基于PID的卫星发射主动段遥测接收系统

王 冲,张鑫鑫,周 捷,袁金如,孙立达,沈亦纯 (上海卫星工程研究所,上海 201109)

摘 要:本文重点针对卫星发射主动段存在遥测盲区问题,开展卫星发射主动段遥测数据接收方法的研究,突破发射场通信建立、地面测控天线指向控制、卫星发射主动段遥测接收系统搭建等关键技术,提出了一种基于PID 的卫星发射主动段遥测接收系统,进而高质量实现卫星发射主动段遥测数据全时段接收与监测。提出的方法在大 气环境监测卫星发射任务中得到了试验验证,结果表明卫星发射主动段遥测数据接收完整且有效。

关键词:卫星发射;主动段;遥测盲区;遥测接收系统;PID

中图分类号: V 19; TD 676 文献标志码: A

Telemetry Receiving System for the Active Segment of Satellite Launch Based on PID

WANG Chong, ZHANG Xinxin, ZHOU Jie, YUAN Jinru, SUN Lida, SHEN Yichun (Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: In view of the problem of telemetry blind area in the active segment of satellite launch, the methods of receiving the telemetry data in the active segment of satellite launch are studied in detail. The key technologies such as launch site communication establishment, beam pointing algorithms of ground measurement and control antenna, and construction of the telemetry receiving system in the active segment of satellite launch are analyzed and broken through, and a telemetry receiving system for the active segment of satellite launch based on PID is proposed. With the proposed system, the telemetry data in the active section of satellite launch can be received and monitored in the whole period with high quality. The method proposed in this paper has been verified in the DQ-1 satellite launch mission. The results show that the telemetry data received in the active section of satellite launch is complete and effective.

Key words: satellite launch; active segment; telemetry blind area; telemetry receiving system; PID

0 引言

近年来,随着卫星研制技术的飞速发展,以及 国家战略部署的需要,卫星发射任务越来越密集。 卫星测控技术是卫星发射任务圆满成功的重要保 障,是一项关键技术^[18]。现有的卫星发射测控方 式,是通过多个地面测控站和远望测控船接力的形 式来接收卫星遥测信息,实现卫星发射测控弧段的 覆盖。对于一般太阳同步轨道卫星,卫星发射入轨 阶段已经超出国内地面测控站覆盖范围;而测量船 布设和准备时间较长,且保障成本较高^[9-11]。

对于卫星发射主动段测控问题,地面测控站无 法实现卫星发射主动段弧段的完全覆盖,即从运载 火箭点火发射到卫星进入第一个地面测控站期间, 存在卫星发射主动段测控盲区。虽然,这段测控盲 区的时间不长,若卫星在发射期间出现异常,每一 帧遥测数据对于现象分析和问题定位来说都是至 关重要的^[12-18]。目前已有一些学者在研究卫星发射 测控方法。陈天运等^[19]提出一种移动便携测控站, 其便携性和环境适应性较好,但便携测控站含有 WiFi收发器,不符合卫星发射阵地要求;冯燕等^[20] 提出一种主动段测控多站联合自动联调方法,但该 方法所述的测控站无法覆盖卫星起飞至第一测控 站之间的弧段,无法解决卫星发射主动段测控盲区 的问题;华清等^[9,21]提出一种卫星入轨段的测控方 法及系统,该方法通过建立运载火箭末级与用户星 之间的上、下行双通信链路,实现中继卫星系统对

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.03.018

收稿日期:2023-02-18; 修回日期:2023-03-25

作者简介:王 冲(1985-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为卫星综合测试。

用户星入轨段的遥测和遥控,但该方法适用于卫星 发射入轨段测控问题,无法解决卫星发射主动段测 控盲区问题。

因此,为解决卫星发射主动段测控盲区问题, 本文研究卫星发射主动段遥测数据接收方法,提出 了一种基于 PID 的卫星发射主动段遥测数据接收 系统,有效解决卫星发射主动段存在测控盲区的问 题。在大气环境监测卫星发射任务中,设计的卫星 发射主动段遥测接收系统得到了试验验证,实现卫 星发射主动段遥测数据全时段实时接收与监测,保 障卫星从地面电测试到发射入轨期间遥测数据的 连续性和完整性,具有一定的工程意义。

