

ISSN 0254-6124

CN 11-1783/V

CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE



空间科学学报

Vol. 32 No. 4 第32卷 第4期

4

2012



中国科学院空间科学与应用研究中心
中国空间科学学会
科学出版社

主办
出版

空间科学学报 (KONGJIAN KEXUE XUEBAO)

目次 (第 32 卷 第 4 期 2012 年)

日球层物理和太阳系探测

- 基于 T96 模型的极尖区位形变化特性研究..... 李 晖 王 赤 张北辰 (461)
- 太阳风中小尺度磁通量管边界重联的统计研究..... 齐 羽 姚 硕 何建森 田 晖 涂传诒 (469)
- 利用多卫星观测 CIR 事件演变的统计分析..... 王晶晶 罗冰显 刘四清 龚建村 (477)
- 2010 年 4 月地球同步轨道相对论电子增强事件分析.....
..... 郑金磊 钟秋珍 陈良旭 刘四清 丁 铸 (488)
- 雷暴期间次级宇宙线粒子强度瞬时变化研究..... 徐 斌 别业广 邹 丹 (501)
- 中国典型区域 Es 特性研究..... 孔庆颜 陈 跃 柳 文 凡俊梅 (506)
- 2009 年 1 月平流层爆发性增温期间全球电离层响应的研究... 雷霄龙 符 养 薛震刚 杜晓勇 (513)
- 返回散射电离图的前沿提取方法..... 冯 静 李 雪 齐东玉 (524)
- 太阳同步轨道真空紫外光电倍增管的高能粒子屏蔽方法研究.....
..... 余迎庆 王咏梅 付利平 孔春阳 李小银 王 月 (532)

微重力和空间生命科学

- 不同重力条件下单气泡池沸腾现象的数值研究..... 赵建福 李震东 张 良 (537)
- 孤立气泡生长过程的短时微重力落塔实验研究.....
..... 李 晶 赵建福 薛艳芳 魏进家 杜王芳 郭 栋 (544)

空间探测技术

- 挠性航天器系统动力学耦合特性研究..... 陆毓颖 刘铸永 洪嘉振 (550)
- 横向连续推力小偏心率人工冻结轨道设计..... 马庆甜 李俊峰 宝音贺西 (555)
- 天基可见光传感器卫星监视地球同步带目标的轨道设计..... 唐 毅 吴美平 李 显 付晓锋 (560)
- 深空通信中高性能低复杂度的 QC-LDPC 码构造方法..... 郭 锐 胡方宁 刘济林 (567)
- 深空探测低信噪比通信研究..... 姜 斌 包建荣 (575)
- 辅助式 GPS 接收机信号发射时间恢复算法研究..... 曹 卉 袁 洪 (585)
- 导航解算中的有色噪声及其协方差矩阵自适应拟合..... 崔先强 杨元喜 张晓东 (592)
- 空间索杆铰接式伸展臂故障树分析..... 胡 明 邓国兵 陈文华 钱 萍 刘东旭 潘 骏 (598)

CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE

CONTENTS (Vol. 32, No.4, 2012)

Heliophysics and Solar System Exploration

- Variation Characteristics of Cusp Configuration Based on T96 Model *LI Hui WANG Chi ZHANG Beichen* (461)
- Statistical Studies of Magnetic Reconnections at Boundaries of Interplanetary Small-scale Flux Ropes *QI Yu YAO Shuo HE Jiansen TIAN Hui TU Chuanyi* (469)
- Statistical Analysis of Multi-spacecraft Observations on CIR Evolution *WANG Jingjing LUO Bingxian LIU Siqing GONG Jiancun* (477)
- Analysis on Relativistic Electron Flux Enhancement Event at GEO in April 2010 *ZHENG Jinlei ZHONG Qiuzhen CHEN Liangxu LIU Siqing DING Zhu* (488)
- Study of the Instantaneous Change of Secondary Cosmic Ray During Thunderstorm *XU Bin BIE Yeguang ZOU Dan* (501)
- Investigation on Es Properties in Representative Region of China *KONG Qingyan CHEN Yue LIU Wen FAN Junmei* (506)
- Observations of the Global Ionospheric Response During the January 2009 Stratospheric Sudden Warming Event *LEI Xiaolong FU Yang XUE Zhengang DU Xiaoyong* (513)
- Methods for Extracting Backscatter Ionogram Leading Edges *FENG Jing LI Xue QI Dongyu* (524)
- Radiation Shielding Method of Energetic Particles for Ultraviolet Photomultiplier of the Sun Synchronous Orbit *YU Yingqing WANG Yongmei FU Liping KONG Chunyang LI Xiaoyin WANG Yue* (532)

Microgravity Science and Space Life Science

- Numerical Simulation on Single Bubble Pool Boiling in Different Gravity Conditions *ZHAO Jianfu LI Zhendong ZHANG Liang* (537)
- Experimental Study on Growth of an Isolated Bubble Utilizing Short-term Microgravity Drop Tower *LI Jing ZHAO Jianfu XUE Yanfang WEI Jinjia DU Wangfang GUO Dong* (544)

Space Exploration Technology

- Study on Dynamic Coupling Characteristic of Flexible Spacecraft *LU Yuying LIU Zhuyong HONG Jiazhen* (550)
- Small Eccentricity Artificial Frozen Orbit Design With Transverse Continuous Low-thrust *MA Qingtian LI Junfeng BAOYIN Hexi* (555)
- Orbit Design of Space-based Visible Sensor Satellite for Monitoring the Objects in Geosynchronous Belt *TANG Yi WU Meiping LI Xian FU Xiaofeng* (560)
- A Class of QC-LDPC Codes With High Performance and Low Complexity in Deep Space Communication *GUO Rui HU Fangning LIU Jilin* (567)
- Research on Communications at Low SNRs in Deep Space Explorations *JIANG Bin BAO Jianrong* (575)
- Method for Time-of-transmission Recovery Based on Assisted-GPS Positioning *CAO Hui YUAN Hong* (585)
- Adaptive Fitting of Colored Noises and Corresponding Covariance Matrices in Navigation *CUI Xianqiang YANG Yuanxi ZHANG Xiaodong* (592)
- * Fault Tree Analysis of the Space Cable-strut Deployable Articulated Mast *HU Ming DENG Guobing CHEN Wenhua QIAN Ping LIU Dongxu PAN Jun* (598)

深空探测低信噪比通信研究^{*}

姜 斌¹ 包建荣^{1,2}

1(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

2(浙江大学浙江省综合信息网技术重点实验室 杭州 310027)

