“鹊桥二号”中继转发时延地面模拟测试方法

王秋平[1,2]，徐 进[2]，余晓川[2]，孙 骥[3]

（1. 西北工业大学 电子信息学院，西安 710072；2. 西安空间无线电技术研究所，西安 710000；3. 航天东方红卫星有限公司，北京 100094）

摘 要：针对中继星再生转发时延在地面难以直接模拟在轨真实链路的问题，提出一种针对“鹊桥二号”中继转发时延的地面测试方法，通过构建等效星地传输通道，实现对再生转发时延的精确测量，并在测试系统引入闭环校准环节，以消除设备和传输路径时延的影响。该方法有效解决了现有方法分段测试误差较大、高精度时间同步要求苛刻、测试设备繁多、真实环境模拟难度大等问题。经地面测试与在轨实际验证，该方法操作简单，时延测试精度高，为“鹊桥二号”的通信系统性能评估和优化提供了有力支持，同时可为其它卫星遥控指令传输时延的测量提供参考。

关键词："鹊桥二号"；中继转发；时延测试；地面模拟

中图分类号：TN925 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9287(2026)02-0117-10

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2026.20250092

引用格式：王秋平，徐进，余晓川，等. “鹊桥二号”中继转发时延地面模拟测试方法[J]. 深空探测学报（中英文），2026，13（2）：117-126.

Reference format: WANG Q P，XU J，YU X C，et al. Ground simulation test method for relay time delay of Queqiao-2[J]. Journal of Deep Space Exploration，2026，13（2）：117-126.

引 言

月球背面及极区始终背对地球，探测器无法直接与地面通信[1-3]。“鹊桥二号”是探月四期工程任务的中继通信卫星，其通过建立稳定的中继通信链路，为月球背面及极区探测器提供实时数据中继传输服务，确保探测器与地面通信连续不间断[4-6]。

月球背面探测器需通过“鹊桥二号”与地面实时交换指令、遥测和数据，中继转发时延直接影响着地面控制中心对探测器的实时监控和应急响应能力[7-8]。为能准确掌握地面发送指令经中继星转发至月面探测器，以及月面探测器接收指令并响应返回遥测经中继星转发至地面的时间周期，进一步及时地明确探测器目前的活动状态及运动情况，“鹊桥二号”中继星对中继转发时间进行了严格要求和控制，对该转发时延的测试场景和测试严谨性一并提出了更高的要求。“鹊桥二号”中继转发时延优化直接关系到实时控制精度、多任务协同的能力，为后续深空探测提出了高标准的通信范式及时延准确度要求[9]。

中继星在轨运行后，受限于空间环境不可完全复现、在轨测试弧段有限，以及星上设备状态无法直接测量等因素，难以全面评估再生转发时延的准确性和稳定性。相比之下，地面测试具有可重复、可控制、可覆盖全工况的优势，可在发射前充分暴露潜在的问题，为系统性能评估和优化提供关键数据支撑。因此，开展中继转发时延的地面测试方法研究具有重要的工程意义[10]。

时延测量是进行时延特性分析研究的重要技术手段。一是根据系统时延特性确定系统产生信号传输延迟时间的大小，以便确定系统的电长度。同时根据时延特性可了解系统产生的信号线性失真情况，并寻求减小信号线性失真的方法。中继转发时延是评估通信质量的重要因素之一，准确测量和评估时延对于系统性能优化具有重要的意义[8,11]。然而，目前中继星时延测试面临以下几个难题。

1） 分段测量引入误差大：目前常用的时延测量仪器包括网络分析仪、矢量信号分析仪、时间间隔测量仪等[12]。其中采用相位计测量时延的方法简单且精度较高，合成不确定度可达到0.01 ns，但测试速度慢，要经过一系列的计算才能得到结果；采用矢量信号分析仪的测量方法可对含有数字调制的信号进行时延测量，该仪器是近年来随着数字电路增多新发展起来的测试设备，目前准确度还不够高[13]。然而，这些仪器均只能测量部分单机的处理时延，而整个链路涉及的单机数量众多，不能拆分测试。经过拆分测试单

收稿日期：2025-08-05 修回日期：2026-03-12

基金项目：西北工业大学博士论文创新基金（CX2025077）

机的时延信息进行计算总和，并不完全正确，因为测试每台单机的测量基准不一样，同时会携带人工误差，从而导致整个链路合成的时延准确度下降，测量精度难以评估。因此，简单采用时延仪器分段测量无法满足要求。

2） 高精度时间同步要求苛刻：现有地面测试方法对星上设备和地面设备之间的时间同步精度要求较高，需采用时统设备周期性同步，以确保时间基准一致[14]。这也导致测试设备繁多，且测试精度受时间同步精度影响大，对时间同步精度的要求极为严格[15]。

3） 再生转发信号测试能力不足：“鹊桥二号”中继链路设计为再生转发体制，即先将接收到的信号进行前置放大，经下变频变换为中频信号，并解调译码，对得到的基带信号进行处理后，送入大容量固态存储单元存储，或经编码、调制、放大后发射[4]。然而，中继再生转发体制由于要对自身数据处理从而引起一定的时延，这一部分时延会随着处理信号的编码方式、码速率、调制方式等因素各异，现有的测试方法在应对再生转发体制时存在诸多不足[16]，目前国内外尚无基于再生转发体制的时延测试方法。无法满足“鹊桥二号”的高精度测试需求，亟需开展有效的中继时延测试方法。

4） 真实环境模拟难度大：传统方法无法完全模拟深空环境的高动态时延变化，地面测试方法的设计必须准确模拟实际工作环境，解决可能存在的难题。

为解决上述时延测试难题，本文提出一种“鹊桥二号”再生中继转发时延地面模拟测试方法，具备以下优势：①全链路测量，避免分段测量基准不一致导致的测试误差，且不受再生转发体制的影响；②构造时间闭环测试框架，使全链路时间基准均为同一台设备，避免高精度时间同步引入更多的测试设备，简化测试方案的同时可通过自环校准消除设备内部时延；③采用地面专用检查测试设备内嵌高精度时延模拟注入单元及卫星工具软件（Satellite Tool Kit，STK）仿真轨道状态，测试环境能够真实模拟实际在轨运动场景。该方法通过构建等效的各链路传输通道，实现了对再生转发时延的精确测量，解决了在轨测试周期长、成本高、难以全面覆盖的难题，并为“鹊桥二号”中继星时延指标的验证提供了可靠依据。

