

文章编号: 2095-4980(2017)04-0580-05

低轨遥感卫星 Ka 频段捕获跟踪的设计及应用

王 怀¹, 彭兴会¹, 李 凡²

(1.航天恒星科技有限公司, 北京 100086; 2.中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

摘 要: 随着对地观测技术的快速发展, 遥感卫星空间分辨力的不断提高, 星地链路传输的信息量越来越大, 码速率越来越高, 数据传输频段已经由传统的 X 频段扩展到 Ka 频段, 以满足海量遥感数据传输的需求。但 Ka 频段低轨遥感卫星波束非常窄, 遥感卫星地面接收系统需要具备良好的跟踪性能, 才能实现系统稳定的捕获跟踪, 保证接收数据的质量。文中通过对跟踪方式和跟踪精确度方面进行分析和论证, 优化捕获跟踪流程, 实现对低轨遥感卫星 Ka 频段的捕获跟踪。文中提出利用 S 频段跟踪引导 Ka 频段跟踪的方式, 高低仰角采用不同的优化流程设计, 结合高分辨力对地观测系统重大专项的先期研究内容和某地面接收站进行了设计验证, 结果表明, 可实现低轨遥感卫星 Ka 频段的捕获跟踪, 待时机成熟, 可进行工程应用。

关键词: 低轨; 遥感; Ka 频段; 跟踪

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0580

Design and application of low orbit remote sensing satellite Ka band capture tracking

WANG Huai¹, PENG Xinghui¹, LI Fan²

(1.Space Star Technology Limited Company, Beijing 100086, China;

2.Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: With the rapid development of the earth observation technology, and the improvements on remote sensing satellite spatial resolution, the satellite and ground link transmission information content, and the bit rate, the data transmission frequency is extended from the traditional X band to Ka band, to meet the needs of remote sensing data transmission. Nevertheless, the beam width of Ka band low orbit remote sensing satellite is very narrow, the ground receiving system of remote sensing satellite needs to have a good tracking performance, in order to achieve a stable capture and tracking, to ensure the quality of the receiving data. In this paper, the tracking method and tracking precision are analyzed, the process of capturing and tracking is optimized, and the acquisition and tracking of Ka band of low orbit remote sensing satellite is realized. The method of using S band tracking to guide Ka band tracking is proposed, combined with the optimization design process of different levels of elevation. The design is verified based on the high resolution earth observation system in a preliminary research of some major projects and a ground receiving station. The results show that the tracking of the low orbit satellite Ka band can be realized.

Keywords: low orbit; remote sensing; Ka band; tracking

随着对地观测技术的进步, 遥感卫星空间分辨力的不断提高, 载荷数据率相应大幅提升, 有限的传输通道带宽制约着卫星效能的发挥, 无法满足用户对海量遥感数据的需求^[1]。目前, 国内遥感卫星主要采用四相相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)或参差四相相移键控(Offset Quadrature Phase Shift Keying, OQPSK)调制方式进行星地数据传输, 传输频段为 X 频段, 传输频率范围为 8 025~8 400 MHz, 带宽仅为 375 MHz。为解决上述难题, 传统方法仍选择 X 频段, 采用高效利用带宽的高阶调制技术, 如八相相移键控(8PSK)、十六进制正交幅度调制(16QAM)等, 或采用频率极化复用技术进一步提高频带利用率。然而, 由于受到卫星自身资源的限制, 星

上数传功率有限,导致传输速率提升空间有限^[1]。此外,随着遥感卫星数量的快速增加,不同卫星 X 频段数传信号间相互干扰的可能性也逐渐增大,因此,该方法不能从根本上解决问题。考虑到除 X 频段外,国际电联(ITU)规定了 Ka 频段(25.5 GHz~27 GHz),其传输带宽分别为 X 频段带宽的 4 倍,理论上可大幅提高通道传输速率。国内高分辨力对地观测系统重大专项的规划和实施,正是为了解决此难题,使得使用 Ka 频段进行星地数据传输成为主要发展方向^[2]。未来的航天任务将由目前的 S、X 频段向 Ka 频段转变,我国也将在低轨遥感卫星上采用 Ka 频段下传卫星数据。但 Ka 频段低轨遥感卫星具有窄波束、高动态等特性,对低轨遥感卫星地面接收系统捕获跟踪性能提出了更高的技术要求^[2]。

1 设计分析

以某工程为例,工程拟采用 12 m 天线口径的 X/S/Ka 三频段天线跟踪低轨遥感卫星,在 Ka 频段要求达到 1/10 波束宽度的跟踪精确度(约 0.006 5°),对系统的跟踪方式、跟踪捕获流程都提出了非常高的要求^[3]。

