

引用本文: 陈富军. SAC-OCDMA 系统三分支信号检测方案[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 66-70.

SAC-OCDMA 系统三分支信号检测方案

陈富军

(驻马店职业技术学院 河南省电动车辆智能制造工程技术研究中心, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了解决三分支信号检测(TBSD)方案的上界表达式不精确的问题, 提出了一种频谱-振幅编码光码分多址(SAC-OCDMA)系统 TBSD 方案, 建立了一个严谨的数学模型, 并对该方案进行了数值评估和仿真。仿真结果表明, 该方案在传输速率为 500 Mb/s、1 Gb/s 时能够完全消除多用户干扰(MUI), 而在传输速率为 5 Gb/s 时则可以消除大部分 MUI, 证明了数学模型的精确性。

关键词: 光码分多址系统; 多用户干扰; 信号检测; 三分支信号检测

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0066-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Three-branch signal detection scheme for the SAC-OCDMA system

CHEN Fujun

(Henan Province Electric Vehicle Intelligent Manufacturing Engineering Technology Research Center,
Zhumadian Vocational and Technical College, Zhumadian Henan 463000, China)

Abstract: To solve the problem of imprecise upper bound expression of three-branch signal detection (TBSD) scheme, a TBSD scheme of spectrum-amplitude coded optical code division multiple access(SAC-OCDMA) system is proposed, a rigorous mathematical model is established, and the scheme is numerically evaluated and simulated. The simulation results show that the scheme can completely eliminate multi-user interference (MUI) at the transmission rate of 500 Mb/s and 1 Gb/s, and most MUI can be eliminated at the transmission rate of 5 Gb/s, which proves the accuracy of the mathematical model.

Key words: optical code-division multiple-access system, multiple-user interference, signal detection, three-branch signal detection

0 引言

频谱-振幅编码光码分多址(SAC-OCDMA)系统除了具有全光处理、按需软容量和低复杂度的优良特性外, 另一个优势是通过采用非固定相位交叉相关(IPCC)编码的平衡检测方案消除多用户干扰(MUI)^[1-2]。取消固定 IPCC 规定可以降低编码的碰撞概率, 扩大活跃用户的编码范围。此外, 许多具有良好相关性的编码方案, 如光正交码^[3-4]和修正的质数码^[1,5], 可以直接应用于 SAC-OCDMA 系统中。但是, 如果平衡解码

器不采用这些具有非固定 IPCC 编码, 将严重降低 OCDMA 系统的性能。

2004 年, DJORDJEVIC I B 等人^[3]提出了一种新型的基于光纤布喇格光栅(FBG)的平衡检测方案。该方案可以同时采用固定与非固定 IPCC 编码, 并消除 SAC-OCDMA 系统中的 MUI, 即三分支信号检测(TBSD)^[6-7]。然而, 修改后的信号检测方案得出的上界表达式并不精确, 因此有必要建立一个严谨的数学模型来进行系统分析和设计。2011 年, NOSHAD M 等人^[8]通过组合法提出了传统平衡检测方案的误码率的下限和上限闭合表达式。2012 年, SHALABY H M H^[9]在此基础上得出了 SAC-OCDMA 系统中平衡检测的误码率性能更精确的闭合表达式。本文将这种闭合表达式进一步扩展, 提出了一种 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案, 并为该方案建立了一个严谨的数学模型, 对固定和非固定 IPCC 编码进行数值评估。

收稿日期: 2023-07-18。

基金项目: 国家重点研发计划项目(项目编号: SQ2020YFF0402940)资助。

作者简介: 陈富军(1982—), 男, 河南周口人, 博士, 副教授, 清华大学访问学者, 河南省照明学会常务理事, 主要研究方向是光通信、光网络、智慧照明等, 承担和参与完成了省部级、国家级项目 7 项, 授权发明专利 3 项。