1 卫星测试系统与发射场通信建立

卫星测试系统与发射场的通信贯穿于卫星发射场测试全流程。建立卫星测试系统与发射场之

间的通信并保障其通信安全,是卫星发射场工作正 常开展的前提。卫星测试系统与发射场之间的通 信建立方式遵照《卫星测试系统与发射场通信协 议》标准执行。

卫星测试系统与发射场通信内容如图1所示, 包含遥测原码、遥测物理量、遥控指令、测试设备控 制指令、指令执行结果、测试设备状态参数原码、测 试设备状态参数物理量等。卫星测试系统与发射场 之间优先选用TCP通信,当需要批量转发测试数据 时选用UDP通信。卫星测试时,多个工位和系统会 同时向卫星测试服务器申请转发遥测物理量和测试 设备状态参数物理量。当采用TCP协议时,测试服 务器需要维持多个TCP通信并频繁转发相同的数 据内容。而采用UDP组播时,仅需组播至相应地址 端口,各终端监听相应地址端口即可获取物理量数 据,通信方式简单,减轻了测试服务器压力。



Fig. 1 Content of communication between the satellite test system and the launch site

2 卫星发射主动段遥测接收系统

2.1 系统组成

如图2所示,卫星发射主动段遥测接收系统部 署在卫星发射阵地前方,并与后方卫星电测试厂房 建立通信,由测控基带、变频器、低噪声放大器、地 面测控天线、天线支架、天线伺服机构、光纤收发 器、射频电缆和射频转接头等射频附件组成。图中,KVM为Keyboard Video Mouse的缩写,UPS为Uninterruptible Power Supply的缩写。

卫星发射主动段遥测接收系统中各组成部分的作用如下。

 1)地面测控天线:用于接收卫星发射的带有卫 星遥测信息的射频信号。

2) 天线伺服机构:完成卫星主动段飞行时地面





Fig.2 Schematic diagram of the telemetry receiving system in the active section of satellite launch

测控天线对卫星的指向跟踪。

3)低噪声放大器:放大地面测控天线接收到的 带有卫星遥测信息的射频信号,并将其放大后的射频信号输出到变频器。

 4)变频器:用于将低噪声放大器放大后的带有 卫星遥测信息的射频信号进行下变频,使其射频信
 号能够适应测控基带。

5) 测控基带:调制、解调变频器的带有卫星遥

测信息的射频信号,形成卫星遥测数据原码,并将 其通过光纤收发器,以光纤的形式传输至信息化机 柜上的服务器进行遥测数据原码解析。

6) 光纤收发器:用于遥测接收系统与卫星电测试厂房之间的数据传输。

2.2 系统工作原理

卫星发射主动段遥测接收系统工作原理如图3 所示。



Fig. 3 Flow chart of the telemetry receiving system in the active section of satellite launch

 建立卫星测试系统与发射场之间的通信,优 先采用TCP协议,当需要与多个监视终端或测试设 备进行通信时建议采用UDP协议。

2)搭建卫星发射主动段遥测接收系统,主要包括测控基带、变频器、低噪声放大器、地面测控天线、天线支架、天线伺服机构、光纤收发器、射频电缆和射频转接头等射频附件等。

 3)结合运载火箭及卫星的相关参数进行运载 火箭理论飞行轨迹仿真计算。

4)根据搭建的遥测数据接收系统与发射塔架、运载火箭相对位置关系,以及运载火箭仿真理论飞行轨迹,计算地面天线理论指向角曲线。

5) 地面测控天线伺服机构实时跟踪地面天线 指向角曲线,实现卫星发射主动段地面测控天线对 卫星的跟瞄,完成卫星主动段遥测数据接收。

3 基于 PID 的地面测控天线波束指向 算法

地面测控天线波束指向算法,用于计算卫星发 射主动段飞行过程中地面测控天线波束对卫星的 实时指向,从而维持稳定的测控传输链路,实现卫 星发射主动段遥测数据的实时下传,算法的准确性 对卫星发射主动段遥测信号的传输起着决定性的 作用。

3.1 算法设计

卫星发射主动段遥测接收系统与发射塔架、运载火箭的位置关系如图4所示。



图4 卫星发射主动段遥测接收系统与发射塔架、运载火箭 的位置关系

Fig. 4 Position diagram of the telemetry receiving system, launch tower, and carrier rocket in the active section of satellite launch

