

嫦娥三号探测器月面通信系统设计与验证

孙泽洲^①, 韩宇^①, 黄晓峰^{①*}, 刘适^①, 李雄飞^②, 陈之纯^③, 张婷^①, 强晖萍^①

① 中国空间技术研究院总体部, 北京 100094;

② 空间电子信息信息技术研究院, 西安 710100;

③ 上海航天技术研究院, 上海 201109

* E-mail: huangxiaofeng@gmail.com

收稿日期: 2014-01-12; 接受日期: 2014-02-28

摘要 嫦娥三号是国内首个地外天体软着陆探测器和月面巡视探测器. 探测器在月表选定的区域成功实施软着陆, 着陆器开展就位探测, 巡视器开展巡视勘察, 巡视器的探测数据可以直接传回地面站或通过着陆器转发传回地面站. 为实现嫦娥三号探测器巡视器对着陆器的数据传输, 嫦娥三号探测器设计了 UHF 频段月面通信系统, 在月球表面成功实现了 UHF 频段器间通信技术的在轨试验. 本文主要对嫦娥三号探测器 UHF 频段月面通信系统方案、通信链路衰减分析以及地面试验验证情况进行说明, 并对月表开展的在轨验证情况进行介绍.

关键词
嫦娥三号
月面通信
UHF 频段
在轨验证

1 引言

嫦娥三号探测器是我国的第 3 颗月球探测航天器, 完成地外天体软着陆探测和月面巡视探测任务. 探测器经过发射段、地月转移段、环月段和动力下降段的飞行, 在月表选定的区域成功实施软着陆, 之后着陆器开展就位探测, 巡视器开展巡视勘察. 巡视器的探测数据通过对地下信道直接传回地面站, 或通过月面转发信道发送给着陆器, 由着陆器传回地面站.

为了实现嫦娥三号探测器巡视器和着陆器间的数据传输, 嫦娥三号探测器设计了 UHF 频段月面通信系统, 研制了 UHF 频段发射机、UHF 频段接收机, 配置了相应的 UHF 频段天线. 在月球表面任务阶段, 着陆器与巡视器协同工作, 进行了 UHF 频段月面通信系统的数据传输验证及性能测试. 本文对嫦娥三号探测器 UHF 频段月面通信系统方案、通信链路衰

减分析以及地面试验验证情况进行说明, 并对月表开展的在轨验证试验情况进行介绍.

2 月面通信系统

2.1 功能

为实现巡视器对着陆器的数据传输, 嫦娥三号探测器设计了月面通信系统, 在着陆器与巡视器之间提供遥测/数传信道. 月面通信系统具备的主要功能如下.

- 1) 月面通信系统链路为单向链路, 即巡视器发送遥测/数传数据至着陆器, 由着陆器进行数据接收;
- 2) 月面通信系统设计具备两器最远相距 3 km 的通信能力;
- 3) 月面通信系统设计要适应月面环境对数据传输的影响.

引用格式: 孙泽洲, 韩宇, 黄晓峰, 等. 嫦娥三号探测器月面通信系统设计与验证. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 433-439
Sun Z Z, Han Y, Huang X F, et al. Lunar surface communication system design and verification of the Chang'E-3 probe (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 433-439, doi: 10.1360/092014-41

2.2 系统组成

探测器月面通信系统在巡视器上配置发射设备和天线, 在着陆器上配置接收设备和天线, 完成数据传输。

UHF 频段月面通信系统由 UHF 频段发射机、UHF 频段发射天线、UHF 频段接收天线和 UHF 频段接收机组成。UHF 频段月面通信系统组成如图 1 所示。其中 UHF 频段接收机和 UHF 频段接收天线安装在着陆器, UHF 频段发射机和 UHF 频段发射天线安装在巡视器。

