

激光与光电子学进展

基于 MPPC 的改进型光子计数 同步通信方法研究

贺锋涛^{1*}, 杜雨¹, 张建磊¹, 杨祎¹, 李碧丽²

¹西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;

²中国船舶重工集团 705 研究所水下信息与控制重点实验室, 陕西 西安 710000

摘要 针对多像素光子计数器(MPPC)恢复信号的过程中易受背景光干扰且同步时钟信号提取困难的问题,提出一种基于MPPC的改进型光子计数同步通信方法。首先利用MPPC完成光电转换,采用泊松分布模型中的均值(MV)、安斯库姆根(AR)变换和最大似然(ML)最优阈值检测算法对电脉冲进行预判;然后生成相位不同的门控周期时钟,并将其作为使能信号以统计脉冲计数总和,通过查找其最大值的方式确定最佳时隙相关同步时钟;最后比较每比特脉冲计数与计数阈值的相对大小以确定比特信息。为了验证方法的有效性,搭建基于MPPC的无线光通信系统。实验结果表明,在波长为520 nm、通信速率为2 Mbit/s、采样频率为200 MHz和比特误码率为 3.8×10^{-3} 的条件下,改进型PCPB-MV、PCPB-AR和PCPB-ML检测算法的灵敏度较传统检测算法可分别提升3.0 dB、3.2 dB和3.8 dB。

关键词 光电子学; 无线光通信; 多像素光子计数器; 泊松分布; 每比特脉冲计数; 最佳时隙相关同步时钟

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2125001

Research on Improved Synchronous Communication Method of Photon Counting Based on MPPC

He Fengtao^{1*}, Du Yu¹, Zhang Jianlei¹, Yang Yi¹, Li Bili²

¹College of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

²Key Laboratory of Underwater Information and Control, China Shipbuilding Industry Corporation 705 Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract Aiming at the problem that the multi-pixel photon counter (MPPC) is susceptible to background light interference and the synchronization clock signal is difficult to extract in the process of signal recovery, an improved synchronous communication method of photon counting based on MPPC is proposed. First, the MPPC is used to complete the photoelectric conversion, the mean value (MV), Anscombe root (AR) transformation and maximum likelihood (ML) optimal threshold detection algorithm of the Poisson distribution model are used to pre-judge the electrical pulse. Second, the gated periodic clock with different phases is generated, which is used as the enabling signal to count the sum of pulse counts, and the best slot-dependent synchronous clock is determined by searching its maximum value. Finally, the relative size of pulse count per bit and count threshold is compared to determine bit information. In order to verify the effectiveness of the method, a wireless optical communication system based on

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-22; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61805199)、国防基础科研项目实验室稳定支持专项项目(JCKY2020207CD02)、陕西省技术创新引导专项(2020TG-001)、西安邮电大学研究生联合培养工作(基地)重点建设项目(YJGJ201905)

通信作者: hefengtao@xupt.edu.cn

MPPC is built. The experimental results show that under the conditions of a wavelength of 520 nm, a communication rate of 2 Mbit/s, a sampling frequency of 200 MHz and a bit error rate of 3.8×10^{-3} , the sensitivity of the improved PCPB-MV, PCPB-AR, and PCPB-ML detection algorithms is 3.0 dB, 3.2 dB, and 3.8 dB higher than that of the traditional detection algorithms, respectively.

Key words optoelectronics; wireless optical communication; multi pixel photon counter; Poisson distribution; pulse count per bit; optimal time slot related synchronous clock

OCIS codes 250.1345; 030.5260; 040.5160

1 引言

近年来,由于可见光通信具有速率高、带宽宽、频率复用性高、绿色无辐射和保密性强等显著优势,所以在无线通信技术领域占据着重要地位^[1-3]。传统的无线光通信(Optical Wireless Communication, OWC)接收系统通常将光电二极管(Photo Diode, PD)和雪崩二极管(Avalanche Photo Diode, APD)作为检测器件,但这两种器件均存在检测门限高和灵敏度低等缺点,使其在复杂信道中的实际传输距离被限制在数十米量级^[4-5]。

为了实现远程通信,研究者们采用具有低功耗和高灵敏度的检测器件,如单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)作为接收机来提高通信效率^[6-9]。SPAD是一种工作在盖革模式下的APD,当有光子入射到SPAD的表面时,其随即触发雪崩效应输出大电流,此时完成一次光子计数,但这种单光子计数的方式需根据接收的光子数进行阈值判决。在光子计数的过程中,阈值判决会受到SPAD内部泊松噪声的干扰而具有随机性。同时,SPAD发生雪崩之后存在死时间(Dead Time, DT),其会制约SPAD检测光子的能力,降低检测器件的灵敏度^[10]。与单个SPAD不同,多像素光子计数器(Multi Pixel Photon Counter, MPPC)是由多个独立工作的SPAD串联猝灭电阻并联组成的一种光子计数器件,该器件可从结构上解决SPAD所存在的DT问题,而且具有高增益、高光子探测效率、快速响应、优良的时间分辨率和宽光谱响应范围等显著优点,使其在深空通信、核医学检测、距离测量和三维成像等领域中具有一定的应用价值^[11-14]。

国内外学者对于单个SPAD的理论研究和工程应用已日趋成熟^[6-10,15-19]。1981年,Cova等^[15]通过实验验证了雪崩-结区被均匀击穿的PD具有单光子检测的能力。2015年,Li等^[16]验证了SPAD接收机的灵敏度比PD接收机提升了30.5 dB~46.0 dB。2016年,Wang等^[17]通过蒙特卡罗仿真验证了在纯海水中采用

