

doi:10.3788/gzxb20174610.1035001

空间 X 射线通信链路建模与功率分析

苏桐^{1,2}, 李瑶^{1,2}, 盛立志¹, 强鹏飞^{1,2}, 陈琛^{1,2}, 徐能^{1,2,3}, 赵宝升¹

(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 100049)

(3 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘 要:从空间 X 射线通信传输理论出发, 首先对 X 射线通信的功率传输过程进行研究, 以加性高斯白噪声信道模型与自由空间损耗为基础, 分析了深空 X 射线通信的信道特征及功率传输过程, 推导了功率传输方程, 建立了通信链路模型; 其次, 分析了深空 X 射线通信系统的误差来源, 建立了基于单光子探测器的噪声模型, 并给出了主要噪声来源的数学表达式, 从而确定了通信核心参数通信距离、通信速率、误码率与信号功率之间的关系; 最后, 对不同阳极高压与不同调制方式下探测器端信号光子数进行实验监测, 对功率传输方程及误差模型进行验证. 实验结果表明, 所给出的功率传输方程与误差模型可以对空间 X 射线通信过程进行较好地解释. 根据此模型, 计算了在满足一定的误码率和传输距离要求时对 X 射线源出射功率的要求, 为空间 X 射线通信研究建立了理论基础, 为核心元器件的研究指明了下一步的方向, 同时有望对空间 X 射线通信的工程化提供一定的参考.

关键词: X 射线通信; 链路模型; 功率方程; 单光子探测; 误码率

中图分类号: TN012

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1035001-8

Space X-ray Communication Link Modeling and Power Analysis

SU Tong^{1,2}, LI Yao^{1,2}, SHSNEG Li-zhi¹, QIANG Peng-fei^{1,2},
CHEN Chen^{1,2}, XU Neng^{1,2,3}, ZHAO Bao-sheng¹

(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)

(3 School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: X-ray communication (Xcom) is a method which applying X-ray as carriers to transmit information in space. After the concept of Xcom was produced by Dr Keith, many institutions and scientists have conducted researches on Xcom and achieved fruitful results. However, most researches are focused on the key devices of Xcom, such as the X-ray emit source, the antenna and the detector, there is nearly no theoretical model for space X-ray communication. In this article, we focused on the power transmission process of space Xcom. To begin with, we analysed the signal channel and transmission model based on the additional gaussian white noise(AWGN) model and free space attenuation, established the power transmission equation and link model. Then we analysed the error source of Xcom, established the noise model based on single photon detectors and also given the main noise sources. In other words, we can built mathematical relationship between the power of X-ray source, transmitting distance & speed and bit-error-ration (BER). Finally, we testified the signal photons of Microchannel Plate

基金项目: 国家自然科学基金(No.61471357)资助

第一作者: 苏桐(1988—), 男, 研究实习员, 硕士研究生, 主要研究方向为 X 射线通信. Email: sutong@opt.ac.cn

通讯作者: 盛立志(1980—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为 X 射线探测. Email: lizhi_sheng@opt.ac.cn

导 师: 赵宝升(1959—), 男, 研究员, 学士, 主要研究方向为单光子探测. Email: open@opt.ac.cn

收稿日期: 2017-03-13; 录用日期: 2017-07-04

<http://www.photon.ac.cn>

(MCP) detector output against various anode voltage and modulations. The results accord well with the theoretical analysis, and the power transmission equation and BER model can explain the Xcom process well too. Based on this transmission theory, we can calculate the emit X-ray power against various transmission distance and BER level respectively. As a result, three key parameters which judging a wireless optical communication system have been given as well as the theoretical model. Simulation results showed that with a constant photons flow, Pulse Position Modulation(PPM) has a better BER level than On-Off Keying(OOK) modulation. When the transmission distance is about 10 km, in order to achieve BER less than 10^{-6} level, the power consumption of X-ray is less than 1mW. According to the power transmission model, in order to improve the BER level of Xcom system, we need a lower dark current detector, an advanced modulation and more transmitting power. These theoretical and experiment results could provide foundations for optimizing the core parameters of XCOM system in our future works.