在两器进行月面通信时, UHF 频段发射机接收来自巡视器综合电子分系统的遥测数据或探测数据的 PCM 信号, 进行 BPSK 调制, 并经过放大、滤波后, 由 UHF 频段发射天线发送。着陆器 UHF 频段接收天线接收信号, 将射频信号发送给 UHF 频段接收机, 由 UHF 频段接收机进行解调, 解调后的数据送往着陆器数管分系统。

巡视器 UHF 频段发射机完成基带信号的 BPSK 调制。UHF 频段发射机由电源、倍频调制以及功放 3

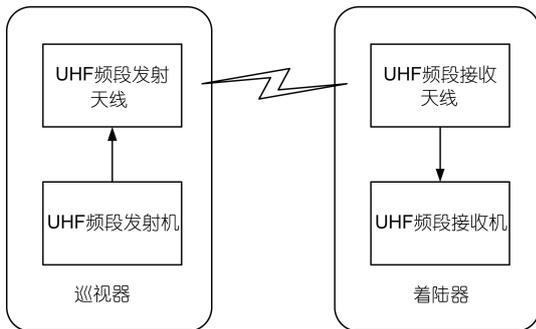


图 1 UHF 频段月面通信系统组成框图

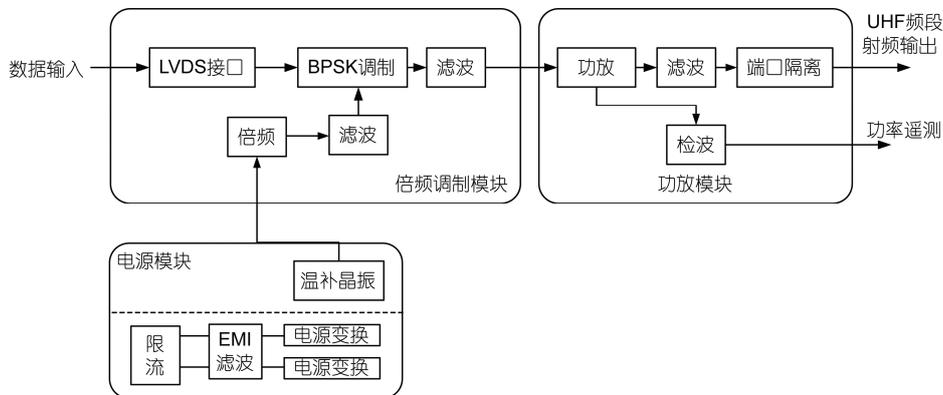


图 2 UHF 频段发射机原理框图

个模块组成, 如图 2 所示。

电源模块对二次电源进行限流、EMI 滤波、进行电压变换后提供给发射机的其他模块, 并为倍频电路提供载波频率的参考信号源。倍频调制模块将参考信号倍频至 UHF 频段的载波频率, 将输入的数据与时钟信号整形后将数据 BPSK 调制到载波上, 然后经过滤波器滤除带外信号。功放模块由两级砷化镓功率放大器组成, 对已调信号进行功率放大。

着陆器 UHF 频段接收机完成射频信号的接收与解调。UHF 频段接收机由 DC/DC 模块、通道部分和数字解调部分组成, 如图 3 所示。

UHF 频段接收机将接收到的信号进行低噪声放大、可变增益放大和滤波, 经 A/D 采样后由数字解调部分进行可变速率数据的滤波和解调, 输出 PCM 信号。

位于接收机最前端的低噪声放大器对接收到的微弱信号进行低噪声放大, 以保证良好的信噪比。可变增益放大器用于大动态情况下对射频信号进行放大, 保证 A/D 采样处的模拟信号幅度稳定。

A/D 采样将模拟信号转化为数字信号, 为信号处理做准备。数字信号送至数字解调部分, 由数字解调部分完成变速率情况下的下变频、滤波, 并将信号进行解调, 恢复出基带信号, 并将基带信号送至着陆器数管分系统。

