

doi:10.3788/gzxb20134207.0801

基于 X 射线的新一代深空无线通信

赵宝升, 吴川行, 盛立志, 刘永安

(中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘 要:在空间无线通信的研究应用方面,微波和激光通信技术已比较成熟,但是也存在传输距离、通信速率有限等瓶颈问题,严重制约未来的深空应用. X 射线由于波长短、穿透能力强,当 X 射线光子能量大于 10keV($\lambda < 0.1\text{nm}$)时,在太空中几乎是无衰减的传输. 因此可望在较小的体积、重量、功耗下实现远距离太空传输. 然而,在我国对于 X 射线通信的应用研究目前尚属空白,美国航空航天局也刚刚提出并将此技术称为“革命性的概念”. 因此,利用 X 射线作为信息载体的新概念空间通信方法的研究具有重要的科学意义及应用前景,X 射线通信技术不仅将对已有的微波和激光通信技术起到很好的补充,而且还能在微波和激光受到屏蔽的通信场合发挥独特作用. 开展基于 X 射线的深空无线通信技术研究,主要包括开展 X 射线空间通信的传输理论研究,开展大功率、宽频带(GHz)X 射线脉冲调制发射技术的研究,开展快速、极微弱 X 射线探测技术的研究,开展 X 射线深空通信的捕获、跟踪与对准技术的研究,以及开展高效率纠错编码理论与技术的研究.

关键词:X 射线; 无线通信; 深空探测

中图分类号:TN92; O434.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)07-0801-4

Next Generation of Space Wireless Communication Technology Based on X-ray

ZHAO Bao-sheng, WU Chuan-xing, SHENG Li-zhi, LIU Yong-an

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In the field of space wireless communication, laser and microwave technology have become mature, but bottleneck problems such as the limited transmission distance, the limited communication rate and so on already exist, which restrict the future applications in deep space. As a result of its short wavelength and great penetrability, X-ray has no attenuation for transmission in space when its photon energy is more than 10keV ($\lambda < 0.1\text{nm}$). Thus, via X-ray, a communication technology of long distance signal transmission in space can be achieved with smaller volume, lower weight and lower power. However, studies on X-ray communication and its applications still remain blank in China presently. X-ray communication was proposed and defined as a “revolutionary concept” by National Aeronautics and Space Administration of USA just a short time ago. Thus, the study on this novel space communication method with a new conception by using X-ray as information carrier will have a great scientific significance and applicable prospect. X-ray communication technology will not only be a good complement to laser and microwave communications, but will also have a unique performance on those occasions where laser and microwave could have been shielded. Study on space wireless communication technology based on X-ray will include: the theoretical research on X-ray space transmission; the research on a high power and wide bandwidth(GHz) modulated X-ray source for pulse signal; the

research on high speed, weak signal of X-ray detection technology; the research on acquisition, tracking and pointing technology of X-ray space communication; the research on high efficient coding theory and technology.

Key words: X-ray; Wireless communication; Deep space exploration

0 引言

20世纪50年代,人类利用航天技术开辟了探索外层空间的新时代,进入21世纪以来,随着美国机遇号、勇气号火星探测器成功登陆火星,卡西尼号探测器飞抵土星并成功释放惠更斯号探测器着陆土卫六,深空探测越来越成为全球关注的焦点^[1]. 美国和苏联是最早开展深空探测和深空通信的国家,美国宣布将在2015年前后将宇航员重新送上月球,在那里建立永久性基地;在2030年之后,美国宇航员将前往遥远的火星探险;欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也于21世纪初提出了未来20年空间科学发展的“宇宙全景计划”^[2]. 与此同时,我国的深空探测活动也进入了崭新的发展阶段. 2000年和2006年,中国政府分别发布《中国的航天》白皮书^[3,4]. 2007年2月,标志着中国政府未来空间科学发展蓝图的《“十一五”空间科学发展规划》发布实施^[5],指出未来15年,我国在环月探测的基础上,将积极进行月球探测和以火星为主线的深空探测. 同年10月,《航天“十一五”规划》发布实施^[6],将载人航天工程、月球探测工程等列入重大科技工程. 同年11月,我国首次月球探测工程取得圆满成功,实现了中华民族的千年奔月梦想. 开启了中国人走向深空探索宇宙奥秘的时代,标志着我国已经进入世界具有深空探测能力的国家行列. 但是,随着人类在空间探测、空间光通信、航天器自主导航与通信等领域的快速发展,对大容量、高速率、远距离、复杂深空环境中的新一代空间通信技术提出了重大需求.

