

文章编号: 1001 - 893X(2010)08 - 0001 - 06

# 深空测控体系结构与技术发展\*

柴霖<sup>1</sup>, 许秀玲<sup>2</sup>

(1. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036; 2. 西南电子设备研究所, 成都 610036)

**摘要:** 深空探测是国家综合实力的象征, 集中体现了航天领域的发展方向和高精尖技术。测控通信系统是深空探测器信息保障的核心, 如何适应深空飞行平台的应用是航天测控发展的重要课题。辨析了深空测控的一些基本概念, 分析了其特点和需求, 总结了深空测控的体系结构、标准化建设方面的进展, 提出了未来 20 年深空测控应重点发展的方向。

**关键词:** 深空探测; 测控通信; 体系结构; 信道编码; 空间通信协议; 标准化

**中图分类号:** V556; V476 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.001

## Architecture and Technology Development of Deep Space TT&C Communication System

CHAI Lin<sup>1</sup>, XU Xiu - ling<sup>2</sup>

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. Southwest China Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** Deep space exploration level indicates a country's overall strength, and concentratively represents the development trend and advanced technology in the field of spaceflight. The TT&C (Tracking Telemetry and Command) and communication system is the core of information guarantee for deep space vehicle, and how to adapt deep space vehicle's requirement is an essential issue. Based on the concept and requirement analysis of the deep space TT&C communication system, the architecture and standardization of deep space communications and navigation technology are discussed. The major development directions of deep space TT&C communication in the future 20 years are proposed.

**Key words:** deep space exploration; TT&C communication; system architecture; channel coding; space communication protocol; standardization

### 1 引言

深空探测集中体现了一个国家的科技水平和综合国力, 不仅具有科学和经济价值, 而且还具有很强的军事和政治意义。从各航天大国近年来推出的深空探测发展战略、规划<sup>[1]</sup>可以清晰地看出, 深空探测是 21 世纪航天领域的发展重点。

深空测控通信(以下简称深空测控)与传统航天测控相比, 显示出极大的特殊性, 其技术要求更苛刻。未来 20 年深空测控的发展应在整个航天测控

体系框架内进行规划, 并根据未来深空任务所应具备的能力, 制定出技术发展重点。

文献[2,3]总结了深空测控的主要关键技术, 文献[4]对深空探测通信星际互联网体系结构进行了初步设想。本文在同行研究的基础上, 对未来 20 年深空测控体系结构和关键技术的发展进行阐述和分析。

### 2 深空测控概念辨析

随着人们对深空研究、认识的深入, 国际上相关标准的陆续推出, 深空测控的一些概念正在悄然变

\* 收稿日期: 2010 - 03 - 05; 修回日期: 2010 - 07 - 06

化。这些变化体现在概念的内涵和外延上,在一定程度上也昭示了技术的发展方向。

## 2.1 深空概念

国际上早期将“月球及以远”称为深空,我国官方文件中一直在沿用这种概念,例如2006年国务院发布的《2006年中国的航天》白皮书,就将探月工程列入深空探测范围<sup>[5,6]</sup>。但在1988年世界无线电大会上,ITU(国际电信联盟)规定“深空是指距离地球大于或等于200万公里的空间”。CCSDS标准中也明确了200万公里以下为A类航天任务,200万公里及以上为B类任务。也就是说,“200万公里作为深空与近地空间的分界”这个概念已为国际所公认。

但从技术体制上看,探月和深空测控相通之处甚多,国内外都经常将月球与深空测控放在一起讨论。因此,出于讨论技术问题的方便,本文的深空概念是包含月球的。

## 2.2 测控通信概念

从2006年美国《2005~2030年NASA空间通信与导航体系结构建议》报告中可以看到,国际上正将传统的“测控通信”(TT&C and Communication)概念向“通信导航”(Communication and Navigation)概念转变<sup>[7]</sup>,房鸿瑞等国内专家已注意到这一趋势<sup>[6]</sup>。新概念中“导航”包括传统的外测跟踪(Tracking)和GPS定位内容,而“通信”将遥测、遥控、话音、低速数传、高速数传都囊括其中。显然,传统的“测控通信”已成为“通信导航”的子集。

## 2.3 深空测控体制概念

传统的深空测控体制主要是信号的调制体制,例如文献[8]所述“所谓测控体制是指深空站与深空探测器间上行/下行信道传送测距、遥控、遥测和探测信息等基带信号时,如何利用载波以及基带信号改变(调制)副载波、载波参数的方式和从被改变参数的载波、副载波中提取(解调)基带信号的方式”。