2.3 工作模式

UHF 频段月面通信系统在着陆器着陆后, 需要对巡视器遥测或探测数据转发时开启两器 UHF 频段通信设备, 实现巡视器对着陆器 UHF 频段的数据传输功能。UHF 频段月面通信系统按工作码速率分为 2 种工作模式, 具体见表 1。

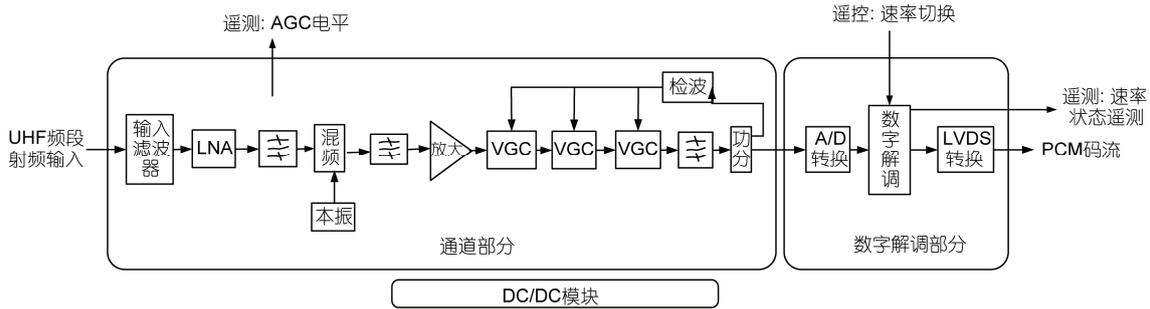


图3 UHF频段接收机原理框图

表1 月面通信系统工作模式

模式	码速率	工作内容
高码速率模式	800 kbps	传输巡视器有效载荷设备的探测数据和工程数据、GNC相机的图像数据、器上遥测数据等内容
	400 kbps	
	200 kbps	
低码速率模式	1024 bps	传输巡视器实时工程遥测、延时遥测、器上重要数据等内容

2.4 主要技术指标

2.4.1 通信频段

月面远距离通信可能存在超视距情况，无线电波在超视距传播时，具有绕射损耗，无线电波的频率越高损耗越大，频率越低损耗越小。对于天线的发射效率，频率越高效率越高，频率越低效率越低。所以在考虑超视距通信体制时，必须进行综合考虑，选择合适的通信频段。

着陆器和巡视器的高度分别约为3和1 m，由于探测器设备尺寸限制，无法架设长波频段以下的天线，因此设计上不考虑长波以下的频段。

短波频段具有地波绕射传输损耗小和绕射能力强的特点。由于天线尺寸与信号波长相关，对于高度仅为1 m且需要在月面行驶的巡视器而言，安装过长的短波通信天线在工程上是很难实现的。故设计上不能选取短波频段。

超短波(VHF/UHF)频段天线的尺寸一般较短，在月面探测环境下探测器能够满足超短波天线的架设条件，该频段还具有较高的发射效率以及一定的绕射能力，满足月面通信的需要。

L频段、S频段及更高的频段可以由小尺寸天线提供更高的数据传输速率，但此频段仅能用于视距通信，超视距传输时，两器间出现月面遮挡情况会造成较大的传输损耗，难以保证相互通信的能力。

综合考虑天线尺寸、重量、通信速率及超视距传输等因素，月面通信系统采用UHF频段。

2.4.2 最远通信距离

根据着陆器和巡视器的天线高度，确定着陆器和巡视器之间的最大直视距离，该距离通过着陆器、巡视器及月面的几何关系得到，如图4所示。

月球表面上高度分别为 h_1 和 h_2 的2天线间的最大直视距离为

$$d_0 = \sqrt{2R}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (1)$$

其中， $R=1738$ km，为月球半径。

着陆器天线高度约为3 m，巡视器天线高度约为1 m。经计算，两器最大直视距离约为5 km。而在实际情况中，月面地形可能存在起伏，会影响两器之间相互通信。综合考虑设备重量与功耗的限制，确定月面最远通信距离3 km。

