

基于脉冲展宽波形的光脉冲位置调制 异步采样信号的数据恢复技术

向劲松¹, 王 举¹, 吴 涛¹, 张学旺²

¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

²重庆邮电大学软件工程学院, 重庆 400065

摘要 提出了一种基于脉冲展宽波形的插值与脉冲展宽效应补偿合并的数据恢复方案。该方案依据权重系数同时实现了插值与脉冲展宽效应补偿, 解决了时隙抽样误差和抖动问题, 完成了脉冲位置调制时隙信号的数据恢复。仿真结果表明, 所提出的方案具有较好的稳健性, 可有效抑制时隙抽样误差和抖动。在译码时使用的抖动参数与实际抖动参数不匹配的条件下, 该方案的性能仍优于将插值与脉冲展宽效应补偿分离处理的方案。该方案将插值与脉冲展宽效应补偿合并在一起, 运算更简化。

关键词 光通信; 光脉冲位置调制; 泊松信道; 脉冲展宽效应; 时钟恢复

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0106004

Data Recovery Technique for Asynchronous Sampling Signal Modulated by Optical Pulse Position Based on Pulse Broadening Waveform

Xiang Jinsong¹, Wang Ju¹, Wu Tao¹, Zhang Xuewang²

¹College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

²College of Software Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract A data recovery scheme, which combines the pulse broadening wave shape interpolation with the pulse broadening effect compensation, is proposed. The scheme can realize interpolation and pulse broadening effect compensation at the same time according to the weight coefficient, solve the problems of time slot sampling error and jitter, and achieve data recovery of time slot signal modulated by pulse position. The simulation results indicate that the proposed scheme has a good robustness, and can solve the problems of time slot sampling error and jitter effectively. Under the condition that the jitter parameters used in decoding mismatch with the actual parameters, the performance of the proposed scheme is still better than the scheme in which the interpolation and the pulse broadening effect compensation are separated. For the proposed scheme combines the interpolation with the pulse broadening effect compensation, the computation is simplified.

Key words optical communications; optical pulse position modulation; Poisson channel; pulse broadening effect; clock recovery

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4080

1 引 言

脉冲位置调制 (PPM) 技术以其较高的功率利用率在深空光通信研究中得到广泛关注^[1-2]。异步采样是

收稿日期: 2016-07-11; 收到修改稿日期: 2016-08-26

基金项目: 国家自然科学基金 (61571072)

作者简介: 王 举 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: wangjinj668@163.com

导师简介: 向劲松 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: xiangjs@cqupt.edu.cn

(通信联系人)

一种采样时钟与数字信号不同步的工作方式,因此不需要考虑时钟锁相跟踪电路处理单元,其系统结构简单,易于实现,在高速光纤通信和其他基于软件无线电的通信系统中得到广泛应用^[3]。但是,异步时钟采样的实际采样点与最佳采样点之间存在时隙抽样偏差,因此需要进行插值以实现数据恢复^[4-5]。Liu 等^[6]采用了分段抛物线插值方法对独立采样得到的信号进行插值运算,从而消除定时误差。Erup 等^[7]研究了多种标准的插值方式,并在数字接收机中进行仿真,找出最佳的插值方式以完成数据恢复,从而改善了系统性能。但是,上述数字接收机中采用的插值算法没有考虑脉冲时隙展宽的影响,系统同步性能未达到最优,且关于 PPM 结合异步采样方式应用于数字接收机方面的研究较少,因此针对 PPM 脉冲展宽情况下的异步采样信号数据恢复问题是一个重要的研究方向。Srinivasan 等^[8]在喷气推进实验室针对月球激光通信演示系统设计了一套地面后备接收系统,地面接收机采用异步时钟采样技术并存储 PPM 时隙信号,采用开环的同步方式实现 PPM 时隙数据的恢复。Quirk 等^[9]提出了 PPM 时隙频率的异步采样数据恢复方案,通过周期性插入帧同步序列来预测时钟误差,再通过插值恢复 PPM 时隙数据。Xiang 等^[10]提出了一种基于串行级联脉冲位置调制(SCPPM)码辅助的光 PPM 时隙同步技术方案,该方案利用最大期望算法预测时钟偏差,再由预测的时钟偏差进行插值得到采样点的数据,实现了 2 倍 PPM 时隙频率异步采样信号的数据恢复。Li 等^[11]研究了脉冲展宽特性以及影响脉冲展宽的因素,将基于格雷码的多脉冲位置调制与联合编码调制方式相结合,以减小时钟抖动和码间干扰的影响。Moision^[12]研究了服从指数分布的时延抖动对系统的影响,并利用似然比补偿的方法抑制脉冲展宽效应,但此研究中处理的是已同步信号,未运用插值进行时钟误差恢复。Xiang 等^[13]使用时隙似然比加权的办法来补偿脉冲展宽带来的影响,并对比了服从指数分布和高斯分布时延抖动的脉冲展宽。借鉴现有异步采样信号的数据恢复方法,结合光子脉冲展宽的抖动特性以及文献[12-13]中处理脉冲展宽效应的方法,本文提出了一种更适用于异步采样时隙抽样误差信号的数据恢复方案。不同于标准的插值方式和似然比补偿方式,该方案基于脉冲展宽波形函数进行插值并计算权系数,同时进行展宽效应补偿,从而实现了 PPM 异步采样信号的数据恢复。

