

一种地球同步轨道主从式星群的 星间测控方案设计

陈亮亮¹ 成艳¹ 徐进² 张孝功²

(1. 中国空间技术研究院通信卫星事业部 北京 100094; 2. 中国空间技术研究院 北京 100094)

摘要:针对主从式 GEO 星群系统星间测控需求,研究了该星群系统最简模型和工作模式,提出了一种地球同步轨道主从式星群的星间测控系统设计方案。该方案阐明了主星(及从星)星间测控链路的具体设计和系统关键技术环节的实现方式,资源占用少、工程实现性强、链路可靠性高。对方案设计结果进行分析后表明,在配置 1 主星和 2 从星的最简模型中,主星仅通过一套星间测控链路便可完成与 2 从星的星间测控任务,较以往频分实现模式有源设备配置减少 50%、功耗减少近 50%;通过全向天线形成的星间测控覆盖域,确保了链路的可靠可用,可以满足用户需求。

关键词:主从式;GEO 星群;星间测控链路

中图分类号: TN915 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5060

Design of inter-satellite TC&R in GEO master-slave satellite group

Chen Liangliang¹ Cheng Yan¹ Xu Jin² Zhang Xiaogong²

(1. Institute of Telecommunication Satellite, CAST, Beijing 100094, China; 2. CAST, Beijing 100094, China)

Abstract: For the Inter-Satellite TC&R demand of GEO Master-Slave Satellite Group, proposed a design after the research on its minimalist model and working mode. The program clarified the specific design and key technology of the Inter-Satellite TC&R Link with features of Low consumption, easy engineered and reliable. Analysis of the design result shows that master can fulfill the ISL TC&R task with 2 slaves in only one ISL TC&R channel, enabling the achievement that 50% reduction of active device configuration and nearly 50% reduction of power consumption compared with traditional Frequency-Division mode. The inter-Satellite TC&R coverage produced by Omni-directional antenna ensured the reliability and stability of the link, which better met the user's need.

Keywords: master-slave; GEO satellite group; inter-satellite TC&R link

1 引言

国内外航天领域星间测控技术的具体实施主要体现为 4 种形态,即 GEO-LEO、GEO-MEO、GEO-IGSO 及 GEO-GEO 的星间测控。

GEO-LEO 主要用于中继系统与低轨航天器的测控,如 TDRSS 和天链系统^[1]。其特点是:GEO 中继卫星和 LEO 航天器在分别配置星间测控通道之余,还须配备捕跟系统以满足 GEO 对 LEO 目标的持续捕跟;此外 GEO 中继还须完成对 LEO 目标飞行轨道的外推和测算。此类系统研制周期较长、开支较大。

GEO-MEO、GEO-IGSO 主要用于 GNSS^[2],如 GPS、北

斗等,其提供了 GEO-MEO、GEO-IGSO 的星间测控链路。MEO、IGSO 卫星与 GEO 卫星存在相对运动,故其仍须配置星间捕获跟踪系统和 GEO 星上的轨道外推系统;此外,为了不影响系统外航天器的正常工作,GEO-MEO、GEO-IGSO 星间测控链路多设计为非全天候系统,对星间天线指向要求较高,仅当 MEO 及 IGSO 目标进入 GEO 卫星规定的可见弧段时才开启链路。此类系统研制周期长、开支极大。

GEO-GEO 主要用于全球通信卫星系统,典型的如美国 MilStar、MUOS 以及 AEHF 系统^[3],其提供了超远距离(一般 $\geq 42\ 000$ km)、全天候可用的 GEO 星间测控及通信链路。为了确保测控通信的安全性并且获得更高的星间测控通信速率(≥ 20 Mbps),其配备了星间捕跟及复杂

的天线调零系统,选用 EHF 频段(如 V 频段)及对应器件,技术实现难度大,研制周期长、造价巨大。

本文提及的 GEO 主从式星群的星间测控,其作用距离近(一般 ≤ 100 km),在构型上属于 GEO-GEO 星间测控范畴,但针对用户提出的系统配置简明可靠、研制成本低、星间测控链路全天候可用、星群可扩展、可快速重构等实际需求,以上 4 种星间测控方案均无法直接参考。