本文认为,上述可以是测控体制的狭义定义,广义的深空测控体制应包括信号调制体制、测量体制、深空网络体制三方面。

## 3 深空测控的难点

深空测控与近地空间测控最根本的区别就是一个“远”字,其它所有种种深空问题实际上都是由“远”这个特点而衍生的。归纳起来,从任务需求角

度深空测控需面对以下4方面主要问题。

### (1) 信噪比低,动态大

月球距地最远 $40.55 \times 10^4$  km,是同步轨道距离( $3.6 \times 10^4$  km)的11.26倍,链路损耗比同步轨道大21.03 dB;火星距地最远 $4.013 \times 10^8$  km,是同步轨道距离的1114.72倍,链路损耗比同步轨道大60.943 dB。因此,深空站接收的信号非常微弱,这也限制了深空数据传输速率。

深空探测器飞行已超过第二宇宙速度(11.2 km/s),再加上需采用高频段测控,所以多普勒和多普勒变化率比近地卫星要大得多。国外文献给出,Ka频段多普勒变化范围为 $\pm 1100$  kHz,多普勒变化率为110 kHz/s。

信噪比低和目标动态大这两个因素,使得深空测控接收机的设计难度大大提高。

### (2) 通信时延巨大

近地空间测控双向时延最多0.24 s,而月球双向时延达2.72 s,火星为44.6 min,海王星为521.56 min。巨大的空间时延使得深空测控不能沿袭传统测控的捕获流程,而且要求遥控指令正确性更高。由于传输已是非实时,所以可以采用译码时间长但编码增益很高的Turbo码,并采用存储转发方式。

### (3) 连续测控覆盖问题

深空探测器飞行时间很长(到达火星要近1年时间),对探测器的连续跟踪测量十分必要。但由于地球自转,单个地面站只能连续跟踪测量8~10.5 h<sup>[9]</sup>,所以必须多个地面站接力连续测量。这引起两个问题,其一,多个深空站国际联网,其技术体制、协议、接口要兼容;其二,在两站交接班(Hand-over)的一段时间内要做三向(Three Way)测距、测速<sup>[10]</sup>,这又要求距离遥远的两深空站的时间频率达到高度同步。

### (4) 测量精度高,多种跟踪定轨体制联合应用

近地卫星使用的各种高精度导航手段(如GPS、惯导)中,除了传统的多普勒测速和距离测量外,其它手段都难以在深空测控中使用(或仅能部分使用)。

最明显的问题是测角,深空目标距离遥远而且波束又窄,角度测量“失之毫厘谬以千里”。用传统的单脉冲比幅测角法,测角精度最多达到 $0.001^\circ$ ,即 $3.6''(17476 \text{ mrad})$ (20世纪80年代,日本64 m天线和德国30 m天线将天线座的测角精度提高到 $0.001^\circ$ ,基本上达到物理极限)。若观测目标的视夹角小于

天线的3 dB波束宽度时,单脉冲方式测角已不能满足目标的定位要求。因此,对于深空远距离目标,传统 A、E、R 测量体制已不适用,需转而采用干涉仪体制用比较相位来测角。

干涉仪测角之所以能提高测角精度,一是因为它是依靠测距来换算出角度的,而测距能够达到很高的精度,并且测距误差与被测量距离的长短无关;二是因为干涉仪的基线越长,测角精度越高,因而可用增加基线长度的方法来换取测角精度。目前,甚长基线干涉仪(VLBI)已成为深空测角的主要手段,其各种改进方法( $\Delta$ VLBI、CEI、SBI 等)也都受到各航天大国的密切关注和研究。

## 4 深空测控体系结构的发展

### 4.1 构建空间通信导航新体系结构

体系结构定义为一个系统的各组成单元及其相互作用,以及将用来控制为了提供某一能力而作的开发的方针和原则<sup>[7]</sup>。

NASA 在《2005 ~ 2030 年 NASA 空间通信与导航体系结构建议》报告中,对未来空间探测任务的通信与导航体系结构进行了规划。深空探测是其中的主要部分,如图 1 所示。

