

X射线通信系统的误码率分析

王律强 苏桐 赵宝升 盛立志 刘永安 刘舵

Bit error rate analysis of X-ray communication system

Wang Lü-Qiang Su Tong Zhao Bao-Sheng Sheng Li-Zhi Liu Yong-An Liu Duo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 120701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.120701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种设计环形汇聚光栅反射镜的新方法

[A new approach to designing circular grating focusing reflector](#)

物理学报.2014, 63(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240702>

用于空间X射线通信的栅极控制脉冲发射源研究

[Grid-controlled emission source for space X-ray communication](#)

物理学报.2014, 63(16): 160701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.160701>

锥束CT平板探测器成像的余晖建模与校正方法

[Image lag modeling and correction method for flat panel detector in cone-beam CT](#)

物理学报.2013, 62(21): 210702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210702>

基于X射线的空间语音通信系统

[A space audio communication system based on X-ray](#)

物理学报.2013, 62(6): 060705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060705>

栅长对PD SOI NMOS器件总剂量辐照效应影响的实验研究

[Gate length dependence of SOI NMOS device response to total dose irradiation](#)

物理学报.2012, 61(24): 240703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.240703>

X射线通信系统的误码率分析*

王律强^{1)2)†} 苏桐¹⁾ 赵宝升¹⁾ 盛立志¹⁾ 刘永安¹⁾ 刘舵¹⁾²⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年12月1日收到; 2015年1月12日收到修改稿)

基于栅极控制脉冲发射 X 射线源与单光子探测技术的 X 射线通信语音方案已经在实验室实现, 为探索未来 X 射线深空通信应用打下了坚实的基础. 实验室 X 射线语音通信演示系统实现后, 迫切需要测试 X 射线通信系统的误码率性能. 在泊松噪声模型下对 X 射线通信演示系统的理论分析的基础上, 使用基于现场可编程门阵列的误码率测量方法对开关键控调制方式下 X 射线通信误码率进行测量. 通过实验测量发现, 要实现语音通信, 系统误码率应该达到 10^{-4} 量级; 分析、测量了现有系统在开关键控调制方式下不同速率对应的误码率, 论证了泊松噪声模型理论分析现有 X 射线通信系统的合理性; 分析提出了限制现有实验室条件下 X 射线通信误码率性能的主要因素.

关键词: X 射线通信, 泊松噪声模型, 误码率, 单光子探测器

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

DOI: 10.7498/aps.64.120701

1 引言

X 射线作为电磁波谱的一部分, 具有波长短 (0.1—10 nm)、频率高 ($>10^{18}$) 等特点^[1]. 近年来, 由于电磁波谱各能量段的日益紧张, 科学家们将目光集中到波长更短、频率更高的电磁波上. X 射线通信于 2007 年由美国国家航空航天局的戈达德空间飞行中心 (Goddard Space Flight Center) 的天文物理学专家 Keith Gendreau 提出^[2]. 中国科学院西安光学精密机械研究所赵宝升团队多年致力于 X 射线脉冲星导航的研究, 于 2011 年针对深空通信及 X 射线的特点提出一种新的构架的 X 射线空间通信方法^[3]. 该方法提出后不久就成功搭建了 X 射线通信实验室演示系统, 实现了实验室条件下优于 20 kbit/s 的 X 射线语音通信^[4]. 为了进一步降低误码率, 本文由理论着手推导出不同调制方式下 X 射线通信误码率的计算公式, 并使用基于现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 的误码测试方法来论证不同调制方式下对应的 X 射

线通信实验室演示系统的误码率计算公式的合理性, 得到了系统在开关键控 (on-off keying, OOK) 调制方式下的误码率为 10^{-4} 量级.

2 X 射线通信系统的误码率理论分析

基于探测器类型和背景噪声级别, 考虑不同探测器的噪声模型. 当采用光子计数器型探测器时, 噪声主要来自光子探测器暗电流和能量很低的背景光干扰, 这时噪声分布符合泊松噪声模型, 换句话说, 噪声体现为错误光子脉冲. 考虑高斯噪声模型时, 噪声主要来源为热噪声. 此外, 当背景光未能被有效地过滤掉时会导致过度干扰, 这些噪声情形也适用于高斯模型^[5]. 下面分析 OOK 调制下的系统误码率.

对于强度调制/直接检测系统而言, 信号 r 由 1 和 0 组成. 这里引进光子数判断门限值 k_T , 即当每比特内接收到的光子脉冲数目 (包括信号光子数 k_S 与噪声光子数 k_N) 大于 k_T 时, X 射线通信系统解调

* 国家自然科学基金 (批准号: 11103069, 61471357) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chlasa@163.com

策略认为此比特传输信号为1, 否则为0.