1 “鹊桥二号”中继通信

“鹊桥二号”中继转发数据的组成框图如图1所示，中继转发包含对月前向链路、对月返向链路和测控中继链路。其中，对月前向链路表示为探测器指令由地面测控站发出，通过“鹊桥二号”中继星测控分系统接收，经星务分系统及中继通信分系统对月发送链路至月面探测器；对月返向链路表示为探测器发出遥测信息及数据，经“鹊桥二号”中继星中继通信分系统对月接收链路接收，并由中继通信分系统对地发送链路发送至地面接收站；当中继通信分系统对地发送链路无法正常工作时，中继星进入测控中继链路（即进入应急工作模式），该模式下探测器发出的遥测信息及数据将通过中继通信分系统的遥测信道传输至星务分系统，然后再通过测控分系统下传至地面。

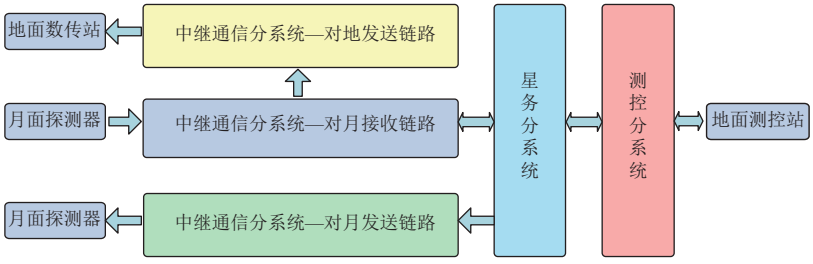


图 1 “鹊桥二号”中继转发组成框图

Fig. 1 Queqiao-2 relay communication system block diagram

本文所提到的测试时延包含前向链路信号转发时延、返向链路信号转发时延及测控中继链路信号转发时延。其中前向转发时延定义为地面测控站发出信号第一帧到月面探测器接收到信号第一帧所需的时间；返向转发时延定义为月面探测器发出信号第一帧到地面数传接收站接收到信号第一帧所需的时间；测控中继转发链路时延定义为月面探测器发出信号第一帧到地面测控站接收到信号第一帧所需的时间。

消耗转发时延较多的是中继通信分系统，原则上地面测试的时候可采用矢量网络测试仪，但由于“鹊桥二号”中继转发内部采用信号再生转发机制，包含信号的接收再处理过程，该过程处理时间随信号传输码速率、带宽变化而不一致，并不是确定值；信号处理单元里含有数字解调处理，不宜使用仪器直接测量。这

两种时延的连接点或分界处可能在某个单元中某块器件的内部，不便分离也不便测试。即使能够分开测量，分段测量又引入了更多不确定度的影响，累计误差很大，降低了测量准确度。为满足工程需求，采用闭环测量构成有线闭环回路，测出总时延值后扣除自闭环校正时延，获得各工作链路的时延值。

2　中继转发时延地面测试方法

“鹊桥二号”中继转发时延地面测试参试设备：中继星测控分系统、星务分系统、中继通信分系统、地面测控站收发模拟设备、月面探测器收发模拟设备、地面数传站模拟设备，各设备功能说明如表1所示。

由于无线标定中需使用无线通信链路传送信号，测量过程中的不可控因素较多，信号干扰和测量设备时延变化等因素都将对标定精度产生较大的影响。为提高标定精度，所提测试方案采用有线射频连接，进行数据通信。其地面测试模拟设备如图2所示，所测整体时延信息包含电缆传输时延、“鹊桥二号”中继处理转发时延、探测器接收处理时延等。测试方法采用时间标记比对法，地面模拟设备配备高精度时延模拟注入单元，并在发射端记录高精度时间戳信息，在接收端再次记录接收时间戳信息，两次时间的差值，即为传输链路总时延。

表 1　地面测试设备

Table 1　Ground test equipment

设备名称	功能
卫星地面测控站模拟设备	模拟测控站功能，生成符合CCSDS标准的测控帧结构，具备精确的时间标记能力
卫星地面数传站模拟设备	模拟数传站功能，具备S/Ka频段数据解调能力，接收符合CCSDS标准的数传帧数据，具备精确的时间戳标记能力
探测器模拟设备	模拟月球轨道或月面探测器，具备与“鹊桥二号”中继星通信的接口和能力，能生成相应的测试信号，具备精确的时间戳标记能力
高精度时延模拟注入单元	集成在卫星测控站/数传站模拟设备和探测器模拟设备内，兼具测试场景搭建功能，包括模拟探测器月面位置和运动轨迹，并据此精确、可编程地注入链路时延信息 可变范围：能覆盖地月距离变化导致的理论光速范围，并可能包含额外的固定处理时延 动态调整：模拟卫星运动导致的时延连续变化，包括多普勒效应导致的微小变化，以及轨道位置变化导致的大范围变化

