

CO-OFDM 光纤通信系统接收算法中时序同步的研究

田中梦文¹ 黄艺驰² 鲁悦² 裴梦晨² 江岩²

¹北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 北京 100876

²北京邮电大学国际学院 北京 北京 102209

摘要 本文对相干光正交频分复用(CO-OFDM)光纤通信系统中的时序同步算法做了改进,并提出了一种新的定时度量函数模型,使得在时域同步过程中定时度量函数保持较好的形状,受噪声的影响更小。通过在80Gbit/s的CO-OFDM系统上对改进算法进行仿真验证,改进的定时度量函数应用在Schmidl算法和Minn算法上,在使用同样训练符号的情况下,仅少量增加复杂度,并有效减小了噪声对时序同步的影响,提高了接收机的灵敏度。

关键词 光通信;相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统;改进的定时度量函数;时序同步;

中图分类号 0436

文献标识码 A

Research on timing synchronization algorithm of coherent optical OFDM systems

Tian Zhongmengwen¹ Huang Yichi² Lu yue²

(¹ School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, Beijing 100876, China)

(² International School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, Beijing 102209, China)

Abstract The coherent optical orthogonal frequency division multiplexing(CO-OFDM) timing synchronization algorithm in optical fiber communication system is improved in this paper, and a modified method is put forward for timing synchronization in the CO-OFDM system. This method makes the timing metric function keep good shape in timing synchronization process and improves its noise resisting ability. Through the simulation of modified method in 80Gbit/s CO-OFDM system, modified timing metric function is applied to Schmidl algorithm and Minn algorithm. Under the

收稿日期: 年-月-日; **收到修改稿日期:** 年-月-日

基金项目: 北京邮电大学大学生研究创新基金资助课题。

作者简介: 田中梦文(1993-), 男, 本科, 主要从事信号处理, 光通信等方面的研究。E-mail: 1013248187@qq.com

导师简介: 张晓光(1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事高速光纤通信偏振控制补偿、新型多级相位调制码系统、光信号损伤恢复等方面的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

***通信联系:** E-mail: 1013248187@qq.com

circumstance of using the same training symbols, with only a small increase in complexity at the same time, modified method effectively reduces the influence of noise on the timing synchronization, which improve the sensitivity of the receiver.

Keywords optical communications; coherent optical orthogonal frequency-division-multiplexing(CO-OFDM) system; modified timing metric function; timing synchronization

OCIS Codes 060.4510;060.4230;060.2330

1 导论

随着宽带视频、多媒体业务等新兴数据业务的发展,人们对带宽需求的快速增长推动着光传输网的不断发展,大容量、高速率的光通信系统已经成为下一代通信网络的重要支撑之一。近年,正交频分复用(OFDM)因具有高效的电域与光域的频谱效率、色散的不敏感性以及高效率的计算,广泛应用于光纤传输领域^[1,2]。许多研究表明,相干光正交频分复用(CO-OFDM)是实现超 100Gbit/s 光传输的一种十分有竞争力的解决方案^[3]。

在 CO-OFDM 系统中,同步是接收端非常关键的步骤之一。OFDM 的同步主要包括时序同步、频率同步和子载波恢复。由于 CO-OFDM 系统对子载波间的正交性有着严格的要求,而较大的同步误差会破坏子载波间的正交性,造成载波间的干扰(ICI, inter-carrier interference),从而大大影响系统的性能,这就对接收端的同步技术提出了很高的要求。

大多数的时序同步算法,其实现是基于计算训练符号的相关性,这些训练符号具有对称结构或者周期性^[4]。其中,较为经典的时序同步方法是 Schmidl^[5]、Minn^[6]、Park^[7]等人提出的算法,之后不断有人对这些算法进行优化,优化的思路主要集中在更加精巧地设计训练符号上。例如文献^[8]中提出了基于PARK算法的改进算法,引入伪随机噪声(PN)序列作为训练符号序列的加权因子,消除了定时度量函数的旁瓣。文献^[9]中提出了基于Schmidl算法的改进算法,在训练符号上引入伪随机序列加权因子,克服了定时度量函数尖峰平坦和两边下降缓慢的两大缺点,使定时估计的性能得以大幅提高。这些改进可以提高度量函数对色散的容忍度,减少旁瓣等等。但不可否认的

是，叠加在训练符号上的噪声也会对度量函数产生影响，通常会改变其形状并减小它的峰值。本文从另一种思路出发，即不改变原算法的训练符号，而是改进原有的定时度量函数。在少量增加运算复杂度的情况下，有效减小了噪声对于定时度量函数的影响。