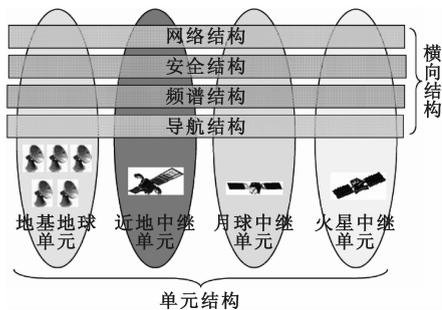


图 1 NASA 由单元和横向结构组成的通信与导航体系结构  
Fig.1 NASA space communication navigation architecture consisting of units and landscape orientation structure

这一新的空间通信与导航体系结构由地基单元、近地中继单元、月球中继单元、火星中继单元 4 个物理单元部分和相互交迭的网络、安全、射频频谱、导航结构组成。其导航结构前面已提到过,相当于将自主导航(主要是 GPS 卫星导航)和外测均包含在内。频谱结构实际上就是反映了深空测控向 Ka 频段和毫米波频段发展的趋势。安全结构是为需要数据安全的用户提供若干可供选择的数据保护

业务,包括加密和认证。

笔者认为这个新体系结构中意义重大、影响最深远的应该是“网络结构”。网络结构的本质是测控通信的信息传输由传统的点对点专线方式转向基于 IP 技术的网络化方式,构建空间因特网。4 个物理单元通过一体化的网络结构紧密连接在一起,充分利用了目前地面所使用的互联网技术,并将其扩展到整个太阳系,每个航天器都是网络中的一个节点,使空间用户可以顺利地从一个单元无缝过渡到另一个单元。

网络结构最大的特点就是引入信息交换协议<sup>[11]</sup>,使得测控通信网络支持分组交换,可以进行配置,以克服现有的点对点通信的不足。在点对点通信中,每个通信路径比较固定,缺乏灵活性。分组交换支持的可配置性概念,使得通信变得非常灵活和容易实现容错保护。

值得注意的是,地面 Internet 采用的基于传统的确认/重传过程的 TCP 协议不适合应用于深空通信中<sup>[4]</sup>。TCP 协议假定传输延迟很小,上下信道对称,重传效率低,系统吞吐量随着往返延迟、信息丢失率增加而降低,这些特点都不适用于深空通信的操作环境。当然,经过改造(TCP 欺骗技术、TCP 划分、Web 缓存、增大初识窗口等)后的 TCP 协议也并非完全不能用。一般认为,目前 CCSDS 中的 CDFP (CCSDS File Delivery Protocol) 协议和集束协议更符合深空测控通信的特点<sup>[4]</sup>。

关于空间 Internet 传输协议是一个需求旺盛、很有潜力的研究课题,研究的最终目标并不是建立深空网或航天测控网专用协议即可,而是想把空间 Internet 与地面 Internet 相兼容。建立一种既满足航天测控通信传输时延大、信号电平弱、信道噪声大、多普勒频移大、空-地通信中断频繁等特殊要求,又充分发挥 Internet 端到端能力强、高层协议功能完善和标准化等优势的天地一体化网络<sup>[6]</sup>。

### 4.2 深空测控标准的制定和发展

国内尚没有专门的深空测控标准,某些相关内容分散在国军标(GJB)航天测控各标准中。在国外,有 ISO(国际标准化组织)、CCSDS(空间数据系统咨询委员会)、ECSS(欧洲空间标准化合作组织)、NASA(美国国家航空航天局)等组织对深空测控制定了不同程度和范围的标准。文献[6]对以上各国外标准的分类、涵盖内容进行了归纳。

总体来看,关于深空测控的标准,ISO 和 NASA

系列都不全面,而且 NASA 主要还是参照 CCSDS, ECSS 系列,影响力较小。从完善性、可靠性、权威性上看,CCSDS 系列最优。因此,我国深空测控通信标准的建设,还是应以 CCSDS 为主要参考。

## 5 深空测控技术及技术体制的发展

要想提出深空测控未来的技术发展重点,必须认清未来深空任务所应具备的能力,需拓展哪些新能力,需提高哪些已有能力。笔者认为需具备以下 6 项能力:

(1)高数传速率:不断提高的数传速率是驱动深空测控技术发展的重要动力,因为它的发展能满足空间探索和航天任务的各种需求;

(2)低接收信噪比:随着科学探测向深空领域的不断深入,如何接收越来越低信噪比的信号是另一个永恒的主题;

(3)高测量精度:测量精度的不断提高,可以支撑和推动航天器向深空的不断探索;