开关键控(On-Off Keying, OOK)的调制方式,可以使水下SPAD可见光通信系统的通信距离有潜力达到500 m。2017年,Wang等^[18]考虑了实际SPAD所存在的DT问题并针对其输出的光子计数脉冲波形,提出了相应的同步方案和快速盲联合检测(Fast Blind Union Detection, FBUD)算法,最后通过实验验证了该算法的优越性。2018年,Hu等^[19]提出了一种基于SPAD的帧同步方法,采用256脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)的方式设计并实现了一个光子的接收比特数目为3.32的接收系统。

综上所述,国内外学者对于单个SPAD的研究极其深入,但对于MPPC的研究仍处于起步阶段。2010年,van Dam等^[20-21]对MPPC的参数及基础特性进行了分析,并建立了基于MPPC的光子计数理论模型。2011年,赵帅等^[22]通过实验验证了MPPC具有单光子检测的能力,而且适用于光强动态范围大的弱光检测。2013年,张国青等^[23]在忽略和考虑光学串话(Optical Crosstalk, OC)等寄生效应的条件下,推导出了基于MPPC的光响应模型。2016年,韩彪等^[24]针对传统光子计数通信系统中的背景光会导致误码率增加的问题,提出了利用单位比特时间内的电脉冲数目来恢复信号的方案,通过误码分析仪在线比对发送信号和恢复信号的匹配关系,从而得到系统的比特误码率(Bit Error Rate, BER),系统的通信速率仅为50 kbit/s,但该方案的通信速率常受制于误码分析仪的带宽。2018年,Shen等^[25]将MPPC作为光电检测器件,采用PPM的调制方式实现了弱光条件下传输距离为46 m的无差错水下光通信。2020年,任致远等^[26]在大气环境中通过实验验证了当传输距离相同时,基于MPPC的最大似然检测算法的BER性能优于均值算法,但该研究并未考虑抑制背景光所引起的光子计数,导致传输距离超过8 m后,两种检测算法的BER性能均不理想。

综上所述,MPPC已经被用于远程通信系统,但如何抑制背景光子计数以及从MPPC输出的电脉冲中离线恢复同步时钟信号并进行信号解调的问题仍

未得到解决。因此,本文首先以波长为 520 nm 的绿色激光作为发射光源,以高灵敏度的 MPPC 作为光电检测器件,搭建 OWC 系统。然后对 MPPC 的接收光子数进行数学建模,采用泊松分布模型中的均值(Mean Value, MV)、安斯库姆根(Anscombe Root, AR)变换和最大似然(Maximum Likelihood, ML)最优判决阈值检测算法对电脉冲进行预判,接着提出一种基于每比特脉冲计数值的改进型光子计数同步通信方法。最后通过实验验证改进型光子计数同步方法的优越性,为远程 OWC 技术的应用提供了新思路。

2 系统模型

基于 MPPC 的无线光通信系统的理论模型和

实验验证系统分别如图 1(a)和图 1(b)所示。基于 MPPC 的无线光通信系统主要由信号发生器、激光二极管(Laser Diode, LD)光源、大气信道模型、单光子检测器件 MPPC 及数据采集卡(Data Acquisition Card, DAC)组成。其中发送端通过信号发生器(RIGOL DG5352)产生占空比为 50% 和频率为 1 MHz 的方波信号,使用波长为 520 nm 的 LD 光源进行光强调制,使用调光衰减片来模拟大气信道对光功率的衰减情况,信号到达接收端后由单光子检测器件 MPPC 模块来完成光电转换,再利用数据采集卡 DAC 对电脉冲序列进行时域随机采样,以便后续检测算法的处理。实验系统的详细参数如表 1 所示。

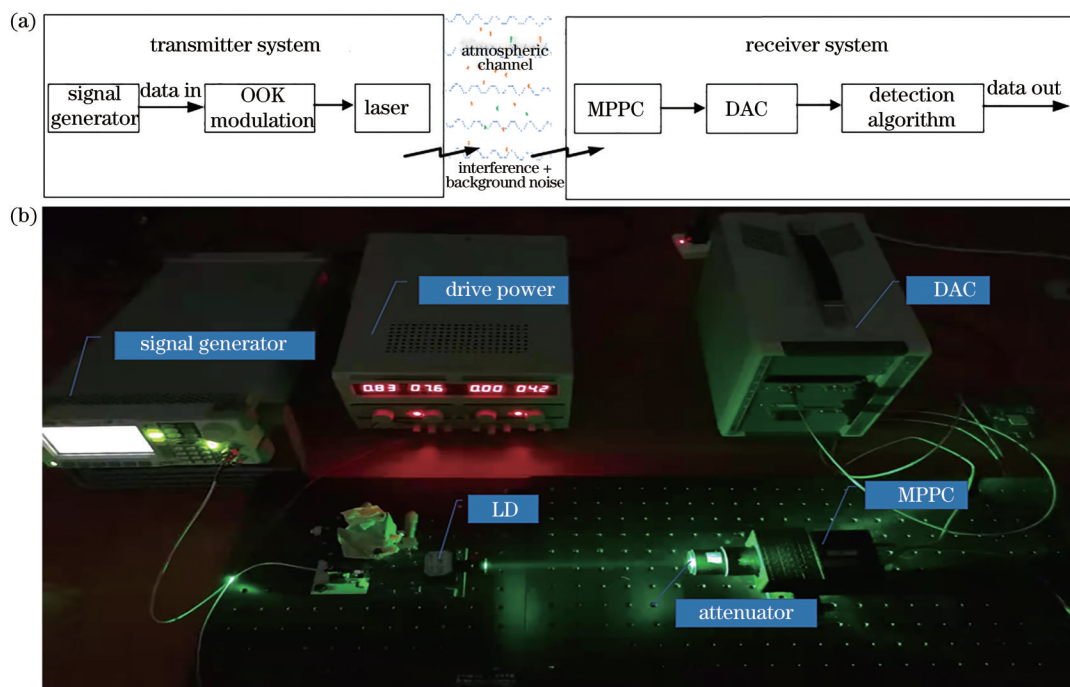


图 1 基于 MPPC 的无线光通信系统。(a)理论模型;(b)实验验证系统

Fig. 1 Wireless optical communication system based on MPPC. (a) Theoretical model; (b) experimental verification system