2.4.3 码速率

为充分利用月面通信信道，嫦娥三号探测器月面通信系统设置了800, 400, 200 kbps和1024 bps四档码速率。根据两器距离，系统采用不同档位的码速率实现不同距离的数据传输需求。

在保证两器最短通信距离的基础上，通过判断UHF频段接收机的接收功率选择月面通信的码速率，具体为

- 1) 当UHF频段接收机接收功率优于-98 dBm时，可采用800 kbps码速率进行通信；

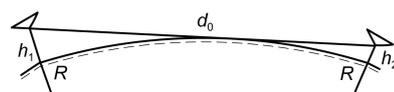


图4 月面通信最大直视距离示意图

- 2) 当 UHF 频段接收机接收功率优于-104 dBm 时, 可采用 400 kbps 码速率进行通信;
- 3) 当 UHF 频段接收机接收功率优于-107 dBm 时, 可采用 200 kbps 码速率进行通信;
- 4) 当 UHF 频段接收机接收功率优于-125 dBm 时, 可采用 1024 bps 码速率进行通信。

3 月面通信链路衰减分析

对于地、空无线电波传播特性的分析, 一般不考虑地形等地表因素的影响, 采用自由空间传播模型进行分析. 自由空间传播模型衰减量^[1]计算如下

$$L_0 = 32.45 + 20 \log d + 20 \log f \text{ (dB)}, \quad (2)$$

其中, 通信距离 d 的单位为 km, 频率 f 的单位为 MHz.

但在月面通信系统中, 会存在月表对 UHF 频段电波的反射, 采用自由空间传播模型对月面通信链路的分析就会有很大的误差. 因此, 月面通信需考虑更接近实际情况的反射、散射模型.

根据反射、散射模型计算的衰减量^[2]

$$L_{mp} = \left[1 - D |\bar{R}| \left(\frac{r}{r_1 + r_2} \right) \right]^2 + 4D |\bar{R}| \left(\frac{r}{r_1 + r_2} \right) \cos^2 \left(\frac{1}{2} \varphi' \right) \text{ (dB)}, \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2d_1 d_2}{Rd \tan \gamma}}}, \quad (4)$$

其中 D 为球面反射扩散因子; $|\bar{R}|$ 为月面反射系数, 或者为散射情况下的等效反射系数; r 为收、发天线的距离; $r_1 + r_2$ 为反射无线电波在收、发天线间传播距离; φ' 为反射波与直射波之间的相差; R 为月球半径; d_1 为发射天线与反射点之间的球面距离; d_2 为接收天线与反射点之间的球面距离; γ 为反射波的掠射角; d 为通信距离.

电波在传输过程中遇到光滑反射面会发生反射, 在遇到粗糙反射面时会发生散射. (3)式根据这样的实际传输环境来构建月面反射、散射模型. 该模型对球形的反射面进行参数转换, 使其球形参数转换为平面参数, 即(4)式中的球面反射扩散因子 D , 将原有的平面反射模型应用范围扩展到球体.

(3)式由两类参数组成. 首先是发射端与接收端的空间几何关系. 根据菲涅尔原理^[3,4], 并不是所有的反射面(散射面)都要进行反射(散射), 而是有限的 1 个区域. 因此, 需要确定反射(散射)点和有效反射(散射)区, 即根据空间几何关系确定 $r_1, r_2, d_1, d_2, \gamma$ 等; 其次是反射(散射)点特性, 包括反射(散射)点处月壤粗糙度以及电特性, 根据有效反射区的实际粗糙度确定接收端接收到的信号是经过月面反射还是粗糙的表面散射产生, 并根据电特性确定月壤对信号的影响(即月面反射系数 $|\bar{R}|$).