摘 要 与传统无线通信相比,深空通信由于传输损耗巨大、探测器能量受限且轨道多变等因素,须解决信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)极低、数据接收不连续及信道参数多变等难题。针对这些问题,论述了在深空探测极低 SNR 下需重点研究的深空天线组阵、编码与调制、联合解调译码、喷泉码以及其自主无线电实现等关键技术,以有效协助解决上述深空通信难题。同时,讨论了这些关键技术的发展趋势及其在未来深空通信中的应用。

关键词 深空通信,联合解调译码,自主无线电,喷泉码

中图分类号 TN 927.3

Research on Communications at Low SNRs in Deep Space Explorations

JIANG Bin¹ BAO Jianrong^{1,2}

1(School of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

2(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Information Network Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Compared with traditional wireless communications, deep space communications are challenged with difficult problems of extremely low Signal-to-Noise Ratio (SNR), high transmission delay and discontinuous reception of data which are mainly caused by large transmission loss, limited energy and changeful trajectory of the space probe, etc. Faced with these problems, the researches on several key techniques at extremely low SNR in deep space communications are summarized. The techniques include deep space antenna arrays, coding and modulation, joint demodulation and decoding, fountain coding and the autonomous radio and so on to help solve the above problems. Finally, the development trends and related applications of them are prospected.

Key words Deep space communications, Joint demodulation and decoding, Autonomous radio, Fountain codes

^{*} 国家自然科学基金项目(61001133, 61102066),中国博士后科学基金(2011M500999)和浙江省综合信息网技术重点实验室开放课题(201101)共同资助
2011-11-25 收到原稿,2012-05-25 收到修定稿
通信作者:包建荣(ibaojr@zju.edu.cn)

0 引言

深空探测因其在科技、经济等方面所具有的重要意义,已成为当前研究的热点.深空通信是实现深空探测的重要保障,与传统无线通信相比,其将面对传输距离远、探测器能量有限且运动多变等问题.尤其是,深空通信需解决极低信噪比(SNR)的通信难题,即在极低SNR下如何有效可靠地实现解调、传输中断后深空通信链路的快速重建等问题^[1].

为解决上述深空通信难题,广泛开展了极低SNR通信的相关技术研究,并已取得高效的编码调制、联合解调译码和自主无线电实现结构等关键技术.这里将分别论述深空通信中极低SNR通信面临的难题,综述联合解调译码、喷泉码、深空天线阵和自主无线电等若干关键技术研究现状及其在深空通信中的应用,进而就发展趋势进行展望.

1 深空通信结构及在极低SNR通信中面临的问题

1.1 深空通信系统结构

深空通信系统主要由图1所示的信源、信宿、信源编解码、信道编解码、调制解调、天线及其组阵等构成.深空通信所面临的极低信噪比等问题,对该系统中的天线组阵与弱信号检测、包含同步等的解调、

信道译码等功能模块提出了很高要求.

1.2 深空极低SNR通信面临的困难

由于深空通信距离遥远,信号接收功率因空间损耗大而非常低,使得SNR也极低^[1].SNR、比特信噪比(E_b/N_0)和符号信噪比(E_s/N_0)关系如下:

$$S/N = R_b/B \times E_b/N_0 = R_s/B \times E_s/N_0, \quad (1)$$

$$E_b = R_s/\ln M. \quad (2)$$

其中, S 和 N 分别为信号与噪声功率, E_b 和 E_s 分别为单位比特和单位符号的能量, N_0 为噪声功率谱密度, R_b 为信息传输速率, B 为传输带宽, M 为调制阶数.在给定调制后, R_b/B 和 R_s/B 为固定值.

传统深空通信解调和译码都是独立实现的^[2].接收机解调所需的解调门限可用SNR来衡量.在调制方式, S , B 和 N_0 不变时,为了保证可靠解调所需 E_s/N_0 ,可通过降低符号传输率来降低传输带宽 B .由噪声功率计算公式 $N = B \times N_0$ 可知, N 将下降,使SNR达到解调门限要求.但该方案因 E_s/N_0 较高,不能充分利用低 E_s/N_0 下信道码能获得的高编码增益,导致传输效率低下.

为了充分获得信道码带来的高编码增益并使系统以接近香农限的方式传输,需使解调器工作在较低的 E_s/N_0 下,并采用低码率信道码来获得较大的编码增益.但低 E_s/N_0 将不能达到传统独立解调所需

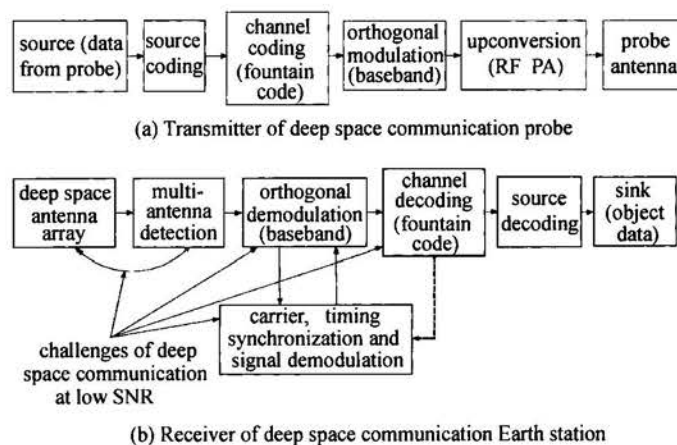


图1 深空通信系统的一般模型

Fig. 1 General model of deep space communication

的解调门限, 而使整个系统失效. 解决该方法之一是采用译码辅助的解调来突破单独解调所需的解调门限限制^[3]. 在 E_b , R_b , B , N_0 和 M 都不变的情况下, 通过降低码率 R , 可得到工作在更低 E_b/N_0 下的信道码. 并可采用该码的译码结果来辅助实现同步等解调算法, 实现低 E_b/N_0 下的联合解调译码, 使联合系统的解调门限比传统单独解调所需的解调门限大为降低. 解调实现过程为, 在解调参数估计较准确并将该参数用于解调补偿的情况下, 由编码后符号的内在相关性, 在信道码译码范围内可获得较好的译码结果. 但该联合解调译码存在复杂度过高的问题^[3], 且低 E_b/N_0 要求设计极低码率与长码长信道码, 进一步增加了系统的复杂度.

1.2.1 深空信道复杂且具衰落性

探测器在月球及其他行星上工作时, 其自身温度和姿态变化等情况十分复杂. 受太阳风等宇宙射线影响, 深空信道具有时变衰落特性, 即信噪比变化快且大, 造成要求正确 SNR 信息才能有效工作的译码非常困难. 美国喷气推进实验室 (JPL) 测得了在实际火星探测中时变衰落信道的典型 SNR 变化情况^[4], 该研究表明, 深空时变衰落信道的 SNR 按时间变化比较快且大, SNR 波动范围达 10 dB 以上.