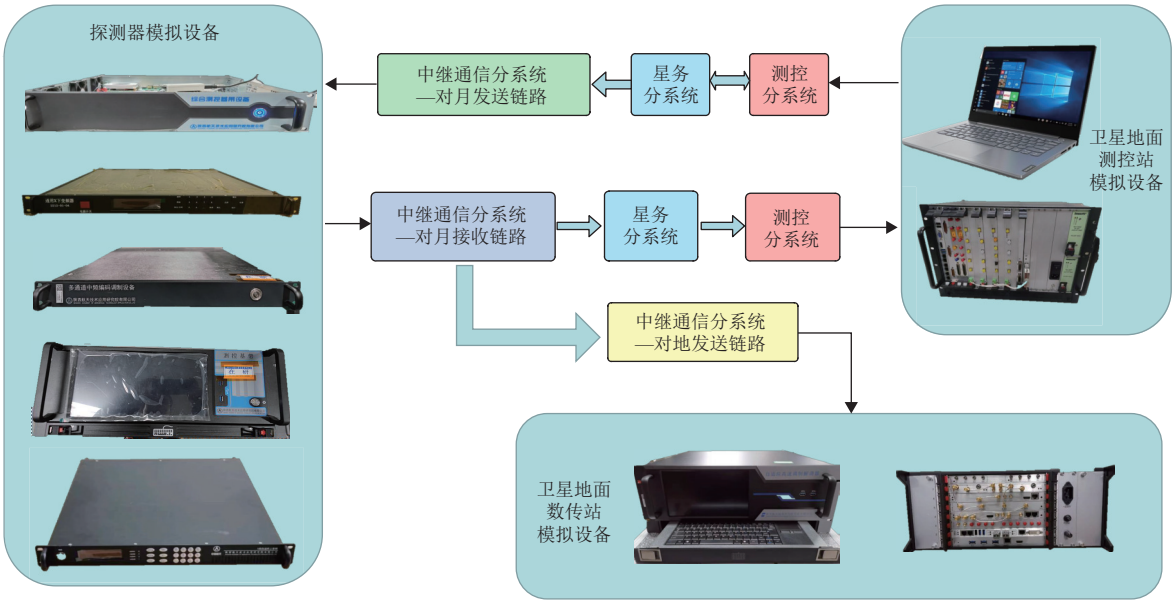


图 2　地面测试射频连接框图

Fig. 2　Ground test RF link block diagram

为模拟在轨真实状态，利用“时间换空间”的方法，轨道状态采用模拟设备内嵌的STK进行仿真，实时模拟“鹊桥二号”和月面探测器在环月轨道的运动情况与位置信息，包括模拟“鹊桥二号”中继星平台地理位置、运动轨迹，并将距离信息转换为传播时延信息。为简化系统测试，地面测试按照各链路进行时延测试。

2.1　前向链路时延测试

卫星地面测控站模拟设备将探测器需要的指令，经射频电缆注入“鹊桥二号”中继星，并由中继星转发给月面探测器模拟设备。该过程确保各个设备从信号接收、处理到转发等过程均在真实环境下运行，模拟的场景和实际在轨运动场景保持一致。

前向链路时延地面测试原理框图如图3所示，中继

通信分系统探测器模拟设备将发送时刻的时间信息传输给指令信号帧，并通过串口线发送给地面测控站模拟设备。地面测控站模拟设备对接收到的指令信号进行组帧处理后，发送至“鹊桥二号”测控分系统。指令信号随后经由星务分系统和对月发送链路发送至探测器模拟设备，探测器模拟设备将接收信号的时刻输出到接收的信号帧。这样，同一信号帧中便包含了发送时刻和接收时刻的时间码，通过计算指令信号帧内记录的接收时间与发送时间的差值，便可获得整个经中继星前向链路的传输时间$T_{\text{前-total}}$。

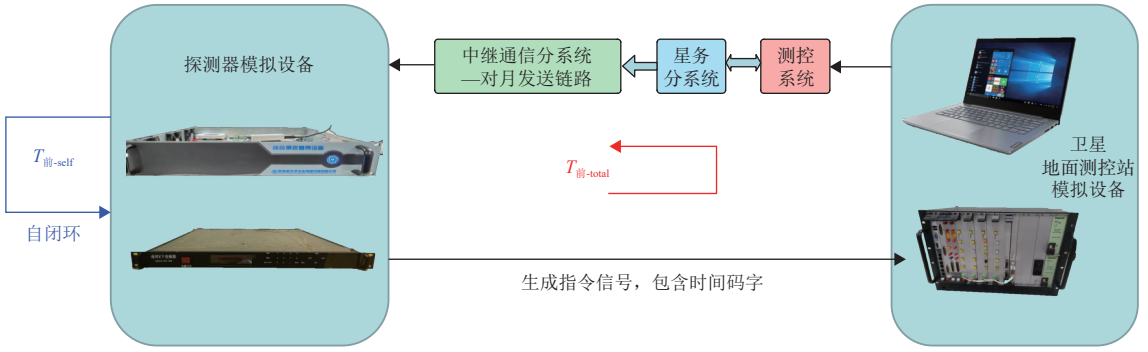


图 3 前向链路时延测试原理框图

Fig. 3 Functional block diagram of forward link time delay test

该地面测试链路由月面探测器模拟设备发出，经“鹊桥二号”中继星中继转发，最后再次回到月面探测器模拟设备，形成闭环的大回路测试，收发时间约束在一个地面专检设备，而非多个不同的设备，从而避免了各个设备之间进行时间同步的要求，降低测试复杂度。

为提高测量结果的可信程度，降低结果的测量不确定性，要尽可能地修正系统误差引入的测量不确定度分量，排除发送设备发出和接收过程中产生的时延，采用的方法是在测量被测信号前，补充测试自闭环时延。校准框图见图3，将模拟探测器的发送设备发出数据送回到自己的信号接收口，同样的记录接收时延，此即为发送设备自闭环时间$T_{\text{前-self}}$。用整个闭环链路的时间减去自闭环时间，即获得整个前向链路的中继转发信号时延$T_{\text{前}} = T_{\text{前-total}} - T_{\text{前-self}}$。其中测试的步骤如表2所示。

表 2 “鹊桥二号”中继前向链路转发时延地面模拟测试方法

Table 2 Ground simulation test method for Queqiao-2 relay forward link forwarding latency

