

相干光通信消相位模糊载波同步算法

李华贵^{1,2*}, 李少波^{1,2}, 刘旭超^{1,2}, 马树泉^{1,2}¹中国电子科技集团公司第五十四研究所光通信研发中心, 河北 石家庄 050081;²河北省光子信息技术与应用重点实验室, 河北 石家庄 050081

摘要 针对基于相位增量的 M 次方载波同步算法存在的相位模糊问题,分析了相位模糊与系统调制参数之间的关系,并通过帧同步过程进行改进,实现了载波同步相位模糊的消除。分别基于OptiSystem和集成相干光通信收发机搭建了空间相干光通信仿真系统和实验系统,并利用所提的消相位模糊载波同步算法对接收信号进行了处理。仿真和实验结果表明,所提出的消相位模糊载波同步算法频偏补偿和相差补偿范围不受系统调制速率、调制阶数的约束,具有更好的应用前景。

关键词 光通信; 相干光通信; 相干探测; 载波同步; 消相位模糊; 帧同步

中图分类号 TN929.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231649

1 引言

相干光通信系统采用二进制相移键控(BPSK)、正交相移键控(QPSK)等相移键控(PSK)调制格式及相干混频探测体制,其通信速率和接收灵敏度远远优于非相干光通信系统,并成功应用于光纤通信、星间通信和星地通信等领域中^[1-3]。高阶调制与复用技术相结合可以提高通信系统的频谱效率,是高速相干光通信系统重点考虑的调制方案^[4-6]。空间相干光通信系统的本振光和信号光一般不同源,且线宽一般在百kHz量级,因此会导致混频信号存在频偏和相差。同时,载荷终端的相对运动会引入高达几个GHz的多普勒频移^[7-8],大气信道也会引入额外的相位噪声^[9]。光纤相干光通信一般采用参考光法、光锁相环法和开环数字信号处理(DSP)法等进行载波同步^[10-11],但参考光法在空间链路中实现困难,光锁相环法频率调节速率小导致锁定效果差,且这两种方案会导致系统复杂度增大,因此在空间相干光通信中研究人员更倾向于采用开环DSP载波同步方案^[7,12]。目前常用的DSP载波同步算法有 M 次方算法^[13]、基于训练序列的频偏估计算法^[14]、盲相位搜索算法^[15]和基于快速傅里叶变换的频率估计算法^[16]等。但上述载波同步算法的频偏和相差补偿范围较小,无法直接应用在星间、星地等大动态相干光通信场景中。 M 次方算法基于相位增量实现频偏和相差估计,具有运算简单、计算量小的优点,其频偏补偿范围为 $[-r_s/(2M), r_s/(2M)]$,相差补偿

范围为 $[-\pi/M, \pi/M]$,其中 r_s 为符号速率, $M=2^n$, n 为调制阶数。研究人员已经开始尝试将 M 次方算法应用到空间相干光通信中,许云祥等^[12]仿真分析了卫星光通信中激光器噪声和接收机噪声对载波同步的影响,验证了开环载波同步算法在空间相干光通信系统中的应用前景。张杰等^[17]对 M 次方算法进行了改进,提高了其频偏补偿精度,并将频偏补偿范围增大至 $[-r_s/2, r_s/2]$,但算法的复杂度也显著增加。针对大气湍流引入的相位随机噪声这一问题,管海军等^[18]采用 M 次方算法和盲相位搜索算法级联的方式提高了相位补偿精度。目前 M 次方算法的补偿能力无法满足空间相干光通信需求,直接采用 M 次方载波同步算法会出现频率模糊和相位模糊问题。

本文分析了 M 次方载波同步方法存在频率模糊和相位模糊的机理,给出了频率模糊和相位模糊与调制速率和调制阶数的关系,并通过改进帧同步过程来实现载波同步相位模糊的消除。为了验证算法的有效性,搭建了双偏振正交相移键控(DP-QPSK)相干光通信仿真系统和实验系统,并利用所提出的载波同步算法对采集数据进行了处理,结果表明所提算法具有良好的消除模糊的能力,可以实现任意频偏和相差相干光通信系统的载波同步。

2 基本原理

2.1 时域 M 次方载波同步算法

相干光通信系统采用相干混频探测体制实现信号

收稿日期: 2023-10-13; 修回日期: 2023-12-11; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2023-12-23