Key words: X-ray communication; Link model; Power equation; Single photon detection; Bit error rate

OCIS Codes: 350.1260; 060.4510; 230.0250; 340.7480; 310.6860; 350.5500

0 引言

X射线通信是一种利用X射线作为载波传输信息的方式,相比于微波通信,X射线波长更短,理论上的通信带宽更高^[1].此外其单个光子能量更高,受空间环境中高能粒子的影响更小,利用X射线进行通信具有高度的定向性与保密性^[2].作为对传统通信方式的补充,X射线通信的潜在应用是微波与激光无法应用的场合,如X射线光子能量极大,可以轻易穿透大部分物体,应用于黑障区及电磁屏蔽场合的通信^[3].

2007年,NASA的Keith博士提出了X射线通信的概念并提出基于紫外LED与单光子探测器的验证方案.2011年,斯坦福大学的Kealhofer等人于提出了一种利用飞秒激光脉冲打击纳米尺寸尖端的X射线通信方法,对X射线发射源进行了优化研究^[4],2016年,NASA公布了可用于调制X射线源的Navcube计算平台,并计划2018年在国际空间站上实现X射线通信演示验证实验^[5].2011年,中科院西安光机所提出了基于栅控X射线管与单光子探测器的空间X射线通信方案,并于2013年实现了实验室验证.2015年,同济大学王占山等对X射线多层膜的反射机理进行了深入地研究^[6-7],同年,西安光机所研制了可用于X射线通信收发天线的多层嵌套式X射线聚焦光学,实现了10m真空管道的语言通信实验,通信速率可达240kbps^[8-9].此外,西安电子科技大学许录平等人提出了一种基于X射线圆偏振光通信测距一体化方案^[10-11],南京航空航天大学初步探索了X射线在穿透等离子体鞘套中的应用^[12],探索了X射线通信的潜在应用.自由空间X射线通信这一概念被提出后,各类研究机构与人员在核心元器件(包括X射线模拟源、探测接收装置及X聚焦光学等)方面开展了大量研究并取得了一定成果.然而,关于空间X射线的传输信道模型方面研究仍处在探索阶段,相关研究成果较少,极大地限制了空间X射线通信这一学科的发展.本文旨在从X射线传输理论出发,通过建立空间X射线通信功率传输方程与噪声模型,给出通信核心参数与传输功率之间的关系,从而填补了空间X射线通信理论研究上的空白.

衡量一个无线通信系统的参数指标分为有效性与可靠性两部分^[13-14].有效性包括通信距离与通信速率,可靠性由系统的误码率水平主导.对基于微通道板(MicroChannel Plate, MCP)探测器和强度调制/直接检测(Intensity Modulation/Directly Detection, IM/DD)的X射线通信系统而言,在通信过程中,空间背景光、信道干扰、光子的起伏以及MCP探测器的各种噪声都会对误码率产生影响,而探测器本身接收到的光功率又与通信距离相关^[15-16].因此在设计通信系统时,必须考虑到上述各种因素的影响,首先根据系统对通信速率的要求计算出探测器端所需接收到的最小信号功率;然后通过对MCP探测器的分析,得出系统噪声功率的大小;最后根据误码率指标来计算出射端的最小出射功率.

本文以加性高斯白噪声信道(Additional White Gaussian Noise, AWGN)模型为基础,分析了深空信道特征及功率传输过程,建立了深空X射线通信的信号功率传输模型;同时分析了深空X射线通信系统的误差来源,确定了通信距离、通信速率、误码率之间的关系;最后确定了在满足一定误码率和传输距离要求时对X射线源出射功率的要求.计算结果表明,在满足误码率小于 10^{-6} 量级,传输距离10 km时,脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)调制的所需的出射功率小于开关键控调制(On-Off Keying, OOK)调制,两种调制方式所需出射X射线光功率均小于1 mW.

1 信号功率传播模型

1.1 点光源 X 射线发射模型

如图 1 所示,一个点辐射源产生的 X 射线在空间中呈余弦分布.对此余弦分布积分,便可得到半球面内 X 射线光功率之和^[9,13]

$$P_T = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho \cdot \sin \theta (2\pi L \cos \theta) (L d\theta) = 2\pi L^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho \sin \theta \cos \theta d\theta = \rho \pi L^2 \quad (1)$$

式中, ρ 为单位时间内、水平方向上距离点光源 L 处,单位面积上的 X 射线功率.

