

基于 X 射线的空间语音通信系统*

邓宁勤^{1)2)†} 赵宝升¹⁾ 盛立志¹⁾ 鄢秋荣¹⁾ 杨颢¹⁾²⁾ 刘舵¹⁾²⁾

1) (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)

2) (中国科学院大学, 北京 100039)

(2012 年 10 月 12 日收到; 2012 年 10 月 25 日收到修改稿)

提出了栅控 X 射线源作为发射器和基于微通道板的 X 射线单光子探测器作为接收器的 X 射线通信方案. 搭建了基于 X 射线的空间语音通信系统, 详细介绍了信号调制发射器、基于微通道板的 X 射线单光子探测器及信号接收解调器的设计及工作原理. 报道了基于 X 射线的空间语音通信系统的初步实验结果, 实现了优于 20 kbit/s 的基于语音信号调制的 X 射线通信. 实验分析了在不同 X 射线强度、信号整形时间和阈值设置下通信性能影响, 得出了 X 射线发射功率限制 X 射线通信速率的结论, 提出了下一步提高 X 射线通信性能的改进方案.

关键词: X 射线通信, X 射线源, 探测器

PACS: 07.85.Fv, 42.79.Sz, 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.62.060705

1 引言

自 1895 年德国物理学家伦琴发现 X 射线, X 射线已广泛应用于医学诊断和无损检测. 然而, X 射线作为一种波长短 (0.01—10 nm)、频率高 (大于 10^{18} Hz) 的电磁波^[1], 同样可作为承载信息的载体用于通信.

X 射线通信是指以 X 射线为载体、在真空中传递信息, 不需要任何有线信道为传输媒介的一种通信技术. 当 X 射线光子能量大于 10 keV ($\lambda < 0.1$ nm) 时, 在太空几乎是无衰减的传输. X 射线在任何介质中的折射率近似为 1, 色散很小, 因此可望在较小的体积、重量、功耗下实现远距离太空传输. 目前, 卫星与卫星之间的信息传输最主要是微波通信的方式. 然而随着空间探测的持续发展, 特别是对深空探测力度的加大, 微波频率资源已经相当紧张. 近年来, 空间通信随着激光、紫外等无线通信方式的兴起, 使空间通信覆盖了更广的电磁波范围^[2,3]. X 射线通信不仅作为一种新型的通信方法, 扩展了通信的电磁波范围, 还具有特殊的用途. 例如, 卫星在返回地球时, 要穿过一个等离子体区,

在这个区域的无线电波被完全屏蔽, 如果利用 X 射线则可以穿过等离子体层, 可以利用这个优点在无线电波无法覆盖的情况下进行通信^[4].

美国国家航空航天局 (NASA) 的戈达德空间飞行中心 (Goddard Space Flight Center) 的 Keith Gendreau 博士于 2007 年首次提出 X 射线空间通信的概念. 在 2012 年 4 月美国 NASA 的空间研究发展计划的 14 个技术领域, 将 X 射线通信称为革命性概念^[5]. 中国科学院西安光学精密机械研究所于 2011 年针对深空通信的特点提出一种新的架构的 X 射线空间通信方法, 被 2012 年 1 月 19 日《中国科学报》报道, 在国内外引起了重大反响. X 射线通信的关键技术之一是要研制具有调制 X 射线信号能力的 X 射线源. 目前已知的 X 射线信号调制方法有由美国戈达德空间飞行中心研制, 通过调制发光二极管的方法间接调制 X 射线信号^[6]. 另一种方法是中国科学院西安光学精密机械研究所研制, 在 X 射线源中加入调制栅极, 通过调制栅极加上适当的控制电压, 使 X 射线源内的电子运动到阳极靶前全部被截获, 利用调制栅极直接控制 X 射线信号.

本文详细介绍了基于 X 射线的空间语音通信

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11103069, 61007017) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dengningqin@163.com

系统的组成和工作原理,报道了该系统的初步实验结果,对影响 X 射线通信的通信速率的因素进行了分析.

