

基于 QAM 的 X 射线通信系统性能改善方法

王润^{1*}, 薛凤凤¹, 薛阳¹, 林俊龙², 李娜¹

¹空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077;

²93575 部队, 河北 承德 067000

摘要 针对复杂深空通信环境对 X 射线通信系统抗噪声性能的影响, 提出一种基于正交振幅调制(QAM)的误码率优化模型。通过分析实际通信环境中的噪声来源, 并结合现有的 X 射线通信链路模型, 给出主要噪声来源的数学表达式; 基于泊松分布模型, 建立 QAM 方式下强度调制直接检测(IM/DD)系统中通信误码率的计算模型, 并通过模拟仿真验证其有效性。仿真结果表明, 该模型的误码率可降至 10^{-6} 量级, 与现有的二进制启闭键控(OOK)和脉冲位置调制(PPM)方法相比, 当接收到相同的光子数时, 该模型所需发射的光子数更少, 尤其是当通信系统处于噪声干扰强度极不稳定的环境中时, 该模型更具优势。

关键词 X 射线通信; 正交振幅调制; 功率方程; 误码率

中图分类号 TN927

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.063401

Performance Improving Method of X-Ray Communication System Based on QAM

Wang Run^{1*}, Xue Fengfeng¹, Xue Yang¹, Lin Junlong², Li Na¹

¹Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

²The 93575 Unit, Chengde, Hebei 067000, China

Abstract Aiming at the influence of the complicated deep-space communication environment on the anti-noise performance of X-ray communication system, a bit error rate optimization model is proposed based on quadrature amplitude modulation (QAM). The mathematical expression of the primary noise source is derived through analyzing the noise source in actual communication scenario combined with an existing X-ray communication link model. On the basis of Poisson distribution model, the calculation model of the communication error rate in intensity modulation direct detection (IM/DD) system is established under the QAM mode, and its effectiveness is verified by simulation. The simulation result shows that the bit error rate of QAM system can be reduced to 10^{-6} orders of magnitude. When the same amount of photons are received, the proposed method launched less photons compared with the existing binary on-off keying (OOK) and pulse position modulation (PPM) methods. Furthermore, this proposed method is suitable for the modulation of the space X-ray communication system when it is deployed in the environment with an unstable noise intensity.

Key words X-ray communication; quadrature amplitude modulation; power equation; bit error rate

OCIS codes 340.7480; 060.2605; 140.7240

1 引言

自 1895 年伦琴发现 X 射线^[1]后, 科学家除了发现 X 射线可在医学和工业等众多领域发挥巨大作用外, 还发现很多其他特性, 例如, X 射线作为一种波长更短、频率更高的电磁波, 被视为一种新型的

无线通信载体并成为国内外近年来的研究热点^[2]。由于 X 射线在深空中传播的频率很高, 具有极强的穿透能力, 其传播效率几乎可达到 100%, 所以将 X 射线作为载波进行通信, 不仅对现有的无线通信技术如微波通信和激光通信等起到良好的补充作用^[3], 同时也能在微波或激光到达不了的通信环境

中发挥其独特的作用,将极大地节省人力、物力和财力。

然而瞬息万变的大气环境容易造成整个通信系统上下行链路不对称和路径损耗严重,使得 X 射线应用在深空通信的工作过程十分复杂,国内外关于 X 射线通信系统的研究和应用刚刚起步。正交振幅调制(QAM)作为一种应用广泛的矢量数字调制技术,是在联合调制幅度和相位的同时利用载波的幅度和相位来传递信息比特,因此,在最小通信距离和相同通信速率的条件下具有较高的频带利用率和抗干扰能力^[4],可较好改善环境噪声不稳定情况下的通信效果。

针对环境噪声引起的误码严重影响通信效果的问题,本文将 QAM 方式用于改善 X 射线通信性能。以现有的二进制启闭键控(OOK)及脉冲位置调制(PPM)方法为基础,使用接收信号光子近似呈二维泊松分布^[5]的硅漂移(SDD)探测器作为接收端,基于 QAM 方式对 X 射线通信系统的误码率进行理论与仿真,并将接收光子数的门限值多维化。该方法不仅能降低 X 射线通信系统中的误码率,也为探索复杂环境中的 X 射线通信提供了更多途径,但由于 QAM 方式较为复杂,其计算与实现过程对软硬件的要求相对已有的调制手段更高^[6],所以对 X 射线通信系统的调制方法仍需进一步研究。