表 1 探测器和实验的详细参数

Table 1 Detailed parameters of detector and experiment

Detector		Experimental	
Parameter	Value	Parameter	Value
Number of pixels	3600	Ambient temperature / °C	25
Pixel size / μm	50	LD wavelength / nm	520
Photoelectric conversion efficiency at wavelength 520 nm / %	~40	Sampling frequency / MHz	200
Photoelectric conversion sensitivity / (V·W ⁻¹)	1.0 × 10 ⁹	Square wave frequency / MHz	1
Effective photosensitive area / (mm × mm)	3.0 × 3.0	Communication rate / (Mbit·s ⁻¹)	2
Size / (mm × mm × mm)	98 × 60 × 35		

接收端使用 C13366-3050GA 型 MPPC 模块,其内置精密测量的 S13362-3050GA 型 MPPC 及电压控制、温度补偿电路,该电路可随着环境温度的变

化来调整施加的偏置电压,从而保持恒定的增益。MPPC 模块中的电路结构和实物分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

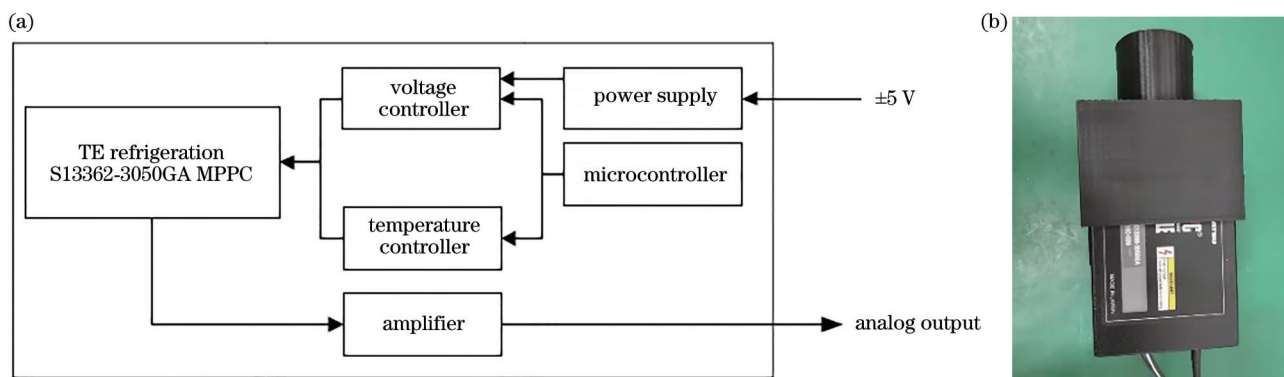


图 2 C13366-3050GA 型 MPPC 模块。(a) 电路结构; (b) 实物

Fig. 2 C13366-3050GA MPPC module. (a) Circuit structure; (b) material object

2.1 MPPC 的工作原理

MPPC 也被称为硅光电倍增管 (SiPM), 其是一种由共偏压、共阴极和工作在盖革模式下的 APD 像素串联淬灭电阻并集成在单片硅晶体上的阵列探测器, 等效的工作原理如图 3 所示。当单个光子入射到 MPPC 中的某个像素点时, 该像素点将处于“激活”状态, 此时 MPPC 会输出一定幅度的电脉冲。经过实际测量, C13366-3050GA 型 MPPC 模块的单光子脉冲响应如图 4 所示。当多个光子入射到 MPPC 中的不同像素点时, 多个像素点将会被“激活”, 此时 MPPC 会输出由多个像素点脉冲响应叠加形成的“巨脉冲”, 此时完成一次光子计数。