本文设计的主从式 GEO 星群系统的最简模型设置 1 颗主星和 2 颗从星,从星 1 和从星 2 以主星和地心连线对称分布。主星作为服务卫星为其自身和从星提供传统卫星的各类测控服务;每一从星根据其载荷需求完成其平台功能配置,可为星群系统用户提供一类或几类特定的载荷服务。该系统设计较传统整体式卫星灵活性高、从星规模小且研制周期短,对于卫星用户在卫星研制过程中由于业务环境发展变化提出的新增需求,只需因地制宜的向星群中增加具有相应载荷功能的新从星,便可快速更新网络,进而满足新增需求;又若星群系统已经发射入轨工作,也可通过研制并发射特定功能的载荷从星完成星群重构,从而满足用户的快速响应需求。从星可随主星通过一箭多星的方式发射入轨后进行分离定轨,亦可通过上面级发射入轨后定轨。上述网络更新和重构从根本上都是通过改变星群中“无线连接”完成的,此“无线连接”实质为主从星间测控链路。

本文对星群系统中主星(及从星)星间测控链路的具体配置、星间频率设计、星间码组设计、星间测距测速原理、星间测距测速信息处理、星群动态重构模式、星间测控系统的效能验证分析共计 7 方面完成了对主从式 GEO 星

间测控方案的阐明,可全面满足用户需求。

2 主从星间测控方案设计

星群中主星可分别与从星通信,从星之间不可相互通信。主星设置星地测控通道,从星不设置星地测控通道,从星遥测信息通过星间链路送至主星,由主星完成遥测格式编排并通过星地测控链路完成下传;地面测控系统发往从星的指令均先发往主星,由主星路由后通过星间链路进行对应分发。

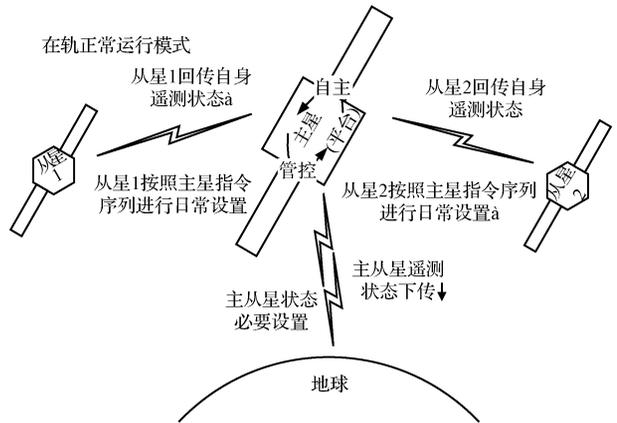


图 1 星群系统工作模式图 1

测定轨模式下,主星通过星地测控系统完成测定轨工作;从星在其自身 GNSS 辅助下,通过主星星群自主管控程序完成测定轨工作。

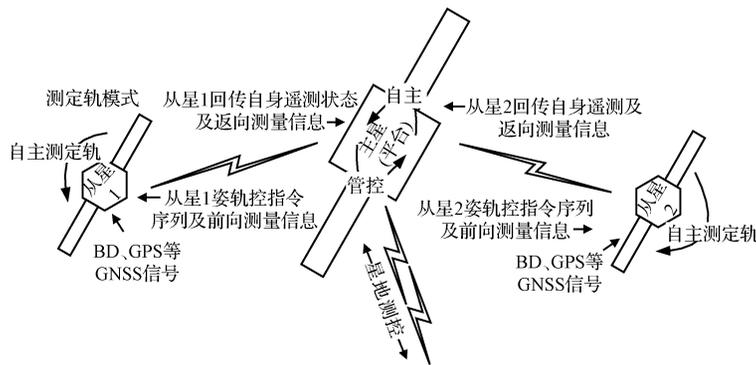


图 2 星群系统工作模式图 2

2.1 主星及从星星间测控链路设计

传统 GEO 卫星系统的测控方式多为统一载波测控体制,如 UCB 或 USB 体制^[4-5],其主要采用频率隔离的方式完成卫星测控信号的鉴别,星上某一特定测控通道仅可完成对应单一频点的测控任务,其组成简图^[6-7]如图 3 所示。