1 深空通信

深空通信一般是指地球上的实体与地球轨道外的宇宙空间中的航天器之间的通信,包括各行星表面的区域通信以及地球与太阳系以外星球间的通信^[7]. 我国于2000年发布的《中国的航天》白皮书指出^[8],深空探测是指对太阳系内除地球外的行星及其卫星、小行星、彗星等的探测,以及太阳系以外的银河系乃至整个宇宙的探测. 它是继卫星应用、载人航天之后的又一航天技术发展领域. 深空通信是维系人类与深空探测器的纽带,是实现深空探测的基础和重要保证. 在深空探测中,深空通信的上行链路肩负着传输指令信息、遥测遥控信息、跟踪导

航信息、自控与轨道控制信息等任务,下行链路肩负着传回科学数据、图像、文件、声音等信息的任务. 因此可以说,由深空探测器、中继站、地面站、控制中心等所组成的深空通信系统在深空探测中扮演了非常关键的角色.

然而,目前深空通信却面临着巨大的挑战与困难. 首先,超远的通信距离,通信波束的发散随发射机与接收机之间距离的平方扩散,链路中信号的严重衰减,使得接收端只能收到极低的信号能量,这对探测器灵敏度提出了更高的要求. 而目前射频(Radio Frequency, RF)通信的发射机功率与接收机灵敏度已接近技术极限,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)深空网(Deep Space Network, DSN)的天线已十分庞大(直径34 m和70 m),低噪放大器也已工作在仅比绝对零度高几度的低温下^[8],现在计划对常规通信进行更多改进,不过终会受到实际情况的限制. 其次,数据传输率低,由于深空通信存在巨大的距离损耗,信号的信噪比极低,很难通过单纯提高发射功率的方法来实现高速率数据传输,目前只能在中、低数据传输速率之下工作. 再次,连续的跟踪困难,链路具有间歇性,由于地球自转、被测星体、卫星的运动使得地面深空站只能连续观测8~12h. 最后,高准确度导航困难. 在深空测控通信中主要依靠传统的多普勒测量和距离测量手段. 随着目标距离的增大,角度测量引起的误差也很大.

2 X射线通信的优势

针对深空通信的特点,迫切需要一种新的具有极高通信能力,拥有比射频、激光更远的通信距离,具有更高数据传输能力的无线通信手段.

1895年德国物理学家W. K. 伦琴发现了X射线,这种波长很短而具有很高穿透性的射线可以使很多固体材料发出荧光,使照相底片感光以及产生空气电离等效应. 因此,110多年来X射线在医疗透视、无损探伤和物质结构分析等领域得到了广泛的应用,为人类做出了巨大的贡献. 美国Henke博士通过多年对X射线的研究发现,当X射线光子能量大于10 keV($\lambda < 0.1$ nm)时,在大气压强低于 10^{-1} Pa时,X射线的透过率为100%,这也就意味着在太空环境中,X射线的传输几乎是无衰减的^[9]. 因而,研究利用X射线作为通信载体的新型空间通

信技术将是一项具有突破意义的应用技术. X 射线通信具有以下潜在优势:

第一、X 射线光子能量大,真空中传播衰减极小,无色散. 当 X 射线光子能量大于 10 keV($\lambda < 0.1 \text{ nm}$),在大气压强低于 10^{-1} Pa 时,X 射线透过率为 100%,因此传输几乎是无衰减的. 此外,X 射线在任何介质中的折射率为 1,不存在色散问题,因此可望以较小的体积、重量、功耗实现远距离太空传输,解决深空通信传输距离的挑战.

第二、X 射线的频率很高(可达 10^{18} Hz),如果 X 射线调制技术能够得到发展和解决,这就意味着 X 射线通信具有非常大的传输带宽. 解决深空通信中数据传输率极低的困难.

第三、利用基于导航的 X 射线脉冲星信标的光束瞄准技术,可以实现深空通信的捕获、跟踪与对准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)技术. 此外,空间 X 射线通信和脉冲星导航在 X 射线的准直、聚焦、调制、探测等方面都要采用相同的技术,因此可以与脉冲星导航的研究互相促进,并有望实现深空通信的高准确度导航.

第四、空间 X 射线通信技术能应用于一些微波、激光无法穿透的特殊的场合,如用于地面上电磁屏蔽地方通信和地球等离子层内的飞行器通信.

目前,在空间无线通信的研究应用方面,已经涵盖了射频、微波到红外、可见光、紫外等电磁波范围;而 X 射线通信的概念刚刚提出,无论是基础研究还是应用研究都尚属起初阶段. 对于未来的应用,X 射线通信技术不仅将对已有的微波和激光通信技术起到很好的补充,而且在微波和激光无法通过和到达的场合,它可以大显身手.