1.1 跟踪方式论证

目前对低轨遥感卫星的跟踪主要采用单脉冲跟踪方式和程序跟踪的方式。程序跟踪适用于对指向精确度要求不高、天线波束相对比较宽的天线系统。而单脉冲跟踪则具有较高的跟踪精确度,可以保证天线电轴准确对准极轨卫星,保障链路具有最大的信噪比^[4]。对 S、X、Ka 三频段天线跟踪分系统,根据任务需求、设备特点进行跟踪体制选择。在该工程中,Ka 频段波束非常窄(约 0.065°),由于轨道预报偏差、指向精确度误差的存在,在程序跟踪方式下,天线电轴指向难以实现 Ka 频段的指向捕获及数传信号接收要求。为保证数传信号的高质量接收,Ka 频段必须具有跟踪引导能力或高精度自跟踪能力。因此 S、X、Ka 频段必须具备单脉冲跟踪功能。同时为了保证 3 个频段的相互引导,对 S、X、Ka 频段天线的电轴一致性也有较高要求,需要达到 0.02°以内^[5],为了保障接收数据的质量,本工程选用单脉冲的跟踪方式。

Ka 频段跟踪要使用精确度较高的单脉冲跟踪方式,这种跟踪方式的前提是天线必须捕获卫星跟踪信号,并从中解调出方位和俯仰的角误差信号。由于 12 m 口径天线 Ka 频段波束约为 0.065°,考虑卫星轨道预报存在误差(一般在 0.1°~0.2°),使用 Ka 频段在轨道起始段直接捕获卫星的难度极大,而且在跟踪丢失后(此现象在卫星过顶前后发生概率大),重新捕获卫星的难度也极大^[6],因此,需要合理设计天线指向精确度,并优化跟踪捕获流程,在不同仰角条件下通过 S 频段引导 Ka 频段捕获卫星,采用螺旋扫描和时间误差修正方法,可以有效地提高程序转自跟踪及不同频段间引导跟踪的成功率辅助天线捕获和跟踪卫星,最终达到实现 Ka 频段自跟踪的目的。

通过 Ka 频段同步卫星地面天线的研制,国内已实现了针对 Ka 频段同步卫星的保精确度跟踪。但对于位置、速度、加速度均时刻变化的极轨卫星,动态滞后是地面天线跟踪误差的主要误差来源^[7]。

天线的动态滞后特性由其结构设计及伺服环路设计决定。目前国内的低轨卫星均工作于 X、S、L 频段,相应卫星地面天线的结构及伺服设计能够满足 X、S、L 频段波束的跟踪需要,但目前的天线无法满足 Ka 频段跟踪精确度需要:而在一般低轨卫星过顶前后,天线方位或俯仰角加速度均会达到 2°/s² 以上,此时即会出现丢失卫星信号的情况。因此,12 m 的 Ka 频段遥感卫星天线不能沿用现有的天线结构和伺服体制,天线跟踪分系统自身需进行高精度指向跟踪设计,为了保障接收数据的质量,在改善天线结构和伺服体制的基础上,优先选用单脉冲的跟踪方式。

1.2 跟踪精确度分析

影响跟踪精确度的主要因素有动态滞后误差、伺服放大器零漂误差、伺服放大器不平衡引入误差、伺服死区与噪声引入误差、接收机热噪声、接收机相移误差、耦合误差、极化误差、接收机解调器零漂、接收机解调器不平衡、比较器前幅度不平衡、稳态风力矩误差等^[8]。

天线跟踪分系统的跟踪精确度定义为天线波束轴方向与 RF 源方向之间的空间角误差。影响跟踪精确度的主要误差源及其贡献如表 1 所示。

在表 1 的跟踪精确度分配过程中,考虑了目前某卫星业务系统中终端站 15 m 口径 Ka 频段天线的技术水平,除动态滞后一项误差项外,其他误差项的分配值采用该天线

表 1 跟踪精确度分配

Table1 Tracking accuracy distribution		
error source	Ka frequency	
	Az/(°)	El/(°)
phase error	0.000 10	0.000 10
amplitude unbalance before comparator	0.001 20	0.001 20
polarization error	0.002 80	0.002 80
channel coupling error	0.000 70	0.000 70
thermal noise error	0.000 70	0.000 70
detector unbalance	0.000 56	0.000 56
servo amplifier unbalance	0.000 56	0.000 56
dynamic hysteresis	0.004 00	0.002 00
gust error	0.001 20	0.001 20
$\sum \Delta X_i^2 / (\text{r.m.s.})$	0.004 00	0.004 00
$\sqrt{\Delta A^2 + \Delta E^2} / (\text{r.m.s.})$	0.006 20	