2 系统模型

图 1 为异步采样与插值恢复系统的结构示意图。信号经过 SCPPM 编码(SCPPM 系统中含有 PPM 编码器)后^[14],光脉冲信号在含有背景噪声和抖动的信道中传输时会随机产生脉冲展宽现象。利用独立时钟进行异步采样时,实际采样点与最佳采样点之间存在时隙抽样偏差,因此需要对采样数据进行插值并对脉冲展宽效应进行补偿修正,将修正后的采样数据送入译码器并由译码器输出。

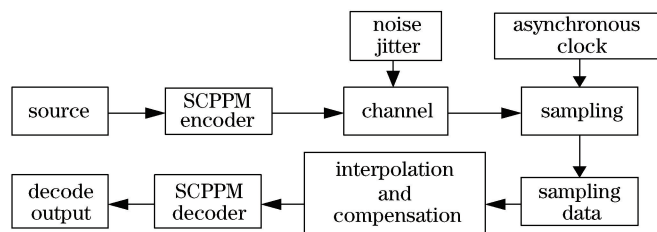


图 1 异步采样与插值恢复系统的结构示意图

Fig. 1 Diagram of asynchronous sampling and interpolation recovery system

图 1 中的信道模型为基于光子计数的泊松信道模型^[15],抖动模型为高斯抖动模型^[13]。采用采样时钟独立于发送信号时钟的方式进行异步时钟采样,分别用 1, 2, 4 倍频时钟进行异步采样^[9]。这里重点研究了插值与补偿模块,并提出了 2 种插值与补偿方案。第 1 种方案将插值与脉冲展宽效应补偿合并,利用脉冲展宽波形函数计算出权系数,并使用权系数进行插值与脉冲展宽效应补偿;第 2 种方案采用将插值与脉冲展宽效应补偿分离的方式,先利用标准的插值公式进行插值,再进行脉冲展宽效应补偿。

2.1 泊松信道下的 PPM 似然比

一个 PPM 帧的 M 个时隙中只有一个时隙存在光脉冲。当光脉冲经光信道传输后,接收机接收部分能量和背景光子,并将接收到的能量转变成光电子计数。信道模型为泊松信道模型,因此接收机接收的光子数模型服从泊松分布。令 k_i 表示某 PPM 帧第 i 时隙接收机检测到的光子数, n_b 为一个 PPM 时隙上噪声光

子的平均计数, n_s 为一个 PPM 时隙上信号光子的平均计数, 则第 i 个时隙存在和不存在光脉冲时的软输出概率密度函数分别为^[10]

$$P_s(k_i | 1) = \frac{(n_s + n_b)^{k_i} \exp[-(n_s + n_b)]}{k_i!}, \quad (1)$$

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

由(1)、(2)式可得, 第 i 个时隙的似然比函数为

$$L_i = \frac{P_s(k_i | 1)}{P_s(k_i | 0)} = \left(1 + \frac{n_s}{n_b}\right)^{k_i} \exp(-n_s). \quad (3)$$