基金项目: 自主投入发展基金(SXX22689X033)

通信作者: bit_wuli@163.com

接收,接收信号可表示为

$$S_k = A_k \exp[i \cdot (-2\pi k \Delta v T_s + a_k + \phi_k)], \quad (1)$$

式中: S_k 是接收的第 k 个码元; A_k 是信号幅度; a_k 是第 k 个码元的调制信息; Δv 是由激光器频率漂移和多普勒效应引入的频偏; T_s 是码元周期; ϕ_k 是激光器线宽及信道引入的0均值随机相位噪声。空间相干光通信链路相位噪声具有明显的时变特性,具体表现为多普勒效应引入的频偏可达 ± 6 GHz,多普勒频率变化率达到 10 MHz/s^[19-20];而测试结果表明,信号激光和本振激光的频率漂移引入的频偏变化范围一般在 1 GHz以内,频率漂移速率约为 0.5 MHz/s。商用窄线宽激光器的相位噪声主要表现为 $1/f$ 噪声等低频噪声,其中 f 为噪声频率,相位噪声一般在 10 MHz量级达到白噪声水平^[21];大气湍流引入的相位噪声主要与湍流强度、横向风速等因素有关,在低频部分表现为 $f^{-2/3}$ 特性,在高频部分一般表现为 $f^{-8/3}$ 特性,大气湍流相位噪声功率谱在 1 kHz附近达到白噪声水平^[22-23]。针对空间光通信频偏、相差特性,采用载波同步算法进行设计时应重点关注对多普勒频偏和激光器相位噪声的有效性,所提的载波同步算法将接收信号划分成大小为 2^9 bit的数据块进行处理,以保证频偏和相差相对于系统为慢变信号。 M 次方载波同步算法包含频偏估计和相差估计两部分,频偏估计部分原理如图1所示。

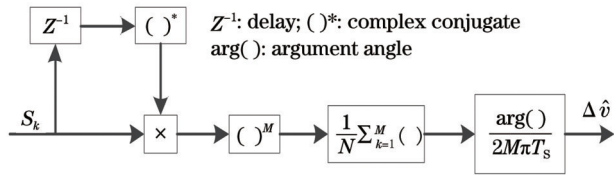


图1 M 次方算法频偏估计原理图

Fig. 1 Schematic diagram of M th power algorithm for frequency offset estimation

由图1可知,系统依次将前一个码元的复共轭与后一个码元相乘,第 k 组码元的相乘结果为

$$d_k = S_{k+1} \cdot S_k^* = \exp[i(a_{k+1} - a_k - 2\pi \Delta v T_s + \phi_{k+1} - \phi_k)]. \quad (2)$$

为了避免调制信息影响估计结果,采用 M 次方运算消除调制信息,得到

$$d_k^M = \exp[i(-2M\pi \Delta v T_s + M\phi_{k+1} - M\phi_k)]. \quad (3)$$

相干光通信系统的光源线宽一般 < 100 kHz,空间信道抖动频率主要在kHz以下,因此式(3)中最后一项 $M\phi_{k+1} - M\phi_k$ 约为0。利用统计平均降低随机误差,频偏估计结果为

$$\Delta \hat{v} = \arg\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k^M\right) / (2M\pi T_s), \quad (4)$$

式中: N 为统计平均码元数。由于取幅角函数 $\arg(\bullet) \in$

$[-\pi, \pi]$,因此 M 次方算法的无模糊频偏估计范围为 $[-r_s/(2M), r_s/(2M)]$ 。

M 次方算法的相差估计实现框图如图2所示。

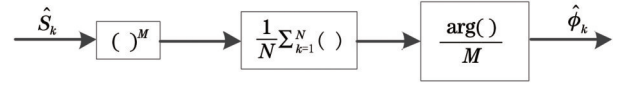


图2 M 次方算法相差估计原理图

Fig. 2 Schematic diagram of M th power algorithm for phase difference estimation

在图2中, \hat{S}_k 是频偏估计及补偿后的码元,其表达式为

$$\hat{S}_k = A_k \exp\{i \cdot [-2\pi k(\Delta v - \hat{\Delta v})T_s + a_k + \phi_k]\}, \quad (5)$$