图中:坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 是以卫星发射主动段 遥测接收系统为原点建立的遥测接收系统坐标系; 坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 为发射惯性坐标系;r为遥测接收 系统坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下的运载火箭理论飞行轨 迹; r_1 为发射惯性坐标系原点 O_2 相对于遥测接收系 统坐标系原点 O_1 的相对距离; r_2 为发射惯性坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 下的运载火箭理论飞行轨迹。

根据运载火箭飞行参数、卫星运行轨道参数、 卫星入轨点位置、卫星入轨点速度等信息,并结合 航天飞行动力学与航天飞行运动学专业知识,对发 射惯性坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 下的运载火箭理论飞行轨 迹 $r_2(t) \in \mathbf{R}^3$ 进行仿真计算,发射惯性坐标系下的运 载火箭理论飞行轨迹 $r_2(t)$ 的具体形式如下:

$$\boldsymbol{r}_{2}(t) = \begin{bmatrix} x_{t} & y_{t} & z_{t} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(1)

式中: $r_2(t)$ 为第t飞行时刻运载火箭相对于发射惯 性坐标系原点 O_2 的空间位置坐标。

结合发射惯性坐标系下的运载火箭理论飞行 轨迹 $r_2(t)$,以及发射惯性坐标系原点 O_2 相对于遥 测接收系统坐标系原点 O_1 的相对距离 r_1 ,可计算得 到地面测控天线理论指向角曲线 $\theta_r(t)$,其具体形式 如下:

$$\boldsymbol{\theta}_{r}(t) = \begin{bmatrix} \alpha_{r}(t) & \beta_{r}(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(2)

式中: $\alpha_r(t)$ 为地面天线理论指向方位角曲线; $\beta_r(t)$ 为地面天线理论指向俯仰角曲线,其具体形 式为

$$\alpha_{r}(t) = \arctan\left(Y_{t}/X_{t}\right) \tag{3}$$

$$\beta_r(t) = \arctan\left(Z_t/d_t\right) \tag{4}$$

$$d_t = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} \tag{5}$$

式中: $r(t) = [X_t Y_t Z_t]^{T}$ 为遥测接收系统坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下的运载火箭理论飞行轨迹; d_t 为运载火 箭第 t飞行时刻在 $O_1X_1Y_1$ 平面内的投影距离遥测 接收系统坐标系原点 O_1 的距离; X_t, Y_t, Z_t 分别为运 载火箭第 t飞行时刻相对于遥测接收系统坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 的空间位置坐标,其具体表达形式如下:

$$X_t = x_t + \Delta x \tag{6}$$

$$Y_t = y_t + \Delta y \tag{7}$$

$$Z_t = z_t + \Delta z \tag{8}$$

式中: $\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y & \Delta z \end{bmatrix}^T$ 为发射惯性坐标系原点 O_2 相对于遥测接收系统原点 O_1 的相对距离; $\mathbf{r}_2(t) = \begin{bmatrix} x_t & y_t & z_t \end{bmatrix}^T$ 为发射惯性坐标系下的运载火 箭理论飞行轨迹。

采用经典PID控制器^[2225],实现地面天线指向 角跟踪,完成卫星发射主动段地面测控天线对卫星 的跟瞄,实现卫星主动段遥测数据接收,其控制器 形式如下:

$$\boldsymbol{u}(t) = k_{\mathrm{p}}\boldsymbol{\theta}_{e}(t) + k_{\mathrm{i}} \int \boldsymbol{\theta}_{e}(t) \,\mathrm{d}t + k_{\mathrm{d}} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{e}(t) \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{e}}(t) = \boldsymbol{\theta}(t) - \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{r}}(t) \tag{10}$$

式中: $\theta_{e}(t)$ 为地面天线指向角跟踪误差; $\theta(t)$ 为地 面天线实时指向角; $\theta_{r}(t)$ 为地面天线理论指向角; k_{p} 为控制器比例项系数; k_{i} 为控制器积分项系数; k_{a} 为控制器微分项系数。

3.2 算法仿真

下面对基于 PID 的地面测控天线波束指向算 法进行仿真计算,仿真参数选取如下。

- 1)发射点经纬度:111.73°E,38.80°N。
- 2) 接收系统经纬度:111.72°E,38.80°N。
- 3) 发射时刻:2022-04-15,18:16:00 UTC。
- 4) 星箭分离时刻:2022-04-15,18:37:23 UTC。
- 5) 地面测控天线有效接收距离:600 km。
- 6) 卫星初始轨道参数见表1。
- 7) 地面测控天线 PID 控制器参数见表 2。