由于探测器运动速度快, 轨道多变, 载波频率高等原因造成高动态多普勒效应, 增加了较低速率信号的接收难度. 同时, 探测器能量有限, 需充分利用其发射功率及效率. 所以, 目前探测器主要采用高功率放大器 (HPA), 例如行波管放大器 (TWTA) 或固态功率放大器 (SSPA) 等. 但当其工作在最大功率效率的非线性区时, 将导致非线性效应, 降低传输性能.

1.2.2 深空链路中断且重建困难

对于深空通信, 受探测器运动速度、轨道不规则、收发双方相对角度变化大、天体阴影等因素影响, 地面站与探测器间的通信易发生中断^[1]. 这将引起突发通信, 导致每次通信链路重建都需重新进行同步、多个未知解调参数估计等信号接收处理. 但在低 SNR 下, 很难实现快速解调处理, 使得通信链路快速重建非常困难.

2 深空通信极低 SNR 通信研究

为解决上述深空通信难点, 目前主要研究了天线组阵、调制与编码、联合解调译码、喷泉码和自主无

线电等关键技术.

2.1 天线组阵技术

为克服深空通信因距离遥远导致的传输衰减, 需增大地面站天线口径来提高微弱信号的接收. 目前最大天线口径的设计已接近极限, 而多天线信号合成的天线组阵技术成为提高信号信噪比的有效手段. 天线组阵主要指多个天线组成阵列, 将各天线接收的同源信号合成, 来改善接收信号的信噪比, 以提高深空通信性能^[5]. 相对于单天线系统, 天线组阵能获得更高的数据率, 操作性更强, 成本也更低. 以上优势使得天线组阵成为深空通信的关键技术之一. 其主要包括阵址选择、阵元口径和数量设计、阵构型设计及信号处理等技术^[6-7].

阵址选择及布局是组阵系统的关键. 考虑不间断连续跟踪通信的需求以及天线增益和系统噪声温度的影响, NASA 建议在地球南北纬 $30^\circ \sim 40^\circ$ 间, 间隔 120° 经线各建一阵. 因地面接收信号微弱, 对阵周围电磁环境要求极高. 阵址必须避开人口稠密区, 以减少电磁干扰. 为对本地天气形成分集 (针对 Ka 波段通信), 可将阵划分为相隔较远 (例如几百公里) 的天线簇. 各簇均有多天线阵元、信号合成器及控制室、气象站、通信系统等基础设施. 在该布局中, 信号先在各簇内合成, 然后在阵级上优化合并.

阵元直径取决于天线阵的成本. 选择大天线时, 阵元数少, 成本主要取决于天线. 天线直径较小时, 所需阵元数多, 此时天线成本显著下降, 但合成多个阵元信号需要大规模信号处理的电子设备, 导致成本增加. NASA 专门研究了该天线阵成本的模型, 结果表明最优阵元直径为 12 m ^[8]. 另外, 阵元数取决于任务数据速率和阵元直径. 当前, 可在每隔 120° 的经线处各建一个 $100\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的阵. 但未来还应能同时处理多目标, 规模还需具有可扩展性.

阵构型的要素是大小、形状和阵元间隔. 阵信号合成需考虑信号相位, 而其主要影响因素是地球对流层水蒸气的波动. 若阵元均位于大气相位波动保持相关的空间尺度内, 则该影响因素可用信号处理中的相关计算来消除. 该尺度与阵址、天气、时间有关, 典型值为几百米. 其决定了阵中最长基线长度, 即阵的大小. 阵元间隔选取要考虑大气相位变化和阵元间遮挡的影响, 以免造成低仰角时的合成损失. 通常可取为二倍阵元直径到几百米. 天线阵形状的设计需要考虑在最长基线约束下容纳更多的阵元, 同时使阵合

成波束的旁瓣较低,以减少太阳以及飞行器附近行星等天体热辐射对系统噪声的影响。

天线阵的基本原理是用天线、微波或射频子系统接收目标能量,形成中频信号。而中频或基带信号通过信号处理子系统进行滤波、数字化、采样等处理,将各路信号的时间延迟和相位延迟对齐并合成,形成最终的阵输出信号。因此,阵元信号处理是组阵的关键。天线组阵系统可通过增加口径效率,超过现有最大口径天线的性能。该系统可用性更高、维护灵活且工作可靠。因此,在深空通信中,可用天线阵来取代超高成本的单一大天线,并提高系统的可靠性与灵活性。天线组阵对中国未来深空探测具有较高的借鉴意义。例如可利用现有地面测控网多个天线组阵,接收来自月球、火星等深空探测器发回的遥测和遥感信号,获得较高的接收信号信噪比,得到高质量的数据和图像信息。

2.2 调制与编码技术

2.2.1 调制技术

深空信道带宽丰富,允许使用低频带利用率和高功率效率的二进制调制。目前,深空通信系统通常采用了二进制相移键控(BPSK)与M元频移键控(MFSK)等调制。例如,2004年美国火星探测器(MER)采用了BPSK(下行)和MFSK(上行)调制,工作在8.4 GHz的X波段,最大传输速率为168 kbit/s^[2];2006年火星探测系统(MRO)采用了正交相移键控(QPSK)(下行)和MFSK(上行)调制,工作在32 GHz的Ka波段,传输速率达12 Mbit/s^[2]。由于接收机中频滤波器带宽限制,通常需采用多通道频分复用使用来使用较宽的频带。受发射端HPA非线性幅度/相位效应影响,每个通道对应一个频带受限的非线性信道。带限特点要求信号对邻近通道不造成干扰,而包络起伏的信号经非线性传输后将引入相位噪声和频谱扩展。因(准)恒包络调制在带限下,允许HPA工作在非线性区,而不必回退功率,可采用抗非线性效应的(准)恒包络调制^[9]。主要包括两种类型。一是恒包络连续相位调制(CPM),例如正弦频移键控(SFSK)、高斯滤波最小频移键控(GMSK)、成型偏移QPSK(SOQPSK)等连续相位调制^[9],二是准恒包络调制,例如Feher专利的QPSK(FQPSK),偏移QPSK(OQPSK)的改进调制等准恒包络调制^[10]。

为了适应深空恶劣信道,深空通信在频带丰富

的Ka波段也须采用适应非线性传输的(准)恒包络高带宽效率调制。当前深空调制技术的发展方向是研究窄频谱主瓣及小频谱旁瓣的(准)恒包络连续相位调制,例如设计小包络波动的TCM结构等方案。对于在火星探测时的极低SNR通信,可采用功率效率相对较高的GMSK恒包络调制及FQPSK准恒包络调制,以有效克服非线性传输效应。