最终相差估计结果为

$$\hat{\phi}_k = \frac{1}{M} \arg\left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{S}_k)^M\right], \quad (6)$$

相差无模糊估计范围为 $[-\pi/M, \pi/M]$ 。

2.2 消相位模糊载波同步算法

M 次方载波同步算法的频率模糊和相差模糊问题均是由相位模糊(包裹)造成的,在载波同步过程中对引入的相位模糊进行分析,发现相位解模糊时可以将相位模糊等效为若干个特定值。具体地,无论频偏模糊 d_v 和相差模糊 d_ϕ 为多少,均可以等效为以下集合中的一项, d_v 的等效取值集合为 $\left\{\frac{1}{MT_s}, \frac{2}{MT_s}, \dots, \frac{M-1}{MT_s}, \frac{M}{MT_s}\right\}$, d_ϕ 的等效取值集合为 $\left\{\frac{2\pi}{M}, \frac{4\pi}{M}, \dots, \frac{(2M-2)\pi}{M}, 2\pi\right\}$ 。在所提载波

同步算法中, d_v 和 d_ϕ 的具体值将由帧同步过程来确定,并对相位模糊导致的残余频偏和相差进行补偿,进而完成载波同步。消相位模糊载波同步算法实现原理如图3所示,其中省去了 M 次方算法部分, $p_s(\bullet)$ 为移相算符, S 表示相位补偿后的码元, $c_{\text{orr}}(\bullet)$ 为相关算符, $s_{\text{clk}}(\bullet)$ 为选通算符, f_{in} 为帧头, S_{ok} 为载波同步后的码元。

相干光通信数字信号处理是按帧进行的,帧头是自相关性良好的随机序列。在进行帧同步时,首先对信号进行相位补偿,补偿后的信号可表示为

$$S = \tilde{S}_k \cdot \exp[i(2\pi d_v k T_s) - d_\phi], \quad (7)$$

式中: \tilde{S}_k 为经 M 次方载波同步算法处理后包含相位模糊的信号。由于 d_v 和 d_ϕ 均有 M 种可能的取值,因此一共会得到 M^2 个补偿码元序列,只需要将得到的码元序列与帧头序列进行互相关运算,则能够正确实现帧同步的码元序列即为正确解模糊的序列。

由上述实现原理可以得出,所提消相位载波同步算法在增加了较小计算量的条件下实现了频偏估计和

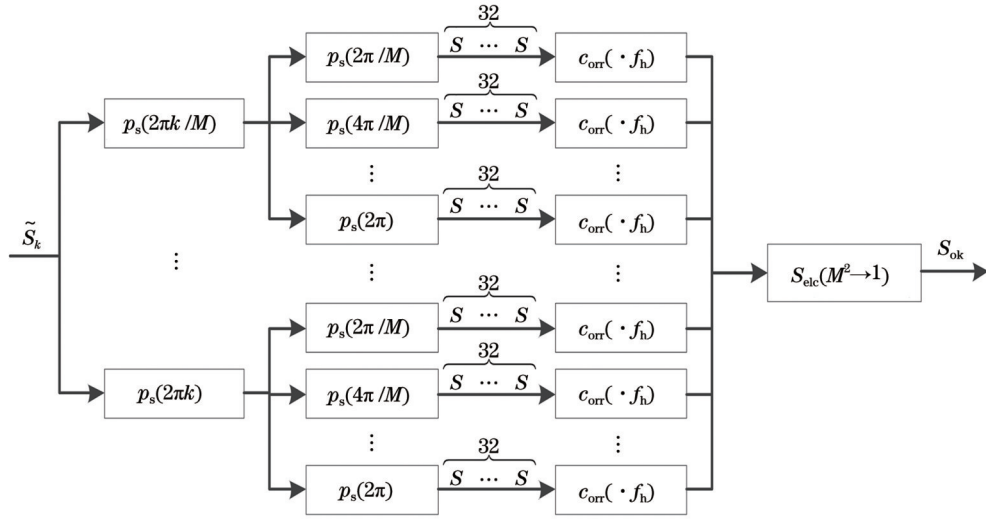


图 3 消相位模糊载波同步算法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of unwrapping phase ambiguity carrier synchronization algorithm