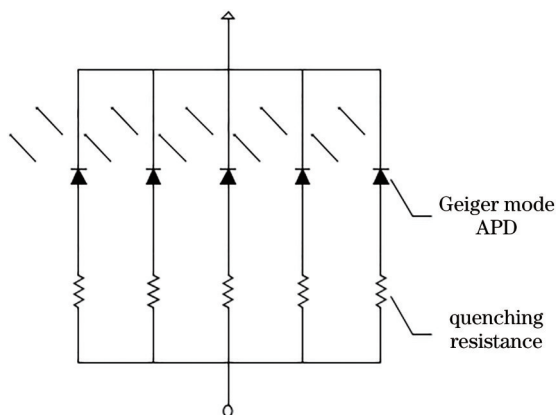


图 3 MPPC 的工作原理示意图

Fig. 3 Schematic of working principle of MPPC

2.2 MPPC 接收光子数的建模

在理想的情况下, MPPC 输出光子数因受泊松

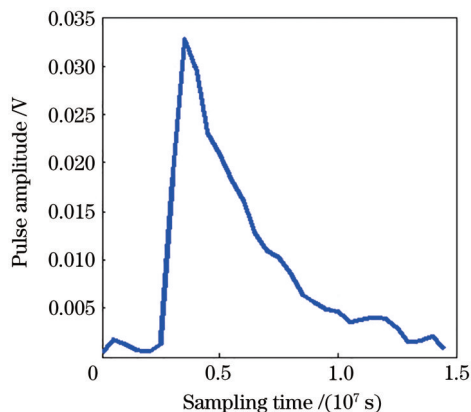


图 4 C13366-3050GA 型 MPPC 的单光子脉冲响应曲线

Fig. 4 Single photon impulse response curve of C13366-3050GA MPPC

噪声的干扰而遵循泊松分布, 其概率密度函数可表示为

$$P(n, \lambda) = \frac{\lambda^n \exp(-\lambda)}{n!}, \quad (1)$$

式中: λ 为平均光子数; n 为同一时刻入射到 MPPC 中不同像素点的等效光子数, $n = 0, 1, 2, \dots$ 。在实际实验中, 通过调整中性滤波片的衰减倍数来调节 MPPC 的接收光功率, 分析不同光学辐射功率下相同光子数入射的概率并对其进行泊松分布拟合, MPPC 在不同光学辐射功率 P_{or} 下输出脉冲高度的统计直方图如图 5 所示。由图 5 可以得到, 当 P_{or} 的拟合结果分别为 -70 dBm 和 -77 dBm 时, 对应的 λ 值分别为 0.4904 和 0.0681 , 此时等效光子数的阈值为 0.5 。

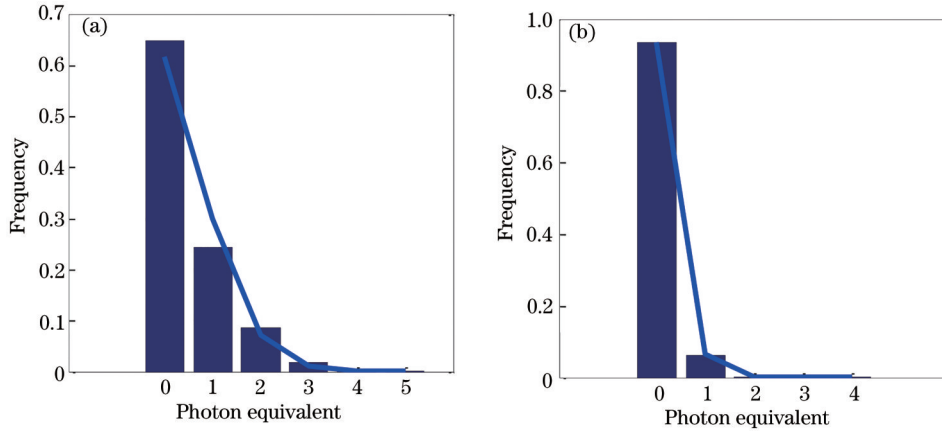


图 5 MPPC 在不同光学辐射功率下输出脉冲高度的统计直方图。(a) $P_{or} = -70 \text{ dBm}, \lambda_1 = 0.4904$;
(b) $P_{or} = -77 \text{ dBm}, \lambda_2 = 0.0681$

Fig. 5 Statistical histogram of output pulse height of MPPC at different optical radiation powers.
(a) $P_{or} = -70 \text{ dBm}, \lambda_1 = 0.4904$; (b) $P_{or} = -77 \text{ dBm}, \lambda_2 = 0.0681$

3 改进型 MPPC 光子计数同步通信方法的研究

3.1 最优判决阈值检测算法

3.1.1 MPPC-MV 检测算法

光子检测的实质是在每个采样时隙记录入射到光电检测器件中的光子数,之后将其转换为相应幅度电脉冲的过程。在理想的状态下,MPPC 输出的电脉冲幅度可由其对应的等效光子数均匀一致地表征出来^[22],因此在接收端采用低复杂度的强度调制/直接检测(Intensity Modulation Direct Detection, IM/DD)方式,通过比较脉冲幅度和设定的检测阈值的相对大小来确定采样时隙的符号值。当脉冲幅度高于检测阈值时,判定接收到的符号为“1”,否则为“0”。MV 检测算法的最优检测阈值可表示为

$$T_{th, MV} = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_0}{2}, \quad (2)$$

式中: \bar{y}_1 和 \bar{y}_0 分别为采用 OOK 调制方式发送比特“1”和“0”信号 MPPC 所输出的平均电脉冲幅度。

3.1.2 MPPC-AR 检测算法

AR 变换可将加性泊松分布数据近似表示为加性正态分布,且该变换过程是单值映射。AR 变换^[27]可表示为

$$\hat{f}(x_i) = 2 \times \sqrt{x_i + \frac{3}{8}}, \quad (3)$$

式中: i 为采样时隙个数, $i = 1, 2, 3, \dots, L$, L 为发送端发送数据 s_i 的长度; x_i 为第 i 个采样时隙 MPPC 所输出的电脉冲幅度。若采样值 x_i 是 s_i 的充分统计量,则经 AR 变换后的 $\hat{f}(x_i)$ 也是 s_i 的充分统计量,即该变换可保证无信息丢失,其方差^[28-29]可近似表示为

$$D[\hat{f}(x_i)] = 1 + \frac{1}{16E^2(x_i)}, \quad (4)$$

式中: $E(x_i)$ 为 x_i 的数学期望。根据方差与数学期望的关系,可得到

$$D[\hat{f}(x_i)] = E[\hat{f}^2(x_i)] - E^2[\hat{f}(x_i)]. \quad (5)$$

结合(3)~(5)式可得到

$$E\left\{4 \times \left[\hat{f}(x_i) + \frac{3}{8}\right]\right\} - E^2[\hat{f}(x_i)] = D[\hat{f}(x_i)] = 1 + \frac{1}{16E^2(x_i)}. \quad (6)$$

经 AR 变换后, $\hat{f}(x_i)$ 的数学期望可表示为

$$E[\hat{f}(x_i)] = 2 \times \sqrt{E(x_i) + \frac{1}{8} - \frac{1}{48E^2(x_i)}} \approx 2 \times \sqrt{E(x_i) + \frac{3}{8}}. \quad (7)$$

