

基于光脉冲位置调制的异步时钟错位采样数据恢复技术

向劲松, 陈雪莉, 贾元明, 张培

重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

摘要 为提高深空光通信中异步时钟采样信号恢复数据的可靠性,提出了基于光脉冲位置调制的异步时钟错位采样数据恢复方案。该方案将光子探测器阵列输出信号分为两组,其中奇数组信号以一定时隙频率进行采样,偶数组信号延迟半个时隙进行采样,最后对两组采样信号分别进行合并和插值以完成数据恢复。仿真结果表明:错位采样数据恢复方案的采样性能优于传统采样数据恢复方案,当以1倍时隙频率采样时,所提方案能有效减小传统采样方案所带来的信号损失,抑制时延抖动引起的脉冲移位错误,系统性能提升效果明显。

关键词 光通信; 光脉冲位置调制; 错位采样; 插值

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.120602

Recovery Technique for Asynchronous Clock Delay Sampling Data Based on Optical Pulse Position Modulation

Xiang Jinsong, Chen Xueli, Jia Yuanming, Zhang Pei

College of Communications and Information Engineering, Chongqing University of

Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract In order to improve the reliability of asynchronous clock sampling signal recovery data in deep space optical communication, an asynchronous clock delay sampling data recovery scheme based on optical pulse position modulation is proposed. The scheme divides output signals of the photon detector arrays into two groups. The output signals of odd arrays are sampled into a certain slot frequency, and the output signals of even arrays are sampled after half slot sampling. Finally, the two groups of sampling signals are merged and interpolated separately to complete the process of data recovery. The simulation results show that the sampling performance of delay sampling data recovery scheme is better than that of traditional sampling scheme. When the sampling frequency is with one times slot frequency, the proposed scheme can effectively reduce the signal loss caused by the traditional sample mode, and suppress the pulse shift error caused by the delay jitter. The system performance can be improved obviously.

Key words optical communications; optical pulse position modulation; delay sampling; interpolation

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 060.4080

1 引言

基于脉冲位置调制(PPM)和光子探测器阵列的激光通信技术因具有能量转换效率高、抗干扰性能强和探测灵敏度高的特点,广泛应用于深空光通信^[1-2]。但深空光通信链路极长,发射器的发射功率非常有限,且各探测器阵列信号容易受背景光噪声和时延抖动等信道特性的影响,使得接收端信噪比极低,难以实现准确的时钟同步及数据恢复^[3-4]。异步时钟采样的开环同步方式不需要闭环跟踪,且系统结构较为简单,因此逐渐被应用于PPM的激光通信系统中。Srinivasan等^[5]针对月球激光通信演示验证(LLCD)项目设计了一套地面后备处理系统,其地面接收机利用与发射端独立振荡、可变时隙速率的16PPM信号进行异步时钟采样

收稿日期: 2017-06-06; 收到修改稿日期: 2017-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61571072)

作者简介: 向劲松(1975—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间光通信方面的研究。

E-mail: xiangjs@cqupt.edu.cn

并存储数据,最后对 PPM 时隙信号进行开环同步处理并通过插值算法恢复数据。Quirk 等^[6]深入研究了 LLCD 备份系统中的 1 倍时隙频率异步采样信号的时钟同步及数据恢复方案,该方案先将探测器阵列各单元信号进行合并,再进行采样,并通过周期性插入训练序列完成时钟同步,最后考虑探测器抖动的影响,通过似然比补偿方式对 PPM 信号进行插值恢复。Moision 等^[7]提出利用时隙似然比加权的方法来补偿脉冲展宽带来的影响,分别分析了指数似然比补偿和高斯似然比补偿两种方法对系统性能的影响。向劲松等^[8]提出了一种利用脉冲展宽波形的权系数插值与脉冲展宽补偿进行合并处理的数据恢复方案,但该方案并没有考虑 1 倍时隙频率采样(即每个时隙只采样一个点)数据量较少的问题,易产生信号损失,且 1 倍时隙采样更容易受到时延抖动的影响,如定时误差接近半个时隙的插值位置所恢复的数据可靠性很差,稍有时延抖动就会引起 PPM 脉冲移位错误。