2 理论模型

2.1 对 Schmidl 时序同步算法的改进

Schmidl 时序同步算法训练符号结构为：S=[A A]，如下图所示。

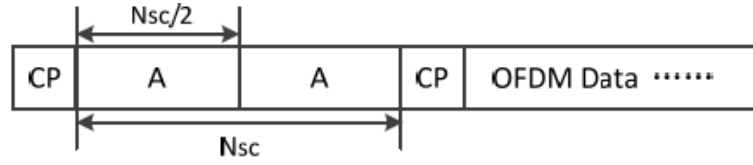


图1 Schmidl 算法的训练符号结构

Fig. 1 The training symbol of Schmidl algorithm

根据训练符号的相关性，Schmidl 算法中所采用的FFT 窗口同步定时度量函数为：

$$M_{sc}(d) = \frac{|P_{sc}(d)|^2}{(R_{sc}(d))^2} \quad (1)$$

其中

$$P_{sc}(d) = \sum_{k=0}^{N_{sc}/2-1} \underbrace{r^*(k+d)}_{\text{包含} N_{sc}/2 \text{ 个点}} \cdot \underbrace{r(k+d+N_{sc}/2)}_{\text{包含另} N_{sc}/2 \text{ 个点}} \quad (2)$$

$$R_{sc}(d) = \sum_{k=0}^{N_{sc}/2-1} \underbrace{|r(k+d+N_{sc}/2)|^2}_{\text{包含} N_{sc}/2 \text{ 个点}} \quad (3)$$

$r(k)$ 为接收信号的采样值， d 为 FFT 窗第一个样值的位置。 $M_{sc}(d)$ 实质上是归一化的互相关函数，定时度量的最佳值应该在正确的OFDM 符号起始点处达到峰值，即： $\hat{d} = \arg\{\max[M_{sc}(d)]\}$

可以看到，对于每一个 d 值， $P_{sc}(d)$ 包含了一个符号周期的序列，而 $R_{sc}(d)$ 只包含半个符号周期的序列。由于各个采样点上叠加的高斯白噪声互不相关，因此包含更长的序列可以减少噪声对于定时度量函数的影响。因此我们将定时度量函数进行如下修改：

$$M_{sc}(d) = \frac{|P_{sc}(d)|^2}{(R_{sc}(d))^2} \quad (4)$$

其中

$$P_{sc}(d) = \sum_{k=0}^{N_{sc}/2-1} \underbrace{r^*(k+d)}_{\text{包含 } N_{sc}/2 \text{ 个点}} \cdot \underbrace{r(k+d+N_{sc}/2)}_{\text{包含另 } N_{sc}/2 \text{ 个点}} \quad (5)$$

$$R_{sc}(d) = \sum_{k=0}^{N_{sc}/2-1} \underbrace{|r(k+d)|}_{\text{包含 } N_{sc}/2 \text{ 个点}} \cdot \underbrace{|r(k+d+N_{sc}/2)|}_{\text{包含 } N_{sc}/2 \text{ 个点}} \quad (6)$$

可以看到，对于每一个 d 值，修改的定时度量函数中 $P_{sc}(d)$ 与 $R_{sc}(d)$ 都包含一整个符号周期，因此能够减少噪声对于度量函数的影响，并且运算的复杂度没有提高。

下图是matlab软件仿真出的三种时间度量函数曲线，从上到下依次为理想传输条件下的定时度量函数，信噪比为25dB时改进Schmidl算法的定时度量函数，信噪比为25dB时Schmidl算法的定时度量函数。可以看出改进的定时度量函数对于噪声的抵抗性有了提高。