2.2 脉冲展宽模型

假设光子探测器在理想状态下工作(即光子探测器探测到一个光子, 检测器上便会产生一个电脉冲), PPM 中利用脉冲位置代表数据信息, 因此在 M 阶 PPM 帧中, 第 i 个时隙的脉冲位置代表了传递的信息。令 $\lambda_i(t)$ 为第 i 个时隙到达的光子强度, $\lambda_i(t) = n_s p(t - i + 1) + n_b$, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, M\}$, $p(t)$ 为一个标准矩形脉冲。到达光子的时间记为 $\{s_j\}$, 其中 $j = 1, 2, \dots, V$, V 为一个 SCPPM 帧中的脉冲个数。存在定时抖动时, 每个到达时隙的光子脉冲都可能存在随机脉冲展宽现象, 因此每个脉冲的到达时间变为 $t_j = s_j + \delta$ (δ 表示抖动)^[12]。

根据光子探测器时延抖动特性选取抖动模型 δ , 参考文献[16]中的雪崩倍增管、雪崩光电二极管和超导纳米线 3 种单光子探测器的时延抖动进行实验, 得出的统计实验数据表明光子抖动分布函数具有高斯分布特性, 且超导纳米线单光子探测器的光子抖动特性最接近标准的高斯分布曲线。因此, 假设光子抖动呈高斯分布^[17], 其表达式为

$$f_\delta(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\delta^2/2\sigma^2), \quad (4)$$

式中 σ 为抖动的标准差。脉冲分布^[12]可表示为

$$f(t) = (p * f_\delta)t. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式进行卷积运算, 得到接收端时隙信号光子分布的波形表达式为

$$f'(t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{2\pi}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{t-1}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right], \quad (6)$$

式中 $\operatorname{erf}()$ 为误差函数。由于脉冲展宽效应的影响, 一些光脉冲会以一定的概率判决到相邻时隙, 因此根据(3)式计算每个时隙的似然比时, 会造成部分时隙信息丢失。为了弥补计算误差和消除展宽效应, 依据脉冲的展宽特性计算权系数并对计算结果进行补偿。

3 基于脉冲展宽波形的插值与脉冲展宽效应补偿合并处理方案

图 2 为基于脉冲展宽波形的插值与脉冲展宽效应补偿合并处理方案的示意图。根据脉冲展宽波形函数计算权系数, 根据权系数对异步采样数据同时进行插值与脉冲展宽效应补偿。由于插值权系数与脉冲展宽效应补偿使用同一个权系数, 因此可以将这两部分合并处理。

图 3 为脉冲展宽波形及权系数示意图, 其中 T_s 为时隙周期, T_c 为采样周期。从图中可以看出, 高斯抖

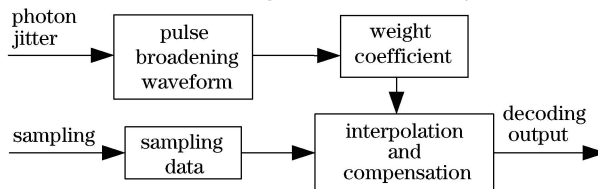


图 2 基于脉冲展宽波形的插值与脉冲展宽效应补偿的合并处理方案的示意图

Fig. 2 Scheme diagram of combining interpolation based on pulse broadening waveform with pulse broadening effect compensation

动模型(f_s)与信号脉冲波形(p)卷积后得到展宽波形函数,实际采样点与理想采样点之间存在时钟偏差 τ (实线为实际采样位置,虚线为理想采样位置)。为了纠正时钟偏差和脉冲展宽效应,使用权系数进行插值与补偿。由于光子是从理想采样点扩散到其他采样间隔,因此最佳采样点位置应该在 4 个权系数之间,4 个权系数基本样点的选取可以借鉴文献[5]中插值样点与参与插值的基本样点之间的定时关系。图 3 中将 4 个接收到的采样点 $[(m_k-2)T_c, (m_k-1)T_c, m_kT_c, (m_k+1)T_c]$ 作为基本样点,计算出最佳采样点位置 kT_s , 相对应位置的补偿权系数分别为 w_{-2}, w_{-1}, w_0, w_1 , 其中小数间隔 $\tau = m_kT_c - kT_s$, 基本指针 $m_k = \text{ceil}[kT_s/T_c]$ (ceil 为向上取整函数)。