将(2)与(3)式相加, 得到月面通信链路总的衰减量

$$L = 32.45 + 20 \log d + 20 \log f + \left[1 - D |\bar{R}| \left(\frac{r}{r_1 + r_2} \right) \right]^2 + 4D |\bar{R}| \left(\frac{r}{r_1 + r_2} \right) \cos^2 \left(\frac{1}{2} \varphi' \right) \text{ (dB)}. \quad (5)$$

4 地面试验验证情况

为验证 UHF 频段月面通信系统的正确性, 根据月表环境特性, 选取地球上的沙漠地表作为月面通信验证试验场地, 进行沙漠环境下 UHF 频段通信链路传输特性试验, 并对 UHF 频段通信系统进行验证. 地面验证试验的系统框图如图 5 所示.

根据试验场地的实际地形, 以着陆器 UHF 接收端为圆心, 3 km 为半径, 规划了 3 条路径作为 UHF 发射端的移动方向, UHF 频段月面通信地面验证试验地形及规划路径的俯视图如图 6 所示.

在 UHF 频段发射端的移动路径上, 每隔 10 或 100 m 同时采用频谱仪和误码仪对 UHF 频段接收机接收的信号进行监测. 通过频谱仪测试 UHF 频段接收机接收的射频信号功率, 计算随距离变化的实测链路衰减量, 将实测值与仿真分析采用的衰减模型计算出的衰减量进行比较, 验证衰减模型的正确性. 误码仪将 UHF 频段接收机解调出数据与 UHF 频段发射机发送的数据进行比较, 验证通信系统是否正常工作.

UHF 频段发射端在路径 1 的最远移动距离为 3 km, 在收、发端距离 1 km 内时, 每隔 10 m 使用频谱仪观察 UHF 频段接收端接收信号的通带功率. 在两