结合信道特性以及文献[8]中研究的权系数插值和补偿合并方案,提出了异步时钟错位采样数据恢复方案。该方案将探测器阵列的输出信号分为奇数组信号和偶数组信号,且奇数组信号与偶数组信号的采样时间相差半个时隙,再对采样后的信号按奇数组和偶数组进行合并,最后对合并后的两组信号分别运用插值进行数据恢复。

2 系统模型

图 1 为深空光 PPM 通信系统结构示意图。在发送端,纠错编码与脉冲位置调制器通过交织器相连,信号经 PPM 后,通过激光器将调制信号发送至空间信道。接收端由光子探测器阵列对光脉冲信号进行接收,传统采样方案是将光子探测器各阵列单元合并成一路信号进行采样,再对合并后的采样数据进行插值恢复,最后将插值恢复后的数据送入译码器进行译码输出。

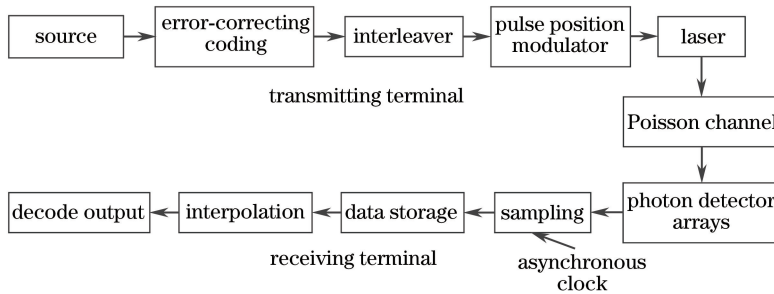


图 1 深空光 PPM 通信系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of deep space optical PPM communication system

在深空激光通信中,采用的光学探测组件大都为基于光电子探测计数过程的探测器,这种探测器的输出信号模型可看作泊松分布模型^[9],因此图 1 中的信道模型为基于光子计数的泊松信道模型。在接收端,一个 PPM 符号只有一个时隙存在信号光脉冲,背景光脉冲均匀分布于各时隙。光子探测器探测到的时隙为 1 的光子数包括信息光子数和背景光子数之和,探测到的时隙为 0 的光子数只有背景光子数。令 k_i 为第 i 个时隙光子探测器所探测到的光子数, K_b 为一个 PPM 信号时隙上背景光子的平均计数, K_s 为一个 PPM 信号时隙上信号光子的平均计数,则当在第 i 个时隙探测到时隙为 1 和 0 的光子数时,其软输出概率密度函数^[1]可分别表示为

$$p(k_i | 1) = \frac{(K_b + K_s)^{k_i}}{k_i!} \exp[-(K_b + K_s)], \quad (1)$$

$$p(k_i | 0) = \frac{K_b^{k_i}}{k_i!} \exp(-K_b). \quad (2)$$

由(1)、(2)式可得第 i 个时隙的似然比函数为

$$L_i = \frac{p(k_i | 1)}{p(k_i | 0)} = \left(1 + \frac{K_s}{K_b}\right)^{k_i} \exp(-K_s). \quad (3)$$

3 基于光 PPM 的异步时钟错位采样数据恢复技术

传统异步时钟采样数据恢复方案中,探测器阵列单元信号等增益合并成一路,然后用与发射端独立振荡的 1,2,4 倍 PPM 时隙频率的异步时钟采样信号进行采样,最后通过插值恢复 PPM 时隙数据。时延抖动导致的脉冲展宽以及采样时钟和时隙时钟不同步等因素都会使得实际采样产生偏差。图 2 为传统异步时钟采样模型示意图^[10]。实线位置代表实际采样位置,虚线位置代表最佳采样位置。