3.1.3 MPPC-ML 检测算法

对于 OOK 调制方式,当发送端发送“1”和“0”信

号的先验概率相等时,泊松条件下 ML 检测算法的最优检测阈值即为相应概率密度函数的交点,表达式为

$$\frac{(\bar{y}_1)^n \exp(-\bar{y}_1)}{n!} = \frac{(\bar{y}_0)^n \exp(-\bar{y}_0)}{n!} \quad (8)$$

则最优判决阈值可表示为

$$T_{th,ML} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_0}{\ln(\bar{y}_1) - \ln(\bar{y}_0)} \quad (9)$$

3.2 改进型 MPPC 光子计数同步通信方法

时钟同步是实现信号离线处理的基础。本文提出一种直接从 MPPC 所输出的脉冲信号中恢复基带信号和最佳时隙相关同步时钟 (Optimal Time Slot Related Synchronous Clock, OTSRSC) 的同步通信方案,原理如图 6 所示,其中 N_s 为采样频率, c_j 为相位为 0 的门控周期时钟循环移位 j 个时隙的移位时钟, k_j 为 j 个时隙的随机采样数据次数。该方案

首先应用上述三种检测算法进行阈值的预判决,将随机采样的 MPPC 输出脉冲 $\mathbf{x} = [x_1 x_2 \cdots x_L]$ 处理为对应时隙的“1”和“0”信号。接着生成相位为 0 的门控周期时钟并对其进行循环移位,将移位后的门控周期信号作为使能信号,统计脉冲计数总和并查找最大值的下标位置,以便提取 OTSRSC。当 OTSRSC 的上升沿或下降沿到来时,边沿检测模块将翻转标志 f 置 1。当计数器模块接收到翻转标志时,触发清零操作,此时统计每比特脉冲计数值 (Pulse Count Per Bit, PCPB) 并比较其与自适应脉冲计数阈值的相对大小,最终确定该时隙的比特信息。

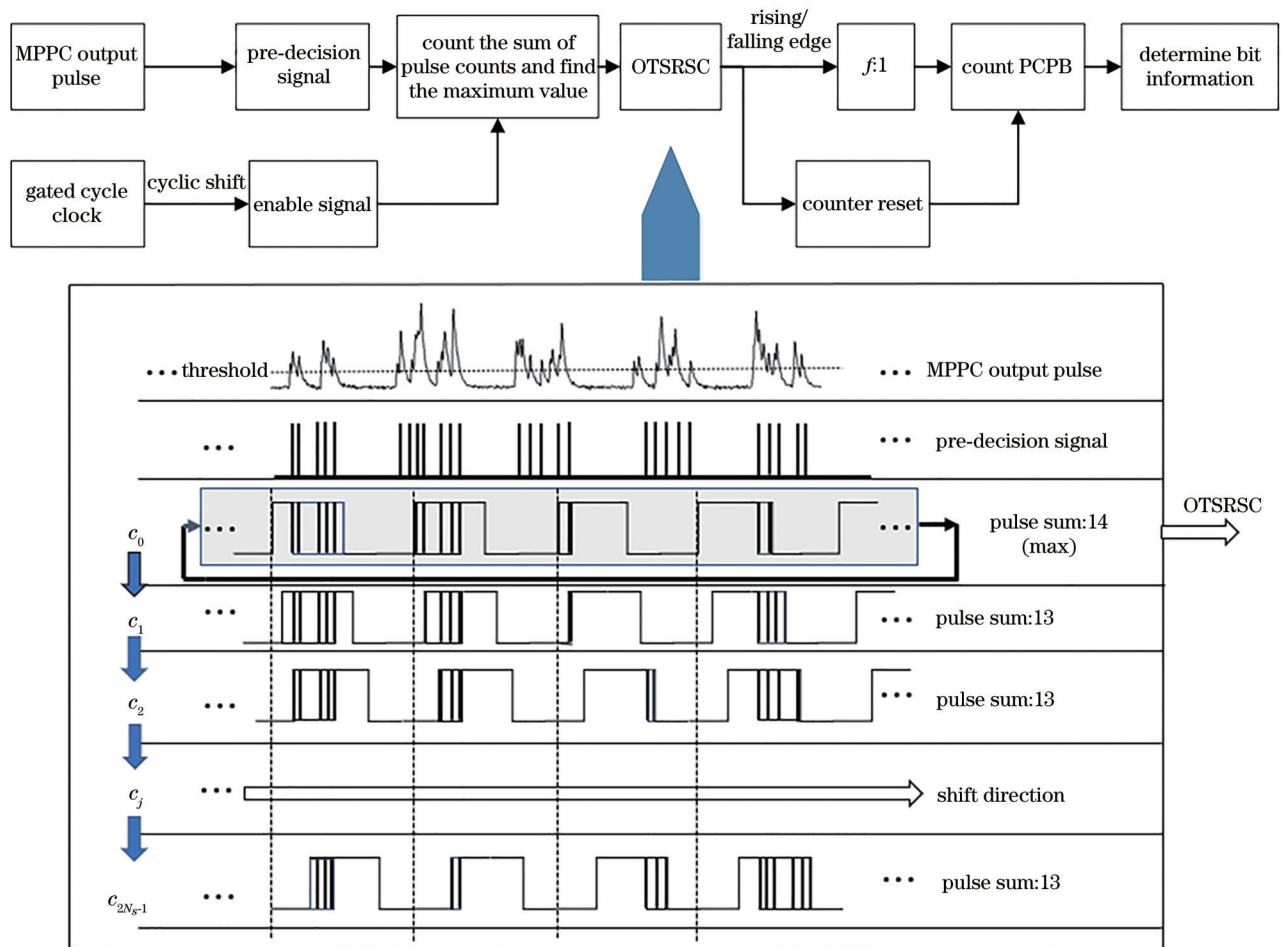


图 6 基于 MPPC 的改进型光子计数同步通信的原理

Fig. 6 Principle of improved photon counting synchronous communication based on MPPC