Tab. 1Parameters of the initial orbit of the satellite		
参数	瞬时值	
半长轴 a/km	7 067.04	
偏心率 e	0.000 4	
轨道倾角 i/(°)	98.117	
近地点幅角ω/(°)	201.46	
升交点地理经度λN/(°)	284.28	
平近点角M/(°)	-1.33	
大地纬度B/(°)	-20.04	
大地经度λ/(°)	101.32	

表1 卫星初始轨道参数

表2 地面测控天线 PID 控制器参数

Tab. 2 Parameters of the PID controller of ground measurement and control antenna

控制通道	$k_{ m p}$	ki	$k_{\rm d}$
俯仰通道	0.005 77	0.000 070 084 4	0.036 07
方位通道	0.001 83	0.000 016 537 5	0.018 42

火箭理论弹道如图 5 所示,天线理论角曲线和 目标距离曲线如图 6 和图 7 所示。地面测控天线的 俯仰角、方位角跟踪响应曲线如图 8 和图 9 所示,跟 踪误差角曲线如图 10 所示。可以看到,地面测控天 线俯仰角和方位角的最大跟踪角误差均在 0.6°以 内,且跟踪角误差能在 30 s 内均减小到 0.2°以内,并 最终收敛到 0,实现地面测控天线指向的稳定跟踪, 满足地面测控天线主动段遥测接收要求。

4 试验验证及分析

本文设计的卫星发射主动段遥测接收系统在 大气环境监测卫星发射任务中进行了飞行验证,成 功接收卫星发射起飞至第一测控站间的遥测数据, 实现了卫星发射主动段遥测的全时段完整接收。

卫星发射主动段遥测接收系统接收卫星遥测



Fig. 5 Theoretical trajectory curve of launch vehicle



图6 天线理论角曲线

Fig. 6 Curve of the antenna theoretical angle



信号的质量通过卫星下传的关键遥测来表征,如虚 拟信道帧计数、应答机1AGC和应答机2AGC等。 下面对上述大气环境监测卫星发射任务中接收到 的卫星发射主动段关键遥测,以及西安卫星测控中 心第一测控站接收到的卫星发射主动段关键遥测 进行分析,结果如图11和图12所示。



图 8 天线俯仰角跟踪曲线

Fig. 8 Tracking curve of the antenna pitch angle



图9 天线方位角跟踪曲线

Fig. 9 Tracking curve of the antenna azimuth angle



图 10 天线俯仰角和方位角跟踪误差角曲线 Fig. 10 Tracking error curves of the antenna pitch angle and azimuth angle

由图可知,卫星发射主动段遥测接收系统自卫 星发射起飞前就能够稳定接收卫星遥测信息,直至 西安卫星测控中心第一测控站能够稳定收到遥测 信息后才被关闭。对于此次发射任务,卫星发射时 刻为2h16min,西安卫星测控中心第一测控站接收 到的第一帧遥测的时刻为2h18min41s。因此,卫 星发射主动段存在近3min的遥测盲区。而卫星发 射主动段遥测接收系统关闭前接收到的最后一帧



图11 虚拟信道帧计数与虚拟信道帧计数差值曲线

Fig. 11 Curves of the virtual channel frame count and virtual channel frame count difference



Fig. 12 AGC curves of Transponder 1 and Transponder 2

遥测的时刻为2h19min59s,由此可知,主动段遥测接收系统接收的卫星遥测除了能够完整覆盖发射主动段遥测盲区外,与第一测控站接收的遥测信息之间存在78s的重叠部分。

由图 11 和图 12 可知,卫星发射主动段遥测接 收系统与西安卫星测控中心第一测控站接收的遥 测信息中虚拟信道帧计数均连续稳定递增,且虚拟 信道帧计数前后两帧差值均为1。遥测重叠部分虚 拟信道帧计数差值为0,表明卫星发射主动段遥测 接收系统与西安卫星测控中心第一测控站接收的 遥测信息具有良好的一致性,进而说明卫星发射主 动段遥测接收系统接收的遥测信息具有较好的可 信度。另外,主动段遥测接收系统与第一测控站接 收的遥测信息中应答机1和应答机2的AGC均处 于0.9~1.1,遥测信号稳定。