2.2.2 编码技术

除HPA非线性效应外,在每个较短时刻内深空信道可认为是高斯白噪声(AWGN)信道^[4,11]。该特点使得在AWGN下,信道码的理论设计能直接用于实际系统。最初,深空信道码采用了卷积码及级联码^[2]。1989年美国开展的伽利略空间计划中使用了卷积码(15, 1/4),1997年美国火星全局调查者系统中采用了卷积码(7, 1/2)和RS码(255, 223)的级联码。随着Turbo码的提出^[12]和低密度校验(LDPC)码的重新发现^[13],信道码的性能非常接近香农限。其在深空通信中获得应用。例如2006年美国的MRO系统中就采用了Turbo码(8920, 1/6),并获得了较高的性能^[2]。Turbo码在1999年被CCSDS推荐为深空信道码的方案之一^[14]。目前,该码设计的主要问题是优化交织器的参数和分量码,以得到低误码平底和低复杂度的译码实现方案。LDPC码具有稀疏奇偶校验矩阵结构并采用迭代译码的线性分组码。相对于Turbo码,LDPC码具有类似接近香农极限的译码性能,且其译码速度快,容易实现并具有极低的误码平底^[13]。因此,LDPC码将成为最有前景的深空信道码方案。

LDPC码在码长较长时,性能比Turbo码好。但全随机设计的LDPC码复杂度与码长成二次方关系,过长的码长将造成其编码过于复杂,难以实现。解决方法是采用兼有Turbo码低编码复杂度和LDPC码低译码复杂度的类Turbo码。这类码通过LDPC校验矩阵的半随机半结构化结构,实现与码长线性的低复杂度编码。但代价是性能比全随机设计的最佳LDPC码差0.5~1 dB。这类码主要有不规则重复累积(IRA)码,扩展的IRA(eIRA)码,累积重复累积(ARA)码等^[15]。此外,在ARA码的基础上,JPL还发展了基于原模图结构的低复杂度和低误码平底的LDPC码,即AR4JA码^[16]。该码采用原模图构造了校验矩阵的框架,并用若干简单的ARA码子矩阵构造整个校验矩阵。当前,该码已被采纳

到 CCSDS 实验规范之中^[16]。该规范给出了该码在不同码率下的性能仿真结果, 以便应用于深空通信。此外, 在 ARA 码的基础上, 还可通过不同累加次数及校验和累加次序的重排列, 来构造综合性能较好的结构化重复新交织累加码^[17]。

信道码除了性能外, 还需考虑码长, 以判断是否满足实际所需的性能、复杂度和延迟等综合要求。JPL 也给出了在误码字率为 10^{-4} 时, 码长与译码所需信噪比的关系^[18]。在实际深空通信中, 可由码长、复杂度、延迟等要求, 合理选择满足要求的信道码。同时, 码选择也需考虑与(准)恒包络调制联合设计等因素, 实现较高性能的联合编码调制方案。

2.3 联合解调译码技术

在深空通信中, 接收机首先将面临极低 SNR 解调问题。在该条件下, 采用有限长导频或判决导向的传统同步都将不能有效工作。而结合信道码的迭代同步可有效解决该问题。除同步外, 接收机还将遇到因深空通信 SNR 变化大及快而引起的参数变化大等问题, 需要采用低 SNR 下高效的译码辅助信号参数估计。而且, 包含上述译码辅助思想的联合解调译码在深空通信中已有典型应用, 例如 JPL 提出了 1/31 码率 Turbo 码及码辅助同步, 实现了 E_s/N_0 低至 -15.8 dB 下的可靠通信^[19]。

联合解调译码可将信道译码获得的软信息反馈给载波及定时同步环, 使其较准确地判断低 SNR 下的同步与参数估计信息。联合解调译码结构如图 2 所示。

图 2 表明, 迭代同步方法主要包含以下 3 类: ①直接将译码后较准确的符号作为参考序列来辅助

同步^[3], ②由 Turbo 码等最大后验 (MAP) 迭代译码, 通过查找给定误差下性能最好的幸存路径实现同步^[3], ③将译码所得软信息经处理后反馈给同步环, 来判断和纠正同步偏差^[20-21]。方案①只将译码后信息简单代替了同步中的参考序列。该方案收敛慢, 性能受限于同步算法, 易受突发信号干扰, 只能用于同步的跟踪阶段。方案②采用了最复杂的 Turbo 码 MAP 译码, 延迟和计算复杂度都相对最大。但在该译码基础上用搜索幸存路径所估计的性能相对最好。方案③主要有两类实现方法。第一类方法通过对需估计的同步偏差参数用最大期望 (EM) 准则推导该参数的迭代更新公式, 并将每次迭代译码所得的软信息用于该更新公式更新同步偏差参数, 以达到最佳估计^[20]。该方法性能较好, 但复杂度较高, 且在较大同步偏差下, 迭代时间长, 计算量大, 并有可能不收敛而失效。第二类方法仅适用于 LDPC 系统。将若干次 LDPC 迭代译码的软信息进行硬判决, 并将该判决结果满足 LDPC 校验矩阵方程约束的程度, 作为判断是否搜索到较准确同步偏差的依据^[21]。该方法性能较好, 与理想系统仅相差 0.2 dB , 但复杂度仍较高且在较大频偏下, 大范围搜索导致计算量增加^[21]。迭代同步还可检测并纠正低 SNR 下传统同步易出现的载波或定时的周期滑动问题, 即跳周及滑码。编码后的符号序列间存在约束, 如果接收中发生了跳周, 该序列在译码时将不满足译码约束条件。该特性可用于判断是否出现跳周, 并在发生跳周时, 对译码前输入数据进行相位补偿等来纠正。研究表明^[22], 在低 SNR 下, 4/5 码率的 LDPC 码系统采用该方法可获得接近理想系统 0.1 dB 的性能, 即该方法有效。滑

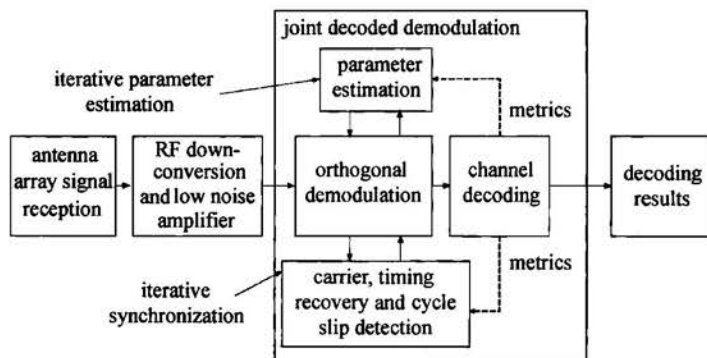


图 2 深空通信中联合解调译码的结构

Fig. 2 Diagram of joint decoded demodulation in deep space communication

码与跳周的解决方法类似,也可以利用信道码的内在约束来辅助实现检测与纠正。

此外, SNR 误估计将降低信道译码的性能。特别是 SNR 估计过低时,译码性能将急剧恶化^[23]。因此,为充分获得编码性能,还需得到准确的 SNR 等信道状态信息,即需要对 SNR 进行估计。其中,一种在低 SNR 下仍非常有效的估计算法是译码辅助的 SNR 估计算法。该算法主要有两类方案。一类方案是将译码后的结果代入 SNR 估计的计算公式,并将该计算结果反馈给 LDPC 译码^[24]。该方案需要 LDPC 译码结果参与 SNR 估计,导致 SNR 估计时间过长。另一类方案采用 EM 准则将 LDPC 译码软信息用于 SNR 估计^[25]。该方案速度快,仅需一次 LDPC 迭代译码就能收敛,复杂度较高但仍可以接受。