3 X 射线通信的国内外研究进展

美国航空航天局戈达德太空飞行中心(Goddard Space Flight Center)的天文物理学家 Keith Gendreau 博士,于 2007 年提出了利用 X 射线实现空间卫星飞行器点对点的通信的概念^[10],首次证明了 X 射线通信的可行性,同时得到了美国航空航天局和美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Program Administration, DARPA)的经费支持. 被称为“世界上提出 X 射线通信第一人”,也被认为是“下一代新的空间通信方法”. 最近在美国航空航天局的空间研究发展计划的 14 个技术领域中,将 X 射线脉冲星导航(X-ray Navigation, XNAV)和 X 射线通信(X-ray Communication, XCOM)称为革命性概念(Revolutionary Concepts)^[11]. 2011 年 12 月 6 日,

作为 X 射线导航和通信的带头人,Keith Gendreau 博士和他的团队被授予 2011 年美国研究和发展创新团队^[12]. 由此可见作为引领世界科技前沿的美国,对该研究的重视程度.

在美国 NASA 的 X 射线通信方案中(如图 1)^[13],Keith Gendreau 博士先将通信信号加载在一个紫外 LED 上,产生的调制紫外光去打击一个光电阴极,通过光电效应产生出电子发射,发射出来的电子再经过一个电子倍增器放大后轰击阳极靶材产生 X 射线信号进行通信. 他的这一方案已经在美国航空航天局的一个 600 米真空传输管道中得到了初步的通信验证.

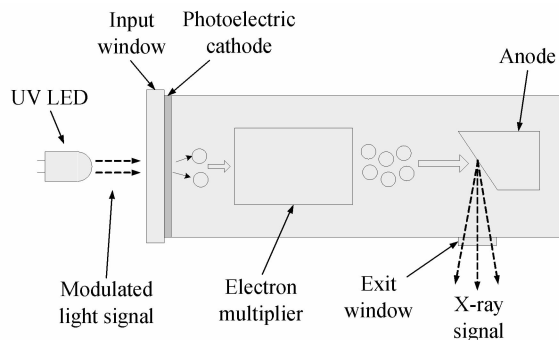


图 1 美国 NASA 的调制 X 射线发射原理
Fig. 1 Schematic diagram of modulated X-ray emitter of NASA

此外,美国斯坦福大学物理系的 Catherine Kealhofer 等人于 2011 年提出一种可以用于空间通信的超快 X 射线发射源技术^[14]. 该新型 X 射线源的原理如图 2 所示,首先利用一个飞秒激光脉冲打击一个纳米尺寸的发射尖端产生电子发射,然后对电子经过加速后轰击阳极靶材产生 X 射线. 这种 X 射线发射源的特点是尺寸小,亮度高,速度快等.

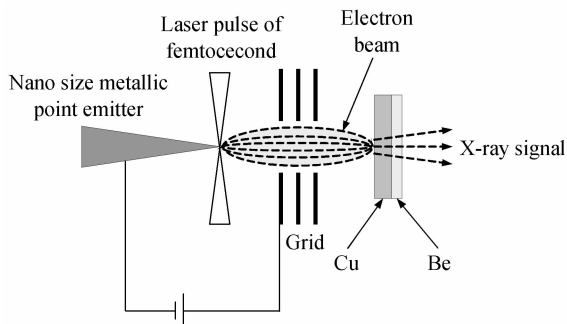


图 2 美国斯坦福大学 X 射线产生方案
Fig. 2 Schematic diagram of Modulated X-ray emitter of Stanford University

中国科学院西安光学精密机械研究所赵宝升团队结合自身的专业优势,以及多年来开展脉冲星导航 X 射线空间探测器以及 X 射线模拟光源的研究基础,提出了一种新型的 X 射线栅控调制源(如图 3)和一种基于微通道板(Micro Channel Plate,

MCP)的X射线探测器分别作为发射和接收装置(分别申请了2个中国发明专利^[15-16],1个国际专利^[17]),并在实验室实现了语音通信,初步实验验证了这一创新性的设想.2012年1月19日,《中国科学报》第四版头条以“空间X射线通信新方法提出”^[18]为题,对该研究进展做了相关报道,引起了国内外专家的高度关注.相比美国航空航天局和美国斯坦福大学的方案,具有许多独特的优势.