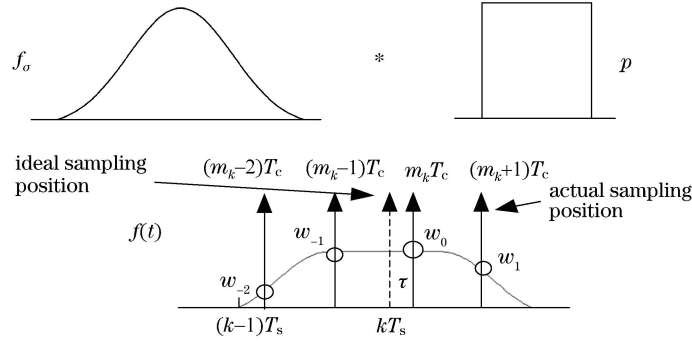


图 3 脉冲展宽波形及权系数示意图

Fig. 3 Diagram of pulse broadening waveform and weight coefficient

将脉冲展宽波形函数在光子偏移到的采样间隔内进行积分,得到 4 个权系数的表达式为

$$\begin{cases} w_{-2}(\tau) = \int_{kT_s+\tau-3T_c}^{kT_s+\tau-2T_c} f(t) dt \\ w_{-1}(\tau) = \int_{kT_s+\tau-2T_c}^{kT_s+\tau-T_c} f(t) dt \\ w_0(\tau) = \int_{kT_s+\tau-T_c}^{kT_s+\tau} f(t) dt \\ w_1(\tau) = \int_{kT_s+\tau}^{kT_s+\tau+T_c} f(t) dt \end{cases} \quad (7)$$

光子扩散到采样间隔 $(m_k-2)T_c$ 后,此位置的平均光子数为 $n_s w_{-2}(\tau)$,其他 3 点处的平均光子数分别为 $n_s w_{-1}(\tau), n_s w_0(\tau), n_s w_1(\tau)$ 。相对应的时隙似然比在 w_{-2} 处记为 L_{-2} ,在 w_{-1}, w_0, w_1 处分别记为 L_{-1}, L_0 和 L_1 。光子扩散到相邻时隙后其扩散点的时隙似然比乘积即为补偿后的似然比^[12],图 3 中虚线位置处时隙似然比 L 可表示为扩散 4 点的似然比相乘,即

$$L = L_{-2}L_{-1}L_0L_1 = \frac{P_{-21}}{P_{-20}} \frac{P_{-11}}{P_{-10}} \frac{P_{01}}{P_{00}} \frac{P_{11}}{P_{10}}, \quad (8)$$

式中 P_{-21}, P_{-20} 分别为 $(m_k-2)T_c$ 所处时隙内存在 k_{i-2} 个光子时,发射信息为 1 和 0 的概率;类似地 P_{-11} 和 P_{-10}, P_{01} 和 P_{00} 和 P_{10} 分别为 $(m_k-1)T_c, m_kT_c$ 和 $(m_k+1)T_c$ 所处时隙内存在 k_{i-1}, k_i, k_{i+1} 个光子时,发射信息为 1 和 0 的概率。

假设对一个 PPM 时隙进行 N 次采样,则泊松信道的平均背景光子数为 n_b/N ,此时补偿位置的时隙似然比(以 L_{-2} 为例)可表示为

$$L_{-2} = \frac{P_{-21}}{P_{-20}} = \left[1 + \frac{Nn_s}{n_b} w_{-2}(\tau) \right]^{k_{i-2}} \exp[-n_s w_{-2}(\tau)]. \quad (9)$$

类似地,计算其他 3 点的时隙似然比 L_{-1}, L_0, L_1 。4 点位置的光子由虚线位置的光子扩散产生,因此 4 点补偿处平均光子数之和应为 $n_s = n_s w_{-2}(\tau) + n_s w_{-1}(\tau) + n_s w_0(\tau) + n_s w_1(\tau)$,将其代入(8)式,进一步化简得到小数时隙 4 点权系数脉冲展宽补偿公式为

$$L \approx \left[1 + \frac{Nn_s w_{-2}(\tau)}{n_b} \right]^{k_{i-2}} \left[1 + \frac{Nn_s w_{-1}(\tau)}{n_b} \right]^{k_{i-1}} \left[1 + \frac{Nn_s w_0(\tau)}{n_b} \right]^{k_i} \left[1 + \frac{Nn_s w_1(\tau)}{n_b} \right]^{k_{i+1}} \exp(-n_s). \quad (10)$$

