段静态指向误差可优于半功率波束宽度的 $1/5$ (12 m 天线为 0.04°),可实现 X 频段直接捕获。

2.3.2 S 频段捕获跟踪后转 Ka 频段跟踪

Ka 频段波束非常窄(如按 28 GHz、12 m 天线分析,波束宽度为 0.0625°),由于轨道预报偏差、指向误差的存在,采用 Ka 频段对卫星进行捕获并转入自跟踪存在极大的技术难度。为保证数传信号的高质量接收,对 Ka 频段的捕获跟踪需采用引导和高精度自跟踪,因此需用 S 频段进行跟踪后引导 Ka 频段捕获自动跟踪。

S 频段捕获、稳定跟踪后,影响引导 Ka 频段自跟踪的因素主要有 S 频段跟踪精度和 S/Ka 频段电轴一致性。如 Ka 频段捕获条件为波束中心方向与目标方向偏差小于波束宽度一半,则 12 m 天线 Ka 频段波束中心方向与目标方向偏差需小于 0.0313° 。

如 S/X/Ka 频段电轴不一致性需要小于 0.01° ,则要求 S 频段跟踪误差需小于 0.03° 。对于 12 m 天线,S 频段(2.3 GHz)天线波束宽度为 0.76° ,需 S 频段跟踪精度为其半功率波束宽度的 $1/25$ (即 0.03°)。

2.4 动态性能

低轨道极轨卫星目标的运动速度很快,特别是在过顶前后,目标运动对天线系统的加速度要求很高。而天线系统在设计时由于速度、加速度、跟踪方式等多方面的原因,存在一定的动态滞后,特别是在过顶前后这个问题更为突出。动态滞后将造成地面接收系统天线的最大增益方向偏离卫星信号的来波方向,这将导致捕获跟踪困难;产生指向误差损耗,影响接收数据的质量;降低系统的极化隔离度(尤其是离轴轴比差的情况)。

太阳同步轨道卫星其轨道高度一般为 400 ~ 850 km 之间,考虑将来发展,在分析时按照 300 km 轨道高度进行设计。采用方位 - 俯仰 + 斜转台(7° 倾角)三轴天线座架,目标在正过顶时,对应的天线最大方位角速度为 $\dot{A}_{\max} = 12.02^\circ/\text{s}$,最大角加速度 $\ddot{A}_{\max} = 1.64^\circ/\text{s}^2$ 。

Ka 频段半功率波束宽度为 0.0625° ,如要求信号损失不超过 3 dB,则允许的动态滞后误差为 $\epsilon < 0.0313^\circ$ 。加速度误差系数 $K > 0.14 \times (1/\epsilon) \times \ddot{A}_{\max} = 7.3 \text{ s}^{-2}$ 。

因此,为了保证 Ka 频段过顶跟踪的实现(信号损失不超过 3 dB),伺服系统的加速度误差系数 K 需达到 7.3 s^{-2} 以上。相应地,伺服带宽需达到 1.45 Hz。

如果确保 Ka 频段保精度跟踪(跟踪精度优于 $1/10$ 半功率波束宽度),则允许的动态滞后误差为 $\epsilon < 0.00625^\circ$ 。加速度误差系数 $K > 0.14 \times (1/\epsilon) \times \ddot{A}_{\max} = 36.63 \text{ s}^{-2}$ 。

因此,为了保证 Ka 频段过顶跟踪的实现,伺服系统的加速度误差系数 K 需达到 36.63 s^{-2} 以上。相应地,伺服带宽需达到 3.3 Hz。

从以往工程和目前的研制水平看,经过优化设计,伺服带宽可以做到 1.5 Hz,要达到 3.3 Hz 以上是有困难的。因此,必须采用前馈复合控制技术提高伺服系统等效加速度误差系数 K ,才能保证动态性能的实现。

2.5 主要关键技术指标

依据目前国内外在轨运行的遥感卫星技术需求及上述分析,系统需具备 S/X/Ka 三频工作,具有 S/X/Ka 双频段的数据接收、自动跟踪功能;X/Ka 频段需实现宽频带、低轴比,具备双圆极化频率复用功能;优良的天线品质因素(G/T 值)。主要功能和关键技术指标设计需求如下:

- (1) 工作频段: S 频段(2.2 ~ 2.3 GHz)/X 频段(7.95 ~ 8.95 GHz)/Ka 频段(26 ~ 28 GHz);
- (2) 天线面精度: 主反射面优于 0.3 mm(RMS) ;
- (3) 系统 G/T 值: X 频段 $G/T \geq 35.0 \text{ dB/K}$, Ka 频段 $G/T \geq 41.0 \text{ dB/K}$ (按 28 GHz 估算), S 频段 $G/T \geq 21.0 \text{ dB/K}$;
- (4) 极化方式: X/Ka 频段有左 + 右旋圆极化同时(数据)、左/右旋圆极化可选(跟踪), S 频段有左/右旋圆极化可选(跟踪 + 数据);
- (5) 轴比: X 频段小于等于 0.5 dB, Ka 频段小于等于 0.8 dB;
- (6) 指向误差: 优于 $1/5$ 半功率波束宽度(S/X 频段), 优于 $1/2$ 半功率波束宽度(Ka 频段);
- (7) 跟踪体制: 双通道跟踪方式(S 频段), 单通道单脉冲跟踪(X/Ka 频段);

- (8)跟踪精度:优于 1/10 半功率波束宽度(X/Ka 频段),优于 1/25 半功率波束宽度(S 频段);
- (9)S/X/Ka 电轴一致性: $\leq 0.01^\circ$;
- (10)最大速度:方位 $20^\circ/\text{s}$,俯仰 $10^\circ/\text{s}$;
- (11)最大加速度: $10^\circ/\text{s}^2$ (方位/俯仰);
- (12)伺服带宽:1.5 Hz。

3 技术实现途径

3.1 天线反射体

天线反射体设计需要从天线结构型式、材料选择、力学分析等方面进行优化设计,保证天线反射体的轻型化、高精度要求。

系统要求工作于 S、X、Ka 3 个频段,且每个频段的效率等技术要求都较高,因此,天线采用修正型卡塞格伦双反射面天线,天线口径选用 12 m。天线反射体主要由主反射面、副反射面、中心体、背架、副面支撑调整机构以及交叉杆件等构成,形成一个桁架式结构形式的刚性整体。

大口径天线主反射面由多块面板拼装而成,考虑到单块面板的加工精度及重力、风、温度等对天线主反射面精度的影响,设计时需对单块面板的大小、背架的形状及强度进行优化设计,同时需提高单块面板的制造精度、单块面板的检测精度、天线的总装精度、总装检测精度。

根据 Ka 频段天线反射面精度要求,天线主反射面分为 3~4 圈,单块反射面板的面积以 1.5 m^2 左右为宜;背架由环梁、辐射梁、环向拉杆、上弦面和下弦面斜拉杆以及连接件组成,与中心体构成一个整体。为了实现天线的高刚度和轻型化,天线反射体采用碳纤维蜂窝夹层结构,关键受力件如背架、中心体采用钢结构。

3.2 S/X/Ka 三频段馈源

S/X/Ka 三频馈源技术需求高,结构复杂,设计时需依据实际工作进行统筹考虑,以降低三频馈源技术设计、实现等方面的技术难点。基本原则是优先确保 X/Ka 频段性能指标,对 S 频段,在满足高跟踪精度及跟踪引导能力需求的前提下可适当降低其他技术指标,如 G/T 、极化鉴别率等。综合考虑性能、可行性、复杂性、工艺实现,采用高性能的 S/X/Ka 三频段组合馈源。