2 系统组成和工作原理

基于 X 射线的空间语音通信系统的原理如图

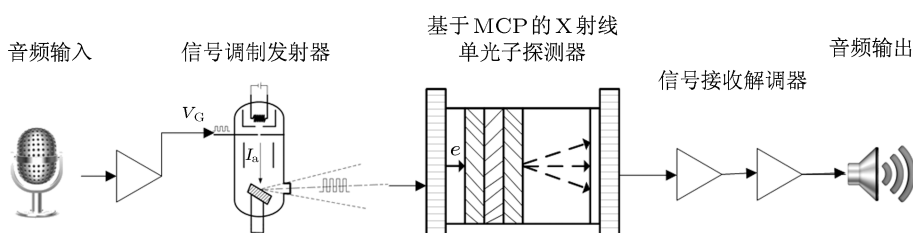


图 1 基于 X 射线的空间语音通信系统原理图

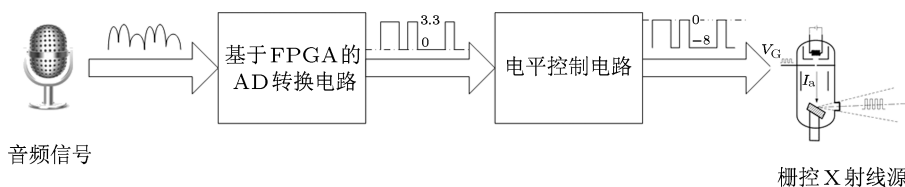


图 2 信号调制发射器原理图

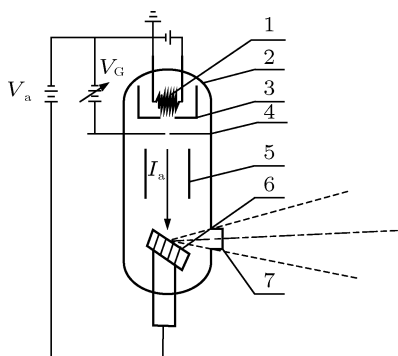


图 3 栅控 X 射线源示意图

图 3 为栅控 X 射线源示意图,在传统 X 射线球管的基础上增加了调制栅极 4 和电子聚焦极 5.调制栅极的作用是调制 X 射线从而复现栅极输入的数字信号.调制原理:当栅极输入的传输信号为高电平时,灯丝阴极产生的电子在电场的作用下向栅极运动,电子在通过栅极后轰击阳极靶并产生 X 射线;当栅极输入的传输信号为低电平时,此时加载灯丝和栅极之间的电压会阻碍电子向阳极运动.通过上述方法调制 X 射线的出射,从而起到类似于开关的作用.聚焦极位于栅极和阳极靶之间,聚

1 所示,主要由信号调制发射器、基于 MCP 的 X 射线单光子探测器和信号接收解调器三部分组成.

2.1 信号调制发射器

图 2 为信号调制发射器原理,主要由栅控 X 射线源和信号调制与栅极控制电路组成.

聚焦极实现电子聚焦作用,控制电子束斑的尺寸.聚焦极的作用还使电子的时间弥散减小,提高时间分辨率.

实验中,调制方式选用开-关键控.栅控 X 射线管具有类似于开关的工作原理,在所有无线通信的调制方法中,开-关键控与栅控 X 射线源调制原理最近似,同时也是最容易实现的调制方法.开-关键控中,二进制数据由每个 T 秒符号间隔是否存在光脉冲表示.根据准则:如果信息位为“1”,则发射 X 射线脉冲;如果为“0”,则通过栅极控制不发射任何脉冲,这样就在发射端上将二进制信息序列直接映射成 X 射线脉冲序列.因此,数据流中的“1”和发射机发射 X 射线脉冲直接存在一一对应关系,实现对 X 射线信号的调制.图 4 为球管的栅控电压与 X 射线出射能量曲线.通过电子光学的优化设计,使阴极灯丝和栅极之间的电压大小正好能够全部截获灯丝所产生的电子.由图 4 可以看出栅极电压为 0 时, X 射线出射能量为最大值,这时对应输入信息位为“1”;当栅极电压为 -8 V 时, X 射线出射能量为 0,说明 X 射线源中电子完全被栅极截获,这时对应输入信息位为“0”.

信号调制与栅极控制电路的作用是将声音的

模拟信号转变为栅控端的数字信号, 以实现 X 射线源栅极的调制.