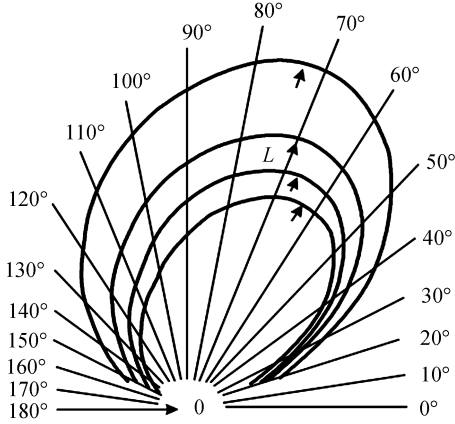


图 1 点辐射 X 射线源空间分布

Fig.1 Spatial distribution of point radiation X-ray source

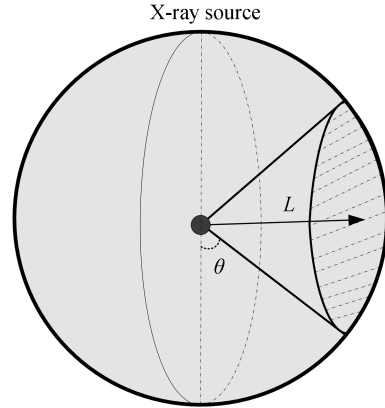


图 2 X 射线管辐射场分布模型

Fig.2 Radiation distribution of X-ray source

当出射 X 射线经过空间传输后,考虑到自由空间损耗,在距离发射源 L 处,只有在探测器收集范围内的 X 射线光子能够被接收,在此收集范围内的 X 射线光子相当于图 2 中与距离 L 所对应的球冠所发出,其光功率之和可表示为^[17-18]

$$P_C = \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \rho \cdot \sin \theta (2\pi L \cos \theta) (L d\theta) = 2\pi L^2 \int_{\theta}^{\frac{\pi}{2}} \rho \sin \theta \cos \theta d\theta = \rho \pi L^2 \cos^2 \theta \quad (2)$$

可以看出,在水平方向上传播的 X 射线光子经过距离 L 的传播后,收集角内的 X 射线光子功率与总的出射 X 射线光子功率之间存在一个余弦平方的损耗关系.

1.2 信号功率传播方程

通信数据经过调制之后,加载到 X 射线源的栅极上,栅极的通、断对应着数字信号 1 或 0.源出射的 X 射线光子经过准直光学增益后在空间信道中传输,在探测器端经聚焦光学的收集被捕获并还原为可被处理的电信号.对于信号光功率而言,X 射线在深空中传输看作是无衰减的自由空间传输,只需要考虑传播过程中的几何衰减即可.在 X 射线通信过程中,能量由最初加载在发射源上的电功率转变为了可被探测器接收的光子脉冲^[19-20].其功率转换过程可以分解为:

1) 发射源外加电功率 P_E : 表征发射源外加电功率中用于产生阴极电子的部分功率,表现为产生大量的阴极电子用以轰击阳极靶材,大小由阳极高压与管流决定.

2) 发射源出射 X 射线总功率 P_T : 表征发射源所出射的 X 射线功率总和,取决于电子打靶效率、X 射线光子能量以及输出窗对 X 射线的透过率等因素.它们之间关系为

$$P_T = P_E \cdot \eta_e \quad (3)$$

式(3)中, η_e 为电子打靶产生 X 射线光子的概率.

3) 准直光学后出射 X 射线功率 P_F : 发射源出射的 X 射线光子在空间中呈余弦分布,准直光学的引入正是为了收集尽可能多的光子提供给探测端,同时减小出射 X 射线的发散角,以提高通信系统核心参数,受准直光学效率影响,具体参数有收集角、有效收集面积、出射发散角等.

$$P_F = P_T \cdot \eta_f \quad (4)$$

式(4)中, η_f 为 X 射线准直光学的效率.

4)到达探测器处的 X 射线单位面积功率 P_A :经准直光学后,X 射线近似于平行出射,经过空间传输后,到达探测器端,此过程中主要受自由空间损耗的影响,此时

$$P_A = P_F / \pi \left(L \tan \frac{\bar{\omega}}{2} \right)^2 \quad (5)$$

式(5)中, L 为 X 射线传输距离, $\bar{\omega}$ 为经准直光学后 X 射线发散角.

5)探测器接收到的功率 P_D :到达探测器端的功率仍然是一种球面辐射分布,而探测器只能捕获到其中的一部分光子,最终由探测器接收到的光功率与聚焦光学效率、探测器面积以及探测效率相关.

$$P_D = P_A \cdot A_E \cdot \eta_d \quad (6)$$

式(6)中, A_E 为经聚焦光学后有效收集面积, η_d 为探测器的探测效率.