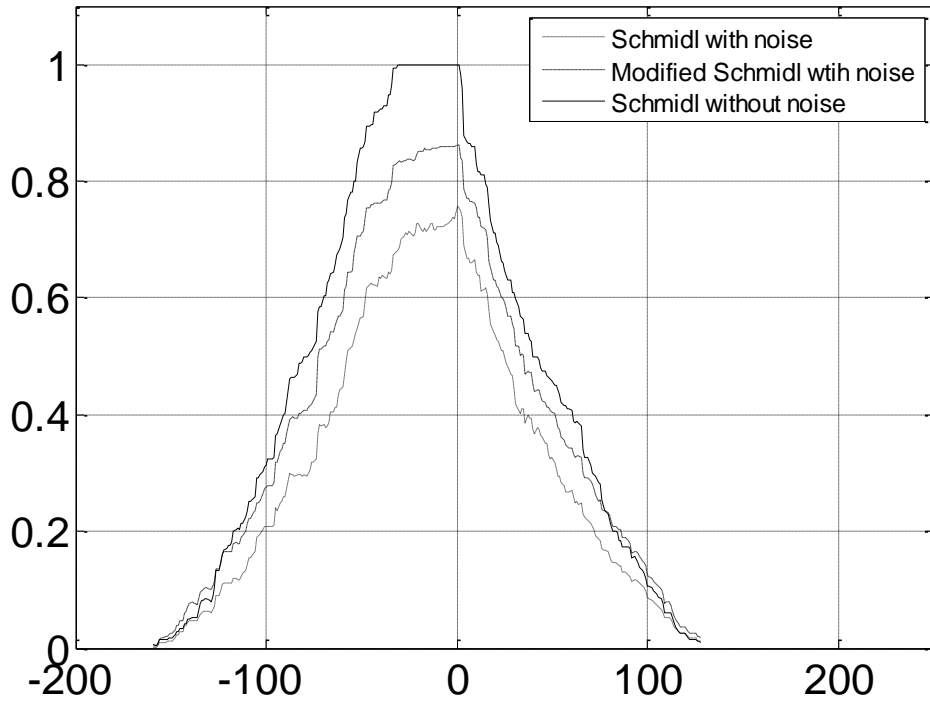


图2 无噪声以及有噪声时两种不同Schmidl算法的定时度量图

Fig. 2 Timing metric of Schmidl algorithm without noise/with noise

2.1 对 Minn 时序同步算法的改进

为了减轻Schmidl 算法中由于定时度量平台引起的定时模糊问题，Minn 提出了改进的时序同步算法^[2]，训练符号的结构为：S=[A A -A -A]，如下图所示。

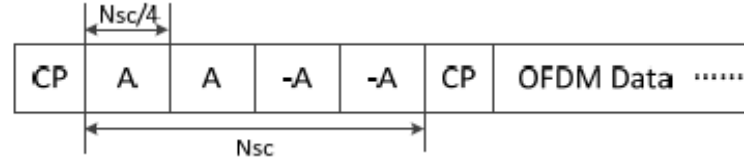


图3 Minn算法的训练符号结构

Fig. 3 The training symbol of Minn algorithm

其中A 代表长度为 $N_{sc}/4$ 的PN 序列， N_{sc} 为子载波的个数，-A 代表A 的负值。

定时度量函数为：

$$M_{mi}(d) = \frac{|P_{mi}(d)|^2}{(R_{mi}(d))^2} \quad (7)$$

其中

$$P_{mi}(d) = \sum_{k=0}^1 \sum_{m=0}^{N_{sc}/4-1} r^* \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m \right) \cdot r \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m + \frac{N_{sc}}{4} \right) \quad (8)$$

$$R_{mi}(d) = \sum_{k=0}^1 \sum_{m=0}^{N_{sc}/4-1} \left| r \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m + \frac{N_{sc}}{4} \right) \right|^2 \quad (9)$$

按照前面的思路同样可以对定时度量函数进行修改：

$$M_{mi}(d) = \frac{|P_{mi}(d)|^2}{(R_{mi}(d))^2} \quad (10)$$

其中

$$P_{mi}(d) = \sum_{k=0}^1 \sum_{m=0}^{N_{sc}/4-1} r^* \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m \right) \cdot r \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m + \frac{N_{sc}}{4} \right) \quad (11)$$

$$R_{mi}(d) = \sum_{k=0}^1 \sum_{m=0}^{N_{sc}/4-1} \left| r \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m \right) \right| \cdot \left| r \left(d + \frac{N_{sc}}{2} \cdot k + m + \frac{N_{sc}}{4} \right) \right| \quad (12)$$

下图是matlab软件仿真出的三种时间度量函数曲线，从上到下依次为理想传输条件下的定时度量函数，信噪比为25dB时改进Minn算法的定时度量函数，信噪比为25dB时Minn算法的定时度量函数。可以看出改进的定时度量函数对于噪声的抵抗性有了提高。