1 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案

1.1 方案原理

SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的原理框图如图 1 所示。TBSD 方案的码族表示为 (L, ω, λ) , $\lambda \in [0, 1]$ 。其中, L 、 ω 和 λ 分别表示码长、码重和码字的最大交叉相关值。同时, 假设帧模式是同步的, 每个用户都被分配了一个具有相同权重的地址代码, 光源非偏振, 功率谱分量具有相同的带宽。

在发射端, 放大自发辐射(ASE)光源产生 C 波段的宽带光信号, 马赫-曾德尔调制器(MZM)使用脉冲模式发生器(PPG)产生的非归零(NRZ)伪随机序列(PRBS)对该光信号进行调制; 然后, 调制后的光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大, 再经光码(OC)编码器编码和功率合成器合成。当发送的光码数据位为“1”时, 发送一个具有指定光谱分布的光脉冲, 而当数据位为“0”时不发送任何信息。众所周知, 除了 MUI 之外, 来自 ASE 光源的相位诱导强度噪声(PIN)严重限制了 SAC-OCDMA 系统的性能, 并且 PIN 的影响不能通过简单地增加或减少传输功率来消除^[10-11]。由于 PIN 要求交叉相关特性不大于 $1^{[6,12]}$, 因此可以通过采用较小的 IPCC 码来降低 PIN 的影响。

在接收端, 叠加的信号被 OC 解码器分成两部分。在功率调节单元之后, 用于所需频谱模式的一部分被

一个 1:1 的分流器分成两部分。然后, 上面的一部分通过一个放大器放大, 进入光谱振幅检测装置光电二极管(PD₁), 而另一部分直接进入 PD₂。同时, 用户 $X(v)$ 光信号的互补模式 $\overline{X}(v)$ 通过衰减器进入 PD₃。3 个 PD 的输出电流分别表示为 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 和 $I_3(t)$ 。

从图 1 可以看出, 判决电信号 $I(t) = I_1(t) + I_2(t)$, 表明最后的输出电流仅取决于加法器的输入值, 与 MUI 无关, 即带有非固定 IPCC 码的 TBSD 方案可以完全消除 MUI 影响。

1.2 方案的数学模型

根据文献[8]可知, 由 PD 引起的入射场 $E(t)$ 可表示为

$$E(t) = \sqrt{\frac{P_r}{2L}} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^L d_m g(t) C_m(i) C_1(i) e^{j\varphi_i^m(t)} \quad (1)$$

其中, L 为编码序列长度, P_r 为用户平均接收功率; $C_m(i)$ 和 $C_1(i)$ 分别表示 2 个编码序列 C_m 和 C_1 的第 i 个元素, d_m 为第 m 个用户的数据位, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$;

$g(t)$ 为单用户光场的归一化包络, 满足 $\frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} g^2(t) dt = 1$; $\varphi_i^m(t)$ 是 m 个用户的第 i 个切片, 可采用维纳随机过程估算^[7,13]求出。