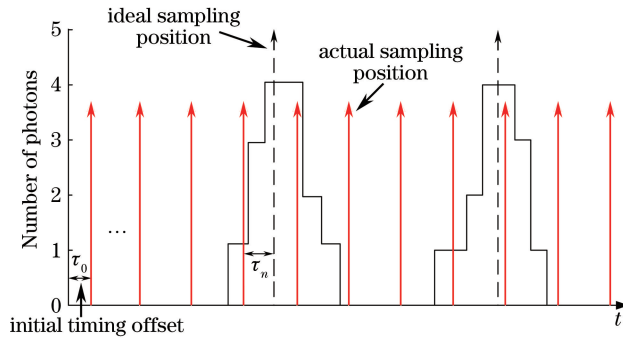


图 2 传统异步时钟采样模型示意图

Fig. 2 Schematic of traditional asynchronous clock sampling model

假设初始定时偏差为 τ_0 , 经过 n 个时隙后, 定时偏差记为 τ_n , 则 τ_n 的表达式为^[11]

$$\tau_n = \tau_0 T_c + pnT_s + n\gamma T_s, \quad (4)$$

式中 $\gamma = (f_s/f_c) - 1$ 为归一化频偏, 其中 f_s 为采样时钟频率, f_c 为时隙时钟频率; T_c 为时隙间隔, T_s 为采样时钟间隔, $p = T_c/T_s$ 。图 2 对应 2 倍时隙频率采样示意图, 即 $p=2$ 。文献[8]中给出了不同采样频率下传统采样方案的性能仿真分析, 在抖动标准差 $\sigma=0.2$ 的条件下, 与 2 倍、4 倍时隙频率采样性能相比, 1 倍时隙频率采样性能分别有约 0.2 dB 和 0.6 dB 的损失。这表明了 2 倍、4 倍时隙频率采样在系统性能上有一定优势, 但是 1 倍时隙频率采样的数据量小, 对存储系统的要求低。此外, 在给定采样电路最高速率限制条件下, 相对于 2 倍、4 倍时隙频率采样, 1 倍时隙频率采样具有更高的数据传输速率。

在深空光通信中, 空载终端的功率非常有限, 能源非常宝贵^[12-13], 因此要求太空终端具有更小的尺寸、质量、功率以及更高的数据传输速率。实际深空光通信系统中, 数据传输速率越低, 对通信链路余量及发射激光功率的要求越高。此外, 采样频率越高, 对接收机处理数据的能力要求越高, 尤其在高速率的深空激光通信系统中, 高采样速率限制了系统的数据传输速率。因此, 提升 1 倍时隙频率异步时钟采样的传输质量以及满足深空激光通信大数据量、高数据速率传输的要求是值得深入研究的课题, 因此以下主要对 1 倍时隙频率采样特点及数据恢复方案进行详细分析。

与基于多倍 PPM 时隙频率采样的性能相比, 1 倍时隙频率异步采样恢复数据的主要问题为数据量小, 在进行数据恢复时容易造成信号损失, 难以实现可靠的数据恢复。此外, 对于 1 倍 PPM 时隙时钟采样的数据, 在与采样时刻定时误差接近 $T_s/2$ 的位置, 插值恢复数据的可靠性较差, 当在这些位置出现某些数据模式时, 稍有时延抖动就会引起 PPM 脉冲产生移位错误。图 3 为 1 倍时隙频率采样数据特征示意图, 从图中可以看出, 定时误差接近 $T_s/2$ 时, 稍有时延抖动就会造成脉冲移位错误。由于经边沿触发整形后的 PPM 信号脉冲宽度 T_w 略小于 1 倍时隙, 在对脉冲信号采样时可能会出现漏采样, 从而引起信号损失。因此, 针对上述问题, 提出 1 倍时隙频率错位采样数据恢复方案。