相差估计模糊的消除,使得算法补偿范围不受系统调制参数限制。快速傅里叶变换算法具有较高的估计精度,但其计算量较大,且补偿范围受限;盲相位搜索算法具有良好的调制格式适应能力,但为了获得较好的估计精度,需要增加测试相位,使得算法复杂度增加。所提算法在计算复杂度和补偿范围方面有优势,但主要适用于 PSK 系统。

3 分析与讨论

3.1 仿真结果分析

利用光通信仿真软件 OptiSystem 搭建了 DP-QPSK 相干光通信系统,系统框图如图 4 所示。通信波段为大气窗口 1550 nm,空间链路距离为 1 km,发射机载波光信号和本振激光器信号的线宽均为 100 kHz,通过改变本振激光器的频率来模拟多普勒频偏,利用相位调制器增加额外相差。由上文可知,多普勒效应对卫星激光通信引入的频偏可达 6 GHz,多普勒频率变化速率达 10 MHz/s,所提算法运用的单个数据块大小为 2^9 bit,因此单个数据块内多普勒频移变化量与调制速率的关系为 $\Delta f_{\text{Doppler}} = 2^9 \times 10 / (2r_s)$,多普勒频移变化量的单位为 MHz。因此,在单个数据块内多普勒频移的变化相对系统调制速率是很小的,可以当作慢变信号处理。同时商用激光器的频率调谐范围远远大于 ± 6 GHz,因此利用激光器调谐模拟多普勒频移是合理的。为了验证所提算法的有效性,对接收端平衡探测器探测信号进行了采集处理,信号处理流程包括消倾斜 (De-skew)、IQ 正交化 (Inphase quadrature orthogonalization)、时钟同步、偏振解复用、载波同步、符号估计和解码^[24]。图 4 为 DP-QPSK 相干光通信仿真系统图,系统主要包含以下器件:伪随机数字序列发生器 (PRBSG, Pseudo-random bit sequence generator),马赫-曾德尔调制器 (MZM, Mach-Zehnder modulator),

串并转换器 (S2PC, Serial to parallel converter),相移键控脉冲生成器 (PSKPG, Phase shift key pulse generator),Mary 脉冲发生器 (MaryPG, Mary pulse generator),偏振分束器 (PS, Polarization splitter),偏振合束器 (PC, Polarization combiner),光学无效 (ON, Optical null),X 耦合器 (XC, X coupler),地 (G, Ground),相位调制器 (PM, Phase modulator),高斯滤波器 (GF, Gaussian filter),PIN 光电二极管 (PIN, PIN photodiode),电学增益器 (EG, Electrical gain),电学偏置 (EB, Electrical bias),电相减器 (ES, Electrical subtractor),电放大器 (EA, Electrical amplifier),光学无线信道 (OWC, Optical wireless channel),自由空间光信道 (FSOC, Free space optics channel)。

将系统调制速率设置为 2 GBaud、采样率为 8 GSa/s、额外相差为 170° ,频偏由 0.6 GHz 逐渐增大到 3 GHz。由 M 次方载波同步算法工作原理可知,3 GHz 频偏和 170° 相差均超出了其无模糊补偿范围。图 5 给出了频偏为 0.6 GHz、相差为 170° 时,接收信号的初始复振幅及载波同步后 X 偏振分量和 Y 偏振分量的复振幅。由图 5 的结果可知,受各种噪声的影响,接收信号存在严重的幅度误差和相位噪声,经载波同步处理后,两个偏振分量信号的星座点收敛良好,EVM (Error vector magnitude) 值约为 10%,系统误码率为 0。

保持其他条件不变,频偏分别设置为 1.2、1.8、2.4、3.0 GHz,系统信号载波同步结果如图 6 所示。两个偏振分量信号的处理效果基本一致,因此图 6 只给出了 X 偏振分量的解调星座图。从图 6 的结果可以看出,所提载波同步算法可以实现不同频偏下系统接收信号的正确同步。当频偏较大时,信号复振幅收敛效果稍微变差,频偏为 3.0 GHz 时星座图 EVM 值约为 14%。这是因为当系统采样率不变时,频偏的增大会导致过