若应用上述设计完成网络体系中主星对多个从星的实时测控,则主星除固有的星地测控通道外,还须配置对应数量且不同频率的星间测控通道,此法在设计上仅为简单功能性叠加,系统重复建设率高、频率管理复杂,总重量

大,且星群系统可配置性差,极大增加了主星系统的负担,不符合当前统一化、小型化设计理念。

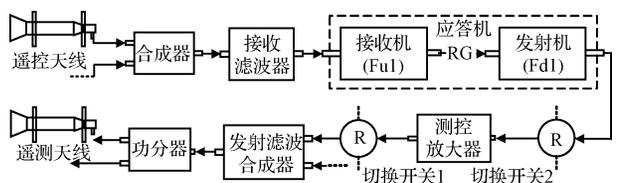


图 3 传统 GEO 卫星测控系统组成

若主星和从星的星间测控采用同频率(即主星接收与所有从星发送采用相同频率、主星发送与所有从星接收采用相同频率)码分多址的测控设计,则可实现主星仅通过一套星间测控通道便可完成与多从星的实时星间测控任务(相对1主星和2从星最简模型的频分实现模式,可减少应答机和测控放大器各1台,实现了有源设备配置减少50%、功耗减少50%)。该设计主星测控包括星地测控和星间测控,具体设计如图4所示。

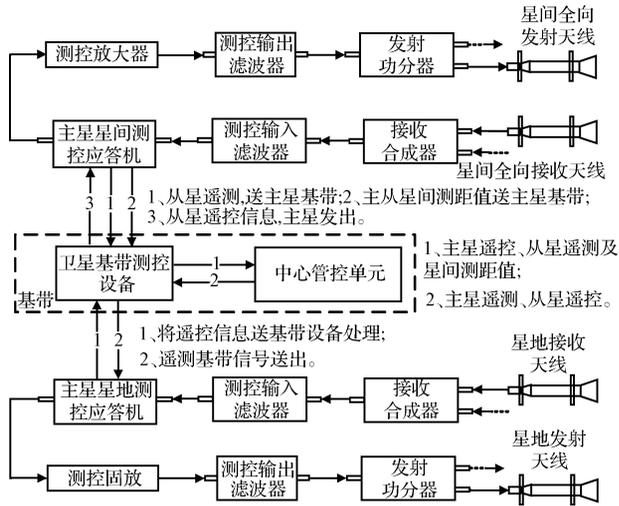


图4 主星星地、星间测控通道设计

主星星地测控可采用全向或者定向模式,星间测控采用全向方式;为避免频率干扰,星地测控频率与星间不同。主星星间测控链路在通道设计上与星地测控链路设计的区别如表1所示。

表1 主星星地测控与星间测控的区别

	主星星地测控链路	主星星间测控链路
测控体制	成熟的星地测控体制	星间载波抑制测控体制
测控应答机	统一载波应答机,无须解出测量信息,由地面系统解出	星间测控应答机,须解出星间测量值,送基带处理并使用
测控放大器	功率需求大,可选测控用固放或行放	功率需求小,可选用测控放大器
天线覆盖	全向或定向	全向

相应的,从星星间测控也采用码分多址测控体制设计,此处给出从星星间测控通道设计如图5所示。

2.2 星间测控频率设计

星间测控采用接收或者发送同频、码分多址的测控方式完成主星与从星的星间测控通信任务。主星星间发射频率(F_{ms})与从星星间接收频率(F_{sr})同频,主星星间接收频率(F_{mr})与从星星间发射频率(F_{s})同频。即:

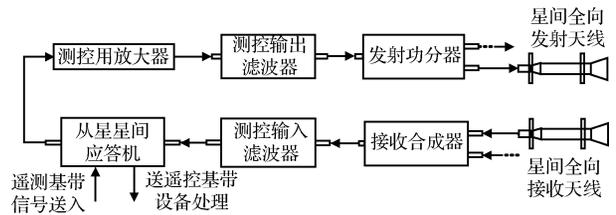


图5 从星星间测控通道设计

$$\text{前向测控频率: } F_{ms} = F_{sr} \quad (1)$$

$$\text{反向测控频率: } F_{mr} = F_{ss} \quad (2)$$

按照《空间业务无线电频率》^[8](Q/W815A-2009)要求,星群星间测控涉及的频率需求属该标准中6.2节“空间研究业务”范畴,可选用2 025 MHz~2 110 MHz作为前向测控频率,选用2 200 MHz~2 290 MHz作为反向测控频率。