已知解调端, 每比特内接收到的光子数目 $k_R = k_S + k_N$, 则有

$$r = 1, \quad k_R = k_S + k_N \geq k_T; \quad (1a)$$

$$r = 0, \quad k_R = k_S + k_N < k_T. \quad (1b)$$

对于OOK调制而言, 误码率来源于对接收到的光子脉冲的误判断. 假定两个信号出现概率相等, 其误码率可表达为以下形式 [6]:

$$PE = \frac{1}{2} \langle PE|1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE|0 \rangle, \quad (2)$$

其中, $\langle PE|1 \rangle$ 指的是每比特内光子数目大于等于 k_T (应该被判定为1), 而信号被判定为0的情况; 同理, $\langle PE|0 \rangle$ 对应每比特内光子数目小于 k_T (应该被判定为0), 而信号被判定为1的情况.

加性噪声整体上符合一定的统计学规律, 可以用已知的统计模型. 具有单光子探测能力的微通道板光电倍增管 (microchannel plate, MCP) 探测器采用光子计数检测方法, 噪声功率与信号功率相比极其微弱; 光子计数检测方法本身是一个离散的概率过程, 这与X射线通信实验室演示系统使用的MCP探测器以及后端解调电路密切相关. 解调电路将MCP探测器输出的负脉冲信号放大、滤波、整形得到矩形波, 滤波是将信号放大后幅值低于阈值的信号滤掉 [7]. 当一个随机事件以固定的平均频率 λ 随机且独立地出现, 那么这个事件在单位时间内出现的次数就近似地服从泊松分布 $P(\lambda)$ [8]. 因此现有的X射线通信实验室演示系统的误码率分析适用泊松噪声模型来模拟接收到的光子分布.

将泊松分布表达式代入 (2) 式中, 有

$$\langle PE|1 \rangle = \sum_{k=0}^{k_T} \frac{(k_S + k_B)^k}{k!} e^{-(k_S + k_B)}, \quad (3a)$$

$$\langle PE|0 \rangle = \sum_{k=k_T}^{+\infty} \frac{(k_B)^k}{k!} e^{-k_B}, \quad (3b)$$

$$\gamma(s, x) = \int_0^x t^{s-1} e^{-t} dt, \quad (4)$$

$$\sum_{k=C}^{+\infty} \frac{x^k}{k!} e^{-x} = \frac{\gamma(c, x)}{\gamma(c, +\infty)}. \quad (5)$$

引入不完全 Γ 函数进行积分化简并求解.

OOK调制方式下, 任意一个比特周期内产生一个比特误差的概率可以表示为

$$PE = \frac{1}{2} \langle PE|1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE|0 \rangle$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} \{ 1 + [(k_S + k_N)^{k_T-1} \\ &\quad + (k_T - 1)(k_S + k_N)^{k_T-2} + \dots \\ &\quad + (k_T - 1)!] e^{-(k_S + k_N)} \\ &\quad - [(k_N)^{k_T-1} + (k_T - 1)(k_N)^{k_T-2} + \dots \\ &\quad + (k_T - 1)!] e^{-k_N} / (k_T - 1)! \}. \quad (6) \end{aligned}$$

由误码率 (6) 式可知, X射线通信系统误码率由3个参数决定, 分别是光子数判断门限 k_T 、每比特内信号光子数 k_S 、每比特内噪声光子数 k_N . 只要先固定其中一个值, 就可以得到剩余两个参数之间的关系.

1) 信号光子数目 k_S 对误码率的影响

根据 (6) 式, 当忽略接收到的噪声光子, 即令 $k_N = 0$ 时, 令 $k_T = 1$, 则

$$PE = \frac{1}{2} \langle PE|1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE|0 \rangle = \frac{1}{2} e^{-k_S}. \quad (7)$$

当忽略噪声光子影响, 误码也不可能完全消除. 误码率量级由每比特信号光子数与门限值共同决定. 将判断门限值 k_T 定为1 (对应目前硬件还原策略), 即假设每个光子脉冲都会被还原, 则当每比特内必须有超过11个信号光子时, 误码率可达到 10^{-6} 量级.