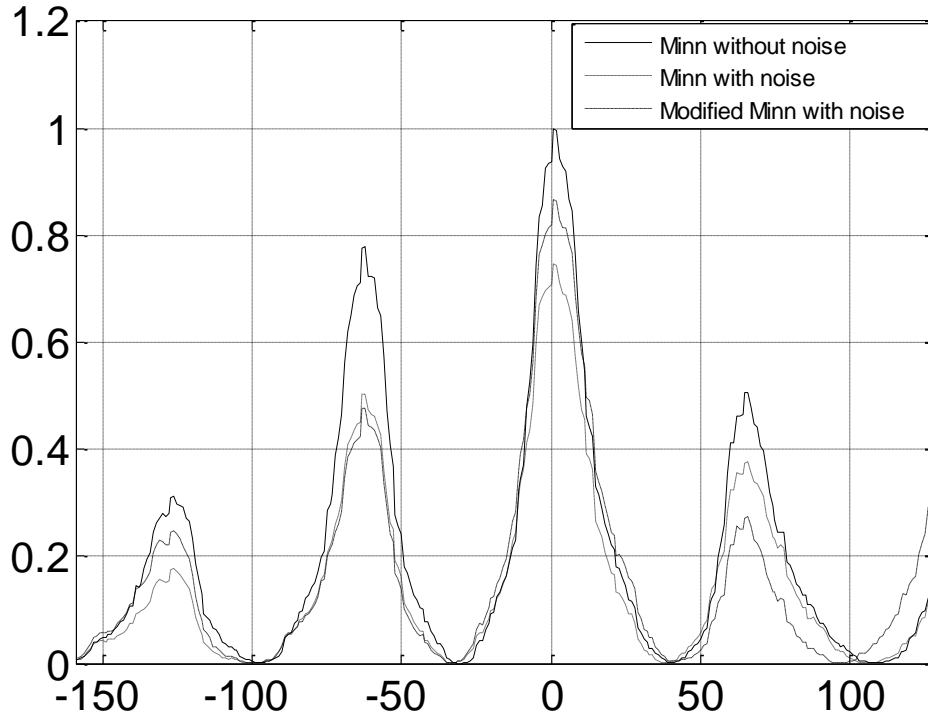


图4 无噪声以及有噪声时两种不同Minn算法的定时度量图

Fig. 4 Timing metric of Minn algorithm without noise/with noise

3 仿真结果分析

下面将上述改进的定时同步算法应用到CO-OFDM光纤通信系统，进行仿真验证。图5 展示了一个完整的CO-OFDM系统框图，仿真所采用的主要系统参数为：a)数据的传输速率为80Gbit/s；b) 子载波个数为256，循环前缀为64 个采样 ($G_{cp} = 1/8$)；c)子载波上信号的调制格式为QPSK；d)假设光纤传输中由光放大器引起的噪声为高斯白噪声；e)光纤的色散系数为17 ps/nm/km； f)信号在2000km 标准单模光纤上传输。

图6 为原Schmidl算法和改进Schmidl算法的定时偏移估计均方差值 (MSE) 与OSNR的关系曲线。定时偏移估计均方差值越小，说明定时效果越好。可以看出，在色散 $D=17 \text{ ps/nm/km} \times 2000\text{km}=34000\text{ps/nm}$ 时，改进的Schmidl算法在15dB至35dB信噪比的时候定时性能均比Schmidl算法好。

图7 为原Minn算法和改进Minn算法的定时偏移估计均方差值 (MSE) 与OSNR 的关系曲线。可以看出，在色散 $D=17 \text{ ps/nm/km} \times 2000\text{km}=34000\text{ps/nm}$ 时改进的Minn算法在20dB至40dB信噪比的时候定时性能均比Minn算法好。