2.3 星间测控用码组设计

主星与网络中任一从星的遥测、遥控或者测量均设计两组(多组)码组,主星的码组状态可根据实际需求通过遥控上注的方式完成在轨动态配置,从星的码组状态为设计既定状态,在轨不可更改。

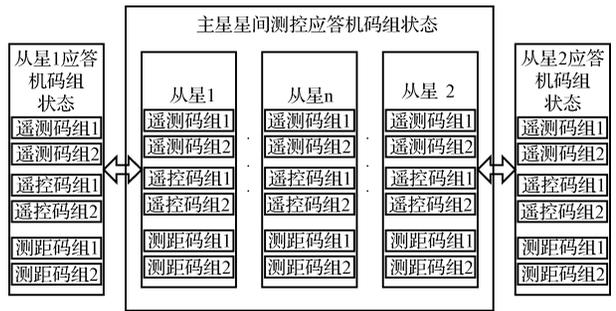


图6 主星与从星测控用码组设计状态

2.4 星间测距测速原理设计

区别于星地测控系统对于测距和测速信息的处理方式,在本星群网络体系中,主星星间应答机须具备对主从星间距离值及相对径向速度值的测量和解出功能,并将测距值、测速值送与主星基带处理设备服务于星群自主管控。

以非相干测控体制^[9-11]为例,对网络体系的星间测距和测速设计进行阐明,如图7所示。

注:对图7中涉及的标识说明如下:

1)在星间测距过程中,定义主星向从星发送测量帧的方向为前向(forthcome,简称为Fcm),从星向主星发送测量帧的方向为反向(return,简称为Rtn);

2)测量伪码速率为 R_{pn} , Φ_{Fcm} 及 Φ_{Rtn} 为主星在前向发送时和反向接收时记录的伪码相位信息, $\Delta\Phi$ 为伪码相位总偏移^[12], $\Delta\Phi = \Phi_{Rtn} - \Phi_{Fcm}$;

3) $T_{ssat-lock}$ 为从星锁定主星测量帧头的时刻(从星时间), T_{ssat} 为从星按照自身工作频率对主星测量帧进行

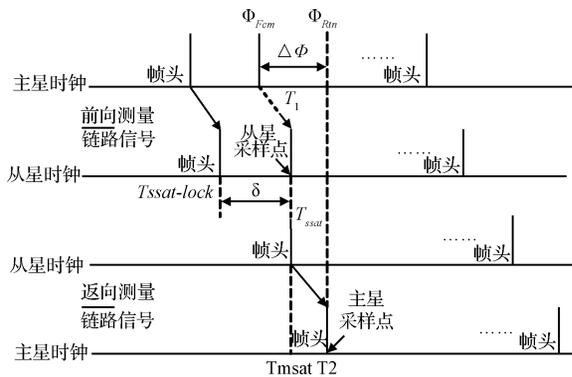


图7 主从星间非相干测量原理

当前伪码相位采样的时刻(从星时间), δ 为此两时刻间的信号处理时间差;

4) T_{ssat} 为从星采样点时刻对应的主星星上时间;

5) T_1 为主星对 ΦF_{cm} 采样的时刻(主星时间), T_2 为主星对 ΦR_{tn} 采样的时刻(主星时间)。

结合图7,对星群中主从星间的测距原理说明如下:

1)主星在某一时刻(主星时间)向从星发送前向测量信号;

2)从星于 $T_{ssat-lock}$ 时刻(从星时间)完成对主星前向测量信号的锁定,经 δ 时间后完成前向测量信号的解扩、解调及帧同步;

3)从星以自身工作频率于采样点时刻 T_{ssat} (从星时间)完成对前向测量帧当前伪码信息(ΦF_{cm})的采样,并将其封装于反向测量帧中发送主星;

4)主星接收反向测量信号并对其解扩、解调及帧同步,并利用反向测量帧同步完成对此时前向测量帧伪码信息(ΦR_{tn})的采样;