“鹊桥二号”中继前向链路转发时延地面模拟测试方法
1）建立有线中继链路：通过射频电缆连接“鹊桥二号”中继星和地面模拟设备，模拟实际通信链路
2）初始化设备：设置中继星工作状态，保证和探测器模拟设备双向通信
3）生成指令源包与空间场景模拟：探测器模拟设备生成探测器指令源包，同时模拟中继星及月面探测器在轨的位置及姿态信息，根据空间转换时间，基于空间几何关系动态计算射频链路传播时延
4）指令源包闭环传输：指令源包经地面测控站发出，经过“鹊桥二号”再次回到探测器模拟设备
5）接收时间记录：探测器模拟设备接收指令源包为接收时刻的时间信息
6）时延数据提取：探测器模拟器对指令源包解码，提取指令发出时间码$T_{\text{前-send}}$及指令接收时间码$T_{\text{前-recv}}$
7）计算总链路时延：通过计算指令接收时间码和发出时间码之差，得到整个中继转发前向链路的时延$T_{\text{前-total}} = T_{\text{前-recv}} - T_{\text{前-send}}$
8）自闭环校准测试：将探测器模拟设备发送端信号环回至自身接收端，同样的方法计算自闭换时延$T_{\text{前-self}}$
9）前向转发时延计算：总链路时延−闭环回路时延得到前向链路时延$T_{\text{前}} = T_{\text{前-total}} - T_{\text{前-self}}$

2.2 返向链路时延测试

返向链路时延地面模拟测试原理框图如图4所示，卫星地面数传站模拟设备将发送时刻的时间信息输入到遥测信号帧，并通过串口线发送给月面探测器模拟设备。探测器模拟设备对接收到的遥测信号进行组帧处理后，发送至“鹊桥二号”中继通信分系统。遥测信号随后经由对地发送链路发送至卫星地面数传站模拟设备，卫星地面数传站模拟设备将接收遥测信号的时刻的信号帧。这样，同一信号帧中便包含了发送时刻的时间和接收时刻的时间码，通过计算遥测信号帧内记录的接收时间与发送时间的差值，便可获得整个经中继星返向链路的传输时间$T_{\text{返-total}}$。

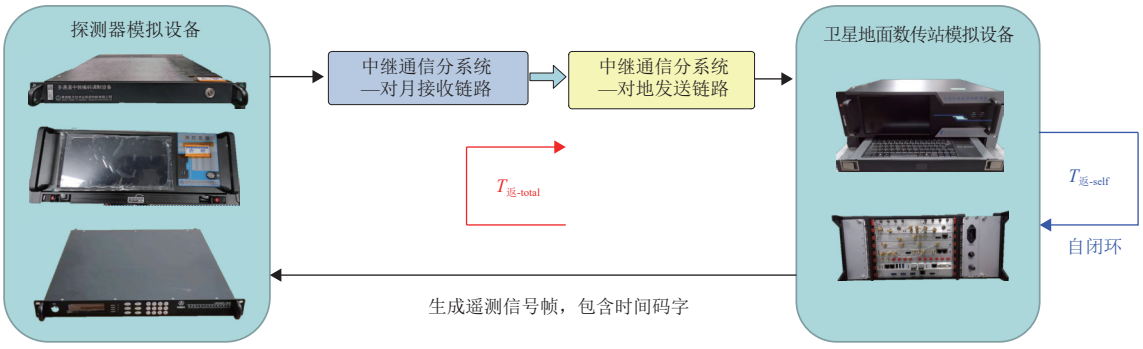


图 4　返向链路时延测试原理框图

Fig. 4　Functional block diagram of return link latency test

返向链路自闭环校准框图见图4，并记录自闭环时间$T_{返-self}$。用闭环链路的时间减去闭环链路时间，即获得整个返向链路的中继转发信号时延$T_{返}=T_{返-total}-T_{返-self}$。详细测试步骤总结如表3所示。

表 3　“鹊桥二号”中继返向链路转发时延地面模拟测试方法

Table 3　Ground simulation test method for Queqiao-2 relay return link forwarding latency

“鹊桥二号”中继返向链路转发时延地面模拟测试方法
1）建立有线中继链路：通过射频电缆连接“鹊桥二号”中继星和地面模拟设备，模拟实际通信链路
2）初始化设备：设置中继星状态，保证和探测器模拟设备双向通信
3）生成遥测源包与空间场景模拟：地面数传站模拟设备生成探测器遥测信号打包，同时模拟中继星及月面探测器在轨位置及姿态信息，根据空间转换时间，基于空间几何关系动态计算射频链路传播时延
4）遥测源包闭环传输：遥测源包经月面探测器模拟设备发出，经过“鹊桥二号”再次回到地面数传站模拟设备
5）接收时间记录：地面数传站模拟设备接收遥测源包并记录接收时刻的时间信息
6）时延数据提取：地面数传站模拟设备对遥测源包解码，提取指令发出时间码$T_{返-send}$及指令接收时间码$T_{返-recv}$
7）计算总链路时延：通过计算指令接收时间和发出时间之差，得到整个中继转发返向链路的时延
8）自闭环校准测试：将地面数传站模拟设备发送端信号环回至自身接收端，同样的方法计算自闭环时延$T_{返-self}$
9）返向转发时延计算：总链路时延−闭环回路时延得到返向链路时延$T_{返}=T_{返-total}-T_{返-self}$

2.3　测控中继链路时延测试

测控中继链路时延地面模拟测试原理框图如图5所示，卫星地面测控站模拟设备将发送时刻的时间信息输入到遥测信号帧，并通过串口线发送给月面探测器模拟设备。探测器模拟设备对接收到的遥测信号进行组帧处理后，发送至“鹊桥二号”中继通信分系统。遥测信号随后经由星务分系统和测控分系统发送至卫星地面测控站模拟设备。卫星地面测控站模拟设备将接收遥测信号的时刻输入信号帧。同一信号帧中便包含了发送时刻和接收时刻，通过计算遥测信号帧内记录的接收时间与发送时间的差值，便可获得整个经中继星测控中继链路的传输时间$T_{测控-total}$。