2 X 射线通信系统传输性能的影响因素

X 射线具有高度的定向性,在传输过程中的能量相对集中,发射机的发射功率可大大降低,整个通信发射机的功耗相对较低,所以可望在较小的体积、质量和功耗下实现远距离深空传输^[7]。但是在整个 X 射线通信过程中,能量由最初的电功率变成可被探测器接收到的 X 射线光功率的过程非常复杂,若要实现将 X 射线作为载波进行通信,首要解决的问题是 X 射线的产生、聚焦、传输、编码调制和探测器的选择等关键技术^[8]。

电子束打靶产生的 X 射线由多能段 X 射线谱共同组成,其中包括固定能量的特征谱和连续能量段的连续谱(取决于阳极靶材和阳极高压),因此选用 X 射线发射源技术具有一定的限制性。目前 X 射线通信系统的调制方式为强度调制,在此基础上,通过优化系统设计方案,从中选择合适的 X 射线通信系统的编码调制方法来降低系统误码率成为研究的一个重点方向。

3 X 射线信号功率及误码率计算模型

3.1 X 射线信号传输功率方程

在 X 射线通信系统中,信号功率大致可分为发射源的外加功率,X 射线的出射功率,经过光学准直后的剩余功率,进入 X 射线探测器的总功率以及在探测器可探测范围内的功率^[9]。在发射端,对辐射源进行数学计算很容易得出总的出射光功率,而在深空传输中 X 射线的出射光功率几乎无衰减,只存在部分几何衰减;在接收端,由于探测器性能的影响,可收集角内 X 射线光子范围,相当于一个发散的部分球冠^[10],X 射线发射及探测分布模型如图 1 所示。

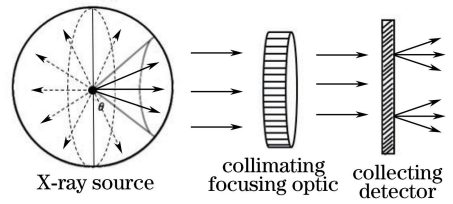


图 1 X 射线发射及探测分布模型

Fig. 1 Distribution model of X-ray emission and detection

在空间 X 射线通信系统中^[2-3],由 X 射线源发射的调制光功率,经过光学准直增益,自由空间衰减和光学接收增益之后,最终由探测器调制解调所剩余的光功率可表示为

$$P_D = \frac{P_T \cdot \eta_i \cdot A_E \cdot \eta_d}{\pi \left(l \tan \frac{\omega}{2} \right)^2}, \quad (1)$$

式中, P_T 为发射源出射 X 射线总功率, η_i 为 X 射线光学准直的效率, A_E 为光学聚焦后的有效收集面积, η_d 为探测器的探测效率, l 为 X 射线的通信距离, ω 为经光学准直后的 X 射线发散角。由(1)式可知,当 X 射线通信系统所处的传输环境相同时,只需确定探测器端所需最小功率 P_D 就可反推出在一定通信距离 l 下的 X 射线源的发射功率,从而可将通信速率和通信距离与发射功率结合起来^[11]。

3.2 系统误码率计算

在无线通信系统中,误码率可表示为任意一个比特周期内产生一个比特错误的概率,对于强度调制直接检测(IM/DD)系统来说,信号将表示为 1 和 0 两个离散值^[12],噪声主要来自光子探测器暗电流和能量较低的背景光子,噪声光子的到达时间及数目无法确定,由此符合泊松分布模型^[13]。前文已给出了 X 射线通信系统的通信距离及速率,分析通信