(4)降低成本:成本决定了深空探测的开展规模和持续时间,超高成本的科学探索项目不可能永无止境地被资助;

(5)提高灵活性:深空测控系统的容错能力、可重组能力、可维修能力也需列入未来深空网建设议事日程;

(6)自主导航能力:自主导航对任何一种航天器都有极大的吸引力, GPS 和 INS 不适用于深空航天器,并不意味着我们在深空自主导航领域可以停滞不前,仍需积极研究新的适合于深空的自主导航技术。

围绕以上 6 项能力,本文建议深空测控未来 20 年,应对以下 10 个技术领域进行重点研究。

### 5.1 拉格朗日点深空测控

根据天体力学研究成果,在地月系统和地球太阳系中各存在 5 个拉格朗日平衡点  $L_1 \sim L_5$ 。拉格朗日点是两个大天体所组成的运动系统中的受力平衡点,位于该点的物体受万有引力和轨道运动的共同作用而处于平衡状态。天文学又称这 5 个点为“秤动点”,形成一条弱稳定区走廊。

以地月系统为例,在  $L_1 \sim L_5$  点上的航天器只要达到一定速度就能克服地月引力和转动坐标系影响,留在走廊里,既不会脱离地月系统,也不会被地球、月球捕获。提供小的速度增量,航天器可以在弱

稳定区内巡回。如果提供高的速度增量,航天器可飞出弱稳定区,脱离地月系统进入深空<sup>[4,13]</sup>。

利用拉格朗日点放置中继星、天文望远镜,或进行交会对接、建立星际航行基地,都是非常好的、有技术可行性的深空探测方案。

### 5.2 新测量体制的发展

如前所述,基于深空测控的特殊性,各国一直在发展一些新的测量体制,主要是集中在干涉仪测量领域,从最早的 VLBI,发展到  $\Delta$ VLBI(包括  $\Delta$ DOR、 $\Delta$ DOD)、CEI、SBI 技术。VLBI 和  $\Delta$ VLBI 技术已在我国工程上成功应用,CEI 和 SBI 也正在演示试验中。下一步更具诱惑力的是空间 VLBI 技术,即在月球或空间拉格朗日点建一个 VLBI 端站,与地球的 VLBI 端站构成大尺度的 VLBI 系统,利用天地长基线达到高精度测量目的,测角精度有望达到 0.01 mrad。

### 5.3 上行天线组阵

小口径接收天线组阵已成为未来深空下行链路的发展方向,NASA 建立了不同规模的下行天线阵,在执行深空任务中取得了成效<sup>[14]</sup>。天线阵灵活、可靠,规模可变、可扩展,这种概念对上行链路和下行链路都有效。上行发射阵列的主要需求在于提供高的 EIRP 值来支持更高的上行数据率,以及提供控制指令到增益非常低的天线,这种低增益天线的情况经常出现在飞行器紧急情况。上行发射阵列的优势首先在于可以较小的成本提供需要的 EIRP,并且可以支持同时多任务;其次是安全性较高,因为大天线大功率发射,在一定范围内的通量密度可能会超过人体和飞船可以承受的极限。

上行天线组阵与一般的相控阵发射系统在原理上是类似的,基本概念是将从各个不同的天线发射的信号延迟适当地相位和时间,使得在目标处的信号得到加强。但上行天线组阵在工程的实现上要求较高,目前研究的热点在于该技术在深空应用的可行性以及相位校准方法。

用于近地的上行链路组阵技术在国外已得到验证<sup>[7]</sup>,但在深空任务中实现要困难得多。深空目标距离遥远,阵列中各天线上空的气象状态也不同。所以,要想调整各天线信号延时和相位,使发射信号在深空目标处准确对齐到毫米级精度,其难度是非常大的。

### 5.4 深空测控高功放技术

无论飞行器还是地面站,深空测控高功放技术

都有巨大的发展潜力。其中重点将集中在Ka频段,希望能研制出飞行器载百瓦级、地面10 kW级Ka频段发射机,这将使数传速率获得百倍以上的提高。

### 5.5 空间大型天线技术

飞行器载轻型可展开式大天线技术,如网状和可膨胀天线,是极大提高数传速率的又一途径。国外已有口径12 m的可展开网面天线用于商业航天,但频段较低。未来将研制Ka频段网面天线,而可膨胀天线作为更前沿的技术也将得到重视和发展。