在深空通信极低的 SNR 条件下,接收机首先需实现有效解调,才能进行译码等处理。通过解调和译码的联合处理,可有效解决传统解调门限过高的问题。采用 LDPC 码的联合解调译码实现复杂度较低,易实现,可优先考虑该方案。另外,译码辅助解调的收敛范围较窄,还需先用传统低复杂度解调算法进行粗估计,以加快联合解调译码过程。

2.4 喷泉码技术

深空通信面临时延大, SNR 极低,误码率和丢包率大,上下行链路带宽不对称和链路易中断等困难,使传输误码超出信道码的纠错能力,这些特点体现出信道的删除特性。喷泉码具有不需反馈信道,无需 ARQ 就能实现可靠传输的优势,适用于深空通信。它是一种分组长度无限的编码方式,又称无码率码。该码每个分组都包含全局数据的部分信息。当分组数量达到一定程度后,就可恢复全局数据^[26],使其不需传统通信 ARQ 机制就能实现可靠传输,极大提高了传输效率。另外,其能以任意小概率逼近香农极限,有助于降低接收系统对信噪比的要求^[27]。所以,喷泉码非常适用于误码率高和链路易中断的深空通信场合^[26]。

喷泉码根据相应的算法对原始数据进行异或等处理,得到 K 个待发送的数据包,并对接收者像喷泉一样喷数据单元。如接收者成功接收 $N > K$ 个数据,且接收的数据满足一定要求,就能恢复出原始数据。喷泉码译码必须多接收的数据相对于原 K 个包的比值 $(N - K)/K$ 为喷泉码的开销。其从接收到

的数据包中恢复原始数据的概率大于 $1 - 2^{-(N-K)}$,并具有较小的编译码复杂度。喷泉码的重要特征是无码率,即从原信息部分可获得任意数量的编码符号。接收者只要获得足够多的编码符号,就能成功还原信息符号^[28]。因此,喷泉码只需前向链路而不需反馈信道,能简化或省略通信协议中握手过程,缩短数据传输时延,提高传输效率。

喷泉码主要包括随机线性喷泉码、LT 码和 Raptor 码^[26]。随机线性喷泉码能接近香农极限,但编译码计算量最大,通常作为喷泉码的理论模型进行研究。Luby 提出的 LT 码是第一个实用的喷泉码。其基于不规则二分图构造的具有稀疏校验矩阵结构的随机线性喷泉码^[29],保留了随机线性喷泉码的优点,并降低了编译码的复杂度。决定 LT 码性能的关键是概率分布 $\rho(d)$ 。在均匀分布中所有数据包的概率分布值均为 $\rho(d) = 1$,不能产生性能较好的编码。一种可行的方案是采用鲁棒孤波分布^[26,29]。Raptor 码源于 LT 码,但其在进行 LT 编码前需要进行预编码处理,以提高性能^[30]。该码首先对原始信息进行预编码,再采用较弱的 LT 码对数据进行 LT 编码并发送到信道。LT 码能以很高的概率恢复大多数符号,而剩余符号依靠预编码恢复。通过联合优化这两部分的码率等参数, Raptor 码可在 LT 码相同的解码开销下,获得更高的解码成功率。

在深空通信喷泉码的设计中,除需考虑深空信道传输不连续、丢包率大等特点外,还需根据深空探测器距离远近不同引起的传输延迟差异,进行包长度等参数的优化调整和设计,以获得满足深空通信要求的高性能喷泉码。因喷泉码具较好的性质,将其与 LDPC 码联合设计可得到性能和复杂度更优方案。例如,采用 CCSDS 标准 1/2 码率 LDPC 码,该联合方案相对于只用 LDPC 码的方案,提高了 0.06~0.44 dB 的编码增益^[31]。

2.5 自主无线电技术

在深空探测中还存在不同体制的探测器间需要相互通信及因信道恶劣造成通信中断后的快速链路重建等困难。为解决这些问题, JPL 提出一种无需人工干预就能自主识别并处理无线电信号的自主无线电技术^[32]。JPL 还总结了适用于深空通信的自主无线电技术^[33]。中国科学院空间科学与应用研究中心也开展了这一技术的研究,并提出一种参数估计的迭代层次结构模型^[34]。自主无线电在传输延迟大的深

空通信中尤其重要。它在深空未知无线电环境下不需地面干预就能自动实现无线电参数的识别和配置,并能快速建立中断的通信链路。

自主无线电针对未知的信道环境,需识别、估计接收信号的参数并用于信号的有效检测。但信号参数识别和估计存在循环问题。例如,频率与相位两个参数估计互为前提,即相对准确的对方估计有助于该参数自身的估计。因此,如何确定参数估计顺序,建立合理的自主无线电参数估计次序十分关键。JPL 提出了自主无线电参数估计模型,并论述了需要解决的关键技术。目前,大多数参数估计方法都需要预知某些参数,距未知无线电信号环境的应用还有不小差距。中国科学院空间科学与应用研究中心提出的自主无线电参数估计的迭代层次结构给出了解决该问题的框架。其通过不同层参数估计消息的交互和迭代,实现了未知信号的自主接收和处理。但该方法要达到实用还需进一步优化参数估计算法,在保证参数估计性能的同时,使算法复杂度降低,此外,需保证层间参数估计所传递消息的可靠性,以保证参数估计的收敛性。

自主无线电中信号参数估计主要分为以下 4 类^[32-33]: 载波相位跟踪、调制方式识别、SNR 估计及载波频率跟踪。针对互为前提的循环信号参数

估计问题,还需将参数估计计划分为粗估计和精估计两个阶段,并根据各参数估计偏差对系统性能影响的大小,合理调整各参数的估计次序,得到联合参数估计与译码的迭代层次结构模型^[33]。因频率偏差对系统影响最大,对它的估计要先于相位偏差等的估计。而定时偏差估计受载波相位偏差影响较小,对它的估计可先于相位估计。自主无线电技术中的参数估计可先依次进行频率偏差, SNR 等粗估计,然后将参数估计与信道译码联合,通过它们之间的消息传递,实现联合精参数估计与译码。深空自主无线电系统的迭代层次结构模型如图 3 所示。