误码率可知误码率 r_e 可表示为任意一个比特周期内对接收到光子数的误判断而产生的误差概率。

根据文献[7],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。当两个信号出现概率相同时,其误码率形式可表达为

$$r_e = \frac{1}{2}(r_e/1) + \frac{1}{2}(r_e/0), \quad (2)$$

式中, $(r_e/1)$ 为每比特内光子数目大于等于门限值(应该被判定为 1),信号被判定为 0 的情况;同理, $(r_e/0)$ 为每比特内光子数目小于门限值(应该被判定为 0),信号被判定为 1 的情况。由于噪声光子数与信号功率相比较弱,同时光子计数检测法是一个离散的概率过程,所以接收端的光子数在单位时间内出现的个数可近似看作为泊松分布^[14-15],用已知的泊松分布统计模型表示为

$$r_e = \frac{1}{2}(r_e/1) + \frac{1}{2}(r_e/0) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=0}^{Nk_t} \frac{(k_s + k_n)^k}{k!} \exp[-(k_s + k_n)] + \sum_{k=Nk_t}^{+\infty} \frac{(k_n)^k}{k!} \exp(-k_n) \right\}, \quad (3)$$

式中, k 为光子数判断门限, Nk_t 为设定的门限值数目, k_n 为每比特内的噪声光子数, k_s 为每比特内的信号光子数。同理可得出在 PPM 下的简化误码率模型为

$$r_e = \frac{1}{L}(r_e/1) + \frac{L-1}{L}(r_e/0) = \frac{1}{L} \exp(-k_s) + \frac{L-1}{L} [1 - \exp(-k_n)], \quad (4)$$

式中, L 为 PPM 的位数。

对于 M 位正交振幅调制(M -QAM)而言,误码率同样来源于对接收到光子脉冲的误判断,利用这种振幅和相位相结合的联合键控,可同时通过载波的幅度和相位来传输信号信息^[16],其调制解调的原理如图 2 所示。

在 X 射线通信系统中采用 QAM 方式进行调

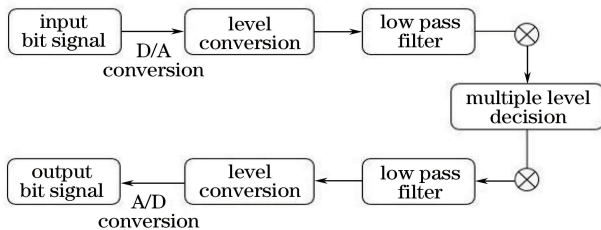


图 2 M -QAM 方式原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of M -QAM mode

制解调,如果在单位时间内传输 1 比特信号数据,则单位时间将被平均分为 M 个时隙,当在接收端设立不同的门限值(此处设定门限值均为初始门限 k_t 的整数倍,如 $k_t, 2k_t, \dots, Nk_t$)时,使用判决器并比较输入信号和噪声信号之间能量幅度与相位之间的差别。如果发送端发送的信息数据可传至接收端, M 时隙中同一门限值区间的任意时隙会表现为高电平即为“1”,其他时隙则表现为低电平即为“0”^[17],再经过包络检测将输入的信号加以调制解调,从而计算调制解调下的误码率。将探测器接收光子数的过程视为泊松分布^[18],理论上可得到在 M -QAM 方式下的误码率模型为

$$r_e = \frac{1}{M} \{ (r_e/0) + (r_e/1) + (r_e/2) + \dots + (r_e/N) \} = \frac{1}{M} \left\{ N - \left[\sum_{k=0}^{k_t} \frac{k_n^k}{k!} \exp(k_n) + \sum_{k=k_t}^{2k_t} \frac{(k_s + k_n)^k}{k!} \exp[-(k_s + k_n)] + \dots + \sum_{k=Nk_t}^{+\infty} \frac{(Nk_s + k_n)^k}{k!} \exp[-(Nk_s + k_n)] \right] \right\}, \quad (5)$$

由(5)式可知,当设定一定的误码率量级时,根据实际环境的噪声光子数,可预先设定所需门限值的数目及大小,从而判断要达到一定的误码率量级所需发射的最少信号光子数,在此基础上对误码率进行定量分析,由此得到探测器输出特性,并给出 X 射线通信系统的三个核心参数。

4 计算与仿真

微通道板(MCP)探测器的噪声表现为光子的暗计数,查阅文献可知在不同 X 射线光子能量下 MCP 探测器的平均暗计数指标^[5]。其中 Z 型 MCP 的增益为 10^{-7} ,理论计算值与实验值见表 1。下文中计算与仿真均使用噪声光子数的实验值来完成。