在接收端由 N 个探测器阵列对 PPM 信号进行接收, 将探测器阵列输出信号分为奇数组信号和偶数组信号。奇数路信号以 1 倍时隙频率进行采样, 偶数路信号以同样频率且错位半个时隙进行采样, 再将各奇数路和各偶数路的采样数据合并为奇数组和偶数组两组信号。根据权系数对两组信号分别进行插值及补偿, 最后将插值补偿后的各时隙软信息进行合并, 以完成数据恢复。

图 4 为 1 倍时隙频率错位采样示意图。由于采样时钟与实际 PPM 时隙时钟存在微小的频率偏差, 采样时钟与 PPM 时隙时钟的相对位置将会出现滑动。当滑动到一定位置时, 如图 4 中奇数路的第 2 个脉冲位置 (即采样时刻与理想时刻的偏差接近 $T_s/2$ 处), 由于 PPM 信号脉冲宽度稍小于时隙周期 T_c , 恢复 PPM 时

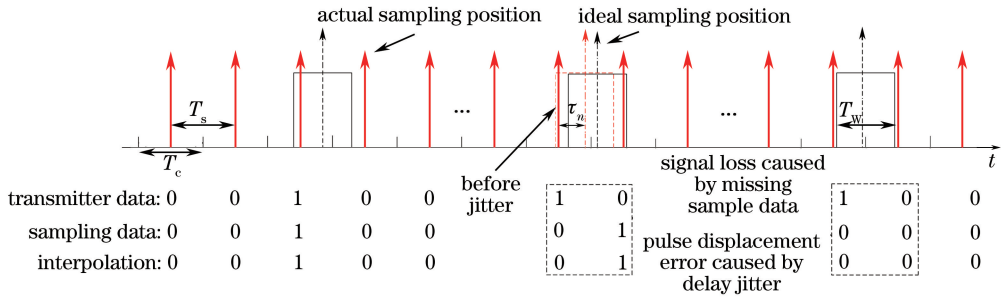


图 3 1 倍时隙频率采样数据特征示意图

Fig. 3 Schematic of sampling data characteristics with one times slot frequency

隙信号时也有一定的几率发生错误。当时偏差增加到大于 $T_s/2$ 时,例如在图 4 中奇数组的第 3 个脉冲位置恢复数据时易产生 PPM 脉冲移位错误,即将脉冲 1 判决到相邻时隙中。通过定性分析,将偶数组信号在奇数路的基础上错位半个时隙进行采样,能够有效弥补这类错误,使得到的采样数据更接近理想的采样数据。在完成错位采样后,需通过插值算法对 PPM 信号进行数据恢复。插值算法的实质就是把实际采样值转换为理想采样值的过程^[14]。文献[8]给出了 2 倍时隙频率传统采样方式经插值及 4 点权系数补偿后的最佳采样点位置的时隙似然比,同理可推导出 1 倍时隙频率传统采样方式经 2 点权系数补偿后的最佳采样点位置的时隙似然比为

$$L = k_{i-1} \lg \left[1 + \frac{K_s W_{-1}(\mu)}{K_b} \right] + k_i \lg \left[1 + \frac{K_s W_0(\mu)}{K_b} \right] - K_s, \quad (5)$$

式中 k_{i-1} 、 k_i 分别表示插值基本样点 $i-1$ 、 i 所在时隙的光子数, μ 为插值的小数间隔, 权系数 $W_{-1}(\mu)$ 和 $W_0(\mu)$ 可由脉冲展宽波形函数 $f(t)$ 在偏移采样间隔内进行积分求得^[8]。这里借鉴文献[8]中传统异步时钟采样数据恢复方案中的插值与脉冲展宽效应合并处理方案,对错位采样 PPM 信号进行数据恢复。