图 3 所示的模型是一个从上至下的 6 层迭代模型,即第 1 层为调制指数估计层,以下依次为粗载波频率估计层,包含数据速率、SNR、脉冲形状及粗定时等参数的混合估计层,包含调制方式、精粗载波频率、精定时和载波相位等参数的混合估计层,帧同步估计层,信道译码层。每层估计结果均以消息的形式传输到下一层,下层消息也可向上传递,同层之间可横向或纵向传递,以实现消息迭代。如果调制方式的初始估计在非相干情况下进行,一旦获得载波相位信息,就可采用相干解调来提高解调性能。各参数的估计首先需要区分相干和非相干、抑制载波和残留载波等调制类型,而调制指数估计是识别这些调制类型

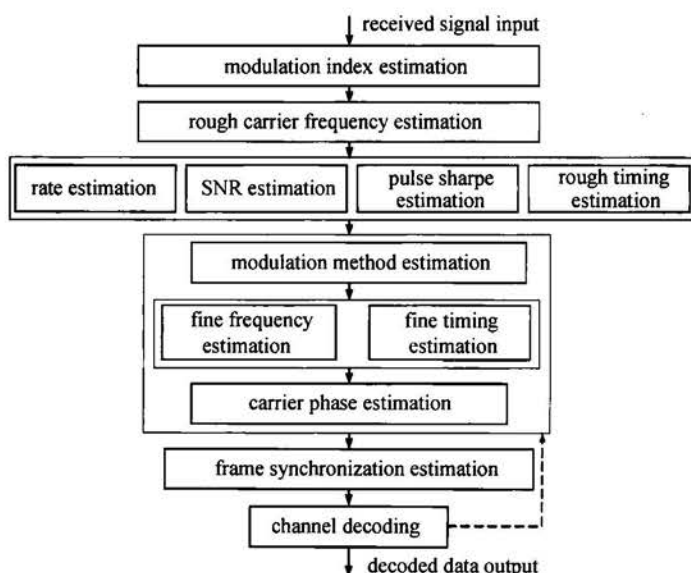


图 3 深空通信中自主无线电系统的层次结构模型

Fig. 3 Layered model of autonomous radio in deep space communication

的关键, 所以将其作为顶层. 第 3 与第 4 层内的参数之间关系比较紧密, 需进行联合的横向或纵向迭代. 在对第 4 层内的参数进行精估计时, 可将判决可靠性较高的信道译码软信息辅助这些参数的精估计, 这样可获得更高精度的参数估计, 该结果反过来也可促进译码的可靠性, 最终实现联合参数估计与信道译码.

自主无线电技术是非常复杂的深空通信系统实现技术, 其参数估计还需进一步完善. 该技术可与信道译码相结合, 以迭代消息传递的方式实现复杂度适中、性能优异的参数估计、译码等联合检测处理. 随着深空探测的发展, 自主无线电技术继续向高性能、低复杂度及高智能等方向发展, 并将成为未来深空通信系统的关键实现方案.

在深空通信中, 自主无线电技术的关键问题是如何快速实现中断后深空通信链路的重建, 以提高传输效率. 当前主要问题是快速捕获并跟踪无线电信号的参数. 例如, 对采用 MSK 调制和 LDPC 编码的系统, 可先用快速傅里叶变换等频率估计算法进行载波频率的快速粗估计. 鉴于 MSK 可以用非相干解调实现, 且其无需载波同步等解调信息, 则可用 MSK 非相干解调与较短的同步导频数据及一些定时估计的盲算法进行粗定时估计. 进而可将系统工作模式切换到相干解调, 利用传统判决反馈环等, 对相位偏差、SNR

等同步参数进行粗估计, 并将导频数据用于帧同步. 最终实施联合的 LDPC 译码辅助解调, 实现精解调参数估计与 LDPC 译码, 进行快速联合解调译码的跟踪, 以完成深空通信链路快速有效的重建. 该方案可用图 4 表示^[35].

在该过程中, 如果联合解调译码发现粗解调参数估计有误, 还需反馈给粗估计算法, 重新进行粗估计. 而且, 需合理排序各解调参数的估计, 实现粗估计与精估计的结合, 以便得到估计速度与估计精度最佳的自主无线电实现方案.

3 深空探测中极低 SNR 通信的发展趋势

深空通信经过 50 多年的发展, 技术性能都已接近极限. 若对它们继续进行改进, 性能增加不大而复杂性将急剧增加. 对于信道码, 采用较低编译码复杂度的类 Turbo 码已距香农极限约 0.5 ~ 1 dB^[12-13]. 为了使该码更接近香农极限, 即继续提高 0.2 ~ 0.5 dB 的性能, 需要大大增加编码的码长及调整编码结构等, 造成复杂度急剧增加, 甚至不能实现而失去意义. 联合解调译码算法的复杂度仍较高, 还需进一步研究低复杂度的实现方案, 特别是充分利用译码的迭代特

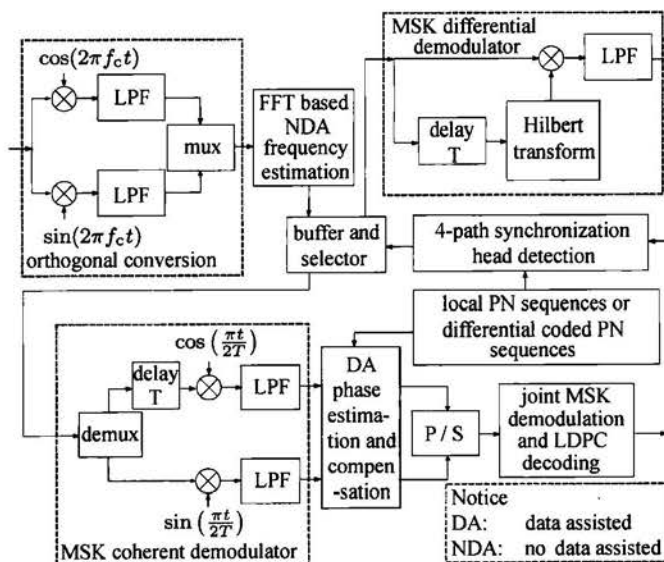


图 4 深空通信中 MSK 自主无线电系统的迭代解调模型

Fig. 4 Iterative demodulation model of MSK based autonomous radio system in deep space communication

性, 将参数估计与同步等解调处理完全融合到译码的迭代过程中. 因此, 对极低 SNR 深空通信的研究还需兼顾性能与复杂度, 以提高深空通信的综合性能.