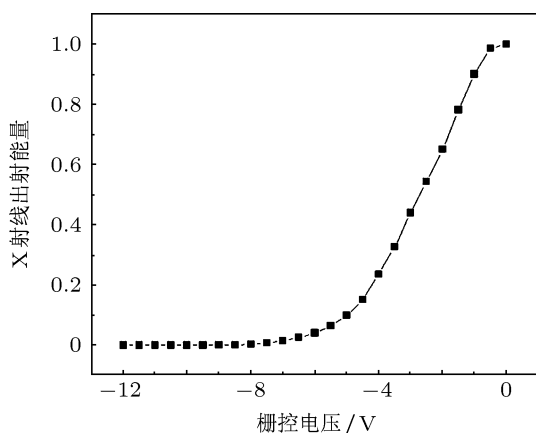


图4 栅控电压与 X 射线出射能量曲线

2.2 基于 MCP 的 X 射线单光子探测器

基于 X 射线的空间语音通信系统采用基于 MCP 的 X 射线单光子探测器, 由输入窗、光电阴极、微通道板和收集阳极组成^[7,8]. 为满足探测器的灵敏度要求, 需选择透过率高的输入窗材料. 根据文献^[9]可知, 聚酰亚胺材料对 20 keV 的 X 射线透过率近似为 1, 因此选用 25 μm 的聚酰亚胺膜作为输入窗. 探测器 MCP 输入面蒸镀 CsI 反射式光电阴极^[10]. 在实验中所采用的单块 MCP 的增益能达到 10^3 , 两块“V”型堆叠的 MCP 可提供 10^6 — 10^7 的电子增益^[11], 可探测极微弱的单光子信号. 保证了 X 射线的通信速率和误码率, 有利于进行 X 射线通信.

2.3 信号提取与解调器

实验中, 采用单光子计数的方式, 每个 X 射线光子入射到探测器上会产生一个脉宽约为 2 ns 幅

度约为 20 mV 的负脉冲, 如图 5(a) 所示. 从探测器直接输出的原始信号 ② 不利于解调, 因此要对脉冲信号进行处理. 处理后的信号 ① 为一脉冲宽度为 400 ns, 幅度为 1.2 V 的脉冲信号, 如图 5(b) 所示.

X 射线信号通常为单光子状态, 单个光子到达时间是随机事件^[12], 由于栅控 X 射线脉冲信号具有可控性, 因此大量的光子到达时间的统计分布是确定的, 即特定相位占有光子的概率是确定的, 但是噪声光子的到达时间不满足这样的统计规律, 这样就会产生噪声信号, 即未输入有效 X 射线信号探测器输出信号不为“0”, 提高了误码率. 因此要排除暗噪声对有效信号的干扰就需要设置一个阈值滤除噪声信号. 实验中, 采用脉冲计数方法对脉冲信号进行处理. 图 6(a) 为调制信号及脉冲输出波形图. 信号 ② 为加载在栅控 X 射线源的调制信号波形, 信号 ① 为探测器获得的 X 射线光子经过处理后的脉冲信号. 在解调电路中根据离散的脉冲信号相邻两个脉冲之间的时间, 判断是否为有效信号. 判定准则为设定时间内如果脉冲数大于 2 个就设置为高电平, 如果在设定时间内检测到的脉冲数小于或等于 2 个则将输出设置为低电平. 图 6(b) 中, ③ 为离散信号解调之后波形.

信号提取原理是将探测器产生的负脉冲信号, 经过前置放大器的信号处理, 将其处理为准高斯信号. 通过比较器实现对准高斯信号阈值的比较并产生触发信号, RC 电路的作用是将脉冲信号的放电时间延长, 使用阈值比较得到提取信号波形图. 由于通信信号经过 RS232 串口将数据传输到由 FPGA 控制的音频电路板上. 因此需要将阈值比较之后的输出信号进行电平转换, 将 LVTTTL 电平转换为串口通信的 RS232 电平, 信号提取方法的信号波形图如图 7 所示.

信号解调方式需与发射端的调制方式相同, 因此解调方式也选用开-关键控方式.