5)设定伪码速率为 R_{pn} ,则由主星解出的主从星间距离为:

$$L = (\Phi R_{tn} - \Phi F_{cm}) \cdot c / 2R_{pn} \quad (3)$$

注:设定在前向和反向测量过程中星间距离相同;式3中 c 为光速。

结合上述星间测距工作流程,给出星间测速原理如下:

1)当从星完成对前向测量帧伪码信息采样时,同时完成对前向测量信号伪多普勒值 $f'd_2$ 的采样,并将其一并封装于反向测量帧中发送于主星;

2)主星在完成对反向测量帧信息提取的过程中,同时完成对其反向伪多普勒值 $f'd_1$ 的采样;

3)对前向和反向伪多普勒值(频率差)进行多次测量并综合计算,即可得到主星对应从星在积分时间段内的平均速度测量值。则主星解出的测速值如下:

$$v = [(f_{Fcm} \cdot f_{Rtn} - (f_{Rtn} + f'_{d2}) \cdot (f_{Fcm} + f'_{d1})) / (f_{Fcm} \cdot f_{Rtn} + (f_{Rtn} + f'_{d2}) \cdot (f_{Fcm} + f'_{d1}))] \cdot c \quad (4)$$

式中: c 为光速; f_{Fcm} 为前向标称频率,等于(1)中频率,即

$f_{Fcm} = Fms = Fsr$; f_{Rtn} 为反向标称频率,等于(2)中频率,即 $f_{Rtn} = Fmr = Fss$; f'_{d2} 前向伪多普勒测量值; f'_{d1} 反向伪多普勒测量值。

2.5 星间测距测速信息处理

如图8所示为星群系统星间测控、星地测控的信息流图,阐明了星间测距及测速信息的处理流程和机制;为了避免信息处理冲突,明确了星地测控优先级高于星间测控。

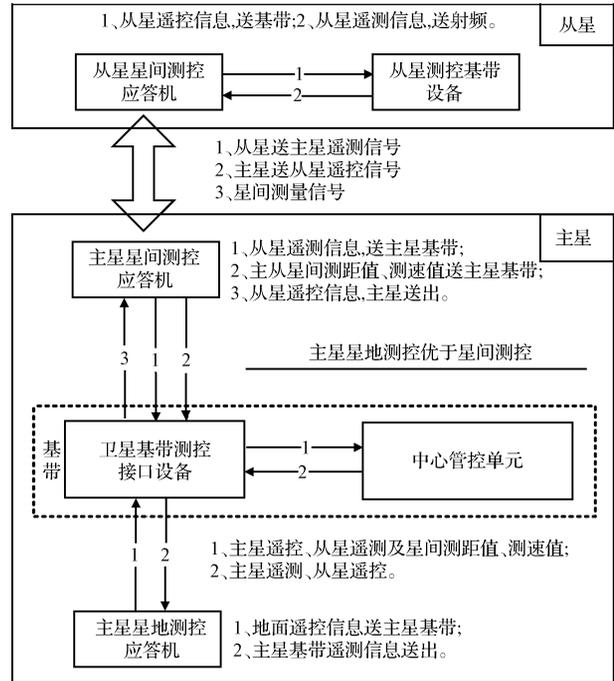


图8 网络体系星间、星地测控信息流

2.6 网络体系动态重构

从星离轨补入重构:若星群中某一从星的在轨寿命已到达或效能已发挥完毕,则地面测控系统将发令经主星使该从星离轨;此时基于用户新增需求,在星群中补充对应载荷功能的新从星,从而完成星群系统的重构。具体实施方案为:地面测控系统通过既定发令流程,首先完成主星原有离轨从星码组的删除任务,之后上注新入从星的码组信息至主星星间测控应答机、完成主星星务基带对新从星的自主测控设置^[13-15],之后完成主星与新入从星的收、发双捕工作,此后通过判读主星的星间测控通信状态遥测确认其对新入从星遥测信息的接收状态,再经主星发令、通过从星遥测确认从星对指令的响应状态。此时若上述任务均已达成,则星群体系从星节点更新任务顺利完成,系统重构成功。

从星离轨重构:对于特定从星离轨后的重构,在地面测控系统通过既定发令流程使得特定从星离轨后,再删除主星星间测控应答机中对应从星的遥测、遥控及测量码组信息,进而停止接收该从星遥测信号,停止主星星务基带发送或转发该从星的遥控指令,进而实现系统重构。