### 5.6 深空激光统一测控技术

激光载波统一系统是指利用激光作为信息载体,实现飞行器轨迹测量、地面站与飞行器之间上行控制信息、下行遥测信息与有效载荷测量信息传输的测量通信一体化系统。

激光和射频信号均为电磁波,但激光比射频频率高4~5个数量级。常用于通信的激光频率为 $1.9 \times 10^{14} \sim 5.6 \times 10^{14}$  Hz,对应波长为536~1 579 nm,这使得以激光作为载波信号的测控通信系统具有测量精度高、信息传输速率高(国外星间激光通信实现了5.5 Gbit/s速率)、不占用无线电频谱资源、抗干扰能力强、保密性好和设备体积小、重量轻、功耗低等优势,具有广阔的技术发展前景。

但激光测控易受气象条件、天光地影影响,难以做到全天时、全天候工作。另一个主要技术难点是光束发散角极小,对飞行器和地面角度捕获跟踪带来困难。但采取相应技术措施后,一旦突破这些技术难题,激光测控必将带来测控技术发展的一次飞跃。

### 5.7 深空X射线自主导航

航天器自主导航具有极其重要的工程实用价值和军事战略意义。一方面,航天器自主导航将大大减轻地面测控系统的工作负担,减少测控站的布设数量,降低航天器(星座)的运行管理和维持费用;另一方面,在敌对环境条件下,自主导航的航天器减少了对地面测控系统的依赖,可增强其自主生存能力。

脉冲星是高度稳定的X射线天体源,将这些信源用作自然导航信标,有足够的可重复性和可预见性<sup>[15]</sup>,因此可用来产生航天器位置、速度和时间的完整导航解,从而实现深空航天器自主轨道控制和运行管理。

### 5.8 高频段天线标校测试技术

高频段天线系统远场条件十分苛刻,建设相应的标校塔经常是不现实的。利用射电源标校对天线

口径又有严格限制,对于较小口径的高频段天线,射电源流量密度无法满足天线标校要求。我国高频段卫星资源十分缺乏,所以利用卫星标校也很困难,必须尽快寻找有效的高频段天线标校测试手段。

### 5.9 在轨可编程用户终端技术

深空探测任务的长期性,对实现深空测控飞行器用户终端在轨可编程、可配置提出了要求。在同一任务过程中需要根据不同任务剖面实现不同的功能,也需要实现对用户终端的在轨可编程。

### 5.10 高效编译码技术

构造出符合深空测控特点、编译码复杂性低、逼近香农极限的信道编译码是深空测控通信的重要研究内容,而且信道编译码技术与传输协议息息相关。对传输速率要求的不断提高,大大增加了编译码实现的难度,也使CCSDS推荐的Turbo码受到挑战,因为其译码复杂度高、占用资源大。

喷泉码是一种很有前景的适合深空的编码方式<sup>[16]</sup>,因其具有不需要反馈信道、只需前向链路的特性,能够简化或省略通信协议中的握手过程,缩短文件传输的时延。深空通信的距离遥远和误码率大的特点,使得传输中的误码超出传统前向纠错(Forward Error Correction, FEC)的能力,以及深空链路易中断的特点,都会造成接收端丢包率很大。而喷泉编码只要接收到的数据包个数 $N$ 与源文件 $K$ 个数据包满足一定关系,就能够恢复出整个文件,这决定了它不需要频繁的重传和确认过程,因而能够提高传输效率。另外,它具有的能够以任意概率逼近香农极限的特点,有利于降低接收系统对于信噪比的要求。深空信道的长、变时延、信道非对称、误码率高、链路易中断的特点完全符合喷泉编码提出的研究背景<sup>[4]</sup>。

## 6 结束语

深空测控通信是航天测控领域最重要的发展方向,集中了多项高精尖技术,不仅是测控通信领域的前沿,而且很多技术也是信息领域的前沿,所以完全可以说深空测控代表了人类向茫茫宇宙挑战的决心和成果。未来20年是深空测控大发展的时代,认识其特点和难题,建立体系框架,理清发展思路,是航天测控从业人员必须履行的责任。