当使能信号的上升沿到来时,脉冲计数总和 S_j 可表示为

$$S_j = \sum_{l=0}^{2N_s-1} y_l \times c_j, \quad (10)$$

式中 y 为 MPPC 输出电脉冲幅度 \mathbf{x} 经检测算法预判

决的向量, $\mathbf{y} = [y_1 y_2 \cdots y_L]$ 。OTSRSC 可表示为

$$c_{opt} = \arg \max_c (S) = \arg \max_c [S_0 S_1 \cdots S_{2N_s-1}], \quad (11)$$

式中 $\arg \max(\cdot)$ 为因变量取最大值所对应的自变量。PCPB 可表示为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{y} \times c_{opt}, f = 1。 \quad (12)$$

每比特自适应脉冲计数阈值 $T_{th, k}$ 可表示为

$$T_{th, k} = \frac{\eta P_{r, k}}{E_p R_b}, \quad (13)$$

式中: η 为 MPPC 的光电转换效率; $P_{r, k}$ 为第 k 次随机采样数据的接收光功率; E_p 为单个光子的能量;

R_b 为比特传输速率。

4 系统的性能分析

数据采集卡所采集的 MPPC 实际输出的部分电脉冲信号及各检测算法的处理结果如图 7 所示。

图 7(a) 为 MPPC 输出的电脉冲, 此时光学辐射功率

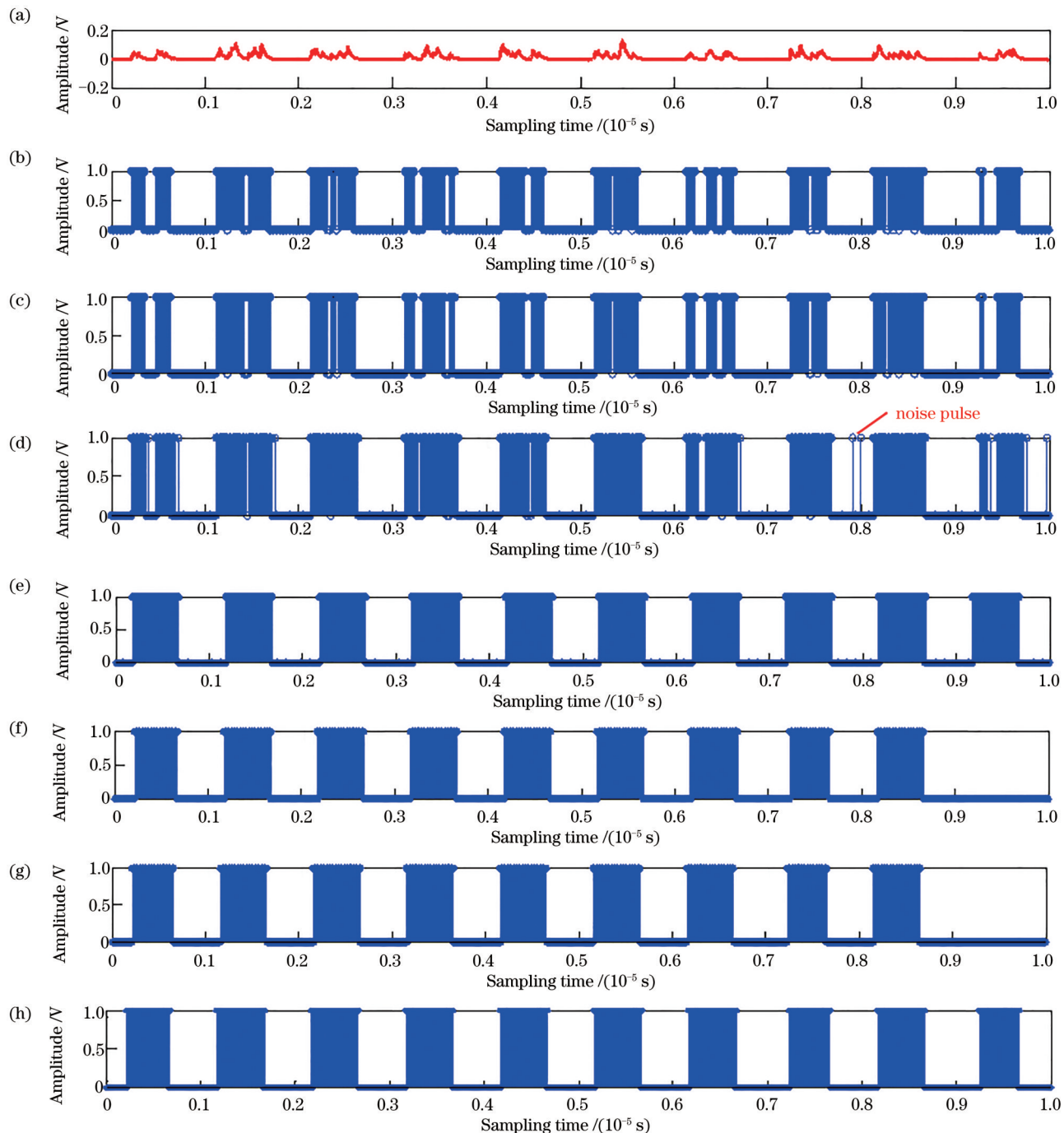


图 7 MPPC 输出的部分脉冲及各算法的处理结果。(a) MPPC 输出脉冲; (b) MV 算法; (c) AR 算法; (d) ML 算法; (e) OTSRSC 信号; (f) PCPB-MV 算法; (g) PCPB-AR 算法; (h) PCPB-ML 算法