表 1 不同光子能量下 Z 型 MCP 的噪声光子数

Table 1 Noise photon number of Z-MCP under different photon energies			
Voltage / kV	Average photon energy / keV	Theoretical value / s^{-1}	Experimental value / s^{-1}
10	5	3.8	4.5
15	7	2.6	3.2
20	10	1.8	2.3

在 M -QAM 方式下^[19],根据第 3 节建立的数学模型,可计算出 4-QAM 和 16-QAM 条件下误码率的计算模型分别为

$$r_e = \frac{1}{M} \{ (r_e/0) + (r_e/1) + (r_e/2) + \dots + (r_e/4) \} =$$

$$\frac{1}{M} \left\{ 4 - \left[\sum_{k=0}^{k_t} \frac{k_n^k}{k!} \exp(-k_n) + \sum_{k=k_t}^{2k_t} \frac{(k_s + k_n)^k}{k!} \exp[-(k_s + k_n)] + \dots + \sum_{k=4k_t}^{+\infty} \frac{(4k_s + k_n)^k}{k!} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \exp[-(4k_s + k_n)] \right] \right\}, \tag{6}$$

$$r_e = \frac{1}{M} \{ (r_e/0) + (r_e/1) + (r_e/2) + \dots + (r_e/16) \} =$$

$$\frac{1}{M} \left\{ 16 - \left[\sum_{k=0}^{k_t} \frac{k_n^k}{k!} \exp(-k_n) + \sum_{k=k_t}^{2k_t} \frac{(k_s + k_n)^k}{k!} \exp[-(k_s + k_n)] + \dots + \sum_{k=16k_t}^{+\infty} \frac{(16k_s + k_n)^k}{k!} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \exp[-(16k_s + k_n)] \right] \right\}. \tag{7}$$

在不同门限值与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 射线信号光子数分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 4-QAM 系统下不同误码率量级所需的信号光子数
Table 2 Signal photon number of different orders of bit error rate for 4-QAM system

Threshold	Magnitude			
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
1	6	8	11	13
2	7	9	12	14
3	8	10	13	15
4	10	12	14	17
5	11	13	16	18
6	13	14	17	20

表 3 16-QAM 系统下不同误码率量级所需的信号光子数
Table 3 Signal photon number of different orders of bit error rate for 16-QAM system

Threshold	Magnitude			
	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
1	5	8	10	12
2	6	9	11	13
3	7	10	12	14
4	9	11	13	16
5	10	13	15	17
6	11	14	16	18

由表 2 和表 3 可知,随着门限值的增大,不同误码率量级下所需的信号光子数增加,且 4-QAM 和 16-QAM 系统下的误码率量级均能达到 10⁻⁶,均可较好地提高通信质量;同时,16-QAM 系统下所需的信号出射光子数少于 4-QAM 的。因此,在 X 射线通信系统中,调制位数越大得到的通信质量效果越好。

同时,对表 3 中 16-QAM 系统下的部分数据进

行模拟仿真,仿真结果如图 3 所示。

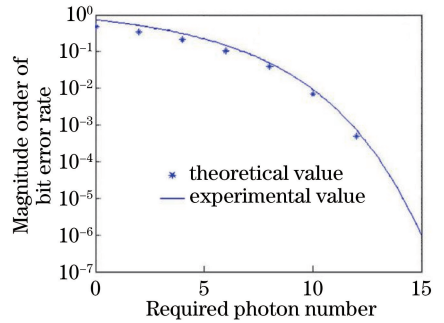


图 3 16-QAM 系统的误码率仿真结果

Fig. 3 Simulation of bit error rate for 16-QAM system

由图 3 可知,相比于 OOK 与 PPM 方法,QAM 方式在通信过程中虽更为复杂,但更加接近 X 射线在深空通信的实际情况,同时也可看出:

1) 结合各种通信调制方法,随着 X 射线通信系统误码率量级的减小,在使用 QAM 方式时,所需发射端出射的信号光子数目逐渐降低;

2) 由仿真结果可知,在通信系统中误码率量级相同时,随着所设置的门限值增大,由于环境噪声的干扰,发射端需出射的信号光子数目也会增加,但增加的趋势成正比下降,可见出射的光子数目越多,环境噪声对通信效率的影响越小。