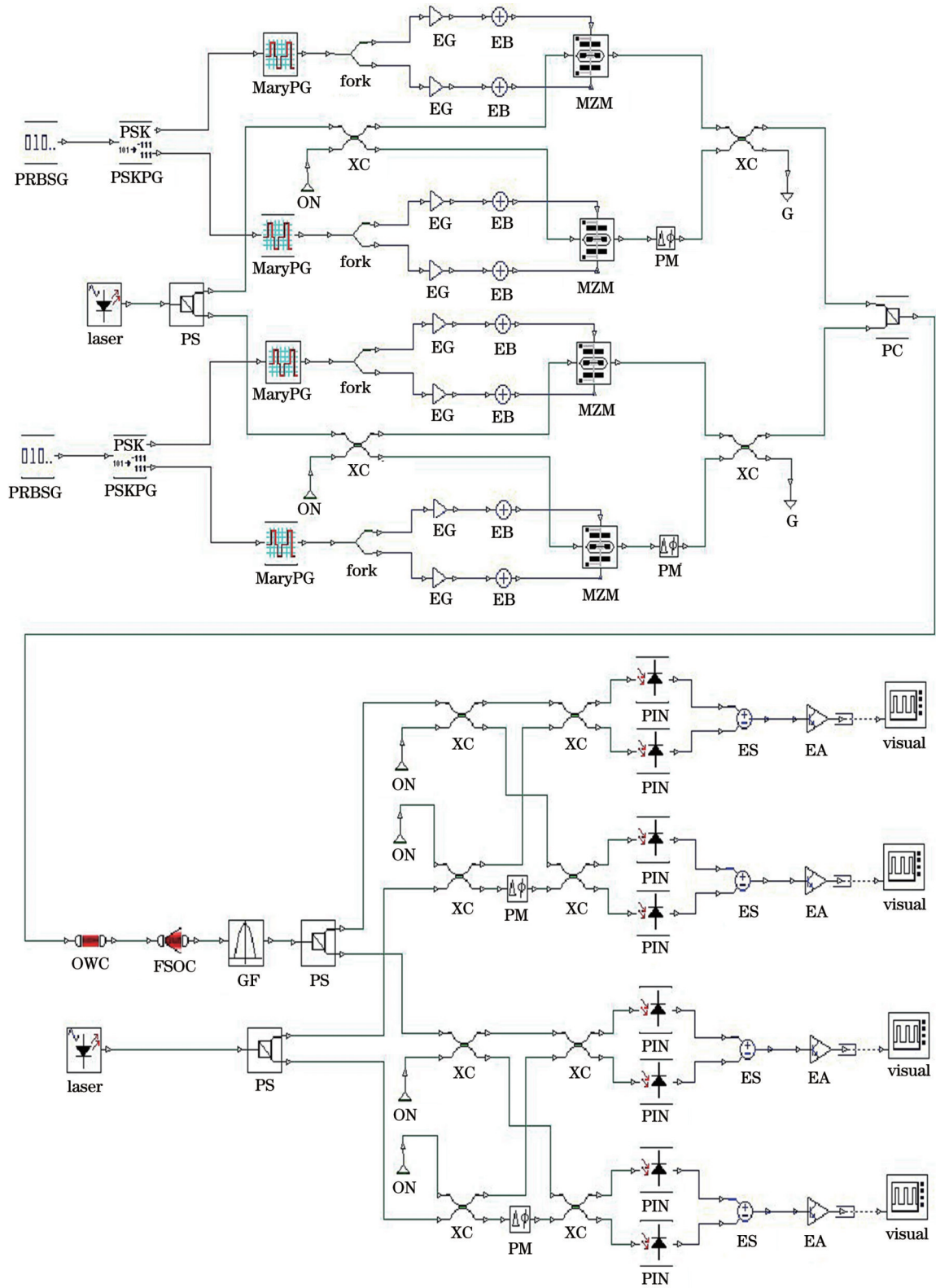


图 4 DP-QPSK 相干光通信仿真系统

Fig. 4 DP-QPSK coherent optical communication simulation system

采样倍数减小,进而影响系统的时钟同步效果,导致最终复振幅收敛的效果较差,所提载波同步算法性能基本不受频偏大小的影响。

为了验证所提载波同步算法在不同通信速率下的载波同步效果,保持系统频偏为 3 GHz、相差为 170°不

变,将调制速率分别设置为 2、5、10 GBaud。系统信号载波同步结果如图 7 所示。同样地,给出 X 偏振分量的解调结果。从图 7 的结果可以看出,所提载波同步算法可以实现不同调制速率接收信号的良好同步,调制速率分别为 2、5、10 GBaud 时,解调星座图的 EVM