本文是作者的粗识拙见,愿抛砖引玉,与同行专家们商榷,共同为我国深空测控事业贡献力量。

## 参考文献:

- [1] 韩鸿硕, 陈杰. 21世纪国外深空探测发展计划及进展[J]. 航天器工程, 2008, 17(3): 1-22.  
HAN Hong - shuo, CHEN Jie. 21st Century Foreign Deep Space Exploration Development Plans and Their Progresses [J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17 (3): 1-22. (in Chinese)
- [2] 刘嘉兴. 向技术极限挑战——深空测控通信的目标[J]. 电讯技术, 2008, 48(4): 1-7.  
LIU Jia - xing. Challenging the Technology Limit: the Goal of Deep Space TTC&Data Transmission[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(4): 1-7. (in Chinese)
- [3] 刘嘉兴. 走向深空——测控通信的发展方向[J]. 电讯技术, 2006, 46(2): 1-8.  
LIU Jia - xing. Forward to the Deep Space: Developing Trend of TTC&DT Technology[J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(2): 1-8. (in Chinese)
- [4] 张乃通, 李晖, 张钦宇. 深空探测通信技术发展趋势及思考[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 786-793.  
ZHANG Nai - tong, LI Hui, ZHANG Qin - yu. Thought and Developing Trend in Deep Space Exploration and Communication[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 786-793. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国国务院新闻办公室. “2006年中国的航天”白皮书[R]. 北京: 国务院新闻办公室, 2006.  
The News Office of State Council of the People's Republic of China. "Chinese Space in 2006" white book [R]. Beijing: The News Office of State Council, 2006. (in Chinese)
- [6] 房鸿瑞. 深空通信导航技术及其标准[J]. 遥测遥控, 2009, 30(3): 1-9.  
FANG Hong - rui. Technology and Standard of Deep Space Communications and Navigation [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2009, 30(3): 1-9. (in Chinese)
- [7] Space Communications Architecture Working Group (SCAWG). NASA Space Communications Navigation Architecture Recommendation for 2005 - 2030 [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2006.
- [8] 郝岩. 深空测控网[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
HAO Yan. Deep Space TT&C Networks [M]. Beijing: The National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 于志坚. 深空测控通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
YU Zhi - jian. Deep Space TT&C System [M]. Beijing: The National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [10] A Kwork. Frequency and Channel Assignments [M] // DSN Telecommunications Link Design Handbook. CA, USA: California Institute of Technology, 2009: 4-10.
- [11] Ioannis Psaras, Giorgos Papastergiou. DS - TP: Deep - Space Transport protocol [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2008: 1-13.
- [12] Akan O B, Fang J, Akyildiz I F. Performance of TCP Protocol in Deep Space Communication Networks [J]. IEEE Communication Letters, 2002, 6(11): 478-480.
- [13] 郑建华, 高怀宝, 刘正常, 等. IPS理论与技术在深空探测中的应用[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 13-17, 33.  
ZHENG Jian - hua, GAO Huai - bao, LIU Zheng - chang, et al. The Application of Interplanetary Superhighway in Deep Space Exploration Missions [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 13-17, 33. (in Chinese)
- [14] 李海涛, 李宇华, 匡乃雪. 深空探测中的天线组阵技术[J]. 飞行器测控学报, 2004, 23(4): 57-60.  
LI Hai - tao, LI Yu - hua, KUANG Nai - xue. Antenna Array Forming Technology in Deep Space Exploration [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2004, 23(4): 57-60. (in Chinese)
- [15] 帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X射线脉冲星导航原理[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1538-1543.  
SHUAI Ping, CHEN Shao - long, WU Yi - fan, et al. Navigation Principles Using X - ray Pulsars [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1538-1543. (in Chinese)
- [16] 姚文顶, 李晖, 陈立甲, 等. 深空通信中喷泉码技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 40-44.  
YAO Wen - ding, LI Hui, CHEN Li - jia, et al. Study on the fountain codes technology in deep space communications [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1): 40-44. (in Chinese)

## 作者简介:

柴霖(1969-),男,河南洛阳人,2005年于西北工业大学获博士学位,现为高级工程师,主要从事飞行器测控通信等方面的研究;

CHAI Lin was born in Luoyang, Henan Province, in 1969. He received the Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2005. He is now a senior engineer. His research concerns space TT&C communication.

Email: chailin2005@gmail.com

许秀玲(1956-),女,河南兰考人,工程师,主要研究方向为电子工程。

XU Xiu - ling was born in Lankao, Henan Province, in 1956. She is now an engineer. Her research direction is electronic engineering.

Email: hxin0909@sina.com