2) 判断门限 k_T 对误码率的影响

$$\begin{aligned} PE &= \frac{1}{2} \langle PE|1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE|0 \rangle \\ &= \frac{1}{2} [(k_S)^{k_T-1} + (k_T - 1)(k_S)^{k_T-2} + \dots \\ &\quad + (k_T - 1)!] e^{-k_S} / (k_T - 1)!. \quad (8) \end{aligned}$$

当每比特内接收到的信号光子数目 k_S 不变, 提高门限判断数值 k_T , 则误码率会升高. 因为 $k_T = 1$ 时, 每个探测器输出脉冲都可以被还原为一个比特的信息; 而当 $k_T > 1$ 时, 一个比特信息需要

$$\frac{[(k_S)^{k_T-1} + (k_T - 1)(k_S)^{k_T-2} + \dots + (k_T - 1)!]}{(k_T - 1)!}$$

数目的探测器输出脉冲.

3) 噪声光子数目 k_N 对误码率的影响

判断门限 $k_T = 1$, 假定每比特内信号光子数目 k_S 足够大, 误码率性能将由每比特内噪声光子数目主导, 此时计算所得的误码率实际上确定了目标系统所能达到的误码率下限, 即

$$\begin{aligned} PE &= \frac{1}{2} \langle PE|1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE|0 \rangle, \\ &= \frac{1}{2} [1 + e^{-(k_S + k_N)} - e^{-k_N}] \quad (9a) \end{aligned}$$

$$\approx \frac{1}{2} (1 - e^{-k_N}). \quad (9b)$$

深空 X 射线传输过程中, X 射线通信系统的噪声来源可被分为三大部分: 等效热噪声、量子噪声以及探测器的本底噪声. 对于能量不变的 X 射线光子, 噪声功率基本不变, 即每秒内接收到的噪声光子个数不变. 每比特噪声光子数等于每秒噪声光子数与通信速率之比, 通信速率越小, 每比特内噪声光子数目就越多, 噪声对误码率的主导作用也就愈加明显.

4) 信噪比对误码率的影响

由以上分析可知, 当通信速率较高时, 每比特内信号光子数目 k_S 逐渐变小, k_S 决定了误码率所能达到的级别; 当通信速率较低时, 每比特内噪声光子数目 k_N 逐渐增多, k_N 成为误码率的主导因素. 将门限值 k_T 定为 1, 要使误码率达到 10^{-6} , 则信噪比必须大于 60 dB. 随着信噪比的增大误码特性变好.

3 实验系统及测量结果

为了验证 X 射线通信实验室演示系统误码率理论分析的可靠性, 使用基于 FPGA 的误码检测器系统测量 OOK 调制方式下对应的通信误码率.

误码检测系统由 M 序列产生模块、时钟选择模块、对比计数模块和显示模块构成. 测试原理如图 1 所示, 其中信道包括栅极控制脉冲发射 X 射线源、真空和 MCP 探测器.

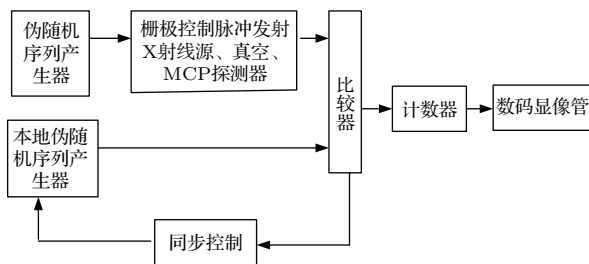


图 1 误码率测试原理图

Fig. 1. Bit-error-rate detecting strategy.

3.1 OOK 调制方式对应的 X 射线通信误码率

由于第一代 X 射线实验室演示系统的信号调制采用 OOK 调制, 通过 FPGA 产生随机码作为通信系统的信号, 经 X 射线作为载波进行通信, 并将得到的解调信号与原始的随机码信号进行比较. 实验得到的 OOK 调制下 X 射线通信系统通信误码率如表 1 所列.

表 1 OOK 调制方式下 X 射线通信误码率

Table 1. Bit error rate in X-ray communication based on OOK modulation.

	通信速率/kbps			
	6.25	12.5	25	50
误码率	4.6×10^{-4}	6.4×10^{-4}	3.9×10^{-4}	2.1×10^{-1}

3.2 结合理论计算分析不同调制方式对应的 X 射线通信误码率

OOK 调制下, X 射线通信系统在不同速率下的信号光子数见表 2 和图 2.

表 2 不同通信速率对应的信号光子数

Table 2. Signal photon number under different speeds in X-ray modulation communication.

	通信速率/kbps			
	6.25	12.5	25	50
信号光子数	23	17	7	4

门限 k_T 为 1 时, 忽略噪声光子数 k_N , 由 (7) 式计算得到: 速率为 50 kbps 时误码率为 2%; 速率为 25 kbps 时误码率为 6.2×10^{-5} ; 速率为 12.5 kbps 时误码率为 2.1×10^{-8} ; 速率为 12.5 kbps 时误码率为 5.1×10^{-11} .