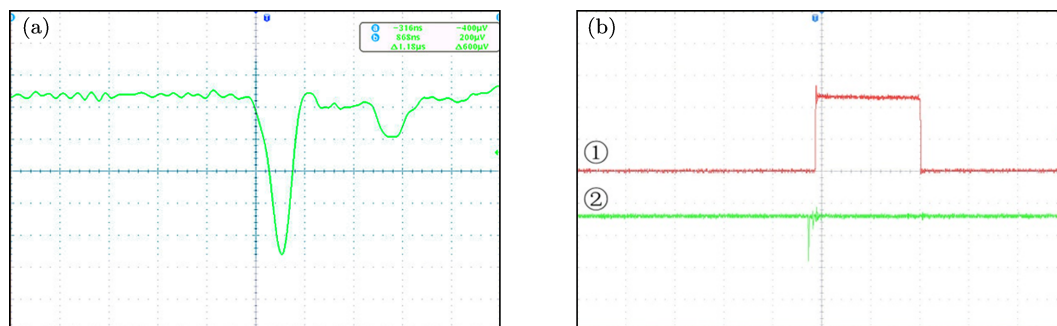


图5 (a) 探测器原始输出信号; (b) 原始信号与处理后的信号

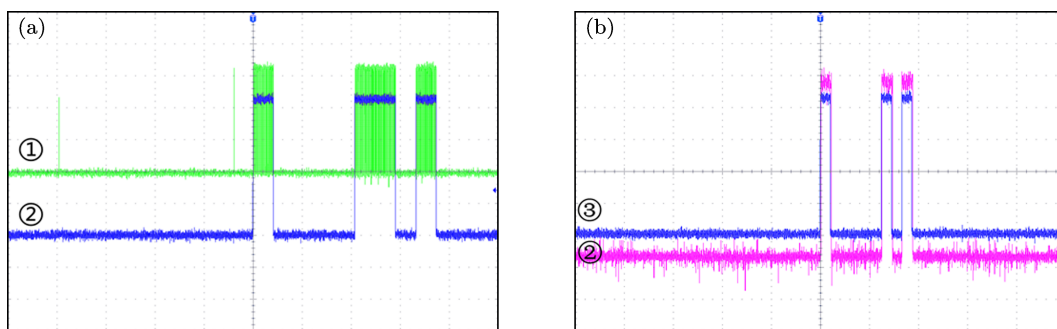


图6 (a) 调制信号及脉冲输出波形图; (b) 调制信号及解调后波形图

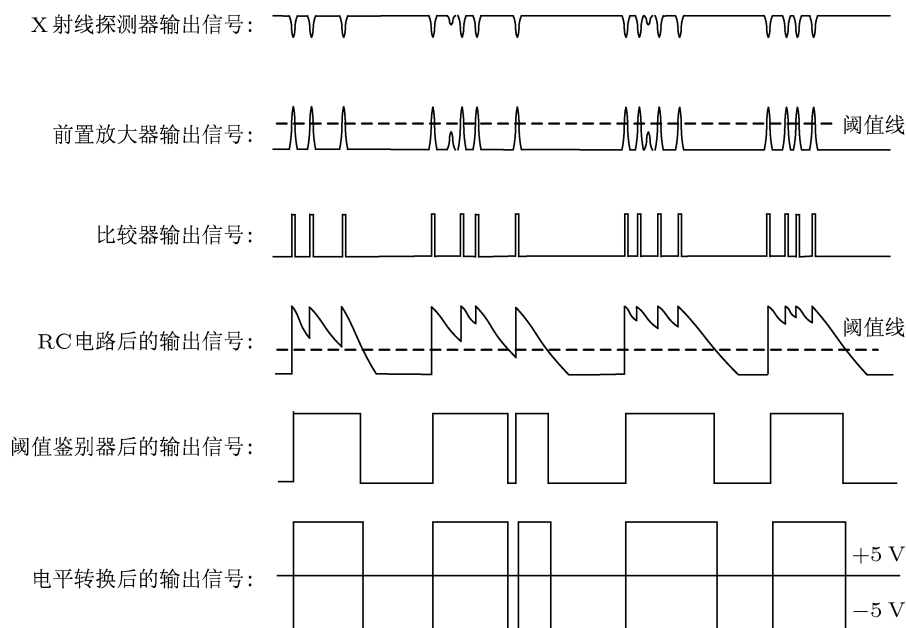


图7 信号提取方法的信号波形图

3 实验结果与分析

在 X 射线通信系统中, 影响 X 射线通信速率的主要因素是 X 射线的强度. 由文献 [13] 可知, X 射线管产生的 X 射线由连续谱和标识谱两部分组成, 要增强 X 射线的强度, 必须提高管电压 V 和管电流 I_a . 图 8 为在不同的管电压和管电流的情况下 X 射线强度的变化曲线. 由图 8 可以看出, 当管电压和管电流增大时, X 射线强度也随之增强.