因此,在空间 X 射线通信系统中,由 X 射线源发射的调制光功率,经过准直光学增益、自由空间衰减、接收光学增益后,最终由探测器接收到的光功率可表示为

$$P_D = P_T \cdot \eta_t \cdot A_E \cdot \eta_d / \pi \left(L \tan \frac{\bar{\omega}}{2} \right)^2 \quad (7)$$

故只要确定了探测器端所需要的最小功率 P_D ,就可以根据式(7)反推出在一定通信距离下的 X 射线源的发射功率,从而将通信速率、通信距离与发射功率结合起来.

1.3 误码率计算模型

定义一个无线通信系统有三个核心指标,通信距离与通信速率已由式(7)给出,通过对 X 射线通信系统误码率的分析可知其误码率可表示为任意一个比特周期内产生的误差概率,误码率来自于对接收到光子数的误判断.当两个信号出现的概率相等时,其误码率可以写成^[21]

$$PE = \frac{1}{2} \langle PE | 1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE | 0 \rangle \quad (8)$$

对于强度调制/直接检测(IM/DD)而言, $\langle PE | 1 \rangle$ 指每比特内接收光子数目大于等于门限值 k_t ,即应该被判定为 1,而被判定为 0 的情况;同理 $\langle PE | 0 \rangle$ 对应每比特内接收光子数目小于门限值 k_t ,即应该被判定为 0,而被判定为 1 的情况,故任一比特周期内产生一个比特误差的概率可写成

$$PE = \frac{1}{2} \langle PE | 1 \rangle + \frac{1}{2} \langle PE | 0 \rangle = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=0}^{k_t} \frac{(k_s + k_n)^k}{k!} e^{-(k_s + k_n)} + \sum_{k=k_t}^{+\infty} \frac{k_n^k}{k!} e^{-k_n} \right] \quad (9)$$

最终误码率公式由三个参数决定,分别是光子数判断门限 k_t 、每比特内信号光子数 k_s 和每比特内噪声光子数 k_n ,只要预先确定其中一个值,就可以根据误码率的量级确定剩余两个参数之间的关系.其中, k_t 为可调的设定阈值, k_s 是发射功率的另一种表示,而 k_n 则对应着信道中噪声光子数.通过分析探测器输出特性,就可对误码率进行定量的分析,从而给出 X 射线通信系统的三个核心参数.

2 MCP 探测器噪声功率分析

2.1 X 射线通信系统噪声来源分析

在 IM/DD 通信系统中,信息加载在光子上,并通过对光强的调制来实现数字信号的传递.探测器端除了接收加载有信息的 X 射线光子外,背景光所造成的探测器响应、探测器自身的本底噪声,都会对系统的判决

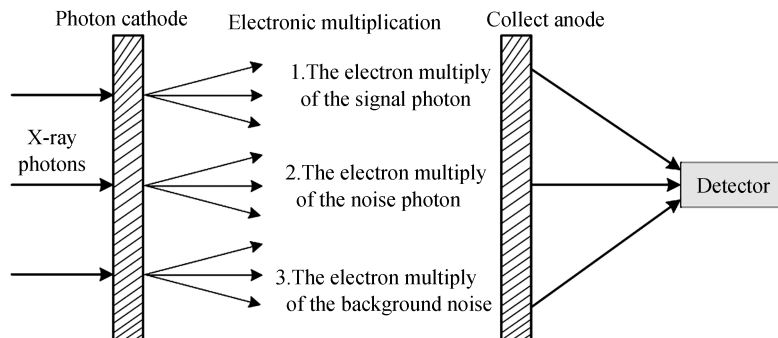


图 3 MCP 探测器的电子倍增过程

Fig.3 Electron multiplication process of the MCP detector

造成影响.X 射线通信系统噪声主要有三个来源^[22-24]:首先是背景光对探测器的影响,除了信号 X 射线光子之外,处在探测器响应能段之内的背景光信号也会引起探测器响应;其次是探测器的本底噪声:主要由 MCP 探测器阴极的暗电流及探测系统热噪声引起;最后是光子起伏,即到达探测器端的信号光和背景光,在被探测系统捕获接收时服从统计规律,由于每一时刻到达探测器的光子数目是随机的,因此由光所激发的载流子也是随机的且服从泊松分布,MCP 探测器的电子倍增过程如图 3.