Fig. 7 Partial pulse output by MPPC and processing results of each algorithm. (a) MPPC output pulse; (b) MV algorithm; (c) AR algorithm; (d) ML algorithm; (e) OTSRSC signal; (f) PCPB-MV algorithm; (g) PCPB-AR algorithm; (h) PCPB-ML algorithm

P_{or} 为 -70 dBm, 采样频率 N_s 为 200 MHz。从图 7(a) 可以看到, MPPC 会根据入射光子数目的多少来响应不同幅度的电脉冲, 通过计算各时隙脉冲幅度与单光子脉冲响应的比值, 便可确定入射到 MPPC 表面上的等效光子数。图 7(b)~(d) 分别为经过 MV、AR 和 ML 检测算法预处理后的信号, 图 7(e) 为 OTSRSC 信号, 图 7(f)~(h) 分别为经过基于 PCPB 的 MV 检测算法 (PCPB-MV)、基于 PCPB 的 AR 检测算法 (PCPB-AR) 和基于 PCPB 的 ML 检测算法 (PCPB-ML) 同步处理后的信号。

从图 7(b)~7(d) 可以看到, 经过最优阈值检测算法预处理后的脉冲计数值是随机的, 绝大多数比特的脉冲数量能够与 OOK 调制的“1”和“0”信号相匹配, 然而在少数对应调制信号为“0”的比特内, 存在由背景光导致的噪声光子计数。此时, 若对噪声光子计数不进行抑制, 则基于 MPPC 的整个通信系统的 BER 性能将会恶化。首先采用基于 PCPB 的改进型光子计数同步通信方法提取 OTSRSC; 接着利用边沿检测模块和计数器模块计算 OTSRSC 相邻翻转标志之间的 PCPB。若统计的 PCPB 大于或等于每比特自适应脉冲计数的阈值, 则判定该时隙的比特信息为“1”, 否则为“0”。从图 7(f)~7(h) 可以看到, 改进型光子计数同步通信方法能够在一定程度上抑制由背景光导致的噪声光子计数, 且三种检测算法中 PCPB-ML 算法的结果最优。

当接收端采用不同的检测算法时, 离线处理 BER 随 MPPC 表面光学辐射功率 P_{or} 的变化情况, 如图 8 所示。从获得一定 BER 所需要的 P_{or} 大小来看, 基于 PCPB 的改进型光子计数通信方法总是明显优于传统的检测算法。在 BER 为 3.8×10^{-3} 的情况下, 基于 PCPB 的 MV 检测算法 (PCPB-MV) 的功率代价较传统 MV 算法提升 3.0 dB, 基于 PCPB 的

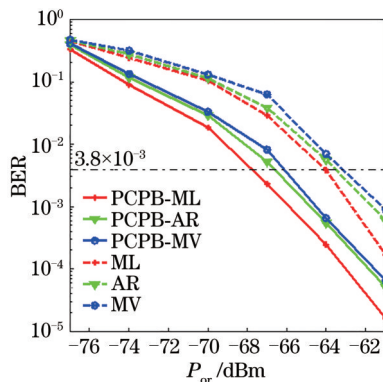


图 8 光学辐射功率与 BER 的关系

Fig. 8 Relationship between optical radiation power and BER

AR 检测算法 (PCPB-AR) 的灵敏度较传统 AR 算法提升 3.2 dB, 基于 PCPB 的 ML 检测算法 (PCPB-ML) 的灵敏度较传统 ML 算法提升 3.8 dB。从计算复杂度的角度出发, 传统的最优判决阈值检测算法仅需计算最优检测阈值便可进行硬判决, 并通过循环移位的方式来确定 OTSRSC, 故传统检测算法的复杂度约为线性阶 $O(L)$ 。本文提出的改进型光子计数同步通信方法在传统检测算法的基础上, 还需设计边沿检测模块和计数器模块, 并将统计的 PCPB 与自适应计数阈值进行对比, 故改进型同步通信方法的复杂度约为平方阶 $O(L^2)$ 。综上所述, 改进型光子计数同步通信方法在提升检测灵敏度的同时, 也在一定程度上降低了算法效率。然而, 近年来随着处理器响应速度及存储器运行速度的不断提升, 算法执行耗费的时间资源和存储数据的空间资源已不再成为限制高复杂度算法实现的主要因素。一般来说, 算法的复杂度越高, 则性能越好。与高性能算法所提升的系统增益相比, 复杂度被考虑的越来越少。

对比不同检测算法的性能, 可以得到 ML 检测算法最优, AR 变换算法次之, MV 检测算法最差。这是因为在计算 ML 算法的最优检测阈值之前, 充分研究 MPPC 的物理特性并对输出信号进行数学建模, 故该算法的 BER 性能最优; AR 变换算法虽能将泊松分布数据近似表示为噪声渐近的标准正态分布以实现方差的稳定化, 但仍会引入不可忽略的近似误差, 从而导致系统的 BER 性能恶化; 传统的 MV 检测算法一般用于高斯信道下的硬判决, 故该算法的 BER 性能最差。

除了不同算法的性能差异, 还可以看到当光学辐射功率 P_{or} 值增加时, 整个接收系统的 BER 性能有显著的改善。这是因为当光学辐射功率 P_{or} 值增加时, 与其对应的接收光子数目也会增加, 在每个比特符号周期内检测到的光子数也会增加, 这将会与由 MPPC 自身泊松噪声导致的噪声计数明显区分开, 从而实现微弱光信号的精确恢复。

5 结 论

本文针对高灵敏度单光子检测器件 MPPC 离线恢复信号的过程中存在背景光子计数影响 BER 且时钟信号提取困难的问题, 提出一种基于 PCPB 的改进型光子计数同步通信方法。该方法采用泊松模型中的检测算法对 MPPC 输出的电脉冲进行