$I_1(t)$ 的平均值和方差^[8]分别表示为

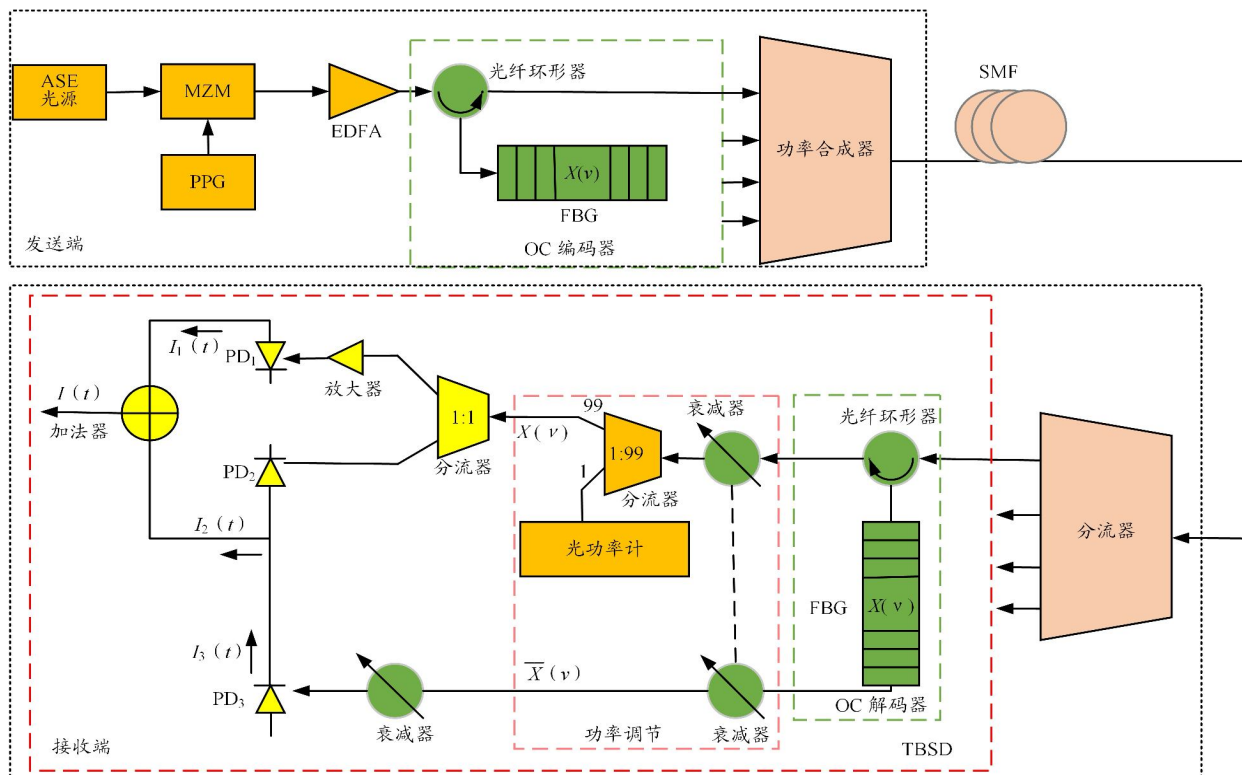


图 1 SAC-OCDMA 系统中 TBSD 方案的原理图

$$\begin{cases} \mu_{I_1} = E\{I_1(t)\} = \frac{\eta P_r}{L} (\bar{\lambda} \kappa) \\ \delta_{I_1}^2 = \text{var}\{I_1(t)\} = B_e \tau_c \left(\frac{\eta P_r}{L} \right)^2 \left(\bar{\lambda} - \frac{\bar{\lambda} w}{L} \right) \frac{\kappa(\kappa-1)}{2} \end{cases} \quad (2)$$

其中, η 为光电二极管的光电转换效率, w 为码重, $\bar{\lambda}$ 为非固定 IPCC 规定的编码的碰撞概率 ($0 < \lambda \leq 1$), B_e 为噪声等效电带宽, τ_c 为相干时间, κ 为干扰随机变量 ($\kappa = \sum_{m=2}^M d_m$)。由于发送比特“1”和“0”的概率相同, 都为 $1/2$, 且 κ 遵循二项分布, κ 的概率密度函数由 $\Psi_\kappa(\zeta) = \binom{M-1}{\zeta} \left(\frac{1}{2} \right)^{M-1}$ 表示, PD 响应 $\zeta \in \{0, \dots, M-1\}$ 。同样, $I_2(t)$ 和 $I_3(t)$ 的平均值和方差分别如式(3)、式(4)所示。

$$\begin{cases} \mu_{I_2} = E\{I_2(t)\} = \frac{\eta P_r}{2L} (wd_1 + \bar{\lambda} \kappa) \\ \delta_{I_2}^2 = B_e \tau_c \left(\frac{\eta P_r}{L} \right)^2 \left[\bar{\lambda} d_1 \kappa + \frac{\bar{\lambda} w}{L} \times \frac{\kappa(\kappa-1)}{2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mu_{I_3} = E\{I_3(t)\} = \frac{\eta P_r}{L} (wd_1 + \bar{\lambda} \kappa) \\ \delta_{I_3}^2 = 4B_e \tau_c \left(\frac{\eta P_r}{L} \right)^2 \left[\bar{\lambda} d_1 \kappa + \frac{\bar{\lambda} w}{N} \times \frac{\kappa(\kappa-1)}{2} \right] \end{cases} \quad (4)$$