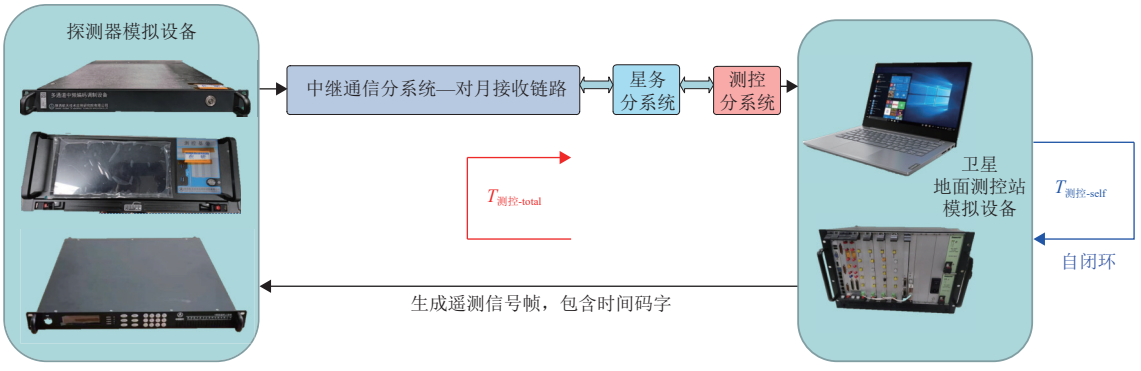


图 5　测控中继链路时延测试框图

Fig. 5　Functional block diagram of TT&C relay link latency test

自闭环校准框图见图5，并记录自闭环校准时间$T_{测控-self}$。用闭环链路的时间减去自闭环时间，即获得整个测控中继链路的中继转发信号时延$T_{测控}=T_{测控-total}-T_{测控-self}$。详细测试步骤总结如表4所示。

表 4 “鹊桥二号”测控中继链路转发时延地面模拟测试方法

Table 4 Ground simulation test method for Queqiao-2 TT&C relay link forwarding latency

“鹊桥二号”测控中继转发时延地面模拟测试方法
1）建立有线中继链路：通过射频电缆连接“鹊桥二号”中继星和地面模拟设备，模拟实际通信链路
2）初始化设备：设置中继星状态，保证和探测器模拟设备双向通信
3）生成遥测源包与空间场景模拟：地面测控站模拟设备生成探测器遥测信号打包，同时模拟中继星及月面探测器在轨的位置及姿态信息，根据空间转换时间，基于空间几何关系动态计算射频链路传播时延
4）遥测源包闭环传输：遥测源包经月面探测器模拟设备发出，经“鹊桥二号”再次回到地面测控站模拟设备
5）接收时间记录：地面测控站模拟设备接收遥测源包并记录接收时刻
6）时延数据提取：地面测控站模拟设备对遥测源包解码，提取指令发出时间码$T_{测控-send}$及指令接收时间码$T_{测控-recv}$
7）计算总链路时延：通过计算指令接收和发出时间差，得到整个测控中继链路的转发时延$T_{测控-total}=T_{测控-recv}-T_{测控-send}$
8）自闭环校准测试：将地面测控站模拟设备发送端信号环回至自身接收端，采用同样的方法计算自闭环时延$T_{测控-self}$
9）测控中继转发时延计算：总链路时延-闭环回路时延得到返向链路时延$T_{测控}=T_{测控-total}-T_{测控-self}$

3 地面测试方法效果验证

3.1 地面测试分析

对所提的方法在地面进行测试，得到各链路时延测试值如表5所示。

表 5 中继转发时延测试结果记录表

Table 5 Record of relay forwarding latency test results

	码速率/（bp·s^{-1}）	调制方式	时延测试值/ms	最大偏离/ms
前向链路	500	PCM/PM	829.5～834.2	2.35
	1 000	PCM/PM	427.8～432.2	2.20
返向链路	512	PM	10 072.9～10 076.5	1.80
	1 024	PM	5 434.6～5 437.8	1.60
	2 048	PM	2 729.5～2 733	1.75
	4 096	PM	1 275.2～1 278.2	1.50
	12.5 k	BPSK	1 183.9～1 187.6	1.85
	25 k	BPSK	833.5～836.8	1.65
	50 k	BPSK	623.5～626.6	1.55
	500 k	BPSK	376.2～378.6	1.20
	2.5 M	BPSK	271.8~274.2	1.20
	5 M	BPSK	259.1～260.4	0.65
测控中继链路	12.5 k	BPSK	1 223.5～1 227	1.75
	5 M	BPSK	289.2～290.6	0.70

从表5可以看出，本文所提的地面测试方法简单有效，针对“鹊桥二号”各链路均能测试链路时延信息，所测试时延结果均满足任务指标要求。该测试方法有效解决了“鹊桥二号”在地面开展转发时延测试的问题，节省了卫星试验成本，提高了效率。所提方法测试的时延信息，包含了中继星在处理信号过程中带来的时间损耗，中继星设置与实际在轨状态完全一致，所测时延最贴近实际消耗时间，其它时延测量仪器很难达到此量级的准确度。对各链路各个码速率展开时延测试，每个码速率下共测试1 000次，各个码速率下时延稳定度如图6～12所示，蓝色点为每次测试的时延值，红色虚线为1 000次测试的时延结果平均值。

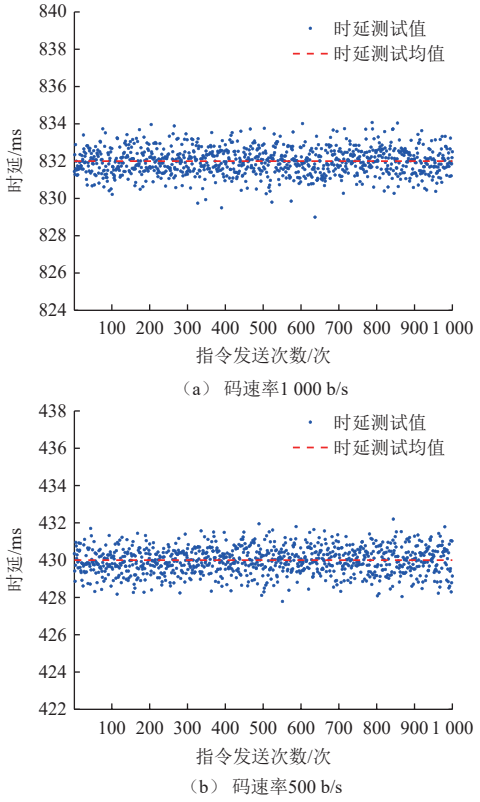
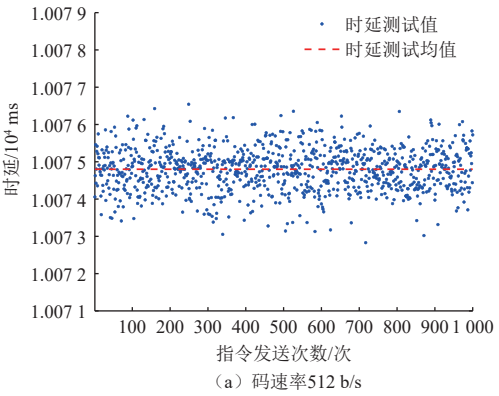