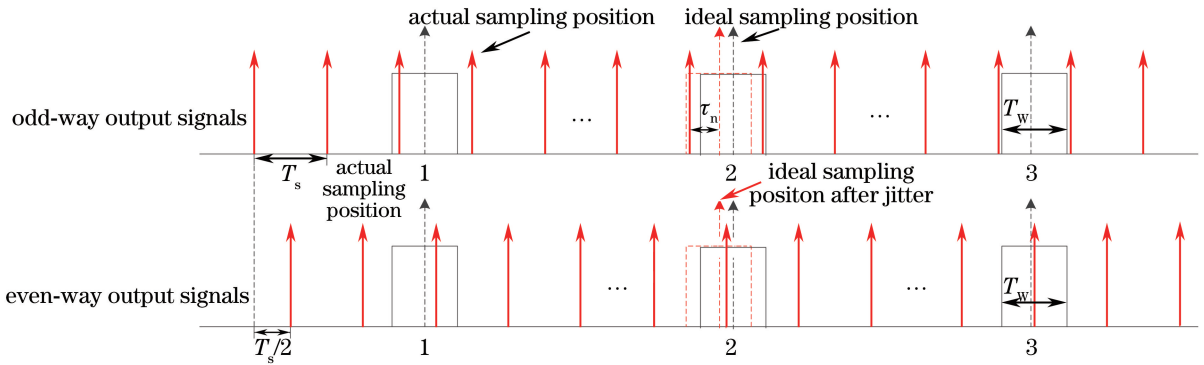


图 4 1 倍时隙频率错位采样示意图

Fig. 4 Schematic of delay sampling with one times slot frequency

首先将奇数路信号和偶数路信号对应合并输出两组信号,再分别根据脉冲展宽波形函数计算奇数组和偶数组信号的权系数,最后运用插值和脉冲展宽效应补偿合并处理方式恢复数据。图 5 为采样时钟与时隙时钟关系下的错位采样权系数示意图。假设时隙周期为 T_c , 采样周期为 T_s , τ_0 和 τ'_0 分别为两路信号的初始偏差,这里 $\tau'_0 = \tau_0 + 0.5$ 。设信号 $I_k = \text{ceil}(kT_c/T_s)$ 为基点指针(ceil 为向上取整函数), $\mu_1 = I_k T_s - kT_c - \tau_0 T_c$ 和 $\mu_2 = I_k T_s - kT_c - \tau'_0 T_c$ 分别为奇数组和偶数组的小数间隔。将两组信号选取接收到的 $(I_k - 1) T_s$ 和 $I_k T_s$ 作为基本采样点, $W_0(\mu_1)$ 和 $W_1(\mu_1)$ 为奇数组信号基本采样点位置所对应的补偿权系数, $W_2(\mu_2)$ 和 $W_3(\mu_2)$ 为偶数组信号基本采样点位置所对应的权系数。基本采样点位置的补偿权系数可通过计算光子偏移时隙间隔内的积分得到,其表达式为^[8]

$$\begin{cases} W_0(\mu_1) = \int_{kT_c + \tau_0 T_c + \mu_1 - 2T_s}^{kT_c + \tau_0 T_c + \mu_1 - T_s} f_1(t) dt, & W_1(\mu_1) = \int_{kT_c + \tau_0 T_c + \mu_1 - T_s}^{kT_c + \tau_0 T_c + \mu_1} f_1(t) dt \\ W_2(\mu_2) = \int_{kT_c + \tau'_0 T_c + \mu_2 - 2T_s}^{kT_c + \tau'_0 T_c + \mu_2 - T_s} f_2(t) dt, & W_3(\mu_2) = \int_{kT_c + \tau'_0 T_c + \mu_2 - T_s}^{kT_c + \tau'_0 T_c + \mu_2} f_2(t) dt \end{cases} \quad (6)$$