由于三分支信号的 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 和 $I_3(t)$ 是独立的, 因此判决电流的平均值为

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{I_1} - \mu_{I_2} + \mu_{I_3} = \frac{\eta P_r}{L} (\bar{\lambda} \kappa) - \frac{\eta P_r}{2L} (wd_1 + \bar{\lambda} \kappa) + \\ &\quad \frac{\eta P_r}{L} (wd_1 + \bar{\lambda} \kappa) = \frac{\eta P_r}{2L} (wd_1 + 3\bar{\lambda} \kappa) \end{aligned} \quad (5)$$

考虑到散粒噪声和热噪声的影响, 判决电流的方差为

$$\delta_{b,\zeta}^2 = \delta_{\text{PIIN}|b,\zeta}^2 + \delta_{\text{SN}|b,\zeta}^2 + \delta_{\text{Th}}^2 \quad (6)$$

其中, b 是所需用户发送的数据位, $b \in \{0, 1\}$; $\delta_{\text{PIIN}|b,\zeta}^2$ 、 $\delta_{\text{SN}|b,\zeta}^2$ 和 δ_{Th}^2 分别为 PIIN、散粒噪声和热噪声的方差, 则

$$\begin{cases} \delta_{\text{SN}|b,\zeta}^2 = 2eB_e (\mu_{I_1} + \mu_{I_2} + \mu_{I_3}) = eB_e \eta P_r (5\bar{\lambda}\zeta + 3wd_1) / L \\ \delta_{\text{PIIN}|b,\zeta}^2 = \delta_{I_1}^2 + \delta_{I_2}^2 + \delta_{I_3}^2 = \\ 5B_e \tau_c \left(\frac{\eta P_r}{L} \right)^2 \left[\bar{\lambda} d_1 \zeta + \frac{\bar{\lambda} w}{L} \times \frac{\zeta(\zeta-1)}{2} \right] + \\ B_e \tau_c \left(\frac{\eta P_r}{L} \right)^2 \bar{\lambda} - \frac{\bar{\lambda} w}{L} \times \frac{\zeta(\zeta-1)}{2} \\ \delta_{\text{Th}}^2 = 4K_b TB_e |R| \end{cases} \quad (7)$$

其中, K_b 、 T 和 R 分别为玻尔兹曼常数、接收绝对温度和接收负载电阻。

SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的误码率表达式为

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{\zeta=0}^{M-1} [P_{\text{el}\kappa, d_1}(\zeta, 0) + P_{\text{el}\kappa, d_1}(\zeta, 1)] \Psi_\kappa(\zeta) \quad (8)$$

其中, $P_{\text{el}\kappa, d_1}(\zeta, 0)$ 、 $P_{\text{el}\kappa, d_1}(\zeta, 1)$ 分别是传送数据为“0”和“1”的 ζ 个干扰用户条件下的误码率, 评估为

$$\begin{cases} P_{\text{el}\kappa, d_1}(\zeta, 1) = \frac{1}{\delta_{1,\zeta} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\theta} e^{-\frac{(y-\mu_1)^2}{2\delta_{1,\zeta}^2}} dy = \frac{1}{2} \text{erfc} \frac{\mu_1 - \theta}{\delta_{1,\zeta} \sqrt{2}} \\ P_{\text{el}\kappa, d_1}(\zeta, 0) = \frac{1}{\delta_{0,\zeta} \sqrt{2\pi}} \int_{\theta}^{\infty} e^{-\frac{(y-\mu_0)^2}{2\delta_{0,\zeta}^2}} dy = \frac{1}{2} \text{erfc} \frac{\theta - \mu_0}{\delta_{0,\zeta} \sqrt{2}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, θ 为决策阈值, 且 $\theta = (\mu_0 + \mu_1)/2$; $\delta_{0,\zeta}$ 、 $\delta_{1,\zeta}$ 分别是传送数据为“0”和“1”的 ζ 个干扰用户条件下的 PIIN 和散粒噪声的方差。