2.2 MCP 探测器噪声分析

阴极暗电流:光发射型探测器的暗电流是指在没有任何光照的情况下,阴极材料的热激发作用所引起的电子发射,由理查森公式决定^[25]

$$i_a = aAT \exp [-W/kT] \quad (10)$$

式中 a 是阴极材料决定的比例系数, A 为光阴极的面积, T 为温度, W 是材料的逸出功, k 是玻尔兹曼常数.

MCP 倍增对信噪比的影响:当由光子激发的电子与阴极暗电流对应的电子进入微通道板时,由于在通道中的倍增是一个随机过程,因此 MCP 本身就会对倍增信号产生附加的噪声,此噪声可以用 MCP 的噪声因子 F 来表示,关系为^[26-27]

$$\text{SNR}_{\text{out}} = \text{SNR}_{\text{in}} / \sqrt{F} \quad (11)$$

同时,H. Pollehn 等推导出^[28]

$$F = \gamma^{-1} \cdot (1 + D^2 / \bar{K}^2) \quad (12)$$

式中, γ 是 MCP 的开口面积比; D^2 是 MCP 输出电子数分布的方差; \bar{K} 是 MCP 的平均增益.

等效负载热噪声的影响:光电探测器的热噪声存在于任何导体和半导体中,其具有有以下特点:与温度成正比;与测量仪器的电子带宽成正比,而与频率无关;热噪声与阻抗中是否有电流流过无关.光电子发射型探测器的热噪声来自于等效输出阻抗 R_L 的热噪声,由式(13)决定^[23]

$$\overline{i_{nL}^2} = 4kT\Delta\nu/R_L \quad (13)$$

2.3 MCP 探测器噪声等效光子数

由于探测器的收集阳极所接收到的信号是经过 MCP 倍增后的电子云团,无法判断出所接收的是由信号 X 射线光子产生还是 MCP 的噪声经倍增后产生.故通过对 MCP 的探测过程进行分析,计算出单位时间内到达收集阳极处的噪声电流大小,根据 MCP 的电子倍增过程,将其换算成等效噪声阴极电流由式(14)表示

$$i_n = aAT \exp (-W/kT) \sqrt{F} + \sqrt{4kT\Delta\nu/R_L} / \bar{K} \quad (14)$$

在 MCP 探测器中,光阴极的作用是将光子转换成电子,产生的电子在微通道板中倍增,故可根据光阴极的光子-电子转换效率将 MCP 探测器的等效噪声阴极电流 i_n 换算成噪声等效 X 射线光子数.也就是说,将在探测过程中引入了噪声等效光子数,从而将 i_n 与误码率公式中每比特噪声光子数 k_n 联系起来,得到信噪比与通信速率、误码率之间的关系.

在当前的通信系统中,采用阴极尺寸为 $\Phi 50$ mm、等效负载阻抗为 50Ω 、开口比 0.7、Z 型 MCP 的平均增益为 \bar{K} 在 10^7 量级左右.同时,实验所采用的 Z 型 MCP 探测器的时间分辨能力为 18.4 ns,对应探测器带宽为 5.4×10^4 Hz.CsI 光阴极厚 120 nm,而阴极产生一个二次电子所需的能量为 7 eV,故当入射 X 射线光子能量为 E eV 时,一个光子就会在 CsI 阴极内部产生 $E/7$ 个电子^[29].将上述参数代入到式(14)中,可得到室温下,直径 $\Phi 50$ mm 的 MCP 探测器每秒的噪声指标为

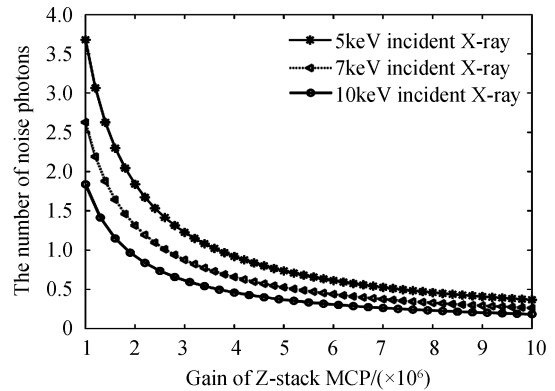


图 4 不同 Z 型 MCP 增益和 X 射线光子能量时的噪声等效光子数

Fig.4 The relationship of \bar{K} and K_N against different incident X-ray energy

$$K_N = 1.84 / (E \cdot \bar{K}) \times 10^{11} \text{ cps} \quad (15)$$

式中, E 是入射 X 射线光子的平均能量, 单位为 eV, \bar{K} 是 MCP 的平均增益, 与微通道板之间所加高压的数值相关. 如图 4 可以看出, 对 Z 型 MCP 探测器而言, 随着探测器增益增大, 入射 X 射线平均能量增加时, 其等效噪声光子数越少.