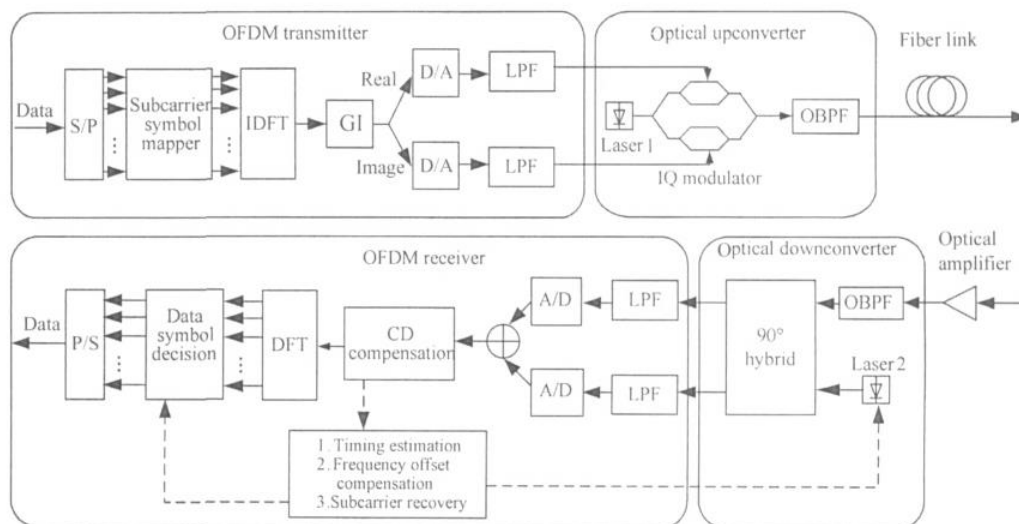


图5 CO-OFDM系统框图

Fig. 5 Schematic diagram of the CO-OFDM system

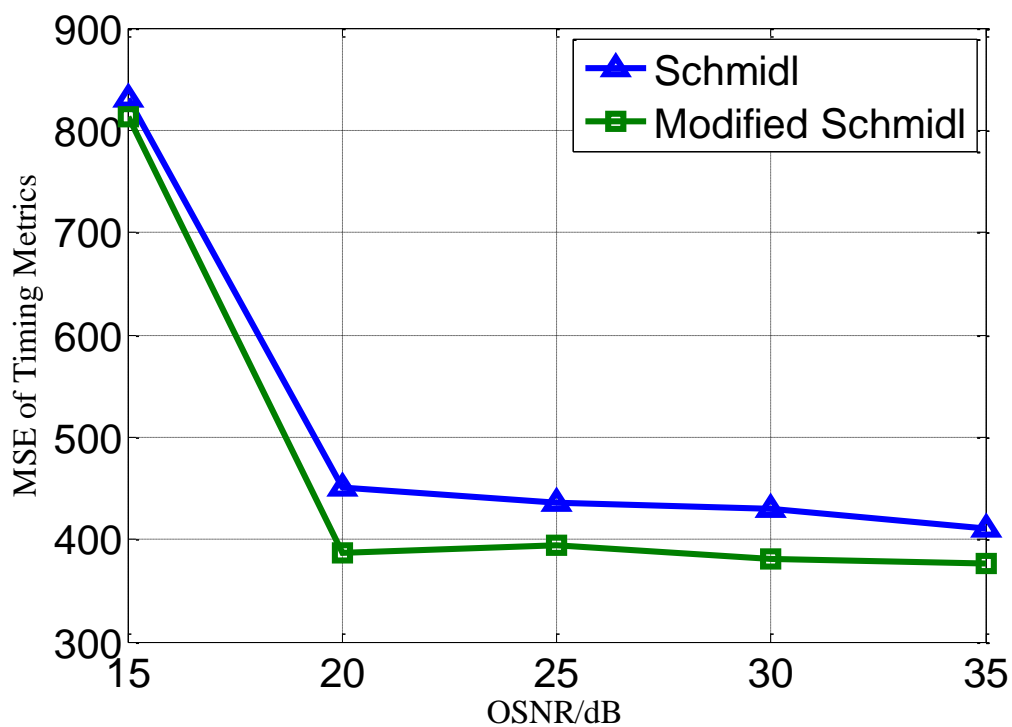


图6 两种算法的MSE-OSNR 曲线

Fig. 6 MSE-OSNR curve of two algorithm

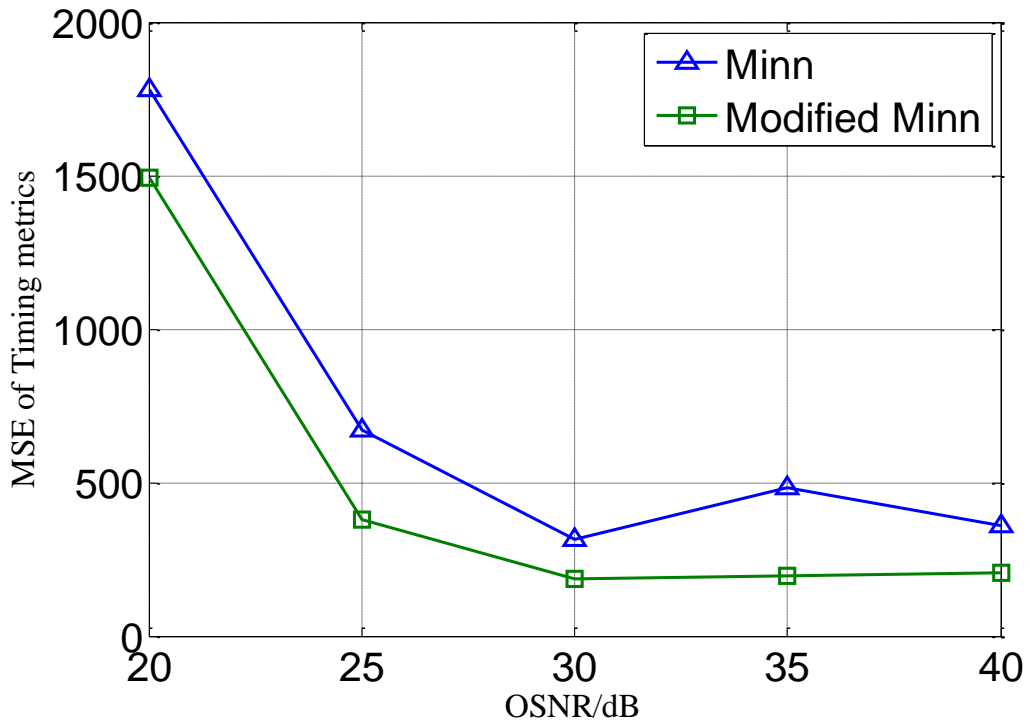


图7 两种算法的MSE-OSNR 曲线

Fig. 7 MSE-OSNR curve of two algorithm

表1中对于几种时序同步算法性能进行了总结及比较:

Timing synchronization algorithm	Shape of time Metric function	Tolerance of dispersion and noise	Performance discription
Schmidl algorithm	Platform	High	Platform leads to large error.
Minn algorithm	Triangular peak shape (with sidelobe)	High	The peak slightly offset causes smaller uncertainties, sidelobe leads to greater uncertainty.
Park algorithm	Pulse shape (with sidelobe)	Low	Sidelobe leads to greater uncertainty.
Modified Schmidl algorithm	Platform	High	Reduce the error that caused by the platform.
Modified Minn algorithm	Triangular peak shape (with sidelobe)	High	Reduce the peak slightly offset and the probability that the sidelobe effects on mainlobe.

表1 同步算法性能比较

Table 1 Comparison of synchronization algorithm

4 结论

本文提出了一种改进的定时度量函数。仿真结果显示,在有色散和高斯白噪声的情况下,将这种改进的定时度量函数应用于 Schmidl 算法和 Minn 算法后,它们抵抗噪声和色散的能力有了明显提高。而且这种改进的定时度量函数复杂度也没有明显增加。

5 参考文献

- [1]Armstrong J. OFDM for optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3):189-204
- [2]Shieh W. Maximum-likelihood phase and channel estimation for coherent optical OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(8):605-607