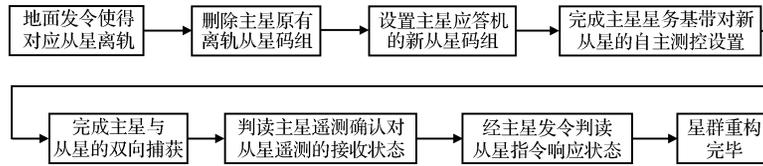


图9 从星离轨补入重构流程



图10 从星离轨重构流程

从星新增重构:对于新增特定从星的重构,首先须设置对应新增从星在主星星间测控应答机中的码组信息,之后设置主星星务基带设备与该码组建立关联并开启自主测控任务,之后完成主星与新入从星的收、发双捕工作,此后通过判读主星的星间测控通信状态遥测确认其对新入从星遥测信息的接收状态,再经主星发令、通过从星遥测确认从星对指令的响应状态。上述操作完成后,便完成了新增从星的网络重构,星群系统重构成功。

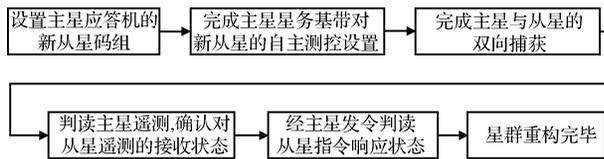


图11 从星新增重构流程

2.7 星间测控效能验证分析

通常,GEO轨道星群系统星间夹角应 $\leq 0.1^\circ$ (即星间距离 ≤ 73.3 km,计算如式(5)所示),考虑星间安全间距要求,本文所涉及 GEO 星群系统主从星间夹角 θ 应满足 $0.05^\circ \leq \theta \leq 0.1^\circ$ 的要求。

$$L = 2 \cdot 42\,000 \cdot \sin(\theta/2) \quad (5)$$

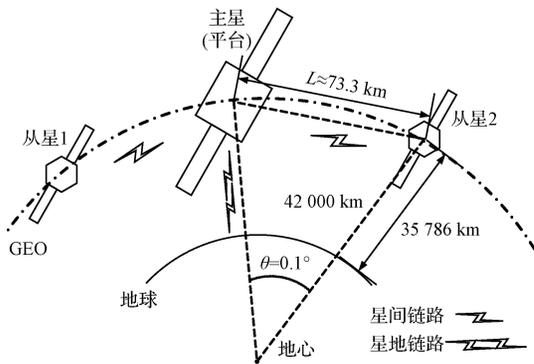


图12 主从式 GEO 星群系统最简模型(0.1°)

在上述模型中,主星通过一套星间测控通道便可完成与从星1及从星2的星间测控任务,较以往频分实现模式有源设备配置减少50%、功耗减少近50%、频率成分少、便于管理,通过简明的配置设计达到了更优的总体效能。

上述模型中主星和从星采用的全向星间测控天线采

用统一设计,具体覆盖域指标如表2所示。在主星对任一从星(或任一从星对主星)的水平方向波束宽度达 170° ,垂直方向达 160° ,边缘增益 ≥ 1 dBi,可全面保证当从星姿态发生超调时星间测控链路的可靠及可用性。

表2 星间测控天线覆盖域

主星(或从星)星间测控天线覆盖域			
水平方向		垂直方向	
波束宽度	波束范围	波束宽度	波束范围
170°	$\pm 85^\circ$	160°	$\pm 80^\circ$

上述模型中,主从星间的遥测、遥控及测量均设置双码(或多码组)备份,当默认码组被截获时可切换备用码组完成测控任务,将在轨星间测控码组的安全性提升50%以上。

按上述模型进行星间测控链路余量预算^[16]进而完成对系统工程化效能的摸底,如表3~5所示。

表3 星间链路预算条件设定

数据输入	单位	系统在轨
星间链路前向频率	MHz	2 030
星间链路返向频率	MHz	2 210
主星与从星间距离	km	73.3

表4 前向星间链路余量及环境分析

数据输入	单位	系统在轨
主星 EIRP	dBW	1
主星天线指向损耗	dB	-0.02
主星前向极化损耗	dB	-0.5
自由空间损耗	dB	-135.89
大气损耗	dB	0
输入功率通量密度	dBW/m ²	-108.81
从星接收天线增益	dBi	1
从星接收通道插损	dB	-3.8
从星接收机入口电平	dBmW	-108.21
设定从星星间应答机捕获门限-115 dBm(接收机输入端),故目前功率余量为6.79 dB,满足要求。		
从星捕获余量	dB	7.39
前向信息恢复余量	dB	11.95