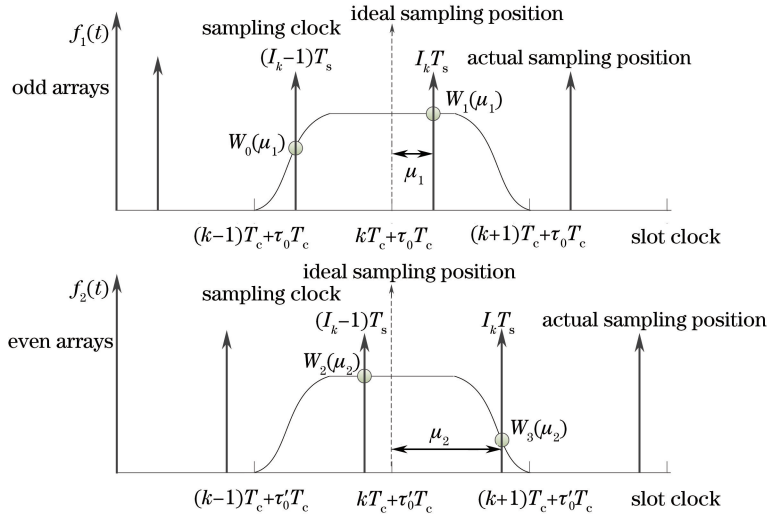


图 5 错位采样权系数示意图

Fig. 5 Schematic of delay sampling weight coefficient

设奇数组信号和偶数组信号最佳采样点(虚线)位置处的对数似然比为 R_{LLR_1} 和 R_{LLR_2} , 结合泊松信道的调制似然比[(3)式]得到合并后的最佳采样点位置处的时隙似然比 R_{LLR} 为

$$\begin{aligned} R_{LLR} = R_{LLR_1} + R_{LLR_2} = & k_{1,i} \lg \left[1 + \frac{K_s W_0(\mu_1)}{2K_b} \right] + k_{1,i+1} \lg \left[1 + \frac{K_s W_1(\mu_1)}{2K_b} \right] + \\ & k_{2,i} \lg \left[1 + \frac{K_s W_2(\mu_2)}{2K_b} \right] + k_{2,i+1} \lg \left[1 + \frac{K_s W_3(\mu_2)}{2K_b} \right] - K_s, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $k_{1,i+1}$ 和 $k_{1,i}$ 分别表示奇数组在 $(I_k - 1)T_s$ 和 $I_k T_s$ 所处时隙内的光子个数, $k_{2,i+1}$ 和 $k_{2,i}$ 分别表示偶数组在 $(I_k - 1)T_s$ 和 $I_k T_s$ 所处时隙内的光子个数。

4 仿真分析

仿真中,采用调制阶数 $M=64$, $T_c=32$ ns 的串行级联脉冲位置调制编译码系统,抖动标准差为 σ , 平均每个时隙的背景光子数为 K_b , 采样时钟与实际时钟的偏差 $\gamma=5 \times 10^{-5}$, 初始采样偏差为 τ_0 , 其在 $-0.5 \sim 0.5$ 个时隙内随机分布。图 6 为不同采样频率下,传统采样方案与错位采样方案的性能对比,此时 $N=8$, $K_b=0.2$, $\sigma=0.2$ 。从图中可以看出,1,2,4 倍 PPM 时隙频率错位采样方案相比于传统采样方案,系统性能均有不同程度的提高,且 1 倍 PPM 时隙频率错位采样方案的系统性能提升最明显。在其他参数与图 6 相同的条件下, $K_b=2$ 时错位采样方案与传统采样方案的系统性能对比如图 7 所示,从图中可以看出,即使将每个时隙的平均背景光噪声增加到 2 个光子 ($K_b=2$),其误码性能仍有 0.08 dB 的提升。这是因为 1 倍 PPM 时隙频率采样数据量较小,采用传统采样方案容易造成信号损失,而采用错位采样方案可将光子探测器阵列单元输出信号进行分组采样,这种互补性采样方案减少了信号损失。图 8 为 $K_b=0.2$, $\sigma=0.2$ 时,不同探测器个数下错位采样数据恢复方案与传统采样数据恢复方案的系统性能对比,从图中可以看出,探测器个数 N 越少,采样性能提升越明显,当 $N=4$ 时,错位采样数据恢复方案相比于传统采样方案,误码性能约有 0.06 dB 的提升。由于探测器存在恢复时间,当探测器单元处于恢复期时无法探测到光子,因此探测器阵列单元个数较少时系统性能会有所下降,而错位采样方案相对于传统采样数据方案,能有效减少因探测器单元个数较少而造成的系统性能损失。图 9 为 $N=8$, $K_b=0.2$ 时,不同抖动参数下错位采样方案与传统采样方案的系统性能对比,从图中可以看出,抖动参数越大,错位采样方案相比于传统采样数据恢复方案的系统性能提升越明