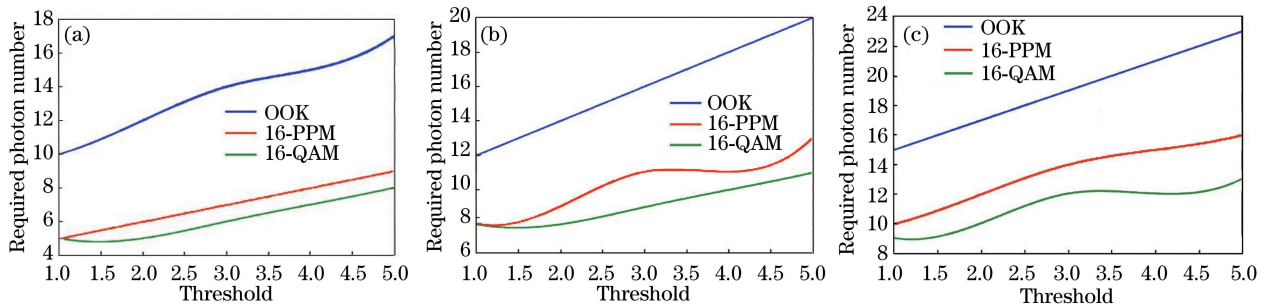
同时,对比现有的 OOK 和 PPM 方式^[20],分别代入(3)式,(4)式和(7)式,可得出在误码率为 10⁻⁶量级时,不同的调制方式检测到的光子数,如表 4 所示。

由表 4 中的数据,可得出误码率在 10⁻⁶量级下,16-QAM 下的误码率理论值均小于 OOK 及 16-PPM 的,计算其他误码率量级时可得出不同调制方式所需的光子数目,将计算结果用 MATLAB 进行仿真,仿真结果如图 4 所示。

表4 误码率在 10^{-6} 量级下不同调制方式所需的信号光子数Table 4 Signal photon number of different modulation methods at 10^{-6} order of bit error rate

Modulation method	Threshold				
	1	2	3	4	5
OOK	17	20	22	24	26
16-PPM	12	15	17	18	19
16-QAM	12	14	15	16	18

图4(a)~(c)分别为误码率在 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 量级下三种调制方式在相同通信速率和通信距离时,所需的信号发射端的出射光子数,由仿真结果可知:

图4 三种调制方法下不同量级误码率所需信号光子数。(a) 10^{-3} ; (b) 10^{-4} ; (c) 10^{-5} Fig. 4 Signal photon number required for different orders of bit error rate under three modulation methods. (a) 10^{-3} ; (b) 10^{-4} ; (c) 10^{-5}

5 结 论

相比于现有的 X 射线通信误码率计算模型,本文针对 X 射线通信系统的误码率性能进行分析,在 QAM 解调方式的基础上,建立了深空 X 射线通信系统在 QAM 模式下误码率的数学表达式,计算得出不同误码率量级下系统要求的信号光子数,并利用 MATLAB 等软件对所建立的误码率模型进行模拟仿真。仿真结果表明,随着通信环境中噪声强度增加,OOK 系统和 PPM 系统性能都在不断恶化,在不同噪声强度下,OOK 系统比 PPM 系统误码率更大,QAM 系统性能优于 PPM 系统。该仿真结果为 X 射线实现高效率应用奠定了基础。

由于水平及实验设备的限制,本文仅假设在实际环境的基础上利用仿真软件对系统的误码率进行仿真比较。因此在实际应用中,仍需对 QAM 的应用研究价值进行进一步探讨,为确保数学理论模型的准确性,在下一步的研究计划中,将在实验室环境中对本文的理论展开验证,以进一步推动 X 射线在深空通信的发展。

1) 当探测器端设定的信号门限值不同时,所需出射的信号光子数存在一定的差异,具体表现为门限值的大小与探测器接收到一定光子数所需的发射信号光子数目近似成正比关系;

2) 当门限值的大小与数目确定时,若探测器可探测到的光子数一定,则三种调制方法中 OOK 所需发射的信号光子数最多,平均为 19 个光子;PPM 次之,平均为 13~14 个光子;QAM 所需出射的信号光子数最少,平均为 11~12 个光子,可见在同等通信质量的要求下,QAM 更有利于系统误码率的减少。