将式(9)代入式(8), 并联立式(6)~式(8), 可求解 P_e 的最终表达式为

$$P_e = \frac{1}{2^M} \sum_{\zeta=0}^{M-1} \binom{M-1}{\zeta} \left[\text{erfc} \frac{\mu - \theta}{\sqrt{8} \delta_{1,\zeta}} + \text{erfc} \frac{\theta - \mu_0}{\sqrt{8} \delta_{0,\zeta}} \right] \quad (10)$$

由于 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案要求编码包含相同的权重, 本文选择双重二次全能码(DWQCC)^[14] 的编码权重为 $[(p+1)/2, (p+1)/2]$ 的编码集作为地址编码, 其中 p 是一个素数。误码率评估时使用的参数如下: 数据比特率 $R_b = 300$ Mb/s, 光源的线宽 $\Delta\nu = 3.5$ THz, 相干时间 $\tau_c = L/\Delta\nu = 37.714$ ps, 接收机噪声温度 $T = 300$ K, 接收机负载电阻 $R = 1$ k Ω , PD 响应 $\xi = 1$, 平均接收功率 $P_r = -10$ dBm。根据式(10)可以得出 SAC-OCDMA 系统中 TBSD 方案的非固定 IPCC 的 DWQCC ($p=11, L=121, w=6$) 与固定 IPCC 的修正二次全能码(MQC)^[12] ($p=11, L=132, w=12$) 的误码率性能与有效用户数的关系, 如图 2 所示。可以看出, DWQCC 和 MQC 的误码率推导值曲线位于上界、下界曲线之间。因此, 本文建立的数学模型是可靠的, 可以为 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案提供更精确的分析和评估。此外, 比较图 2(a)和图 2(b)可以看出, 在大致相似条件下, 在 SAC-OCDMA 系统中, TBSD 方案采用 DWQCC 时的误码率性能比 MQC 更好。这是因为非固定 IPCC 的 DWQCC 比固定 IPCC 的 MQC 具有更低的碰撞概率, 所以 DWQCC 可以显著降低 PIIN。

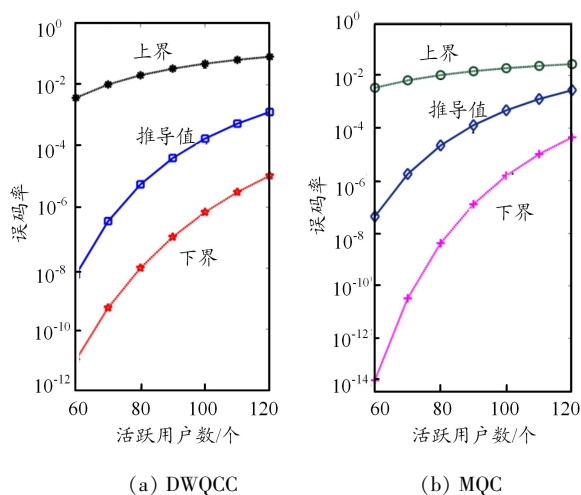


图2 误码率性能与活跃用户数的关系

2 仿真分析

本文根据图1所示的原理图,采用 Optiwave Opti-System7.0 仿真器对 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的性能进行了仿真。在发射端,仿真采用的地址码是本文作者在文献[14]中提出的,其码重为 $(p+1)/2$ 。当 $p=5$ 时,编码长度和码重分别为25,3。脉冲发生器产生的 PRBS 和调制信号分别如图3(a)和图3(b)所示。频谱切片的间隔为0.4 nm(50 GHz),参考波长 $\lambda_0=1\,540.19\text{ nm}$ 。对于编码为 $C_1=(00001\,00000\,00000\,00000\,10010)$ 的四用户中第一个期望用户,波长分别为1 541.79、1 548.19、1 549.39 nm。编码信号的光谱如图3(c)所示。为了避免相邻的反射信号之间的串扰,本文抑制了 FBG 编码器的反射光谱的旁瓣,经过滤波后,FBG 的反射宽度约为0.3 nm。