由于通信速率为 50 kbps 时, 信号光子数过少、误码率很高, 目前还原策略下整形解调后信号无法还原、无法完整地进行通信, 已经不适用于误码率计算公式. 同时实际实验中背景噪声光子数并不能忽略不计, 实验测得通信系统中 MCP 单光子探测器背景噪声光子数约为 0.2/s, 对应的不同通信速率下每比特内噪声光子数如表 3 所列.

表 3 不同通信速率对应的误码率下限

Table 3. The floor level of bit error rate under different speeds in X-ray modulation communication.

	通信速率/kbps		
	6.25	12.5	25
误码率下限	3.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}	8×10^{-6}

每个噪声光子数 k_N 宽度为 5—8 ns 量级, 被还原后脉冲展宽最小为 800 ns [9], 在现有基于 MCP 探测器的 X 射线通信系统中, 由于 MCP 探测器暗噪声的限制, 通信速率为 6.25 kbps 时误码率极限为 3.2×10^{-5} ; 12.5 kbps 时误码率极限为 1.6×10^{-5} ; 25 kbps 时系统误码率极限为 8×10^{-6} . 理论计算结合实际实验测量, 将信号光子数、噪声光子数代入 (9a) 式得系统在不同速率下对应的误码率理论值如表 4 所列.

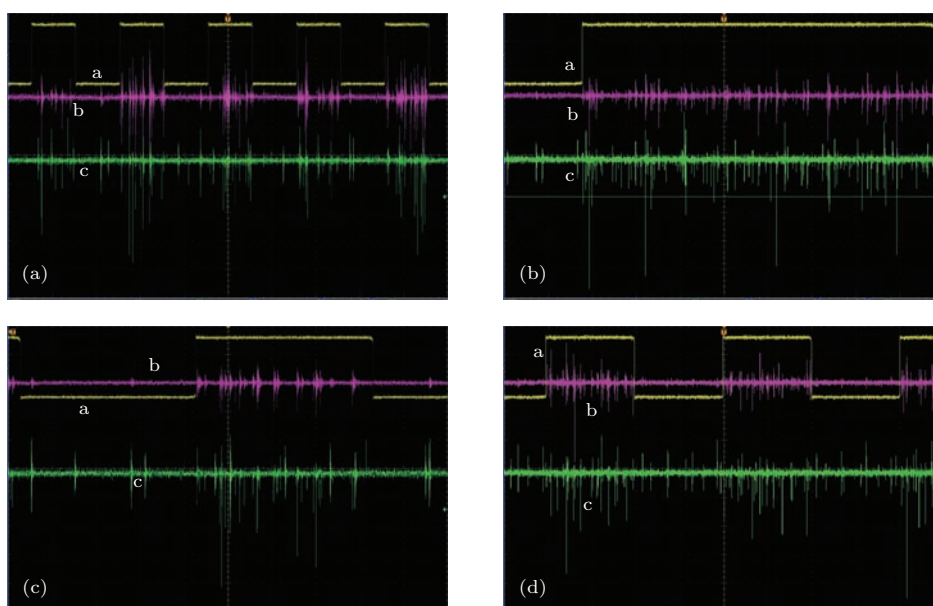


图2 (网刊彩色) OOK调制下X射线通信系统在不同速率下的信号光子数(a为栅极调制信号, b为探测器输出信号, c为经解调板放大后的探测器信号, 幅值超过阈值-144 mV的为信号光子) (a)速率为6.25 kbps; (b)速率为12.5 kbps; (c)速率为25 kbps; (d)速率为50 kbps

Fig. 2. (color online) Signal photon number under different speeds in X-ray modulation communication system based on on-off keying: (a) 6.25 kbps; (b) 12.5 kbps; (c) 25 kbps; (d) 50 kbps.

表4 不同通信速率对应的误码率理论值

Table 4. Theoretical bit error rate under different speeds in X-ray modulation communication.

	通信速率/kbps		
	6.25	12.5	25
误码率	3.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}	4.5×10^{-4}

与实验测量数据对比得到25 kbps时误码率较为接近, 随着通信速率的降低, 每比特内信号光子数目已不再主导误码率的变化, 通信误码率变化不大. 由实验可知, 在OOK调制方式下, 目前X射线通信实验室演示系统误码率维持在 10^{-4} 量级.

现有基于OOK调制方式下的X射线语音通信系统误码率性能主要受栅极控制脉冲发射X射线源及探测器制约, 实验中MCP探测器单位面积探测到的X射线信号功率仅为 7×10^{-5} mW. 进一步提高X射线栅极控制脉冲发射球管功率以及探测器探测性能, 增加探测到的信号光子数、降低噪声光子数, 可以有效提升基于OOK调制的X射线通信实验室演示系统的误码率性能.