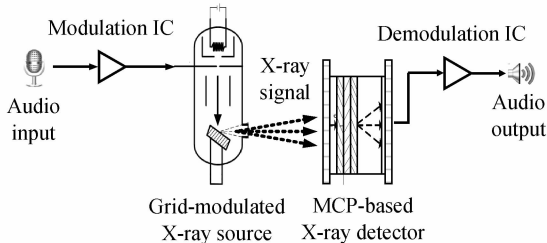


图3 中科院西安光机所X射线通信方案图

Fig. 3 X-ray communication structure of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science

2011年10月,经国防科技信息中心对该技术进行查新,通过对美国政府研究报告文摘库、国外期刊论文文摘库、美国工程索引文摘库、CSA剑桥科学文摘、ISTP科学会议录索引等13个数据库和Internet网上资源的检索和综合分析,空间X射线通信还未见相关报道.

4 X射线通信技术研究重点

开展X射线深空无线通信技术,重点包括四个方面的研究:第一,对于空间通信的传输理论研究,其中包括研究X射线穿越星际空间的时间特性、脉冲展宽、信道延迟等规律和太阳及天体引力对X射线传播的影响.第二,大功率、宽频带X射线脉冲调制发射技术的研究,重点针对解决高功率X射线发射体理论及技术瓶颈问题,输出功率密度与结构参量的定量关系,以及电子束时间弥散与结构参量、调制参量等的关系.第三,快速、极微弱X射线探测技术的研究,重点针对解决高量子效率光电探测问题,其中主要涉及X射线探测器及大面积阵列集成技术,超快时间响应的电子读出系统,以及在单光子态下信号的提取、解调方法.第四,X射线深空通信的捕获、跟踪与对准技术研究,重点研究基于X射线脉冲星信标的光束瞄准新技术及引力弯曲效应对自主跟瞄的影响,深空信道模型与信道容量及其影响因素,以及上下行链路不对称、路径损耗等的高效编码问题等.

5 结论

X射线深空通信作为新一代深空无线通信技术,其研究虽然刚刚起步,但是凭借着独特的技术优势,未来必将有力推动空间探测、空间光通信、航天器自主导航与通信等领域的快速发展,对我国空间技术乃至世界航天事业的发展都将产生重要的影响.

参考文献

- [1] FAN Yao-lin, LI Zhi-qiang, WU Xue-ying, Communication system in deep space exploration and detection[J]. *Digital Communication World*, 2010, 5: 86-90. 樊耀林, 李志强, 吴学英. 深空探测测控通信系统[J]. 数字通信世界, 2010, 5: 86-90.
- [2] 王平. 深空光通信[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- [3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的航天[R]. 北京:中华人民共和国国务院新闻办公室, 2000.
- [4] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2006年中国的航天[R]. 北京:中华人民共和国国务院新闻办公室, 2006.
- [5] 国防科工委. “十一五”空间科学发展规划[R]. 北京:国防科工委, 2007.
- [6] 国防科工委. 航天发展“十一五”规划[R]. 北京:国防科工委, 2007.
- [7] 周贤伟, 尹志忠, 王建萍, 等. 深空通信[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [8] LI Ping, ZHANG Ji-sheng. The current status and the future of NASA deep space network[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2003, 22(4): 10-17. 李平, 张纪升. NASA深空网(DSN)的现状与发展趋势[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(4): 10-17.
- [9] Eric Gullikson. X-ray interactions with matter[EB/OL]. 2010 [2013-2-20]. http://henke.lbl.gov/optical_constants.
- [10] First X-ray communication system demonstrated [J]. *Goddard Tech Trends*, 2007, 3(4): 3-4.
- [11] JOHN R, DAVID I, CALVIN R, et al. Draft communication and navigation system roadmap technology area 05[R]. USA: NASA, 2010.
- [12] JOAN C, FRANCIS R. Goddard's astrophysics science division annual report 2011[R]. USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2012.
- [13] SASHA S, SARAH S, CYPRESS F, et al. Digital X-ray signal transmission [R]. USA: OLIN-NASA Research Group, 2011.
- [14] CATHERINE K, SETH M F, STEFAN G, et al. Ultrafast laser-triggered emission from hafnium carbide tips[EB/OL]. 2012 [2013-2-20]. <http://arxiv.org/pdf/1104.1452v3.pdf>.
- [15] 鄢秋荣, 赵宝升, 刘永安, 等. 一种基于单光子探测的空间光通信中光信号的调制和解调装置和方法[P]. 中国: ZL 2010106027550.0. 2010.
- [16] 刘永安, 赵宝升, 鄢秋荣, 等. 一种X射线探测器[P]. 中国: 201120410981.9. 2011.
- [17] 赵宝升, 鄢秋荣, 盛立志, 等. 栅控X射线源、空间X射线通信系统及方法[P]. 美国: PCT/CN2011/084651. 2011.
- [18] 张行勇. 空间X射线通信新方法提出[N]. 中国科学报, 2012-1-19(4).