显,当 $\sigma=0.3$ 时,错位采样数据恢复方案相比于传统采样数据恢复方案的系统性能约有0.07 dB的提升。这是由于1倍PPM时隙频率异步时钟采样方案的抗时延抖动能力弱,这里将探测器阵列相邻单元信号的采样时钟相位差设为 π ,即将探测器阵列单元输出分为奇数组和偶数组,偶数组在奇数组的基础上延迟半个时隙进行采样,这种相邻单元互补性的配置能更好地抑制时延抖动引起的脉冲移位错误。

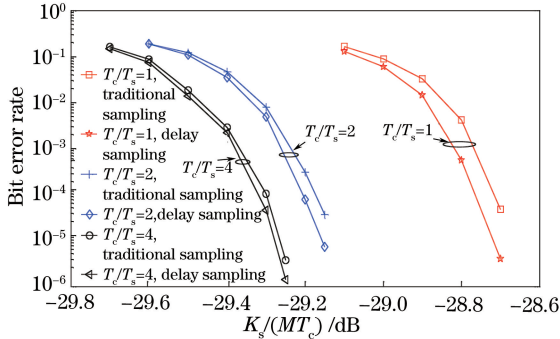


图6 不同采样频率下错位采样方案与传统采样方案的系统性能对比

Fig. 6 System performance comparison between delay sampling scheme and traditional sampling scheme under different sampling frequencies

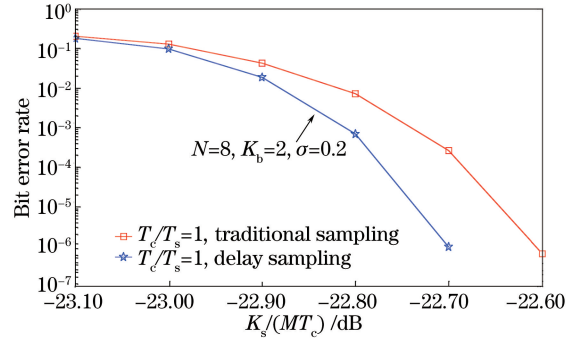


图7 $K_b=2$ 时错位采样方案与传统采样方案的系统性能对比

Fig. 7 System performance comparison between delay sampling scheme and traditional sampling scheme when $K_b=2$

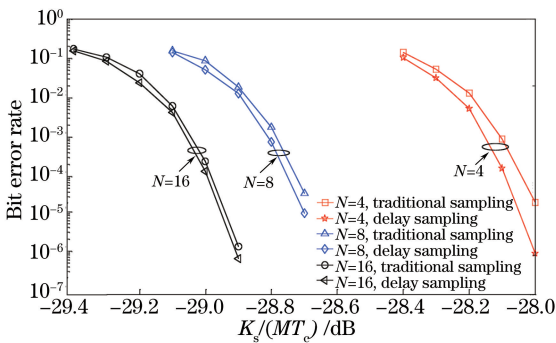


图8 $K_b=0.2, \sigma=0.2$ 时,不同探测器个数下错位采样方案与传统采样方案的系统性能对比

Fig. 8 System performance comparison between delay sampling scheme and traditional sampling scheme under different number of detectors when $K_b=0.2$ and $\sigma=0.2$