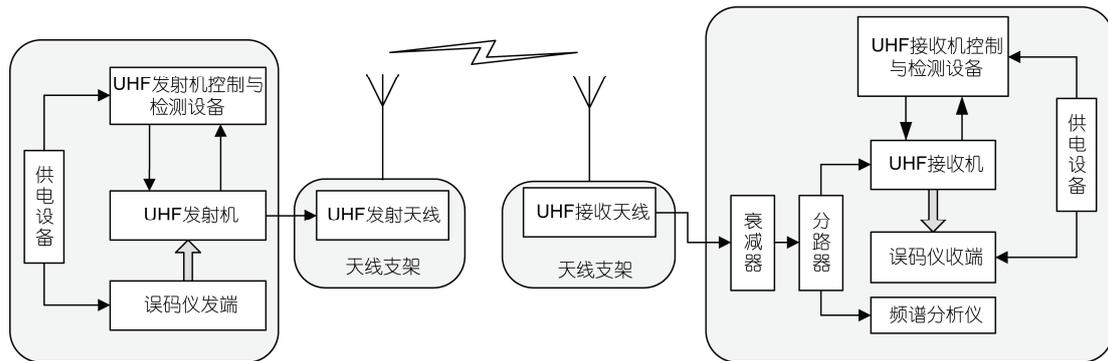


图5 月面通信地面验证试验系统框图

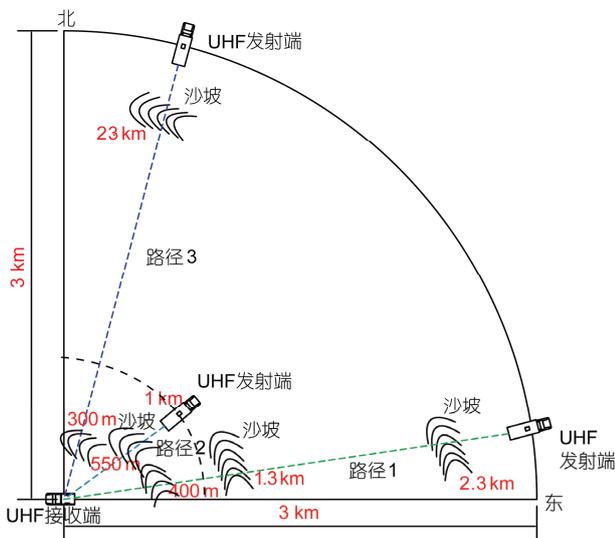


图6 (网络版彩图)试验地形及规划路径俯视图

器距离 1 km 以上时, 每隔 100 m 使用频谱仪观察 UHF 接收端接收信号的通带功率. UHF 发射机以 800 kbps 码速率发送数据.

UHF 频段发射端在路径 2 的最远移动距离为 1 km, 每隔 10 m 使用频谱仪观察 UHF 接收端接收信号的通带功率. UHF 发射机以 800 kbps 码速率发送数据.

UHF 频段发射端在路径 3 的最远移动距离为 3 km, 每隔 100 m 使用频谱仪观察 UHF 接收端接收信号的通带功率. 开始时, UHF 发射机以 800 kbps 码速率发送数据, 在 500 m 处切换码速率为 400 kbps, 在 1 km 处切换码速率为 200 kbps, 在 2 km 处切换码速率为 1024 bps.

在路径 1~3 的测试中, UHF 频段通信系统在各档码速率下均能够正常通信. 试验结果表明, 当 UHF 频段接收机接收功率优于当前码速率要求的门限值

时, 探测器 UHF 频段发射机与接收机在当前码速率下通信正常.

根据 UHF 频段发射机的输出功率、UHF 频段天线的增益和 UHF 频段接收机的接收功率计算试验环境链路的实际衰减量. 将实际测量后计算得到的传输衰减绘制曲线, 与所处位置的自由空间传播衰减以及仿真分析结果共 3 条曲线进行比对, 结果如图 7~9 所示.

从曲线分析得到, 通信链路的传输特性受到两器的距离以及地形起伏的影响, 实测的 UHF 频段通信链路衰减曲线与通信链路仿真分析的曲线走势一致, 仿真分析所采用的衰减模型与实际测量结果吻合, 可以作为月面通信系统链路设计的依据.