4 插值和脉冲展宽效应补偿分离的补偿方案

图 4 为插值和脉冲展宽效应补偿分离的补偿方案。先根据时钟误差进行插值,使用数字接收机时钟恢复标准插值公式,如拉格朗日插值、抛物线插值和线性插值等^[4];插值得到 1 倍时隙位置的数据,根据插值点数据计算得到权系数,然后借鉴文献^[12]提出的补偿算法,由权系数进行整数时隙脉冲展宽效应补偿。与前文合并数据恢复方案相比,该方案在结构上先进行插值后进行脉冲展宽效应补偿;在展宽补偿方式上以整数时隙进行展宽补偿。

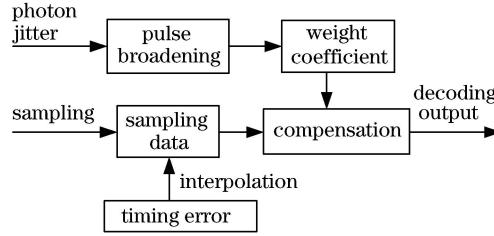


图 4 插值和脉冲展宽效应补偿分离的补偿方案

Fig. 4 Compensation scheme separating interpolation and pulse broadening effect compensation

假设时钟误差已准确预测,分别使用标准抛物线插值、拉格朗日插值和线性插值进行插值。

4 点拉格朗日插值系数^[7]分别为

$$C_{-2}(\tau) = \frac{1}{6}\tau^3 - \frac{1}{6}\tau, \quad C_{-1}(\tau) = -\frac{1}{2}\tau^3 + \frac{1}{2}\tau^2 + \tau,$$

$$C_0(\tau) = \frac{1}{2}\tau^3 - \tau^2 - \frac{1}{2}\tau + 1, \quad C_1(\tau) = -\frac{1}{6}\tau^3 + \frac{1}{2}\tau^2 - \frac{1}{3}\tau,$$

4 点分段式抛物线插值系数^[6]分别为

$$C_{-2}(\tau) = \frac{1}{2}\tau^2 - \frac{1}{2}\tau, \quad C_{-1}(\tau) = -\frac{1}{2}\tau^2 + \frac{3}{2}\tau,$$

$$C_0(\tau) = -\frac{1}{2}\tau^2 - \frac{1}{2}\tau + 1, \quad C_1(\tau) = \frac{1}{2}\tau^2 - \frac{1}{2}\tau. \quad (11)$$

两点线性插值系数^[7]为

$$C_{-1}(\tau) = \tau, \quad C_0(\tau) = 1 - \tau. \quad (12)$$

经插值公式插值后进行脉冲展宽效应补偿。由于整数时隙补偿时,光子偏移主要集中在相邻时隙,因此只进行左右相邻两个时隙的似然比补偿,即

$$L \approx (L_{i-1}; -1)(L_i; 0)(L_{i+1}; 1), \quad (13)$$

式中 L 为补偿后第 i 时隙位置的时隙似然比, L_{i-1} 为光子从第 i 时隙扩散到第 $i-1$ 时隙的时隙似然比, L_i 为补偿前第 i 时隙的时隙似然比, L_{i+1} 为光子从第 i 时隙扩散到第 $i+1$ 时隙的时隙似然比。

根据小数时隙补偿权系数公式,同理可得整数时隙权系数,考虑左右对称结构,将整数时隙权系数公式简写为

$$\omega_0(\tau) = \int_{\tau+(k-1)T_s}^{\tau+kT_s} f(t) dt, \quad \omega_1(\tau) = \int_{\tau+kT_s}^{\tau+(k+1)T_s} f(t) dt. \quad (14)$$

由于(14)式为左右对称结构,因此 $\omega_1(\tau) = \omega_{-1}(\tau)$, 将其代入权系数表达式,得到整数时隙 3 点权系数展宽补偿为

$$L \approx \left[1 + \frac{n_s \omega_{-1}(\tau)}{n_b} \right]^{k_{i-1}} \left[1 + \frac{n_s \omega_0(\tau)}{n_b} \right]^{k_i} \left[1 + \frac{n_s \omega_1(\tau)}{n_b} \right]^{k_{i+1}} \exp(-n_s). \quad (15)$$