根据信息论观点, 将系统中各分立部分联合处理, 可减少它们之间因分别单独处理而引起的额外互信息损失^[36]. 上述深空通信技术现状中的联合解调译码等部分均已体现该思想, 但联合方式还不够紧密, 需在统一的信息处理平台上实现复杂度适中且联系更紧密的联合系统方案. 对于该方案实现的构想, 可将调制、编码和自主无线电等技术统一到迭代接收机^[37]的平台上, 即将经过优化设计的方案, 以多变量统一迭代方式进行协同信号检测, 并通过一些智能优化算法和知识库等得到较低复杂度的高性能迭代接收机. 当前实现该构想的一个可能途径是采用因子图^[38]进行联合分析和设计. 但该构想的复杂度非常高, 还需进一步研究, 最终实现全协同的高效深空通信.

4 结论

介绍了深空探测中极低 SNR 通信所采用的编码调制、联合解调译码、喷泉码、天线组阵及自主无线电实现等若干关键技术及其在深空通信中的应用. 同时, 讨论了这些关键技术的改进及其联合优化的发展趋势. 对于深空通信, 实现极低 SNR 下通信还面临诸多困难, 例如降低复杂度等. 目前仍需要对现有技术进行深入的联合来有效克服这些困难, 以便在深空探测中实现高效可靠的极低 SNR 通信.

参考文献

- [1] Zhang Naitong, Li Hui, Zhang Qinyu. Thought and developing trend in deep space exploration and communication [J]. *J. Astron.*, 2007, **28**(4):786-793. In Chinese (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)
- [2] Xiao Song, Li Yunsong, Bai Baoming, et al. The key technologies of deep space communications [J]. *China Commun.*, 2006, **4**(6):82-94
- [3] Barry J R, et al. Iterative timing recovery [J]. *IEEE Signal Proc. Mag.*, 2004:89-102
- [4] Moribito D, Hastrup R. Communications with Mars during periods of solar conjunction: initial study results [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002:1271-1281
- [5] Rogstad D, Mileant A, Pham T. Antenna Arraying Techniques in the Deep Space Network [M]. Hoboken: Wiley, 2003
- [6] Yao Fei, et al. Key techniques and development trend of antenna arraying for deep space communication [J]. *J. Astronaut.*, 2010, **31**(10):2232-2238. In Chinese (姚飞, 等. 深空通信天线组阵关键技术及其发展趋势 [J]. *宇航学报*, 2010, **31**(10):2232-2238)
- [7] Li Haitao, et al. Researches on antenna arraying technology and its applications to deep space TT&C system [J]. *J. Spacecr. TT&C Tech.*, 2008, **27**(3):10-14. In Chinese (李海涛, 等. 天线组阵技术研究及其在我国深空测控通信系统中的应用 [J]. *飞行器测控学报*, 2008, **27**(3):10-14)
- [8] Gatti M. The Deep Space Network Large Array [R]. Interplanetary Network Progress Report 42-157, 2004
- [9] Simon M K. Bandwidth-Efficient Digital Modulation With Application to Deep Space Communications [M]. New Jersey: Wiley, 2003
- [10] Lin Yongzhao, Liu Xuewen. Two classes of modulation schemes for deep space communications [J]. *China Commun.*, 2006, **4**(6):95-103
- [11] Andrews K S, et al. The development of Turbo and LDPC codes for deep-space applications [J]. *Proc. IEEE*, 2007, **11**:2142-2156
- [12] Berror C, Glaviex A, Thitimajshima P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes [C]//Proc. ICC'1993, 1993:1064-1070
- [13] Mackay D J. Good error-correcting codes based on very sparse matrices [J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1999, **45**(45):399-431
- [14] Calzolari G P, Vassallo E, Habinc S. CCSDS telemetry channel coding: the turbo coding option [C]//5th IEE CCSDS Workshop New Technologies, New Standards. London: IEE, 1998, **5**:1-6
- [15] Ryan W E, Lin S. Channel Codes: Classical and Modern [M]. New York: Cambridge University Press, 2009
- [16] CCSDS. Low Density Parity Check Codes for Use in Near-Earth and Deep Space [S]. Orange book, 2007
- [17] He Shanbao, et al. Research on novel channel encoding techniques applied in deep space communications [J]. *J. Tel., Track. Command*, 2009, **30**(4):11-14. In Chinese (何善宝, 等. 深空通信新型信道编码技术研究 [J]. *遥测遥控*, 2009, **30**(4):11-14)
- [18] Dolinar S, Divsalar D, Pollara F. Code Performance as a Function of Block Size [R]. TMO Progress Report 42-133, 1998. 1-23
- [19] Hamikins J, Divsalar D. Coupled receiver-decoders for low rate Turbo codes [C]//2003 Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2003). Yokohama: IEEE, 2003:381-381
- [20] Noels N, et al. A theoretical framework for soft-information-based synchronization in iterative (turbo) receivers [J]. *EURASIP J. Wireless Commun. Network*,