X 射线强度、信号整形时间和阈值设置是影响基于 X 射线的空间语音通信系统性能的主要因素. 实验中, 当管电压高于 18 kV, 阈值设置为 $-0.116 \sim -0.157$ V 及整形时间为 $10 \sim 20$ μ s 时, 系统能够稳定工作. 为便于分析实验现象, 以固定的音频信号输入到系统中, 在管电压为 20 kV, 阈值设置为 -0.116 V 及信号整形时间为 15 μ s 的情况下,

标准信号波形如图 9(a) 所示. 在保证其余变量不变的情况下, 依次改变管电压、信号整形时间及阈值设置分析对 X 射线通信性能的影响, 如图 9 所示.

由图 9(b) 可看出, 当管电流下降至 16 kV 时, X 射线强度减弱使单位时间内探测器探测的光子数减少, 导致输出的高电平信号误读成低电平信号. 由于探测器的输出是离散的光子脉冲信号, 因此需要通过信号整形实现对原始信号的还原. 由图 9(c) 可看出, 假如信号整形时间过长, 时间间隔较短的相邻的高电平信号会产生一个连续的高电平信号导致误码; 由图 9(d) 可看出, 如果信号整形时间过短, 时间间隔较长的光子脉冲信号之间会产生一个错误的低电平信号. 因为探测器探测到的信号包括有效信号、背景噪声和暗噪声, 所以系统需要设置适当的阈值达到滤除噪声减低误码率的目的. 如图 9(e) 所示, 阈值设置过高会把部分有效信号当成噪

声信号滤除; 如图 9(f) 所示, 阈值设置过低则引入了噪声信号. 由上述分析, 可得出只有系统的 X 射

线强度较强、信号整形时间和阈值设置适当的情况下, 系统才能实现准确的 X 射线通信.