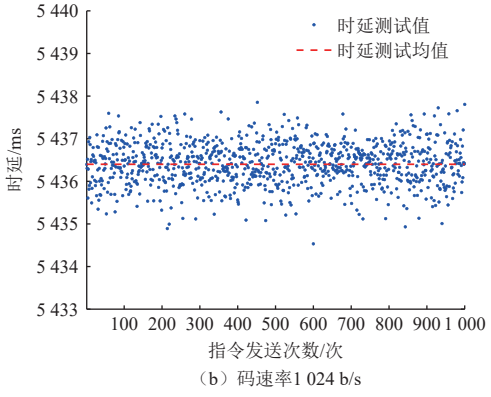
图 6 前向链路时延测试稳定度

Fig. 6 Stability of forward link latency test results

每次测试的结果均在平均值附近均匀分布。经过多次地面时延测试数据统计分析，所提地面测试方法测试的时延误差波动小、稳定度高，前向链路误差范围均匀分布在0～2.5 ms，返向链路误差范围最大分布在0～2 ms，中继测控链路误差范围最大分布在0～2 ms，地面测试方法有效，满足测试要求。



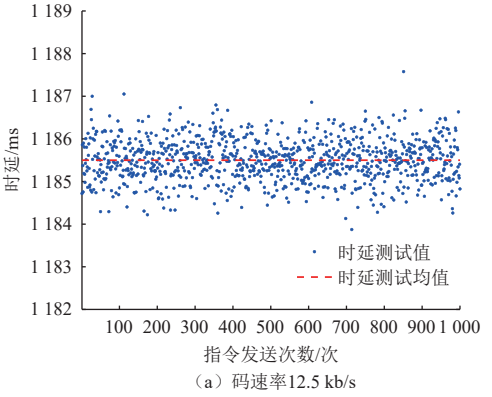
（a）码速率512 b/s



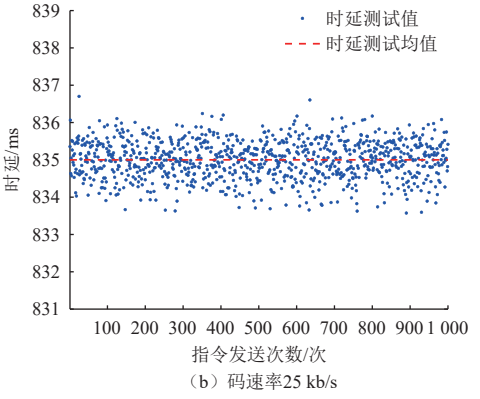
（b）码速率1 024 b/s

图 7　返向链路时延测试稳定度

Fig. 7　Stability of return link latency test results



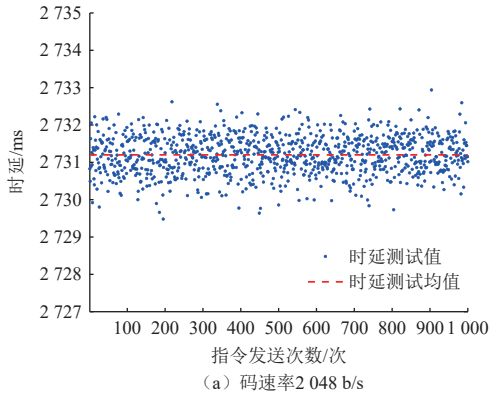
（a）码速率12.5 kb/s



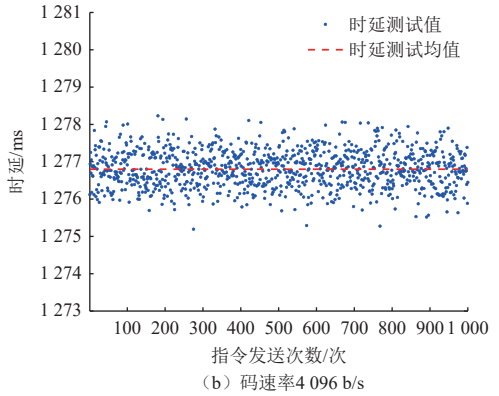
（b）码速率25 kb/s

图 9　返向链路时延测试稳定度

Fig. 9　Stability of return link latency test results



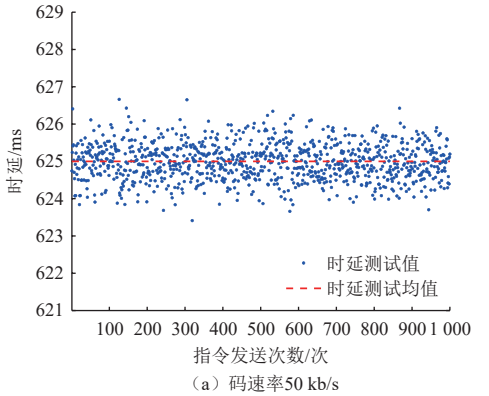
（a）码速率2 048 b/s



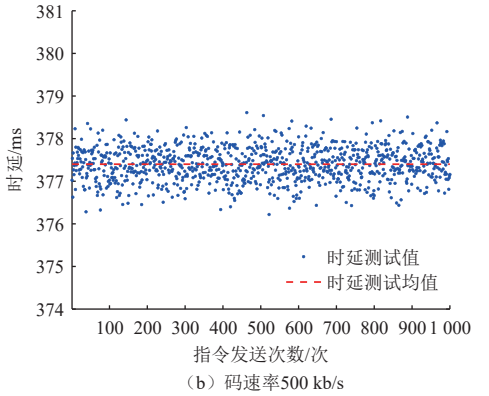
（b）码速率4 096 b/s

图 8　返向链路时延测试稳定度

Fig. 8　Stability of return link latency test results



（a）码速率50 kb/s



（b）码速率500 kb/s

图 10　返向链路时延测试稳定度

Fig. 10　Stability of return link latency test results

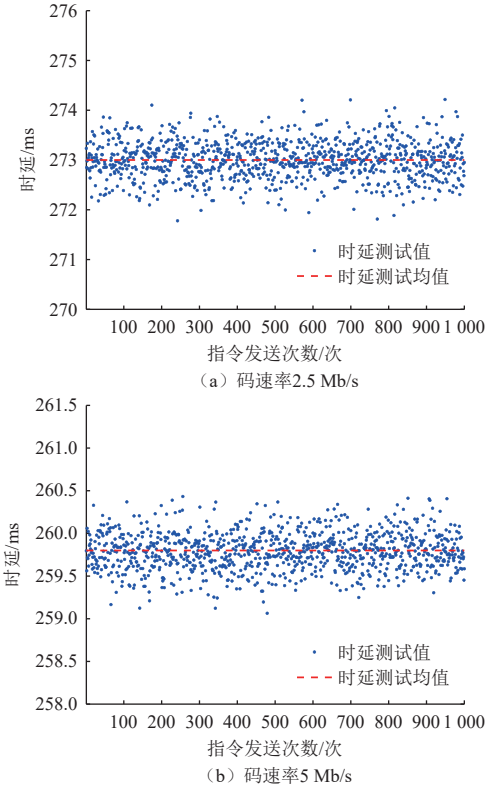


图 11 返向链路时延测试稳定度

Fig. 11 Stability of return link latency test results

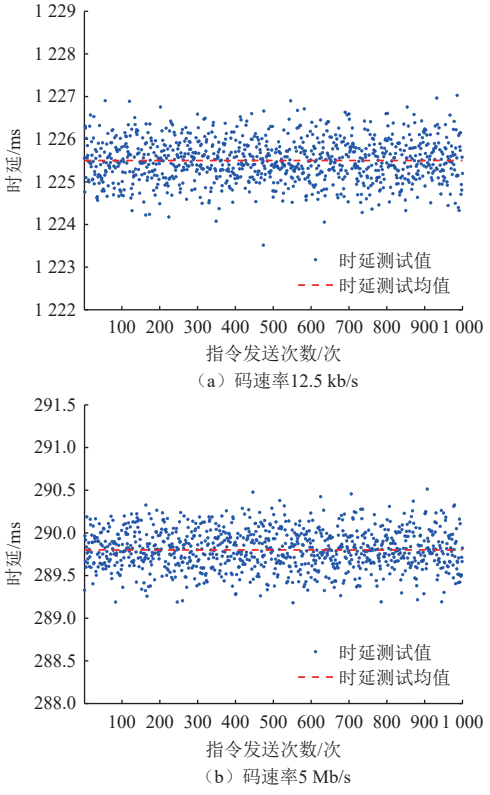


图 12 测控中继链路时延测试稳定度

Fig. 12 Stability of TT&C relay link latency test results

3.2 在轨测试验证

2024年5月12—15日，中继通信载荷与“嫦娥六号”完成在轨对通测试；2024年6月2—4日，中继通信载荷成功支持“嫦娥六号”降落在月背艾特肯（South Pole-Aitken，SPA）盆地，并全程保障月背的探测采样工作；2024年6月7日，中继通信载荷成功支持“嫦娥六号”月面分离、起飞、交会对接等工作。

根据任务期间多次对接测试的遥测数据统计，“鹊桥二号”在轨与“嫦娥六号”实际对接过程中，各链路（前向/返向/中继测控）的实际传输时延与地面测试结果的变化趋势高度一致，多次测量的最大误差未超过10 ms，且符合时延仿真分析结果。该地面时延测试系统测试方法可行，能够满足“鹊桥二号”中继星时延测试功能、性能需求。