对 S/X/Ka 三频馈源结构,考虑到目前的技术现状,馈源采用 5 喇叭体制的组合馈源,Ka 和 X 频

段喇叭位于馈源的中心,S 频段采用 4 喇叭形式,位于 Ka 和 X 馈源的外围,其布局如图 1 所示。

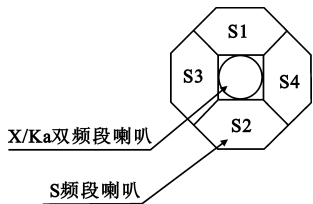


图 1 S/X/Ka 三频段 5 喇叭结构图
Fig.1 S/X/Ka tri-band 5-horn feed structure

外围的 4 个 S 频段切角喇叭输出口分别与各自的极化器相连,通过合成网络形成 S 频段的左、右旋圆极化的和差信号。

Ka 和 X 频段馈源采用 X/Ka 双频段单喷口馈源,用小张角波纹喇叭作为两频段射频信号的初级辐射器。

X/Ka 双频段分波器是 X/Ka 双频段馈源系统的关键部件,也是技术难度最大的部件,必须对分波器中的一些重要数据如 X 频段耦合孔尺寸、锥削角度和 X 频段滤波器等参数进行仿真分析计算,使 X 频段和 Ka 频段的性能都保持最好水平。

3.3 窄波束、高动态、高精度跟踪

高频率、大口径天线的波束窄,且低轨卫星目标的运动速度很快,为了保证对高动态目标的捕获跟踪,对系统的指向精度、跟踪精度有很高要求。

3.3.1 跟踪体制

Ka 频段波束非常窄,采用 Ka 频段对卫星进行捕获并转入自跟踪存在极大的技术难度,且采用 Ka 频段下传卫星数据的卫星上无 X 频段下传信号。因此,为保证数传信号的高质量接收,对 Ka 频段的捕获跟踪需用 S 频段进行跟踪后引导 Ka 捕获、自动跟踪。

同时,为确保 S 频段引导 Ka 频段捕获,S 频段跟踪精度需达到半功率波束宽度的 1/25。单通道单脉冲跟踪体制难以实现如此高的跟踪精度要求,S 频段需采用双通道跟踪方式。

3.3.2 指向误差

在程序跟踪方式下,天线的电轴指向偏差主要是输入指令偏差(如轨道预报误差、数据采样率、时间同步引入的误差)、动态滞后误差、伺服系统噪声引入的误差,阵风扰动,重力、风、温度等结构变形,传动装置的间隙,轴系精度,角度传感器、显示器的精度和分辨率等^[6]。为提高指向精度,需采用如下

技术措施:

(1)采用复合控制技术,提高等效加速度误差常数,降低动态滞后误差;

(2)采用数字控制技术,降低伺服放大器零点偏移和死区、伺服放大器零漂和噪声、编码器噪声、跟踪接收机噪声等误差;

(3)从天线结构类型、材料选择、力学分析等方面进行优化设计,严格控制加工、装配、检测等环节,提高轴系精度、减小重力、风、温度等引起的结构变形;

(4)采用双链驱动、电消除、差速振荡抑制技术,减小传动装置的齿隙,提高传动机构运行的稳定性;选用高精度、高分辨率角度传感器,采用光电技术直接进行编码,绝对位置编码输出,消除了传统模拟旋变编码电路的误差;

(5)提高测角数据的采样率、时间系统的准确性,降低输入指令误差;采用射电星、低轨卫星等多种方式进行角度标定,修正系统误差。

3.4 伺服控制

3.4.1 环路设计

天线控制模块采用独立的三轴控制体系。环路设计采用成熟的电流环、速度环和位置环三环结构,同时为提高性能,采用双链驱动、电消除、差速振荡抑制技术。电流环设计有利于改善电机的动态特性,克服力矩控制死区和非线性;速度环设计提高系统低速平稳性能和提高系统抗风能力,减小由于风力矩引起的暂态及稳态误差;位置闭环是保证跟踪性能的外环,是系统的主要工作方式。

3.4.2 动态性能

Ka 频段跟踪需较高的动态性能,设计时需着重考虑提高位置环带宽、提高加速度误差常数,从而提高系统的动态性能。

(1)结构谐振频率严重影响整个伺服系统的稳定性,限制了伺服系统位置环的带宽,致使加速度误差常数不能提高。所以,设计时需尽可能地减小负载惯量、增大传动链的刚度(尤其是输出轴的刚度),以提高结构谐振频率。