- 2005:117-129
- [21] Valles E L, *et al.* Carrier and timing synchronization of BPSK via LDPC code feedback [C]//Proc. 40th Asilomar Conf. on Signal, System and Computers, 2006:2177-2181
- [22] Jin X, Kavcic A. Cycle-slip-detector-aided iterative timing recovery [J]. *IEEE Trans. Magn.*, 2002, **38**:2292-2294
- [23] Summers T A, Wilson S G. SNR mismatch and online estimation in turbo decoding [J]. *IRE Trans. Commun.*, 1998, **46**(4):421-423
- [24] Reed M C, Asenstorfer J. A novel variance estimator for turbo-code decoding [C]//Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC1997). Montreal, Canada: IEEE, 1997:173-178
- [25] Wu N, Wang H, Kuang J M. Code-aided SNR estimation based on expectation maximization algorithm [J]. *Elec. Lett.*, 2008, **44**(15):123-124
- [26] Li Hui, Yao Wending, Zhang Naitong. Fountain codes in deep space communication [J]. *Tele. Eng.*, 2008, **48**(4):8-12. In Chinese (李晖, 姚文顶, 张乃通. 深空通信中的喷泉编译码技术 [J]. 电讯技术, 2008, **48**(4):8-12)
- [27] Yao W, Chen L, Li H, Xu H. Research on fountain codes in deep space communication [C]//The 2008 International Congress on Image and Signal Processing (CISP2008), 2008:219-224
- [28] Hyytia E, Tirronen T, Virtamo J. Optimizing the degree distribution of LT codes with an importance sampling approach [C]//Proceedings of the 6th International Workshop on RES, 2006:56-66
- [29] Puducheri S, Kliwer J, Fuja T E. The design and performance of distributed LT codes [J]. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2007, **53**(10):3740-3754
- [30] Luby M. LT codes [C]//Proceedings 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 2002:271-282
- [31] Zhu Hongjie, Pei Yukui, Lu Jianhua. Applying fountain codes in deep space communication [J]. *J. Internet Tech.*, 2008, **1**(1):11-14. In Chinese (朱宏杰, 裴玉奎, 陆建华. 喷泉编码在深空通信中的应用 [J]. 网络技术期刊, 2008, **1**(1):11-14)
- [32] Hamkins J, *et al.* An overview of the architecture of an autonomous radar [R], Interplanetary Network IPN Progress Report 42-159. Los Angeles, California: Jet Propulsion Laboratory, 2004. 1-14
- [33] Hoboken N J. Autonomous Software-Defined Radio Receivers for Deep Space Applications [M]. New Jersey: Wiley, 2006
- [34] Hu Shengbo, Mengxin, Yao Xiujuan, *et al.* Key technologies of autonomous radio for deep space network [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(6):513-518. In Chinese (胡圣波, 孟新, 姚秀娟, 等. 深空探测中的自主无线电关键技术 [J]. 空间科学学报. 2007, **27**(6):513-518)
- [35] Bao Jianrong, Zhan Yafeng, Yin Liuguo, Lu Jianhua. Design of efficiently joint eIRA coded MSK modulation systems [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Ele. Syst.*, 2012, **48**(2):1636-1642
- [36] Cover T M, Thomas J A. Elements of Information Theory [M]. New Jersey: Wiley, 2006
- [37] Wymeersch H. Iterative Receivers Design [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [38] Worthen A P, Stark W E. Unified design of iterative receivers using factor graphs [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2001, **47**(2):843-849

《空间科学学报》第七届编辑委员会

Editorial Committee of Chinese Journal of Space Science

主 编 (Editor in Chief) 刘振兴 (LIU Zhenxing)

顾 问 (Advisors) A Nishida G Haerendel M G Kivelson Winghuen Ip (叶永焯) Shitsan WU (吴式灿)

常务副主编 (Executive Deputy Editor in Chief) 吴 季 (WU Ji)

副主编 (Deputy Editor in Chief)

顾逸东 (GU Yidong)

Joe KAN (甘如石)

刘秋生 (LIU Qiusheng)

欧阳自远 (OUYANG Ziyuan)

濮祖荫 (PU Zuyin)

孙辉先 (SUN Huixian)

王 赤 (WANG Chi)

肖 佐 (XIAO Zuo)

编 委 (Members of Editorial Committee)

曹晋滨 (CAO Jinbin)

常 进 (CHANG Jin)

陈洪滨 (CHEN Hongbin)

陈诺夫 (CHEN Nuofu)

陈 耀 (CHEN Yao)

代树武 (DAI Shuwu)

邓晓华 (DENG Xiaohua)

董晓龙 (DONG Xiaolong)

窦贤康 (DOU Xiankang)

丰美福 (FENG Meifu)

冯学尚 (FENG Xueshang)

龚建村 (GONG Jiancun)

韩建伟 (HAN Jianwei)

胡红桥 (HU Hongqiao)

胡小平 (HU Xiaoping)

胡友秋 (HU Youqiu)

荆武兴 (JING Wuxing)

李春来 (LI Chunlai)

李俊峰 (LI Junfeng)

李海涛 (LI Haitao)

李莹辉 (LI Yinghui)

林宝军 (LIN Baojun)

刘立波 (LIU Libo)

陆全明 (LU Quanming)

罗 俊 (LUO Jun)

吕达仁 (LÜ Daren)

孟 新 (MENG Xin)

史建魁 (SHI Jiankui)

涂传治 (TU Chuanyi)

万卫星 (WAN Weixing)

汪卫华 (WANG Weihua)

王 超 (WANG Chao)

王焕玉 (WANG Huanyu)

王劲松 (WANG Jinsong)

王世金 (WANG Shijin)

王志刚 (WANG Zhigang)

魏奉思 (WEI Fengsi)

吴 健 (WU Jian)

解京昌 (XIE Jingchang)

熊华钢 (XIONG Huagang)

徐寄遥 (XU Jiyao)

徐文耀 (XU Wenyao)

颜毅华 (YAN Yihua)

杨惠根 (YANG Huigen)

易 帆 (YI Fan)

袁 洪 (YUAN Hong)

张东和 (ZHANG Donghe)

张绍东 (ZHANG Shaodong)

张效信 (ZHANG Xiaoxin)

赵光恒 (ZHAO Guangheng)

赵和平 (ZHAO Heping)

赵建福 (ZHAO Jianfu)

周国成 (ZHOU Guocheng)

宗秋刚 (ZONG Qiugang)

Xinlin LI (李忻璘)

Yunchow WHANG (黄云潮)

Paul SONG (宋 普)

Leung TSANG (曾 亮)

Tielong ZHANG (张铁龙)

Jihkwin CHAO (赵奇昆)

空 间 科 学 学 报

(双月刊, 1981 年创刊)

第 32 卷 第 4 期 2012 年 7 月出版

Vol.32

Chinese Journal of Space Science

(Bimonthly, Started in 1981)

No.4

July 2012

编 辑 ©《空间科学学报》编委会

地址: 北京 8701 信箱 邮政编码: 100190

电话: 010-62582788

网址: <http://www.cjss.ac.cn>

E-mail: cjss@nssc.ac.cn

主 编 刘振兴

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院空间科学与应用研究中心

中国空间科学学会

出 版 科 学 出 版 社

印刷装订 北京中科印刷有限公司

总 发 行 科 学 出 版 社

地址: 北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717 电话: 010-64017032

E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司

地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

广告经营许可证 京东工商广字 0034 号

Edited by

Editor-in-Chief

Administrated by

Sponsored by

Published by

Printed by

Distributed by

Foreign

Editorial Board of Chinese Journal of Space Science

Add: P.O. Box 8701, Beijing 100190, China

Tel: 010-62582788

Web: <http://www.cjss.ac.cn>

E-mail: cjss@nssc.ac.cn

LIU Zhenxing

Chinese Academy of Sciences

Center for Space Science and Applied Research,

Chinese Academy of Sciences

Chinese Society of Space Research

Science Press

Beijing Zhongke Printing Limited Company

Science Press

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,

Beijing 100717, China Tel: 010-6403456

E-mail: journal@cspg.net

China International Book Trading Corporation

Add: P.O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 11-1783/V

国内邮发代号: 2-562

国外发行代号: BM608

定价: 50.00 元

国内外公开发刊

ISSN 0254-6124



9 770254 612120