的相关技术即可完全满足。而对于动态滞后, 允许的贡献在 10^{-3} 量级, 目前的天线设计尚无法达到。本工程在天线跟踪设计中, 通过速度复合前馈技术, 按照系统的偏差值来进行控制, 当输入量发生变化, 形成偏差值, 进而产生减少系统输出量偏移的控制作用, 以此获得大动态、高稳定性的伺服环路, 大幅降低动态滞后, 最终可以实现高跟踪精确度指标。具体分析如下:

伺服系统采用速度前馈复合控制技术提高伺服系统的加速度常数(假定天线口径为 12 m, Ka 频段频率为 25~27.5 GHz):

$$\Delta A = \frac{\ddot{A}_{\max} \times \cos(E_{\ddot{A}_{\max}})}{K_a} = \frac{1.64 \times \cos(81.93)}{60} = 0.0038^\circ \quad (1)$$

式中: ΔA 为方位向动态滞后误差; K_a 为加速度常数; $\ddot{A}_{\max}$ 为方位向最大动态滞后值; $E_{\ddot{A}_{\max}}$ 为方位向最大滞后对应的俯仰角度。

由式(1)可看出, 天线跟踪分系统的加速度常数必须优于 60 并考虑一定余量才能满足方位向动态滞后误差指标。其中, 伺服环路中采用变积分 PID(Proportion Integration Differentiation)控制, 可以在消除动态滞后的同时, 缩短响应时间, 减小超调量; 计算机辅助跟踪技术的实质是在位置环路中引入前馈方式, 进一步缩短伺服环路的响应时间, 提高环路的平稳性。

2 工程应用

结合工程实际情况, 为保障执行任务的成功率, 正常情况下采用 S 频段引导 Ka 频段进行捕获跟踪, 同时考虑了 S 频段捕获跟踪异常, Ka 频段直接捕获跟踪对卫星系统其他功能指标的要求, 可以进一步提高接收数据的成功率。

2.1 S 频段引导 Ka 频段捕获跟踪

在自引导时间 T 内, 卫星不超过给定空域的概率称为连续引导概率。根据工程经验可假定:

- 1) 在引导时间 T 内卫星相继离开主波束的概率近似服从“泊松分布”;
- 2) 引导设备的随机角误差是正态平稳随机过程;
- 3) S 频段单次引导 Ka 频段概率经计算为 70.8%。

综上所述, 依靠 S 频段直接引导 Ka 频段跟踪是有一定风险的, 需要对跟踪捕获流程进行优化。

对于高分卫星只有 S、Ka 频段信号的情况, 在 S 频段稳定跟踪, 天线电轴一致性较高的情况下, S 波段跟踪完全能够满足 Ka 波段的捕获跟踪要求。如不能保证卫星信号进入 Ka 波段的半功率波束宽度, 可以采用在 S 波段稳定跟踪的情况下对 S 波段跟踪接收机输出的误差电压叠加小量的直流偏置电压, 形成跟踪下的扫描, 当满足捕获门限时进入 Ka 频段自动跟踪。当电轴一致性相对较差时, 可以采用偏置跟踪方法, 确保 Ka 频段信号的捕获, 转入 Ka 频段自跟踪, 如果 Ka 频段信号关闭或跟踪丢失后天线自动转回 S 频段自跟踪。

2.1.1 低仰角跟踪流程优化方法

由引导捕获概率估算可知 S 频段引导 Ka 频段捕获单次概率相对较低, 需要在低仰角 S 频段引导时, 在天线控制组件(Antenna Control Unit, ACU)的方位俯仰误差电压叠加微量偏置, 形成以卫星运动的方位、俯仰角度为圆心的螺旋曲线。将螺旋曲线投影到电轴平面时, 其轨迹与卫星偏差的关系如图 1 所示。

经分析可知最佳的扫描半径大约为 $2/3$ 半波束宽度。实际的扫描半径是可以变化的, 为了搜索捕获可以适当增加, 当 Ka 频段卫星已在中心附近时, 为了提高捕获概率及速度, 可以适当减小搜索范围。此方法在以往卫星捕获跟踪中已有成功应用。