5 仿真分析

图 5 为进行不同插值方式和补偿数据恢复后 SCPPM 系统的误码率(BER)。从图中下面的 4 条曲线可

可以看出,在定时抖动($\sigma=0.2$)条件下,与其他3种插值与脉冲展宽效应补偿分离处理方式相比,采用插值与脉冲展宽效应补偿的合并处理方式在系统误码率为 10^{-4} 时每纳秒光功率节省约0.05 dB。图中上面3条曲线为采用去除脉冲展宽效应补偿的分离插值方式的仿真结果,可以发现在没有展宽效应补偿的情况下,采用分离插值方式在系统误码率为 10^{-5} 时每纳秒光功率节省约0.2 dB,表明在处理时隙抽样误差时,需要考虑脉冲展宽效应对系统性能的影响。因此,采用基于脉冲展开波形函数的插值与脉冲展宽效应补偿合并处理方案进行数据恢复是一种可行的方案,可以有效抑制时隙抽样误差和脉冲展宽效应引起的系统性能恶化。

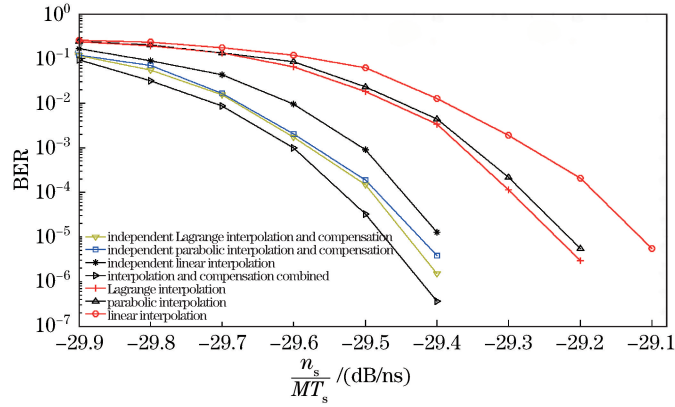


图5 不同插值方式下的性能对比 ($M=64, n_b=0.2, T_s=32$ ns)

Fig. 5 Performance comparison of different interpolation methods ($M=64, n_b=0.2, T_s=32$ ns)

图6(a)、(b)分别为不同采样频率和不同抖动条件下对采用合并处理方案进行数据恢复的仿真结果。图6(a)表明,在 $\sigma=0.2$ 条件下,4倍频PPM采样性能最好,其BER比2倍频采样在系统误码率为 10^{-4} 时每纳秒光功率节省约0.2 dB,比1倍频采样节省约0.8 dB。图6(b)表明,在2倍频PPM采样条件下,随着抖动的加大,系统性能出现明显的恶化。图7为在抖动参数不匹配条件下(译码时抖动参数 $\sigma' \neq \sigma, \sigma$ 为实际抖动参数)进行仿真得到的结果。由图6可知,采用插值与脉冲展宽效应补偿合并方式得到的系统性能较好,在译码抖动参数匹配(图5)与不匹配条件下都优于一般通用的分离恢复方式的系统性能。因此,可以得到合并数据恢复方案具有很好的稳健性,更适用于脉冲展宽的异步采样PPM信号解调系统。