3 实验与计算

3.1 不同 X 射线光子能量下 MCP 噪声

MCP 探测器的噪声表现为暗计数, 实验统计了在不同 X 射线光子能量下, Z 型 MCP 探测器的平均暗计数指标. 其中 Z 型 MCP 的增益 \bar{K} 为 10^7 , 理论计算值与实验值如表 1. 由表 1 可知, 测试值接近理论值并符合理论模型的趋势.

表 1 不同光子能量下理论与实测 Z 型 MCP 的噪声光子数
Table 1 The number of equivalent noise photon against different X-ray energy

Anode voltage	Average photon energy	Theoretical/cps	Experiment/cps
10 kV	5 keV	3.8	4.5
14 kV	7 keV	2.6	3.2
20 kV	10 keV	1.8	2.3

3.2 噪声光子数与误码率的关系

根据式(9)可计算出在不同门限值和实际噪声光子数水平下, 不同误码率量级时每比特信号中所需的 X 射线信号光子数如表 2.

表 2 OOK 调制时达到不同误码率量级所需信号光子数
Table 2 The required Ks against different Kt (OOK)

Thresholdkt	10^{-3} Level	10^{-4} Level	10^{-5} Level	10^{-6} Level
1	10	12	15	17
2	12	14	17	20
3	14	16	19	22
4	15	18	21	24
5	17	20	23	26

同理在 L-PPM 调制模式下的误码率可改写为

$$PE = \langle PE | 1 \rangle = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{k_t} \frac{(k_s + k_n)^k}{k!} e^{-(k_n + k_s)} \quad (16)$$

当采用 4PPM 调制, $L=4$, 展开式(16), 可求出不同门限和实际噪声光子数水平下、误码率量级时每比特内的信号光子数目, 如表 3.

表 3 4PPM 调制时达到不同误码率量级所需信号光子数
Table 3 The required Ks against different Kt (4PPM)

Thresholdkt	10^{-3} Level	10^{-4} Level	10^{-5} Level	10^{-6} Level
1	6	8	11	13
2	7	10	13	15
3	9	12	15	18
4	10	13	17	19
5	11	15	18	21

当采用 16PPM 调制, $L=16$ 时, 可求出不同门限和实际噪声光子数水平下、误码率量级时每比特内信号光子数目如表 4.

表 4 16PPM 调制时达到不同误码率量级所需信号光子数
Table 4 The required Ks against different Kt (16PPM)

Thresholdkt	10^{-3} Level	10^{-4} Level	10^{-5} Level	10^{-6} Level
1	5	8	10	12
2	6	9	12	15
3	7	11	14	17
4	8	11	15	18
5	9	13	16	19

3.3 X 射线源最小出射功率的计算

MCP 探测器端接收到的光功率可由单位时间接收的 X 射线光子功率决定,可写成 $P_D = k_s V E e$, 其中 k_s 是每比特内信号光子数目,在已知误码率量级时可由式(9)和式(16)求出, V 为通信速率,单位为 bps, E 为 X 射线光子平均能量,单位为 eV, e 是电子伏特与 SI 制的能量单位焦耳(J)的换算系数, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$. 于是根据式(9)可以反推出达到特定量级的误码率、通信距离时对源出射 X 射线功率的要求为

$$P_T = k_s V E \pi \left(L \tan \frac{\bar{\omega}}{2} \right)^2 e / \eta_i \eta_d A_E \quad (17)$$

当入射 X 射线能量 $E = 1.49 \text{ keV}$ 时,基于 Wolter I 型原理的多层嵌套式聚焦光学在半径 $r = 50 \text{ mm}$ 、焦距 $f = 1 \text{ 150 mm}$ 时 $\eta_f = 0.001 \text{ 886}$,此时 $\tan(\bar{\omega}/2) = 0.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 、 $A_E = 5 \text{ 700 mm}^2$ 、MCP 探测器效率 $\eta_d = 0.2^{[8,30]}$,可计算出通信速率 6.25 kbps ,误码率 10^{-6} 量级下不同调制方式和通信距离所需的 X 射线源出射功率如图 5.