4 结 论

本文对“鹊桥二号”前返向中继转发难点进行了分析，提出了“鹊桥二号”中继星转发时延地面实物测试的方法，并利用中继通信系统搭建测试场景开展了地面实物测试。经过与实际在轨工作时延对比，趋势一致。所提时延测试方法在评估“鹊桥二号”中继转发时延方面具有较高的准确性和可靠性，满足地面测试的需求，解决了现有中继再生转发时延测试方法测试误差较大、测试设备繁多、不能模拟深空中继卫星在轨实际场景等问题，为“鹊桥二号”中继通信载荷的性能优化和任务规划提供了有力的支持。

参考文献

[1] 叶培建，肖福根. 月球探测工程中的月球环境问题[J]. 航天器环境工程，2006(1)：1-11.
YE P J，XIAO F G. Issues about lunar environment in lunar exploration project[J]. Spacecraft Environment Engineering，2006(1)：1-11.

[2] 张立华，吴伟仁. 月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J]. 深空探测学报(中英文)，2018，5(6)：497-505，568.
ZHANF L H，WU W R. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5(6)：497-505，568.

[3] 李春来，严韦，刘建军，等. 中国月球探测促进月球与行星科学创新发展[J]. 中国科学：地球科学，2023，53(11)：2437-2456.
LI C L，YAN W，LIU J J，et al. Innovative developments in lunar and planetary science promoted by China’s lunar exploration[J]. Science China Earth Sciences，2023，53(11)：2437-2456.

[4] 徐进，王秋平，李耀，等. “鹊桥二号”中继通信载荷任务分析与设计[J]. 中国空间科学技术(中英文)，2025，45(3)：41-55.
XU J，WANG Q P，LI Y，et al. Mission analysis and design of Queqiao-2 communication relay payload[J]. Chinese Space Science and Technology，2025，45(3)：41-55 .

[5] 杨孟飞，张高，张伍，等. 嫦娥六号探测器月背无人自动采样返回任

务技术设计与实现[J]. 中国科学：技术科学，2025，55(7)：1133-1146.
YANG M F，ZHANG G，ZHANG W，et al. Technical design and implementation of the unmanned automatic sampling and return mission of Chang’e-6 probe on the far side of the Moon[J]. Science China Technological Sciences，2025，55(7)：1133-1146.