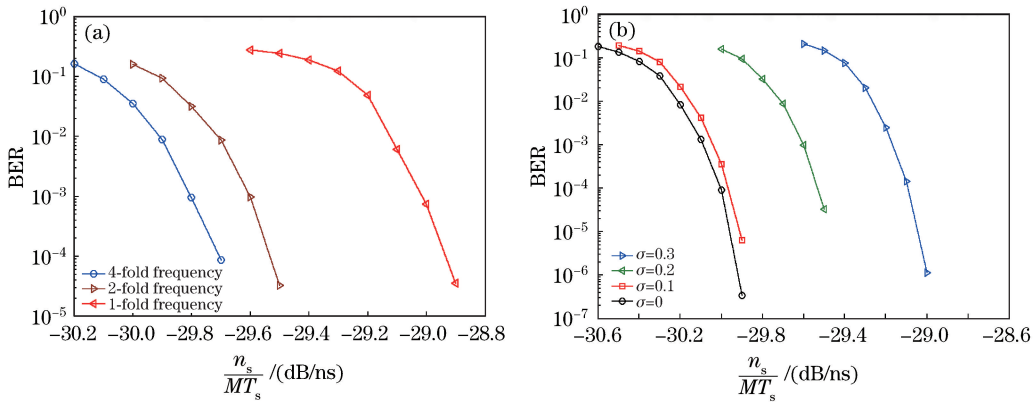


图6 不同(a)采样频率和(b)不同抖动参数的合并插值方式下的BER

Fig. 6 BER obtained by combining interpolation methods with different

(a) sampling frequencies and (b) jitter parameters

使用两种数据恢复方式进行仿真时,将权系数计算改为查表的方式,即在每个点的位置映射一个权系数,使用权系数时只需找到序列号即可找到对应的权系数,因此两种数据恢复方式中权系数的计算量可以抵消。权系数展宽补偿的计算同样采用查表的方式,记 y_n 为对每个点补偿的结果取对数,则展宽效应补偿为 $L = \sum y_n$,由此可知,合并方式4点权系数展宽补偿相当于经历了4次加法运算,而分离方式3点展宽补偿经历了3次加法运算。由于分离方式是先插值后补偿,因此4点插值需要4次加法运算,分离方式需要7次加

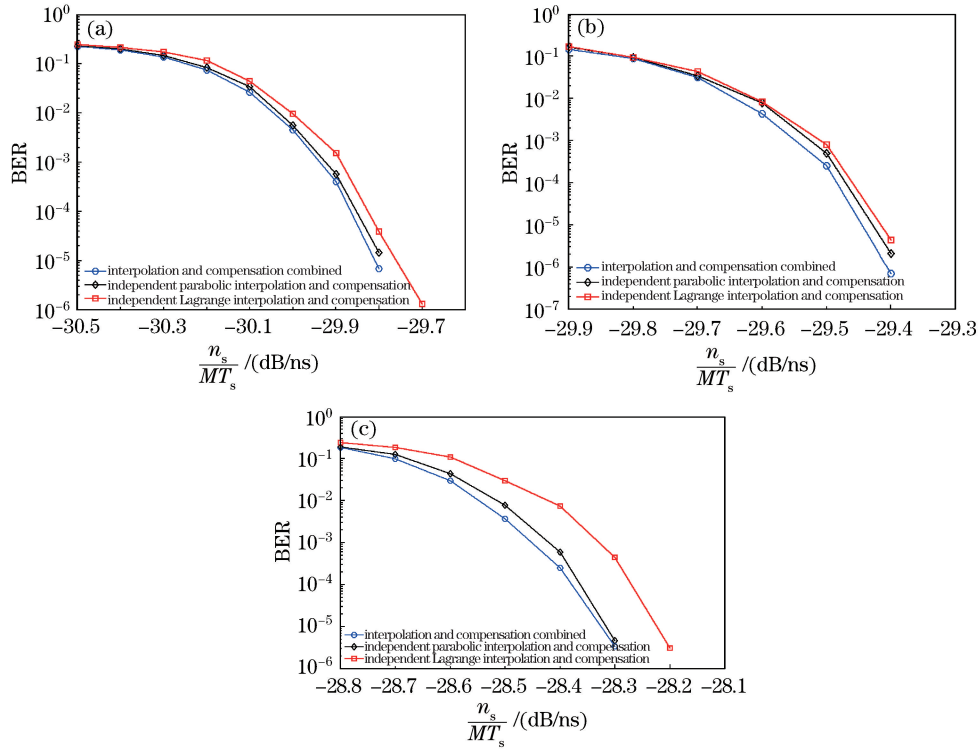


图 7 抖动参数不匹配条件下的仿真结果。(a) $\sigma=0.2$, $\sigma'=0.1$; (b) $\sigma=0.2$, $\sigma'=0.3$; (c) $\sigma=0.2$, $\sigma'=0.4$

Fig. 7 Simulation results when jitter parameters mismatch. (a) $\sigma=0.2$, $\sigma'=0.1$; (b) $\sigma=0.2$, $\sigma'=0.3$; (c) $\sigma=0.2$, $\sigma'=0.4$
法运算;而合并方式只需要 4 次加法运算,合并方式的运算量明显减少。