表5 反向星间链路余量及环境分析

数据输入	单位	系统在轨
从星 EIRP	dBW	1
从星天线指向损耗	dB	-0.02
从星反向极化损耗	dB	-0.5
自由空间损耗	dB	-136.63
大气损耗	dB	0
输入功率通量密度	dBW/m ²	-108.81
主星接收天线增益	dB	1
主星接收通道插损	dB	-3.5
主星接收机入口电平	dBmW	-108.65
设定主星星间应答机捕获门限 -115 dBm(接收机输入端),故目前功率余量为 6.35 dB,满足要求。		
主星捕获余量	dB	7.53
反向信息恢复余量	dB	11.66

结合上述3个表可以得知,主从星星间测控前向及反向链路功率余量、捕获余量和信息恢复余量均大于3 dB,可以满足实际工程化要求。

3 结论

本文设计的主从式 GEO 星群星间测控链路采用接收或发送同频码分多址的测控模式,具有链路设计简明齐整、设备配置优(无须配置捕跟系统)、总重量小、频率管理便捷等特点;系统支持从星的动态离轨和接入,很好的满足了用户对星群网络的更新和重构需求;采用全向星间测控天线,显著提高了星间测控链路的可用性和可靠性,遥测、遥控及测量均设置双码备份,大幅提升了星间测控的安全性,该方案设计可全面满足地球同步轨道主从式星群星间测控的各项需求。

参考文献

[1] 李化营,李轩,刘焱.基于卫星中继的多用户“分时复用”策略研究[J].电子测量技术,2015,38(4):14-18.
 [2] 陈建云,吴光耀,冯旭哲,等.卫星星座星间通信链路拓扑分析[J].仪器仪表学报,2014,35(增刊2):101-105.

作者简介

陈亮亮,1985年出生,工学硕士,工程师,主要研究方向为卫星测控系统和卫星星间链路系统。
 E-mail:chenliang850919@sina.com

[3] 王景泉.美国调整军事航天器的发展策略[J].航天器工程,2014,23(3):98-104.
 [4] 陈宜元,殷礼明.卫星无线电测控技术(下)[M].北京:宇航出版社,2007:286-301.
 [5] 郭攀.微小型C频段测控应答机设计与实现[D].杭州:浙江大学,2015:9-16.
 [6] 韩魁选.微波统一测控系统设计导论[M].北京:国防工业出版社,1984.
 [7] 王烁,郑鹏,吴宇翔,等.基于多路开关的遥测故障分析与验证[J].国外电子测量技术,2013,32(2):13-16.
 [8] 裴斗生,李健十,李辉,等.空间业务无线电频率(中国空间技术研究院院标,Q/W 815A-2009)[S].北京:中国空间技术研究院,2009.
 [9] 冯文全,刘曦,李春升.扩频测控体制信号捕获方法分析[J].北京航空航天大学学报,2013,39(9):1150-1156.
 [10] 张玉虎.非相干扩频测控体制的多址干扰效应研究[J].上海航天,2014,31(5):17-19.
 [11] GRELLIER T, GHION A, DANTEPAL J, et al. Compass signal structure and first measurements[C]. ION 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, 2007:25-28.
 [12] 黄波,胡修林,王新模.伪码辅助载波星间自主测距技术[J].宇航学报,2010,31(6):1618-1624.
 [13] 杨磊,刘鹏飞,赵勇,等.微纳卫星星载设备管理方法[J].仪器仪表学报,2014,35(增刊2):141-145.
 [14] 于功敬,熊毅,房红征.健康管理技术综述及卫星应用设想[J].电子测量与仪器学报,2014,28(3):227-231.
 [15] 李建增,路广勋,王东锋.发射场地面设施健康状态管理研究综述[J].中国测试,2013(6):24-27.
 [16] 刘嘉兴.飞行器测控与信息传输技术[M].北京:国防工业出版社,2011.