2.1.2 高仰角跟踪流程优化方法

当卫星已经运动到中高仰角时, 12 m 口径天线在 S 频段引导 Ka 频段模式下卫星运动速度较快, 采用圆锥扫描来引导卫星已经比较困难。通过长期对在轨各类遥感卫星的跟踪接收, 轨道预报数据尽管有一定偏差, 但是, 系统偏差的一个重要来源却是时间的偏差, 由于时间的偏差, 将会直接带来角度的偏差。高仰角时, 可以采用时

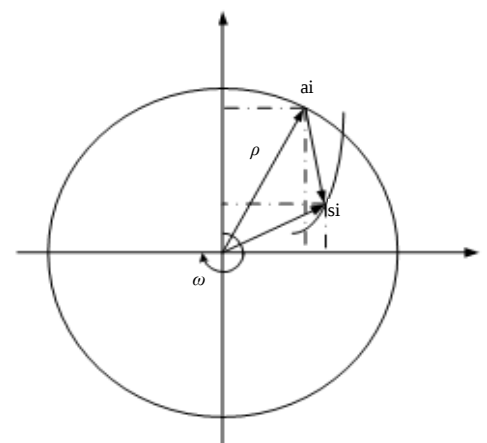


Fig.1 Plane trajectory diagram of low elevation projection

图 1 低仰角投影平面轨迹图

间偏差修正方法沿轨道方向进行时间偏差的修正,这需要利用一些先验数据,即当卫星信号出现后,系统通过自跟踪方式获得一定数量的角度数据,利用原始的预报数据与自跟踪获得的角度数据进行最小方差拟合,就可以获得实际的时间偏差,提高在高仰角引导捕获成功的概率^[9]。

综上,根据不同仰角条件下 S 频段引导 Ka 频段捕获跟踪过程中采用螺旋扫描和时间误差修正方法,可以有效地提高程序转自跟踪及不同频段间引导跟踪的成功率。

2.2 Ka 频段直接捕获跟踪

卫星捕获跟踪还存在无 S 频段引导(或者 S 频段跟踪异常),需要直接捕获跟踪 Ka 频段信号的可能。因此,为使天线能够捕获卫星,即要求天线指向精确度、轨道预报精确度和时间精确度的累计误差需小于 Ka 频段半波束宽度 0.065° 。

指向精确度分析:根据高分辨力对地观测系统重大专项关键设备及关键单机攻关指标要求,天线指向精确度需优于 $1/20$ 半波束宽度,即优于 $0.003\ 25^\circ$ 。

地面站天线一般采用 B 码授时,星地时间精确度优于 200 ns 。由于星地时差引起的位置偏移较轨道预报精确度引起的卫星位置偏差小很多,本项可以忽略。

依据本工程天线跟踪分系统设计指标为可实现对 300 km 轨道高度卫星全空域无盲区跟踪的要求,分析如表 2 所示。

表 2 轨道精确度影响 Ka 频段捕获跟踪分析
Table2 Orbit precision influence on Ka frequency capture tracking

orbit height	Fig.	entry	3°	5°	7°	10°	16.5°
300 km	1	space distance	1 673.24 km	1 499.8 km	1 348.97 km	1 160.38 km	871 km
	2	angle error	$0.034\ 26^\circ$	$0.038\ 22^\circ$	$0.042\ 495^\circ$	$0.049\ 40^\circ$	$0.065\ 8^\circ$

由表 2 可以看出,轨道预报外推 24 h ,精确度为 1 km 时, 300 km 高度卫星由于轨道预报引起的角度误差随仰角增高而增大, 10° 仰角角度误差约为 $0.049\ 4^\circ$; 仰角为 16.5° 时轨道预报误差约为 0.0658° ,大于 Ka 频段半波束宽度,不满足直接捕获跟踪条件。同理,如轨道预报外推 24 h ,精确度为 1.5 km 。结论如下: 300 km 高度卫星由于轨道预报引起的角度误差仰角为 10° 时,轨道预报误差约为 $0.074\ 103^\circ$,大于 Ka 频段半波束宽度,不满足直接捕获跟踪条件。

通过分析可知,主要误差源为轨道预报精确度。轨道预报引入的误差随天线捕获角度增大而增大。当外推 24 h ,预报精确度为 1.5 时, 300 km 轨道卫星在 10° 时预报误差已大于 Ka 频段半波束宽度。

综上,通过 Ka 频段直接捕获误差分析和指标分解,可知地面系统轨道预报精确度是保证 Ka 频段卫星在低仰角直接捕获的关键。为提高系统捕获跟踪的可靠性,Ka 频段卫星数传在 3° 发送单载波信号或空帧信号便于地面站捕获;为确保接收解调的可靠性,在发送有效数据前发送 2 s 空帧,并确保 Ka 频段数传全程连续输出无间断。在上述条件下为提高捕获概率,在天线预置等待点做螺旋扫描,扫描半径为 $2/3$ 半波束宽度(0.05°),等同于扩展天线半波束为 0.1° ,进一步提升天线捕获 Ka 频段信号的概率。