硬判决,通过比较 PCPB 和脉冲计数阈值的相对大小,继而确定该比特的时隙信息。经过实验验证,该改进的光子计数同步通信方法能够直接从 MPPC 输出的电脉冲信号中解调出最佳时隙相关同步时钟,并在一定程度上抑制由背景噪声导致的光子计数。在 BER 为 3.8×10^{-3} 的情况下,相比于对应的传统 MV、AR 和 ML 检测算法,改进型的 PCPB-MV、PCPB-AR 和 PCPB-ML 检测算法的灵敏度可分别提升 3.0 dB、3.2 dB 和 3.8 dB。本文所提出的基于 MPPC 的改进型光子计数同步通信方法可为信号离线同步处理及背景噪声抑制提供新思路,之后的研究可从抑制 MPPC 自身的后脉冲和延迟串扰等方面开展,进一步提升通信系统的 BER 性能。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 204-238.
- [2] Chen Q R, Zhang T. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0406003.
陈泉润, 张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0406003.
- [3] Wang F, Yang Y, Duan Z L, et al. Characteristic analysis of underwater laser signal transmission channel based on visible light[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(3): 26-28.
王菲, 杨祎, 段作梁, 等. 基于可见光的水下激光传输信道的特性分析[J]. *光通信技术*, 2016, 40(3): 26-28.
- [4] Shafique T, Amin O, Abdallah M, et al. Performance analysis of single-photon avalanche diode underwater VLC system using ARQ[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7906313.
- [5] Jamali M V, Salehi J A, Akhondi F. Performance studies of underwater wireless optical communication systems with spatial diversity: MIMO scheme[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(3): 1176-1192.
- [6] Li Y C, Videv S, Abdallah M, et al. Single photon avalanche diode (SPAD) VLC system and application to downhole monitoring[C]//*IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, December 8-12, 2014, Austin, Texas, United States. New York: IEEE Press, 2014: 2108-2113.
- [7] Ji Y W, Wu G F, Wang C. Generalized likelihood block detection for SPAD-based underwater VLC system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(1): 7900510.
- [8] Mao T Q, Wang Z C, Wang Q. Receiver design for SPAD-based VLC systems under Poisson-Gaussian mixed noise model[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 799-809.
- [9] Rong X C, Wang C, Ren J W, et al. Visible light communication system based on embedded hard drive indicator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1806004.
荣新驰, 王超, 任嘉伟, 等. 基于嵌入式硬盘指示灯的可见光通信系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1806004.
- [10] Zhang J, Si-Ma L H, Wang B Q, et al. Low-complexity receivers and energy-efficient constellations for SPAD VLC systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(17): 1799-1802.
- [11] Wang Y. Research on receiving technology of multipixel photon counter array in deep space optical communication[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.
王应. 深空光通信中多像素光子计数器阵列接收技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- [12] Armstrong I S, Hayden C, Memmott M J, et al. A preliminary evaluation of a high temporal resolution data-driven motion correction algorithm for rubidium-82 on a SiPM PET-CT system[J]. *Journal of Nuclear Cardiology*, 2020: 1-13.
- [13] Xue L, Li M, Li X Y, et al. Multi-photon time-of-arrival resolution enhancement by deconvolution in laser ranging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0702007.
薛莉, 李明, 李希宇, 等. 激光测距多光子分立时刻的反卷积解算方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0702007.
- [14] Liu K B, Yang X H, He T T, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 220001.
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 220001.
- [15] Cova S, Longoni A, Andreoni A. Towards picosecond resolution with single-photon avalanche

- diodes[J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52(3): 408-412.
- [16] Li Y C, Safari M, Henderson R, et al. Optical OFDM with single-photon avalanche diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 943-946.
- [17] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J. A long distance underwater visible light communication system with single photon avalanche diode[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 7906311.
- [18] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J, et al. Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28783-28793.
- [19] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, et al. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21685-21699.
- [20] van Dam H T, Seifert S, Vinke R, et al. A comprehensive model of the response of silicon photomultipliers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(4): 2254-2266.
- [21] Eckert P, Schultz-Coulon H C, Shen W, et al. Characterisation studies of silicon photomultipliers [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 620(2/3): 217-226.
- [22] Zhao S, Guo J, Liu H B, et al. Application of multi-pixel photon counters to single photon detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 972-976.
赵帅, 郭劲, 刘洪波, 等. 多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 972-976.
- [23] Zhang G Q, Zhu C J, Liu L N. Photon number resolution model and experimental verification of multi-pixel photon counter[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(7): 1273-1278.
张国青, 朱长军, 刘丽娜. 多像素光子计数器的光子数分辨模型与实验验证[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1273-1278.
- [24] Han B, Zhao W, Wang W, et al. Modified photon counting communication method for underwater application[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806004.
韩彪, 赵卫, 汪伟, 等. 面向水下应用的改进型光子计数通信方法[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806004.
- [25] Shen J N, Wang J L, Chen X, et al. Towards power-efficient long-reach underwater wireless optical communication using a multi-pixel photon counter[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23565-23571.
- [26] Ren Z Y, Wu G F, Liu J H, et al. An experimental system of low illumination visible light communication based on multi-pixel photon counter[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(7): 1159-1165.
任致远, 仵国锋, 刘杰徽, 等. 基于多像素光子计数器的弱光可见光通信实验系统[J]. 信号处理, 2020, 36(7): 1159-1165.
- [27] Makitalo M, Foi A. Optimal inversion of the anscombe transformation in low-count Poisson image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(1): 99-109.
- [28] Anscombe F J. The transformation of Poisson, binomial and negative-binomial data[J]. Biometrika, 1948, 35(3/4): 246-254.
- [29] Makitalo M, Foi A. Optimal inversion of the Anscombe transformation in low-count Poisson image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(1): 99-109.