5 在轨验证情况

2014 年 1 月 23 日 3 时 50 分, 着陆器 UHF 频段

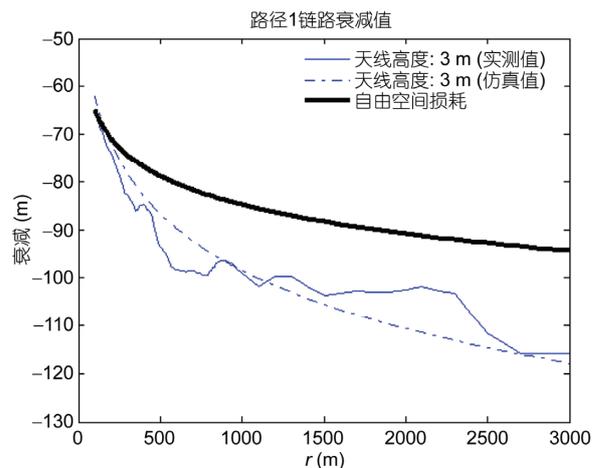


图7 (网络版彩图)路径1测试比对结果

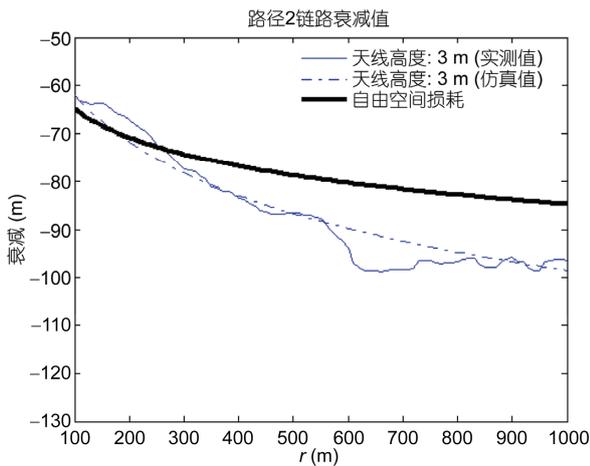


图 8 (网络版彩图)路径 2 测试比对结果

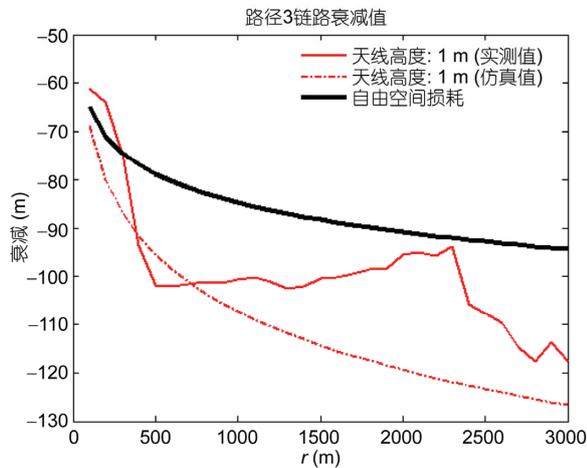


图 9 (网络版彩图)路径 3 测试比对结果

接收机、巡视器 UHF 频段发射机顺序开机,进行了 UHF 频段月面通信链路试验,巡视器 UHF 频段发射机以 800 kbps 码速率向着陆器 UHF 频段接收机传输巡视器导航相机、全景相机、避障相机等多幅图像.着陆器接收的巡视器图像和遥测数据经着陆器 X 频段数传通道下传至地面站,经地面判读所获巡视器图像正常、巡视器遥测数据正常. UHF 频段接收机接收功率为 -40.71 dBm,工作状态良好. UHF 频段月面通信系统在试验过程中系统功能正常,各项技术指标测试正常,按既定要求完成了第 2 个月昼下的 UHF 频段月面通信系统初步验证任务.

着陆器和巡视器在月面的相对位置如图 10 所示.巡视器位于着陆器 $-Z$ 轴偏 $-Y$ 轴 40.32° 方向,两器距离约为 17.59 m.

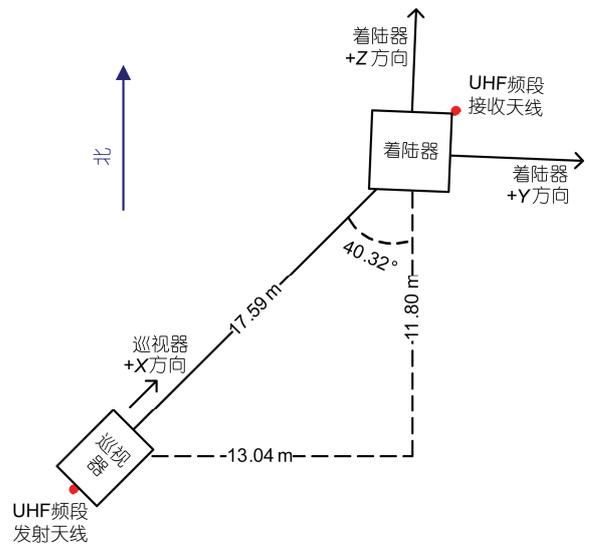


图 10 (网络版彩图)月面两器相对位置示意图

根据月面使用的 UHF 频段发射天线及 UHF 频段接收天线在巡视器和着陆器全尺寸辐射模型器的天线方向图测试数据,2 根天线在对应方向上的增益值见表 2.

通过 UHF 频段发射机的输出功率、UHF 频段天线的增益和 UHF 频段接收机的接收功率计算月面通信链路的衰减量为 -53.25 dB,与月面通信链路仿真分析的结果比对如图 11 所示.