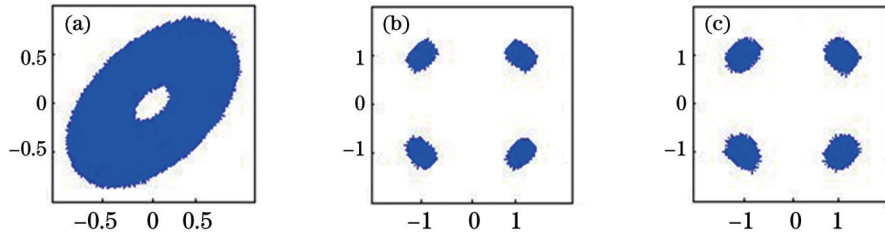


图 5 仿真系统初始信号及载波同步结果。(a)初始信号;(b) X载波同步结果;(c) Y载波同步结果

Fig. 5 Raw signal and carrier synchronization results of simulation system. (a) Raw signal; (b) X carrier synchronization result; (c) Y carrier synchronization result

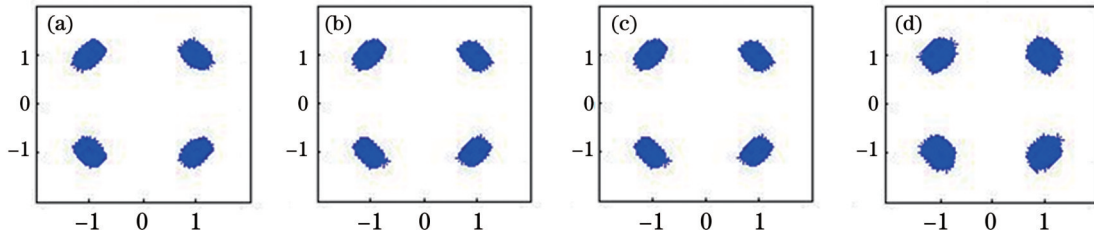


图 6 不同频偏下仿真信号载波同步结果。(a) 1.2 GHz;(b) 1.8 GHz;(c) 2.4 GHz;(d) 3.0 GHz

Fig. 6 Carrier synchronization results of simulation signal under different frequency offsets. (a) 1.2 GHz; (b) 1.8 GHz; (c) 2.4 GHz; (d) 3.0 GHz

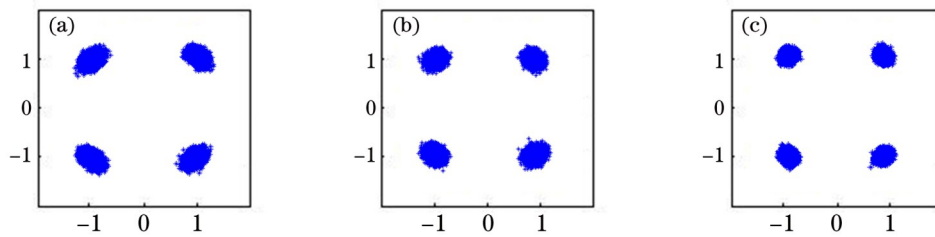


图 7 不同调制速率下信号载波同步结果。(a) 2 GBaud;(b) 5 GBaud;(c) 10 GBaud

Fig. 7 Carrier synchronization results of simulation signal under different modulation rates. (a) 2 GBaud; (b) 5 GBaud; (c) 10 GBaud

值分别约为 10.2%、9.6% 和 9.1%。为了更客观地评价所提载波同步算法在不同通信速率下的载波同步效果,这里始终保持了 4 倍的过采样,通信速率的增大使得载波同步效果更好。