上述分析表明,卫星发射主动段遥测接收系统 工作状态良好,且接收到的卫星遥测数据不丢帧、 无误码,具有较好的连续性和可信度。

5 结束语

为解决卫星发射主动段存在遥测盲区问题,本 文设计了一种基于 PID 的卫星发射主动段遥测接 收系统,充分利用现有的地面测控设备,简化系统 构成,实现卫星发射主动段遥测数据的实时接收与 监测,保证卫星发射主动段遥测数据的连续性和完 整性,且具有较好的可信度。

参考文献

- [1] 窦骄,韩孟飞,宁金枝,等.小卫星测控通信技术发展与 趋势[J].航天器工程,2021,30(6):113-119.
- [2] 雷厉.航天测控通信技术发展态势与展望[J].电讯技 术,2017,57(12):1464-1470.
- [3] 李于衡,孙海忠,王旭康.近地卫星天基测控现状研究[J].无线电工程,2020,50(1):1-9.
- [4] 李文东,张莎莎,赵鹏飞,等.卫星测控射频链路安全防 护能力分析与设计[J]. 航天器工程,2022,31(1): 42-47.
- [5]冯志强,李宗德,纪春国,等.卫星多体制测控地面测试 系统设计[J].计算机测量与控制,2023,31(1):1-7,14.
- [6] 孙立达,叶翔,温渊,等.高轨飞行器主动段双向测控陆基导航方案[J].上海航天(中英文),2021,38(2): 58-65.
- [7] 夏茹敏,史可懿,何健,等.天地联合测控鲁棒性路由算

法[J].上海航天(中英文),2021,38(4):101-108.

- [8] 韦欣荣,徐军,王万斌,等.一种多星测控下行多址干扰 分析方法[J].航天器工程,2018,27(2):47-53.
- [9] 魏伟,陈三楚,郭怡,等.用于卫星入轨段测控的箭载天 基测控中继系统[J].中国空间科学技术,2022,42(6): 64-70.
- [10] 李于衡,孙海忠,王旭康.近地卫星天基测控现状研究[J].无线电工程,2020,50(1):1-9.
- [11] 郭强,韩琦,冯小虎.风云四号科研试验卫星星地一体 化测控设计[J].国外电子测量技术,2020,39(2): 127-131.
- [12] 马友,贾树泽,赵现纲,等.基于张量分解的卫星遥测缺 失数据预测算法[J].电子与信息学报,2020,42(2): 403-409.
- [13] 钱威,周军,张国勇,等.基于主成分分析的卫星遥测回 归方法:CN105590026A[P].2016-05-18.
- [14] 李维铮,孟桥.基于遥测数据动态特征的卫星异常检测 方法[J].空间科学学报,2014,34(2):201-207.
- [15] 陈静.卫星遥测数据的时间序列相似性度量方法研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [16] 钱晨.基于遥测数据的卫星姿态控制系统故障检测方 法[D].杭州:浙江大学,2021.
- [17] 刘爽,陈盈艺.一种通用卫星遥测数据处理系统及方法:CN109842675A[P].2019-06-04.
- [18] 朱昶文,党建成,周军.卫星遥测数据短时 CEEMDAN -PSO-ELM 预测模型[J].上海航天(中英文),2020,37 (6):107-114.
- [19] 陈天运,赵磊,周欢,等.一种移动便携测控站: CN114006626A[P].2022-02-01.
- [20] 冯燕,徐玲,王智伟,等.一种主动段测控多站联合自动 联调方法:CN113780736A[P].2021-12-10.
- [21] 华清,甘霖,王宇飞,等.一种卫星人轨段的测控方法及 系统:CN110784254A[P].2020-02-11.
- [22] 杨巨庆,黄健,段丽华.PID 控制技术与应用[J].哈尔滨 师范大学自然科学学报,2004,20(2):76-79.
- [23] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 559-576.
- [24] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, et al. A review of PID control, tuning methods and applications [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9: 818-827.
- [25] 刘宁,柴天佑.PID 控制器参数的优化整定方法[J/OL].自动化学报,2023 [2023-02-16].https://doi.org 10.16383/j.aas.c220795.