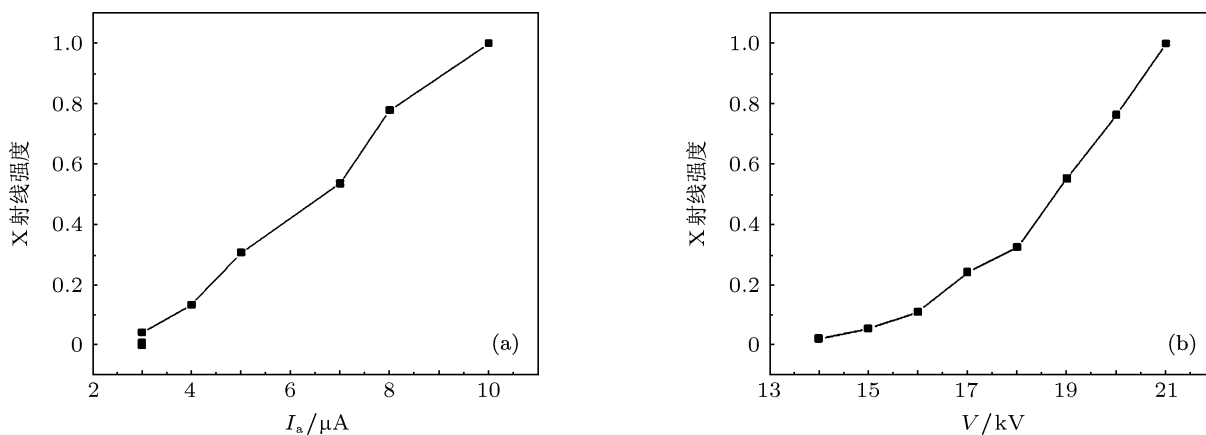


图 8 (a) X 射线强度与管电流关系曲线; (b) X 射线强度与管电压关系曲线

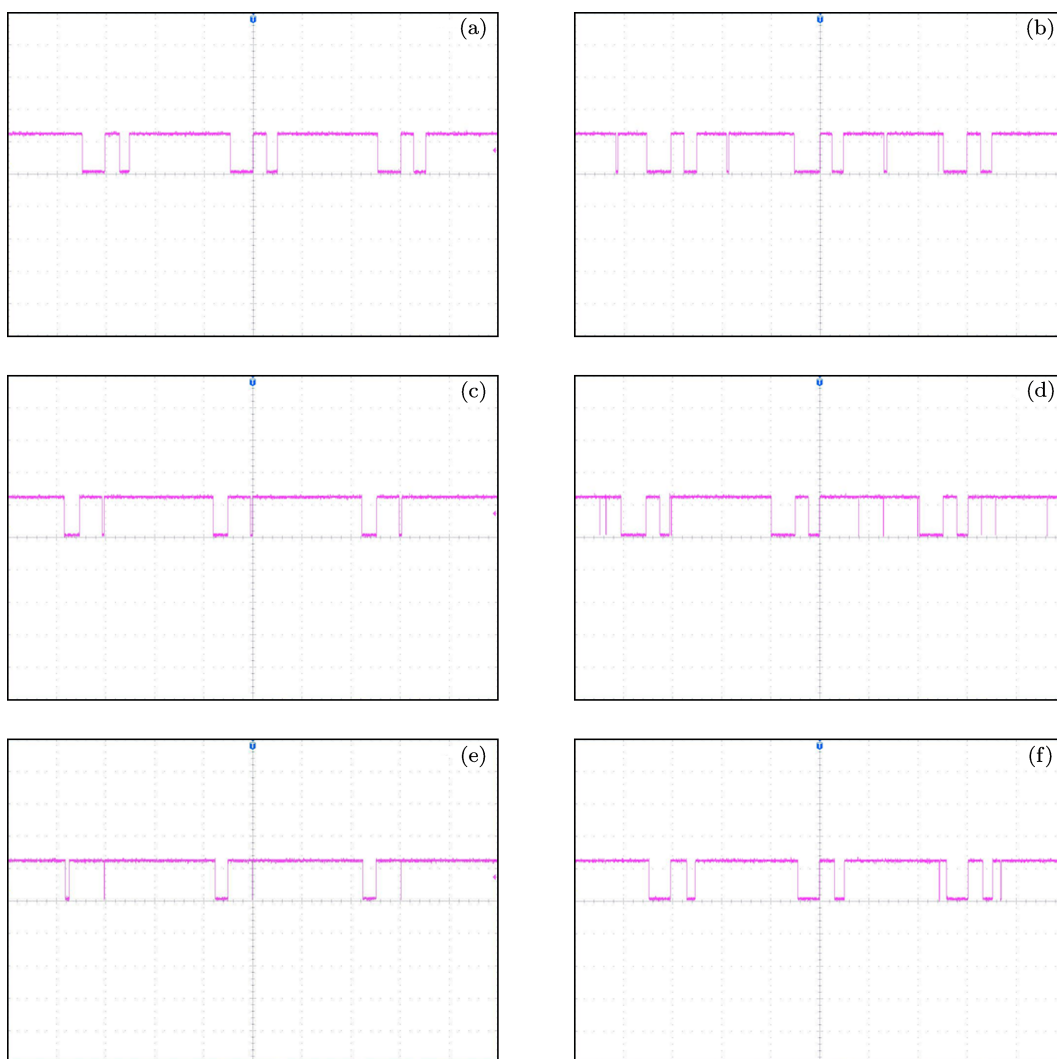


图 9 (a) 标准信号波形; (b) 管电压为 16 kV; (c) 信号整形时间为 6 μs ; (d) 信号整形时间为 40 μs ; (e) 阈值设置为 -0.1 V; (f) 阈值设置为 -0.284 V

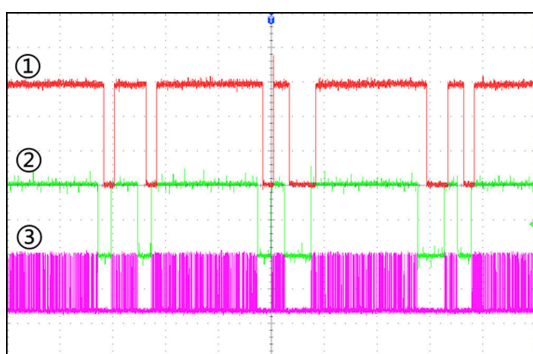


图 10 音频信号传输波形图

图 10 为基于 X 射线的空间语音通信系统音频信号传输波形图. 信号 ③ 为探测器获得的 X 射线光子经过处理后的光子脉冲信号, 信号 ② 为加载在栅控 X 射线源的原始音频信号波形, 信号 ① 为

解调电路处理后的输出音频信号波形. 从图 10 可看出, 在 X 射线辐射能量为 20 keV 时, X 射线通信能够在系统中以优于 20 kbit/s 频率下实现准确的信息传输, 实现了基于语音信号调制的 X 射线通信.