表 2 天线增益值

天线	增益(dBi)
UHF 频段发射天线	-5.46
UHF 频段接收天线	-15.7

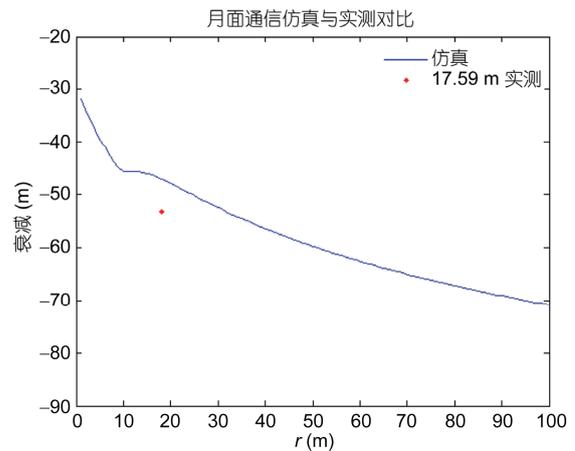


图 11 (网络版彩图)月面通信链路仿真分析与实测对比结果

由曲线对比得到,月面通信链路试验实测的UHF频段通信链路衰减值与通信链路仿真分析曲线在18 m处的衰减值相差6 dB,实际测量结果与仿真分析所采用的衰减模型较为吻合,系统工作正常。

6 结论与展望

嫦娥三号探测器配置的UHF频段通信设备,通过在轨飞行试验,验证了UHF频段抑制载波体制通信系统在月面工作的可行性,对UHF频段月面通信系统各项功能以及UHF频段发射机、UHF频段接收

机、UHF频段发射天线、UHF频段接收天线的性能进行了验证,均满足设计要求。嫦娥三号探测器对UHF频段月面通信系统在轨的成功验证,为后续深空探测任务中地外天体表面探测器间通信系统设计进行了良好的技术验证。后续,探测器将在巡视器巡视探测及就位探测过程中继续开展UHF频段月面通信试验,对UHF频段月面通信各项性能进行验证,进一步为地外天体表面探测器间通信任务积累数据和经验。

目前,国内正在对临近空间链路协议进行探索与研究,为后续地外天体表面探测器间实现双工、高效的数据传输提供技术支持。

参考文献

- 1 纪越峰. 现代通信技术. 第2版. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004
- 2 CCIR. Propagation by diffraction. Report 715-3, Rec. and Rep. Of CCIR, Vol.5, ITU. Geneva, 1990
- 3 Boithias L. Radio Wave Propagation. New York: McGraw-Hill Inc, 1987
- 4 ITU-R. Propagation by diffraction. ITU-R Rec. P. 526-5. Geneva, 2003

Lunar surface communication system design and verification of the Chang'E-3 probe

SUN ZeZhou¹, HAN Yu¹, HUANG XiaoFeng¹, LIU Shi¹, LI XiongFei², CHEN ZhiChun³, ZHANG Ting¹ & QIANG HuiPing¹

¹ Institute of Spacecraft System Engineering CAST, Beijing 100094, China;

² Academy of Space Electronic Information Technology, Xi'an 710100, China;

³ Shanghai Academy of Spacecraft Technology, Shanghai 201109, China

The Chang'E-3 is the first Chinese soft landing lunar probe, including a lander and a rover. After landing on the certain area of lunar surface, lander started in-situ exploration, rover began lunar surface reconnaissance. Data of rover exploration can be transmitted via direct-to-earth link or relay link of lander. UHF lunar surface communication system is designed for transmitting data from rover to lander. The system achieved the on-orbit verifications goal of lunar surface transmission successfully. The paper describes the design of the Chang'E-3 probe lunar surface communication system, transmission loss analysis, tests on the ground, and the on-orbit verifications.

Chang'E-3 explorer, lunar surface communication, UHF, on-orbit verifications

doi: 10.1360/092014-41