- [3]Shieh W, Yang Q, Ma Y, 107 Gb/s coherent optical OFDM transmission over 1000-km SSMF fiber using orthogonal band multiplexing[J], Opt Express, 16, 2008, 6378~6386
- [4]Huang Yusha, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia et all.. A modified synchronization scheme for coherent optical OFDM systems[J], Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 12(3):514-522
- 黄雨沙, 张晓光, 席丽霞等. CO-CODM 系统中一种改进的同步算法方案[J]. 光电子 • 激光, 2013, 12(3): 514-522
- [5] Schmidl TM, Cox DC, Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J], IEEE Trans Commun, 45, 1997, 1613~1621
- [6] Minn H, Bhargava VK, Letaief KB, A robust timing and frequency synchronization for OFDM systems[J], IEEE Trans Wireless Commun, 2, 2003, 822~839
- [7] Park B, Cheon H, Kang C, A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems[J], IEEE Communications Letters, 7(5), 2003, 239~241
- [8]Huang Yusha, Research on Synchronization Techniques of Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing System. [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- 黄雨莎. CO-OFDM 系统同步技术的研究[D]. 北京邮电大学, 2013.
- [9]Ren Guangliang, Chang Yilin, Zhang Hui et all.. Synchronization method based on a new constant envelop preamble for OFDM systems [J]. IEEE Transactions, March 2005, Volume 51, Issue 1: 139~143.

6 创新点说明

之前有一些人研究了相干光正交频分复用系统中的时序同步算法改进方案,大部分都是更加精巧地设计训练符号,例如引入伪随机噪声(PN)序列作为训练符号序列的加权因子等等。这些都是以增加计算复杂度为代价提高同步性能。本文提出的改进方案能够在仅少量增加复杂度的前提下,减少噪声和色散对于同步的影响,提高了接收机的灵敏度。