4 结论

研制了调制 X 射线发射源, 搭建了基于 X 射线的空间语音通信系统, 实现了优于 20 kbit/s 的 X 射线空间通信的实时语音模拟通信. 分析了 X 射线强度、信号整形时间及阈值设置对 X 射线通信的性能影响. 该系统对于开展 X 射线通信相关理论研究和核心技术攻关具有重要意义. 下一步将通过电子优化设计及对 X 射线管阴极材料的研究, 增大管电流提高通信速率.

- [1] Bass M 2010 *Handbook of Optics* (3rd Ed.) (Columbus: The McGraw-Hill Companies) p791
- [2] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, Busch T E 2001 *Opt. Eng.* **40** 2208
- [3] Clampin M 2002 *Opt. Eng.* **41** 1185
- [4] Sproch S, Strohkorb S, Frankenfeld C, Bethune J 2012 *Digital X-ray Signal Transmission* <http://nasa.olin=.edu/projects/2011/dcom/FinalStatusReport.pdf> [2012-06-28]
- [5] Space Technology Roadmaps, http://www.nasa.gov/pdf/501627main-STR-Int-Foldout_rev11-NRCupdated.pdf [2012-10-12]
- [6] Jablonski D G 2009 *22nd International Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation Savannah, the United States, September 22-25, 2009* p1458
- [7] Zhang X H, Zhao B S, Liu Y A, Miao Z H, Zhu X P, Zhao F F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1779 (in Chinese) [张兴华, 赵宝升, 刘永安, 缪震华, 朱香平, 赵菲菲 2009 物理学报 **58** 1779]
- [8] Liu Y A, Yan Q R, Sai X F, Wei Y L, Sheng L Z, Yang H, Hu H J, Zhao B S 2011 *Chin. Phys. B* **20** 068503
- [9] Henke <http://henke.lbl.gov/cgi-bin/filter.pl> [2012-10-12]
- [10] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Sai X F, Yan Q R, Chen B M, Wang P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 019701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 赛小锋, 鄢秋荣, 陈宝梅, 王朋 2012 物理学报 **61** 019701]
- [11] Yan Q R, Zhao B S, Yang H, Liu Y A, Zhu X P, Li M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6164 (in Chinese) [鄢秋荣, 赵宝升, 杨颖, 刘永安, 朱香平, 李梅 2010 物理学报 **59** 6164]
- [12] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣 2011 物理学报 **60** 029701]
- [13] Jin Y, Sun X S, Xue Q 2008 *X-ray Diffraction Analysis Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) p14 (in Chinese) [晋勇, 孙晓松, 薛配 2008 X 射线衍射分析技术 (北京: 国防工业出版社) 第 14 页]

A space audio communication system based on X-ray*

Deng Ning-Qin^{1)2)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾ Yan Qiu Rong¹⁾
Yang Hao¹⁾²⁾ Liu Duo¹⁾²⁾

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

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 12 October 2012; revised manuscript received 25 October 2012)

Abstract

In this paper, an X-ray communication program, which consists of a sender of grid controlled X-ray source and a receiver of X-ray single-photon detector based on micro-channel plate, is presented. With the detailed information about the signal modulation transmitter, the micro-channel-based X-ray single-photon detector as well as the signal receiving demodulator, a space audio communication system based on X-ray is built. The communication rate of more than 20 kbit/s is realized. According to the preliminary test result analyses of the X-ray space audio communication system test, the X-ray emission success rate restricts the communication speed by the influence of different X-ray intensities, signal shaping time and threshold settings respectively. Therefore, a scheme for further increasing X-ray communication performance is suggested.

Keywords: X-ray communication, X-ray source, detector

PACS: 07.85.Fv, 42.79.Sz, 84.40.Ua

DOI: 10.7498/aps.62.060705

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11103069, 61007017).

† Corresponding author. E-mail: dengningqin@163.com