6 结 论

提出了一种基于脉冲展宽波形的插值与脉冲展宽效应补偿的合并处理方法,该方法将插值与脉冲展宽效应补偿两个相互分离的数据恢复方式合并为一个步骤处理,可更有效地减小时隙抽样误差和解决脉冲展宽效应问题。仿真结果表明,合并数据恢复方式具有较好的稳健性,不论译码抖动参数匹配还是不匹配,其性能均优于插值和脉冲展宽效应补偿分离方式。合并处理方式减少了运算量,为脉冲展宽的异步采样 PPM 信号解调系统提供了一种可靠的数据恢复方案。

参 考 文 献

- [1] Ren Xin, Li Hongzuo, Wang Yan, *et al.* Effect for modulation rate of pulsed fiber laser on pulse position modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0706002.
任 鑫, 李洪祚, 王 岩, 等. 脉冲位置调制对脉冲式光纤激光器调制速率的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0706002.
- [2] Wang Yan, Li Hongzuo, Zhang Meng, *et al.* Research of pulse position modulation characteristics of fiber laser in space optical communications[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805001.
王 岩, 李洪祚, 张 猛, 等. 空间光通信光纤激光器脉冲位置调制特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805001.
- [3] Duan Guoteng, Li Lin, Cui Hailin, *et al.* Fiber-coupled asynchronous optical sampling THz-TDS system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(2): 171-176.
段国腾, 李 林, 崔海林, 等. 全光纤耦合异步光学采样 THz-TDS 系统[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(2): 171-176.
- [4] Gardner F M. A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receiver[J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(5): 423-429.
- [5] Gardner F M. Interpolation in digital modems-part I: Fundamentals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(3): 501-507.

- [6] Liu Lei, Xiao Jiangnan, Tang Jin, *et al.* Experimental research on timing recovery of a differential quadrature phase shift keying coherent optical transmission system based on an improved Gardner algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406002.
刘磊, 肖江南, 唐进, 等. 相干光差分正交相移键控系统中改进的 Gardner 定时恢复方法实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0406002.
- [7] Erup L, Gardner F M, Harris R A. Interpolation in digital modems-part II: Implementation and performance[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, 41(6): 998-1008.
- [8] Srinivasan M, Birnbaum K, Cheng M, *et al.* A post-processing receiver for the lunar laser communications demonstration project[C]. *SPIE*, 2013, 8610: 86100Q.
- [9] Quirk K J, Srinivasan M. Optical PPM demodulation from slot-sampled photon counting detectors[C]. *IEEE Military Communications Conference*, 2013: 1634-1638.
- [10] Xiang Jinsong, Wu Tao, Huang Sheng, *et al.* Code-aided optical PPM slot synchronization for the SCPPM coded system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806006.
向劲松, 吴涛, 黄胜, 等. 基于 SCPPM 码辅助的光 PPM 时隙同步技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806006.
- [11] Li Tiansong, Yuan Weichao, Yi Miao, *et al.* Time jitter effects on bit error probability in multi-pulse position modulation satellite optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 0102605.
李天松, 袁伟超, 易森, 等. 多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特误码率影响[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 0102605.
- [12] Moision B. Photon jitter mitigation for the optical channel[R]. *IPN Progress Report*, 2007, 42: 171.
- [13] Xiang Jinsong, Xiao Gang. The compensation of pulse broadening effect in PPM and LDPC optical communication system[J]. *Study on Optical Communications*, 2016, 4(8): 60-63.
向劲松, 肖刚. PPM 与 LDPC 光通信系统中脉冲展宽效应补偿办法[J]. *光通信研究*, 2016, 4(8): 60-63.
- [14] Moision B, Hamkins J. Coded modulation for the deep-space optical channel: Serially concatenated pulse-position modulation[R]. *The Interplanetary Network Progress Report*, 2005, 42: 161.
- [15] Luo Hanjun, Yuan Xiuhua. Accuracy of photon pulsed heterodyne detection system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208004.
罗韩君, 元秀华. 光子脉冲外差探测系统的测距精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208004.
- [16] Moision B, Farr W. Communication limits due to photon detector jitter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(9): 715-717.
- [17] Zeng Zhilong, Zhu Yong, Lu Lin, *et al.* Research of peak count rate scanning method for single photon detector used in high precision optical transfer time measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0508003.
曾智龙, 朱勇, 卢麟, 等. 单光子探测峰值扫描法高精度光纤传输时间测量研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508003.