在接收端,当背靠背传输数据时,解码信号如图4所示。解码后的信号由功率调节单元进行调整,以测量误码率,其99%的接收光功率被分配给PD,另外1%的接收功率分配给光功率计。SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的解码和检测性能测量结果如图5所示。可以看出,在4种不同传输速率下,接收端信号的“眼睛”是张

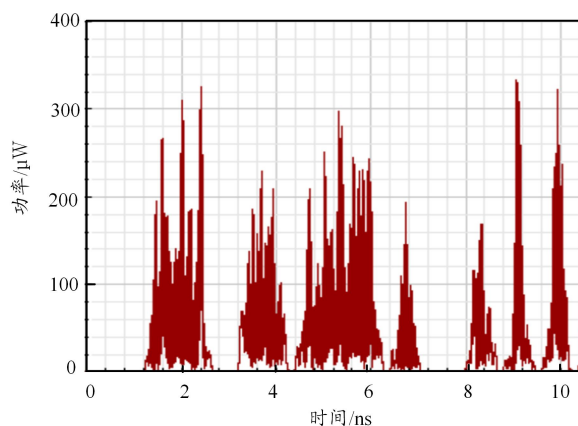


图4 解码信号

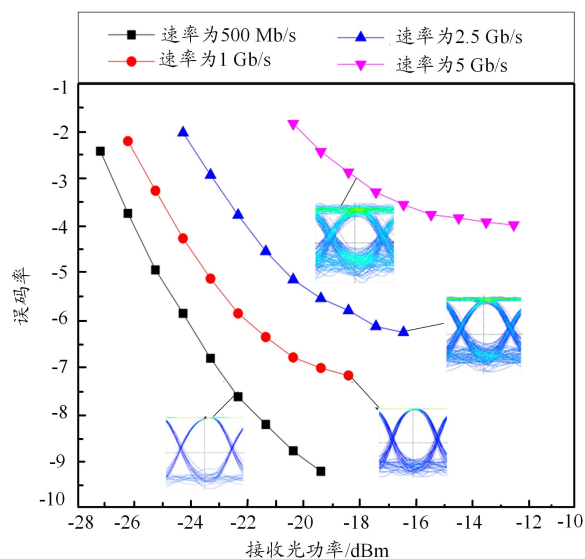


图5 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的解码和检测性能测量结果

开的,这表明大部分的MUI被消除了。其中,当传输速率为5 Gb/s时,由于 ASE 光源和拍频噪声的影响而产生的少量串扰码严重降低了SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的性能^[1-2],系统只消除大部分 MUI;当传输速率为500 Mb/s 和1 Gb/s 时,“眼睛”明显张开,这表明 MUI 被该方案完全消除了。