由图 5 可以看出,在满足误码率小于 10^{-6} 量级,传输距离 10 km ,出射 X 射线的光功率小于 1 mW ,16PPM 调制所需的出射 X 射线功率小于 4PPM 和 OOK 调制.根据式(17),后期可以通过改进 X 射线源的设计,提高出射 X 射线源的功率,并加入信源编码,提高 X 射线聚焦光学系统和探测器的效率入手,指导 X 射线通信的进一步优化发展.

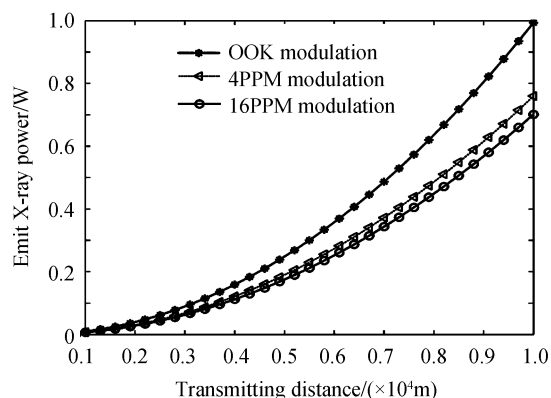


图 5 不同调制方式与通信距离满足误码率 10^{-6} 量级时 X 射线源所需的出射功率

Fig.5 The emit X-ray power against 10^{-6} BER level and different transmitting distance

4 结论

本文针对 X 射线通信信道模型建立中存在的不足,以加性高斯白噪声信道为基础,分析了深空信道特征及 X 射线通信的功率传输过程;通过分析深空 X 射线通信系统的误差来源,以及 MCP 探测器等效噪声光子数与增益和入射 X 射线光子能量之间的关系,给出了通信距离,通信速率,误码率的数学表达式,并指出了它们与传输光功率之间的关系;同时计算了不同调制模式、通信速率和误码率时对信号光子数的要求;并通过数值仿真与实验设计,对所建立的功率传输方程与噪声模型进行了验证,实验结果表明,在现有条件下,要实现 1 M bps 速率,误码率优于 10^{-6} 量级的空间通信,必须保证每秒内接收到的信号光子数大于 1.312×10^7 个(即探测器输出功率大于 10 nW),从而对包括发射源、探测器、收发天线等核心元器件提出了要求.下一步拟从 X 射线源结构优化与大面积、高时间分辨率的 X 射线探测器量子效率提高两方面入手,进一步优化 X 射线通信核心参数指标,为 X 射线通信的工程化奠定基础.

参考文献

- [1] ZHAO Bao-sheng, WU Chuan-xing, SHENG Li-zhi, *et al.* Novel space X-ray communication based on X-ray[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 801-804.
赵宝升,吴川行,盛立志,等.基于 X 射线的新一代深空无线通信[J].光子学报,2013, **42**(7): 801-804.
- [2] SHEIKH S I, PINES D J. Recursive estimation of spacecraft position and velocity using X-ray pulsar time of arrival measurements[J]. *Navigation*, 2006, **53**(3): 149-166.
- [3] JABLONSKI, D G. The information-theoretic limits for the performance of X-ray source based navigation (Xnav) and X-ray communication (Xcom)[C]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009, 1458-1466.
- [4] KEALHOFER, FOREMAN S M, GERLICH S, *et al.* *Physical Review B Condensed Matter*, 2012, **86**(3): 165-173.
- [5] KEITH G. Dr. Keith Gendreau talk about NICEER and Modulate X-ray source [EB/OL]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nasa-s-navcube>.
- [6] CHEN S, MA S, WANG Z, *et al.* Wolter-I-like X ray telescope structure using one conical mirror and one quadric mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(12): 156-160.
- [7] ZHU J, TU Y, LI H, *et al.* X-ray nanometer focusing at the SSRF based on a multilayer laue lens[J]. *Chinese Physics*