3 结论

目前该工程 Ka 频段跟踪捕获问题经高分辨力对地观测系统重大专项有关先期攻关研究已经取得了突破进展,采用复合前馈技术后可实现对于 Ka 频段极轨高分卫星全空域无盲区跟踪,并已经完成试验验证。此外,S 频段引导 Ka 频段和 Ka 频段直接捕获跟踪经前期攻关项目分析和研究,在外部轨道精确度有保证且高分卫星数传能够满足要求条件下也是完全可以实现的。但由于目前无在轨的 Ka 频段极轨卫星,且 Ka 频段校飞试验尚未进行,S 频段引导 Ka 频段和 Ka 频段直接捕获跟踪无直接实验数据,但理论关键技术已经突破,待时机成熟,即可进行相关工程试验。

参考文献:

- [1] 王中果,汪大宝. 低轨遥感卫星 Ka 频段星地数据传输效能研究[J]. 航天器工程, 2013,22(1):72-76. (WANG Zhongguo, WANG Dabao. Research on transmission effectiveness of remote sensing data from LEO satellite-to-earth at Ka-band[J]. Spacecraft Engineering, 2013,22(1):72-76.)
- [2] 朱维祥,穆伟,王万玉,等. Ka 频段遥感卫星数据接收系统跟踪性能测试新方法[J]. 电讯技术, 2015,55(5):560-563. (ZHU Weixiang, MU Wei, WAN Wanyu, et al. A new tracking performance test method for Ka-band remote sensing satellite

- data receiving system[J]. Telecommunication Engineering, 2015,55(5):560-563.)
- [3] 张宇,陶晓明. 卫星地面站天线跟踪性能评估方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(7):508-511. (ZHANG Yu,TAO Xiaoming. Evaluation method for tracking performance of satellite earth station antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(7):508-511.)
- [4] 李新涛,苏旺旺,王明辉. 关于 Ka 波段低轨道自跟踪地球站天线的研究[C]// 第二届卫星通信产业发展研讨会. 西宁:[s.n.], 2011:102-104. (LI Xintao,SU Wangwang,WANG Minghui. Study on Ka-band LEO self-tracking earth station antenna[C]// The second satellite communication industry development seminar. Xining,Qinghai,China:[s.n.], 2011:102-104.)
- [5] 毛南平,段玉虎,潘高峰,等. S/X/Ka 三频段天线电轴不一致性对天线性能的影响[J]. 电讯技术, 2013,53(7):927-931. (MAO Nanping,DUAN Yuhu,PAN Gaofeng,et al. Impact of electrical axis inconsistency on S/X/Ka band antenna performance[J]. Telecommunication Engineering, 2013,53(7):927-931.)
- [6] 毛新宏,王晓岚,田栋,等. 一种 Ka 频段卫星天线多模单脉冲馈源设计[J]. 航天器工程, 2014,23(2):96-99. (MAO Xinhong, WANG Xiaolan,TIAN Dong,et al. Design of Ka-band satellite antenna multimode monopulse feed[J]. Spacecraft Engineering, 2014,23(2):96-99.)
- [7] 穆伟. 遥感卫星天线捕获、跟踪控制技术研究[J]. 电子科学技术, 2014,1(1):36-39. (MU Wei. Research on antenna capturing,tracking control of receiving station for remote sensing satellite[J]. Electronic Science & Technology, 2014,1(1): 36-39.)
- [8] 曾屹. 合成孔径雷达成像卫星地面接收系统设计[D]. 南京:南京理工大学, 2007. (ZENG Yi. Design of synthetic aperture radar imaging satellite ground receiving system[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science &Technology, 2007.)
- [9] 陈德利. 低轨卫星地面自跟踪系统的研究及实现[D]. 广州:华南理工大学, 2006. (CHEN Deli. Research and implementation of LEO satellite ground tracking system[D]. Guangzhou,China:South China University of Technology, 2006.)

作者简介:



王 怀(1984-), 男, 河南省南阳市人, 高级工程师, 主要研究方向为遥感地面站总体设计.email:huai_work@163.com.

彭兴会(1992-), 男, 北京市人, 工程师, 主要研究方向为天线跟踪设计.

李 凡(1981-), 男, 北京市人, 工程师, 主要研究方向为地面站总体设计.