4 结 论

本文对基于OOK调制方式的X射线通信系统误码率问题进行了详细的理论分析, 推导出了适合

X射线语音通信的误码率计算公式, 测量得到满足X射线语音通信, OOK调制方式下X射线通信系统的误码率为 10^{-4} 量级, 对X射线深空通信具有重要意义. 下一步拟在提高栅极控制脉冲发射X射线源功率、探测器探测效率的基础上改进调制方式进一步深入研究X射线通信误码率性能提升问题.

参考文献

- [1] Bass M 2010 *Handbook of Optics* (3rd Ed.) (Columbus: The McGraw-Hill Companies) p791
- [2] Zhang X Y 2012 *New Method of X-ray Space Communication* (Beijing: China Science Daily) 2012-1-19(4) (in Chinese) [张行勇 2012 空间X射线通信新方法提出 (北京: 中国科学报) 2012-1-19(4)]
- [3] Zhao B S, Wu C X, Sheng L Z, Liu Y A 2013 *Acta Photon. Sin.* **42** 801 (in Chinese) [赵宝升, 吴川行, 盛立志, 刘永安 2013 光子学报 **42** 801]
- [4] Deng N Q, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R, Yang H, Liu D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060705 (in Chinese) [邓宁勤, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣, 杨灏, 刘舵 2013 物理学报 **62** 060705]
- [5] Qun F H, Brian M S, Zheng Y X 2009 *Proc. SPIE* **7464** 74640H
- [6] Ke X Z, Xi X L 2006 *The Introduction of Wireless Laser Communication* (Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications Press) p173 (in Chinese) [柯熙政, 席晓莉 2006 无线激光通信概论 (北京: 北京邮电大学出版社) 第173页]

- [7] Wang P, Zhao B S, Sheng L Z, Hu H J, Yan Q R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 209702 (in Chinese) [王朋, 赵宝升, 盛立志, 胡慧君, 鄢秋荣 2012 物理学报 **61** 209702]
- [8] Zhao M Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications) (in Chinese) [赵明宇 2013 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [9] 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, 赛小峰, 鄢秋荣, 陈宝梅, 王朋 2012 物理学报 **61** 019701]

Bit error rate analysis of X-ray communication system*

Wang Lü-Qiang^{1)2)†} Su Tong¹⁾ Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾
Liu Yong-An¹⁾ Liu Duo¹⁾²⁾

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China*)

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

(Received 1 December 2014; revised manuscript received 12 January 2015)

Abstract

X-ray communication, which was firstly introduced by Keith Gendreau in 2007, is potential to compete with conventional communication methods, such as microwave and laser communication, against space surroundings. As a result, a great deal of time and effort has been devoted to making the initial idea into reality in recent years. Eventually, the X-ray communication demonstration system based on the grid-controlled X-ray source and microchannel plate detector can deliver both audio and video information in a 6-meter vacuum tunnel. The point is how to evaluate this space X-ray demonstration system in a typical experimental way. The method is to design a specific board to measure the relationship between bit-error-rate and emitting power against various communicating distances. In addition, the data should be compared with the calculation and simulation results to estimate the referred theoretical model. The concept of using X-ray as signal carriers is confirmed by our first generation X-ray communication demonstration system. Specifically, the method is to use grid-controlled emission source as a transceiver while implementing the photon counting detector which can be regarded as an important orientation of future deep-space X-ray communication applications. As the key specification of any given communication system, bit-error-rate level should be informed first. In addition, the theoretical analysis by using Poisson noise model also has been implemented to support this novel communication concept. Previous experimental results indicated that the X-ray audio demonstration system requires a 10^{-4} bit-error-rate level with 25 kbps communication rate. The system bit-error-rate based on on-off keying (OOK) modulation is calculated and measured, which corresponds to the theoretical calculation commendably. Another point that should be taken into consideration is the emitting energy, which is the main restriction of current X-ray communication system. The designed experiment shows that the detected X-ray energy is 7×10^{-5} mW/m². This relatively low power level not only restricts the bit rate of transceiver, but also increases the error fraction to some extent. Obviously, OOK modulation can meet the high communication rate and relatively low bit-error-rate requirement of current audio demo system. Current restriction has been pointed out and the potential improvement is also presented.

Keywords: X-ray communication, Poisson noise model, bit error rate, photon counting detector

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

DOI: 10.7498/aps.64.120701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11103069, 61471357).

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