- C, 2015, **12**: 104-106.
- [8] LIU Duo, QIANG Peng-fei, LI Lin-seng, *et al.* Study of the X-ray focusing optics in the X-ray communication[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(1): 63-68.
刘舵, 强鹏飞, 李林森, 等. 一种 X 射线聚焦光学及其在 X 射线通信中的应用 [J]. 物理学报, 2016, **65**(1): 63-68.
- [9] ZHAO Bao-sheng, SU Tong, SHENG Li-zhi. *Conspectus of spatial X-ray communication*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
赵宝升, 苏桐, 盛立志. 空间 X 射线通信概论[M]. 科学出版社, 2016.
- [10] SONG S, XU L. X-ray communication based simultaneous communication and ranging[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(9): 289-298.
- [11] SONG S, XU L, ZHANG H, *et al.* Novel X-ray communication based XNAV augmentation method using X-ray detectors[J]. *Sensors*, 2015, **15**(9): 22325-22342.
- [12] LI H, TANG X, HANG S, *et al.* Potential application of X-ray communication through a plasma sheath encountered during spacecraft reentry into earth's atmosphere[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**(12): 123101.
- [13] 柯熙政; 席晓莉, 无线激光通信概论[M]. 北京邮电大学出版社: 2004.
- [14] SU Y, HU H, FENG H, *et al.* A novel generation scheme of ultra-short pulse trains with multiple wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2017, **389**: 176-180.
- [15] MA Jing, TAN Li-ying, WANG Qi, *et al.* The progress and trend of research of inter satellite optical communication [J]. *Chinese Journal of Space Science* 2000, **20**(S1): 127-136.
马晶, 谭立英, 王骥, 等. 卫星光通信研究进展及趋势 [J]. 空间科学学报, 2000, **20**(S1): 127-136.
- [16] WEI A, HAN B, ZHAO W, *et al.* The influence of atmospheric turbulence on IM/DD space optical communication system[C]. International Symposium on Photoelectronic Detection & Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013: 275-276.
- [17] DENG Ning-qing, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Voice communication system based on X-ray[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(6): 060705.
邓宁勤, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 X 射线的空间语音通信系统 [J]. 物理学报, 2013, **62**(6): 060705.
- [18] 马晓飞. 基于空间 X 射线通信的脉冲发射源研究[D]. 中国科学院研究生院, 西安光学精密机械研究所, 2014.
- [19] HANG B, HU H, WANG W, *et al.* Influence of laser linewidth and polarization modulator length on polarization shift keying for free space optical communication[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 8639-8649.
- [20] HU Hui-jun, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Study of the photo-counting detector used for X-ray navigation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(1): 526-531.
胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 等. 用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器研究 [J]. 物理学报, 2012, **61**(1): 526-531.
- [21] WANG Lv-qiang, SU Tong, ZHAO Bao-sheng, *et al.* Bit error rate analysis of the X-ray communication system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(12): 115-119.
王律强, 苏桐, 赵宝升, 等. X 射线通信系统的误码率分析[J]. 物理学报, 2015, **64**(12): 115-119.
- [22] WANG Xiao-ru, GUO Lei, LIU Ye-jun, *et al.* Design of the optics communication link between the earth and moon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 81-84.
王小瑞, 郭磊, 刘业君, 等. 月地光通信的链路设计 [J]. 光子学报, 2014, **43**(S1): 81-84.
- [23] SONG Juan, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Selection of MCP for array X-ray pulsar navigation detector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 402-407.
宋娟, 赵宝升, 盛立志, 等. X 射线脉冲星导航探测器的微通道板甄选[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2): 402-407.
- [24] XU Guo-dong, SONG Jia-ning, LI Peng-fei. Pulsar navigation adaptive filtering algorithm based on information quality [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 827-837.
徐国栋, 宋佳凝, 李鹏飞. 基于信息质量的脉冲星导航自适应滤波算法[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(3): 827-837.
- [25] BOUTBOUL T, AKKERMAN A, GIBREKHTERMANA, *et al.* An improved model for ultraviolet- and x-ray-induced electron emission from CsI[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **86**(10): 5841-5849.
- [26] SHCHEMELEV VN, SAVINOV EP. Total quantum-current yield in the soft x-ray region[J]. *Physics of the Solid State*, 1998, **40**(6): 952-955.
- [27] CUI H, ZHAO Y, JIANG S, *et al.* Experiment of Si target ablation with soft X-ray laser operating at a wavelength of 46.9nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **46**(1): 20-24.
- [28] POLLEHN H, BRATTON J, FEINGOLD R. Low noise proximity focused image intensifiers [J]. *Advances in Electronics & Electron Physics* 1974, **40**: 21-31.
- [29] 胡慧君. 用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器及其关键技术研究[D]. 中国科学院研究生院, 2011.
- [30] 么周石. 空间光通信链路关键技术研究[D]. 电子科技大学, 2004.