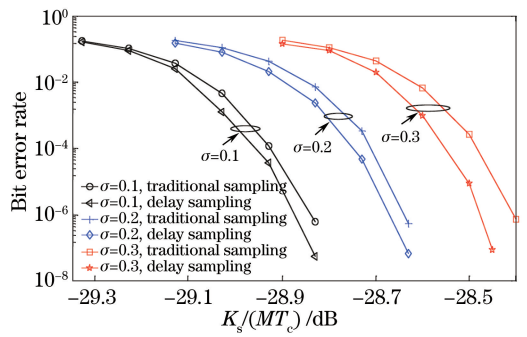


图9 $N=8, K_b=0.2$ 时,不同抖动参数下错位采样方案与传统采样方案的系统性能对比

Fig. 9 System performance comparison between delay sampling scheme and traditional sampling scheme under different jitter parameters when $N=8$ and $K_b=0.2$

5 结论

提出了基于光PPM的异步时钟错位采样数据的恢复方案,该方案将探测器阵列单元输出信号分为两组进行错位采样,并通过插值实现数据恢复,这种错位采样方案相比于传统采样数据恢复方案,能有效降低1倍时隙频率采样数据量小造成的信号损失,同时这种互补性的采样方案能更好地抑制时延抖动引起的脉冲移位错误。仿真结果表明:该错位采样数据恢复方案不仅能提高1倍时隙频率采样的系统性能,2倍和4倍时隙错位采样的系统性能也有不同程度的提升。下一步研究中,该错位采样数据恢复方案将应用于自适应可变速率的PPM解调系统。

参考文献

- [1] Hemmati H, Biswas A, Djordjevic I B. Deep-space optical communications: Future perspectives and applications[J]. Proceedings of IEEE, 2011, 99(11): 2020-2039.
- [2] Boroson D M, Robinson B S. Status of the lunar laser communication demonstration[C]. SPIE, 2015, 8610: 861002.

- [3] Mueller K, Muller M. Timing recovery in digital synchronous data receivers [J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(5): 516-531.
- [4] Zhou Xiangchao, Zhao Danfeng, Xue Rui. Soft timing synchronization algorithm for LDPC codes on $GF(q)$ in deep space communication[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(3): 110-114.
周相超, 赵旦峰, 薛睿. 深空通信系统中高阶 LDPC 码的软定时同步算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 110-114.
- [5] Srinivasan M, Birnbaum K, Cheng M, *et al.* Apost-processing receiver for the lunar laser communications demonstration project[C]. SPIE, 2013, 8610: 86100Q.
- [6] Quirk K J, Srinivasan M. Optical PPM demodulation from slot-sampled photon counting detectors[C]. IEEE Military Communications Conference, 2013: 14082403.
- [7] Moision B. Photon jitter mitigation for the optical channel[J]. IPN Progress Report, 2007, 42(171): 1-13.
- [8] Xiang Jinsong, Wang Ju, Wu Tao, *et al.* Data recovery technique for asynchronous sampling signal modulated by optical pulse position based on pulse broadening waveform[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106004.
向劲松, 王举, 吴涛, 等. 基于脉冲展宽波形的光 PPM 异步采样信号的数据恢复技术[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0106004.
- [9] Rogalin R, Srinivasan M. Maximum likelihood synchronization for pulse position modulation with inter-symbol guard times[C]. IEEE Global Communications Conference, 2016: 16654598.
- [10] Xiang Jinsong, Wu Tao, Huang Sheng, *et al.* Slot synchronization aided by serial concatenated pulse position modulation code system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806006.
向劲松, 吴涛, 黄胜, 等. 串行级联脉冲位置调制码辅助的时隙同步技术[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806006.
- [11] Quirk K J, Gin J W, Srinivasan M. Optical PPM synchronization for photon counting receivers[C]. IEEE Military Communications Conference, 2008: 10457527.
- [12] Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.* Lunar laser communication demonstration in USA: Terminal design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050003.
宋婷婷, 马晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证-终端设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050003.
- [13] Song Tingting, Ma Jing, Tan Liying, *et al.* Experiment design and development of the lunar laser communication demonstration in USA[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040004.
宋婷婷, 马晶, 谭立英, 等. 美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040004.
- [14] Erup L, Gardner F M, Harris R A. Interpolation in digital modems. II. Implementation and performance[J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(6): 998-1008.