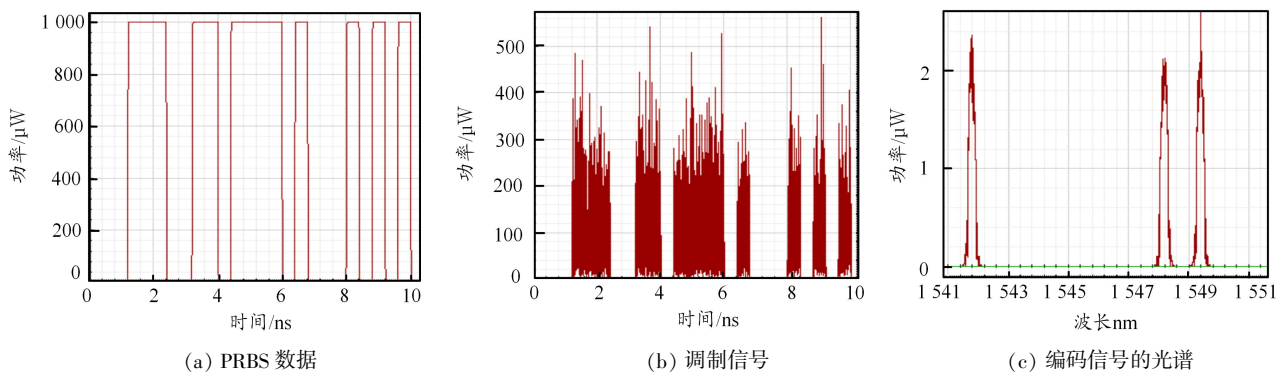


图3 仿真信号图

3 结束语

本文从理论上建立了 SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案的数学模型,然后数值评估了固定和非固定 IPCC 的编码在 SAC-OCDMA 系统中的性能。评估结果表明:在相同条件下,非固定 IPCC 的编码比固定 IPCC 的编码在该方案中具有更好的误码率性能。这是因为前者的码字间的碰撞概率比后者低,所以 PIIN 的效果明显降低。因此,SAC-OCDMA 系统 TBSD 方案放宽了对固定 IPCC 编码的要求,这有利于 SAC-OCDMA 的实际应用推广。仿真结果表明,该方案在传输速率为 500 Mb/s、1 Gb/s 时能够完全消除多用户干扰(MUI),而在传输速率为 5 Gb/s 时则可以消除大部分 MUI。因此,TBSD 方案可用于光码识别和检测。

参考文献:

- [1] WEI Z, GHAFOURI-SHIRAZ H. Proposal of a novel code for spectral amplitude-coding optical CDMA systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 14(3): 414–416.
- [2] SMITH E D J, BLAIKIE R J, TAYOR D P. Performance enhancement of spectral-amplitude-coding optical CDMA using pulse-position modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(9): 1176–1185.
- [3] DJORDJEVIC I B, VASIC B. Combinatorial constructions of optical orthogonal codes for OCDMA systems[J]. IEEE Communication Letters, 2004, 8(6): 391–393.
- [4] ALJUNID S A, ISMAIL M, RAMLI A R, et al. A new family of optical code sequences for spectral-amplitude-coding optical CDMA systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(10): 2383–2385.
- [5] CHEN F J, LUO F G, FENG G, et al. Design of double-weight code for synchronous OCDMA systems with power control[J]. China Optics Letters, 2014, 12(11): 110608-1–110608-5.
- [6] SAHRAOUI W. Design and development of fibonacci code for SAC-OCDMA system [C]//IEEE. Proceedings of IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology(ELNANO), Ukraine: IEEE, 2022: 462–466.
- [7] SEBASTI O M. Analysis of eavesdropping on optical 2-D OCDMA networks [C]//IEEE. Proceedings of 2023 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). Portugal: IEEE, 2023: 1–6.
- [8] NOSHAD M, JAMSHIDI K. Bounds for the BER of codes with fixed cross correlation in SAC-OCDMA systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(13): 1944–1950.
- [9] SHALABY H M H. Closed-form expression for the bit error rate of spectral-amplitude-coding optical CDMA systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(15): 1285–1287.
- [10] FARGHAL A E A, SHALABY H M H. Reducing inter-core crosstalk impact via code-interleaving and bipolar 2-PpM for core-multiplexed SAC OCDMA PON [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(1): 35–45.
- [11] FARGHAL A E A. Performance analysis of core-multiplexed spectral amplitude coded OCDMA PON[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(9): 666–675.
- [12] EL-SAHN Z A, SHASTRI B J, ZENG M, et al. Experimental demonstration of a SAC-OCDMA PON with burst-mode reception: local versus centralized sources [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(10): 1192–1203.
- [13] ZHOU H, QIU K, WANG L Y. Design, demonstration and analysis of a modified wavelength-correlating receiver for incoherent OCDMA system [J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6048–6063.
- [14] NOSHAD M, JAMSHIDI K. Code family for modified spectral-amplitude-coding OCDMA systems and performance analysis[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(6): 344–354.