参 考 文 献

- [1] Tang X Z. The discovery of X-rays and their effects on physics [J]. Physics and Engineering, 1981, 79 (2): 29-31.
唐玄之. X 射线的发现及其对物理学的影响 [J]. 物理与工程, 1981, 79(2): 29-31.
- [2] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, *et al.* X-ray photon counting detector for X-ray pulsar-based navigation [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 019701.
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): 019701.
- [3] Zhao T, Li H Z, Gong Y L. Research on high-level modulation in visible light communication [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 36 (5): 104-107.
赵婷, 李洪祚, 宫玉琳. 可见光通信中高阶调制格式研究 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(5): 104-107.
- [4] Zhao B S, Wu C X, Sheng L Z, *et al.* Next generation of space wireless communication

- technology based on X-ray [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 070801.
- 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): 070801.
- [5] Su T, Li Y, Sheng L Z, *et al.* Space X-ray communication link modeling and power analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1035001.
- 苏桐, 李瑶, 盛立志, 等. 空间 X 射线通信链路建模与功率分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(10): 1035001.
- [6] Wang L Q, Su T, Zhao B S, *et al.* Bit error rate analysis of X-ray communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 120701.
- 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): 120701.
- [7] Zhao B S, Su T, Sheng L Z, *et al.* Introduction to space X-ray communication [M]. Beijing: Science Press, 2016: 213-217.
- 赵宝升, 苏桐, 盛立志, 等. 空间 X 射线通信概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 213-217.
- [8] Liu D, Qiang P F, Li L S, *et al.* Multilayer nested X-ray focusing optical device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0834002.
- 刘舵, 强鹏飞, 李林森, 等. 多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0834002.
- [9] Wang P. Research on X-ray spatial communication system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 84-85.
- 王朋. X 射线空间通信系统的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 84-85.
- [10] Xiong J T, Zhang B H. Analysis and design of ATP system in space laser communication[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 1998(5): 467-472.
- 熊金涛, 张秉华. 空间光通信 ATP 系统设计分析 [J]. *电子科技大学学报*, 1998(5): 467-472.
- [11] Zhao Z C, Qiu B. Research of servo platform of ATP system[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, 37(6): 121-123, 28.
- 赵政春, 邱颀. ATP 系统伺服平台的研究[J]. *机床与液压*, 2009, 37(6): 121-123, 28.
- [12] Hu Z, Jiang H L, Tong S F, *et al.* Research on ATP system technology of laser communication terminal inspace[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(6): 752-757.
- 胡贞, 姜会林, 佟首峰, 等. 空间激光通信终端 ATP 技术与系统研究[J]. *兵工学报*, 2011, 32(6): 752-757.
- [13] Deng N Q, Zhao B S, Sheng L Z, *et al.* A space audio 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.
- [14] Lu W Q, Pan C S. An analysis of the factors that may affect the electromagnetic wave propagation in the space communications [J]. *Fire Control & Command Control*, 2004, 29(5): 21-24, 27.
- 陆文庆, 潘成胜. 空间通信中影响电波传播的因素分析[J]. *火力与指挥控制*, 2004, 29(5): 21-24, 27.
- [15] Zhang C Q. Research on simulations of TD-LTE QAM and BER performance [J]. *Mobile Communications*, 2013, 37(24): 26-30.
- 张长青. TD-LTE QAM 仿真和误码率性能研究[J]. *移动通信*, 2013, 37(24): 26-30.
- [16] Ma X F. Pulse emission source research based on spatial X-ray communication[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 37-39.
- 马晓飞. 基于空间 X 射线通信的脉冲发射源研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 37-39.
- [17] Song J, Zhao B S, Sheng L Z, *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.
- [18] Xu G D, Song J N, Li P F. 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.
- [19] Liu L L, Hu S A, Si B. Simulation and analysis of several digital modulation modes [J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(9): 95-99, 102.
- 刘立林, 胡世安, 司兵. 几种数字调制方式的仿真与分析[J]. *现代电子技术*, 2012, 35(9): 95-99, 102.
- [20] Wu X Y. Research on modulation and demodulation technology in space laser communication system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 28-31.
- 吴星煜. 空间激光通信系统中的调制与解调技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 28-31.