[6] 周文艳，高博宇，董烟姗，等. “鹊桥二号”轨道与嫦娥六号任务匹配性设计和飞行实践[J]. 中国空间科学技术(中英文)，2024，44(6)：16-22.
ZHOU W Y，GAO B Y，DONG T S，et al. Matching design and flight practice of Queqiao-2 orbit with Chang’e-6 mission[J]. Chinese Space Science and Technology，2024，44(6)：16-22.

[7] 段庆光，吴有杏，魏连魁. 链路时延差对测控设备跟踪及解调性能影响分析[J]. 无线电工程，2020，50(2)：143-147.
DUAN Q G，WU Y X，WEI L K. Analysis of the impact of link delay difference on tracking and demodulation performance of TT&C equipment[J]. Radio Engineering，2020，50(2)：143-147.

[8] 赵海然. 基于直播卫星的应急广播传输系统时延测试[J]. 广播电视信息，2024，31(7)：102-104.
ZHAO H R. Delay testing of emergency broadcast transmission system based on direct broadcast satellite[J]. Radio & Television Information，2024，31(7)：102-104.

[9] 闫亚飞. 深空探测领域2024年度进展综述[J]. 高科技与产业化，2025，31(1)：73-78.
YAN Y F. Review of the progress in deep space exploration in 2024[J]. High Technology and Industrialization，2025，31(1)：73-78.

[10] 邹恒光，惠腾飞，翟盛华，等. 卫星通信技术发展综述[J]. 空间电子技术，2025，22(S1)：1-19.
ZOU H G，HUI T F，ZHAI S H，et al. A comprehensive review of the development of satellite communication technology[J]. Space Electronic Technology，2025，22(S1)：1-19.

[11] 刘奇，吴鸿仁，马千里，等. 卫星遥控指令传输时延测试方法[J]. 航天器工程，2024，33(4)：144-147.
LIU Q，WU H R，MA Q L，et al. Test method for transmission delay of satellite remote control commands[J]. Spacecraft Engineering，2024，33(4)：144-147.

[12] 黄坤超. 时延测试方法研究[D]. 成都：电子科技大学，2007.
HUANG K C. Research on delay testing methods[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2007.

[13] 林升，彭浩，赵英伟，等. 矢量网络分析仪的原理及常见故障维修[J]. 电子工业专用设备，2023(2)：31-34.
LIN S，PENG H，ZHAO Y W，et al. Principle and common fault maintenance of vector network analyzer[J]. Special Equipment for the Electronics Industry，2023(2)：31-34.

[14] 李玮. 卫星导航系统时间测试评估方法研究[D]. 西安：中国科学院研究生院(国家授时中心)，2013.
LI W. Research on time test and evaluation methods for satellite navigation systems[D]. Xi’an：Graduate School of Chinese Academy of Sciences(National Time Service Center)，2013.

[15] 张心臻，敬军，范宇强，等. 基于北斗卫星导航系统的时间统一系统设计与实现[J]. 物联网技术，2025，15(12)：149-152.
ZHANG X Z，JING J，FAN Y Q，et al. Design and implementation of time unified system based on Beidou satellite navigation system[J]. Internet of Things Technology，2025，15(12)：149-152.

[16] 朱子行，赵尚弘，李勇军，等. 再生式通信卫星转发器的研究进展[J]. 电讯技术，2011，51(8)：147-153.
ZHU Z H，ZHAO S H，LI Y J，et al. Research progress of regenerative communication satellite transponders[J]. Telecommunication Engineering，2011，51(8)：147-153.

作者简介：

王秋平(1996－)，女，博士生，主要研究方向：卫星通信及数传系统设计。

通信地址：陕西省西安市西北工业大学电子信息学院(710129)

E-mail：qiupwang@mail.nwpu.edu.cn

徐进(1985－)，男，研究员，主要研究方向：卫星通信及数传系统设计。**本文通信作者**。

通信地址：陕西省西安市航天基地东长安街(710129)

E-mail：271566972@qq.com

Ground Simulation Test Method for Relay Time Delay of Queqiao-2

WANG Qiuping[1,2]，XU Jin[2]，YU Xiaochuan[2]，SUN Ji[3]

（1. School of Electronic Information，Northwestern Polytechnical University，Xi'an 710072，China；
2. Xi'an Institute of Space Radio Technology of Space Technology，Xi'an 710000，China；3. DFH Satellite Co.， Ltd.，Beijing 100094，China）

Abstract：Aiming at the problem that the regenerative forwarding delay of relay satellites is difficult to directly simulate the real on-orbit link on the ground，a ground test method for measuring the relay forwarding delay of Queqiao-2 was proposed. By constructing an equivalent satellite-ground transmission channel，the method enabled precise measurement of the regenerative forwarding delay. A closed-loop calibration procedure was incorporated into the test system to eliminate the effects of equipment delay and transmission path delay. This approach effectively overcomes limitations of existing methods，such as significant errors in segmented testing，stringent requirements for high-precision time synchronization，the need for extensive test equipment，and difficulties in simulating true environments.Verified through ground tests and on-orbit validation，the method is operationally simple and offers high delay measurement accuracy. It provides strong support for evaluating and optimizing the Queqiao-2 communication system and serves as a valuable reference for measuring telecommand transmission delays in other satellites，demonstrating significant engineering value.

Keywords：Queqiao-2；relay transmission；time delay measurement；ground-based simulation

Highlights：

- A ground-based test method for the relay forwarding delay of Queqiao-2 satellite is proposed，featuring simple operation and high test accuracy，providing strong support for the performance evaluation and optimization of Queqiao-2 communication system，and serving as a reference for the measurement of telecommand transmission delays in other satellites.
- The proposed test method effectively addresses the issues of existing segmented testing methods，such as significant measurement errors，stringent high-precision time synchronization requirements，the need for complex test equipment，and the difficulties in simulating realistic environments.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]