(2)采用复合控制技术,即引入前馈补偿,使二阶无静差系统等效为三阶无静差系统,提高等效加速度误差常数,降低动态滞后误差。

(3)系统闭环带宽受采样频率的限制。在系统的振荡指标一定的情况下,系统的采样频率越低,其开环截止频率就越小,系统闭环带宽也越小。提高伺服系统的采样率,缩短采样周期,可扩展带宽,同时可降低输入指令误差,提高系统的稳定性和快速

响应能力。

(4)采用变积分 PID 控制,在第一阶段,控制误差较大时,积分很弱,环路类似于一型环路,能够快速、平稳运行,几乎没有超调;在第二阶段,控制误差较小,积分逐步加强,会带来一定的超调;第三阶段,控制误差已足够小,天线运行已趋于平稳,积分加强到正常值,保证系统有足够的加速度常数和最小的动态滞后误差。

3.5 双圆极化频率复用

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,加之空间传播链路对电磁波去极化的影响(空间传播链路对 Ka 频段去极化的影响尤为严重^[7]),使得星、空间传输链路、地合成轴比下降。因此,在卫星和地面天馈系统设计时,需尽可能提高天馈系统的轴比。同时,在地面接收系统设计时需采用交叉极化干扰消除技术(XPIC)^[8],降低交叉极化干扰的影响。在某先期攻关项目中,已在解调器中实现了交叉极化干扰消除的功能。

4 结 论

极轨遥感卫星使用 Ka 频段下传卫星数据对地面接收系统提出了更高更新的技术要求,且目前国内外均对用于接收极轨遥感卫星数据的 S/X/Ka 三频段地面接收系统缺乏深入的技术研究和工程化产品,因此需对系统的优化设计、研制、加工、装配、检测、标校等环节涉及的关键技术开展深入的研究。本文结合国内相关工程建设需求,分析研究了 S/X/Ka 天馈系统的关键技术、主要技术指标需求及解决途径,研究结果已用于相关项目的立项论证、系统设计及工程样机的研制工作中,并得到试验及测试验证。

由于目前无 Ka 频段极轨卫星,Ka 频段捕获跟踪的技术实现方案仅能采用模拟试验方式进行验证,仍需做进一步的试验验证;重力、风、温度等结构变形造成的精度下降对 Ka 频段指向精度、捕获跟踪等的影响仍进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 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, 54(4): 423 – 428. (in Chinese)
- [2] 王万玉, 李娟妮, 张宝全, 等. 宽频带低轴比双圆极化频率复用天馈系统设计[J]. 电讯技术, 2012, 52(6): 835 – 839. WANG Wan-yu, LI Juan-ni, ZHANG Bao-quan, et al. Design of the dual circular polarization frequency reuse antenna and feed system with wideband low axial[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 54(6): 835 – 839. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Roddy D. Satellite Communications[M]. 3th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 115 – 118.
- [5] Vassear H. Degradation of Availability Performance in Dual-Polarized Satellite Communications System[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(3): 465 – 472.
- [6] 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: 92 – 93.
- [7] 张宝全, 弓树宏, 王万玉, 等. Ka 频段雨致极化失配特性研究[J]. 无线通信, 2012(2): 1 – 6.

ZHANG Bao-quan, GONG Shu-hong, WANG Wan-yu, et al. Study on the Characteristics of Rain-Induced Polarization Mismatch Factor at Ka Bands[J]. Wireless Communications, 2012(2): 1 – 6. (in Chinese)

- [8] YANG Jun-yi, CHEN Jin-shu, WANG Wan-yu, et al. Joint XPI and ISI Cancellation for Dually-Polarized Radio Systems over Earth-Space Links[J]. Procedia Engineering, 2012, 29(2): 3217 – 3221.

作者简介:



王永华(1971—), 男, 山西万荣人, 1994 年获学士学位, 现为高级工程师, 主要从事雷达测控技术方面的研究;

WANG Yong-hua was born in Wanrong, Shanxi Province, in 1971. He received the B.S. degree in 1994. He is now a senior engineer. His research concerns radar TT&C.

Email: wangyonghuaxx@163.com

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 concerns signal and information processing.

Email: wywang@ceode.ac.cn