为了充分分析不同频偏和相位噪声下所提载波同步算法的补偿效果,在 5 GBaud 调制速率下分析了频偏分别为 1、2、3、4、5、6 GHz 时,解调星座图 EVM 值随相位噪声的变化结果如图 8 所示。考虑到星载相干激光通信频偏一般不超过 6 GHz,相位噪声对系统的影响具有圆对称性,因此将最大频偏和相差分别设置为 6 GHz 和 180°。从图 8 的结果可以看出,频偏的增大会使得载波同步星座图 EVM 值有少量的增大,已经证实这主要是由系统相对信号频带的过采样倍数变化导致的,增大系统采样率可以有效解决这个问题。当系统采样率增大到一定程度时,解调 EVM 值会趋于收敛,因此当频偏较小时增大采样率对 EVM 的影响不明显。相差对解调 EVM 的影响具有一定的周期性,这是由系统采用的调制格式决定的,如对于

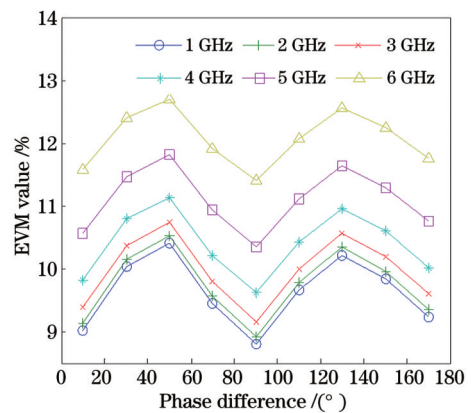


图 8 不同频偏下解调 EVM 值随相差的变化

Fig. 8 Variation of demodulation EVM value with phase difference under different frequency offsets

QPSK 调制,当相差为 90° 的倍数时,其对解调 EVM 的影响很小。但如果载波同步算法不能正确消除相位模糊,即使解调 EVM 值很小,也可能导致系统出现很大的误码。

从所提载波同步算法的实现原理及相位模糊消除原理可以看出,所提载波同步算法不受系统调制速率(通信速率)的影响,而且,在保持系统的过采样倍数不变的条件下,系统调制速率的增加往往使得载波同步过程具有更好的补偿能力。为了进一步验证更高速率下所提载波同步算法效果,将系统的调制速率设置为 20 GBaud,此时系统的通信速率为 80 Gbit/s,并分析了载波同步星座图的 EVM 值。结果表明,不同频偏和相差下解调星座图的 EVM 值在 10% 左右,变化趋势与图 8 的结果一致。

3.2 实验结果分析

为了验证所提载波同步算法可用于实际相干光通信系统信号载波同步,采用集成相干光发射机(IQM-701)和接收机(FUJITSU 100 G Receiver)搭建了空间 DP-QPSK 相干光通信系统。发射机载波光信号和本振激光器信号线宽均为 100 kHz,发射端调制信号由任意波形发生器产生,同时对两个偏振分量进行 QPSK 调制。通过测试可以发现,实验中采用的激光器的频率漂移范围在 1 GHz 以内,主要与自身温度有关,且随时间变化缓慢。为了模拟系统频偏的变化,选择了两个不同的激光器作为本振信号,两个激光器输出信号与发射机载波光信号频率差分别为 2.3 GHz 和 3.7 GHz,实验系统采用的主要参数如表 1 所示。

为了验证所提载波同步算法不受 $[-r_s/(2M)]$,

表 1 实验系统设置参数

Table 1 Parameters of experimental system

Parameter	Value	Note
Wavelength /nm	1550.1	Atmospheric window
Signal linewidth /kHz	100	
Local linewidth /kHz	100	
Optical aperture /mm	200	Both transmitter & receiver
Frequency offset /GHz	2.3, 3.7	
Modulation rate /GBaud	2, 5, 10	1 GBaud=4 Gbit/s
Link length /m	600	
Link inclination angle /($^{\circ}$)	0.38	
Sampling rate /(GSa/s)	50	

$r_s/(2M)]$ 的约束,将系统调制速率分别设置为 2、5、10 GBaud。实验系统链路图如图 9 所示,发射端位于单位办公楼四楼,接收端位于一酒店三楼房间的露天阳台,信号经窗户发送给接收端,链路距离约为 600 m,链路水平面夹角约为 0.38° 。利用高速示波器对接收机信号进行采集,设置示波器采样速率为 50 GSa/s,并利用所提算法对采集信号进行处理。任意波形发生器产生两路周期均为 2000 bit 的循环随机数序列,分别作为同相分路(I路)和正交分路(Q路)调制信息,因此在进行解模糊时在长度为 4000 bit 的数据块中进行,所采用的帧头长度为 32 bit。

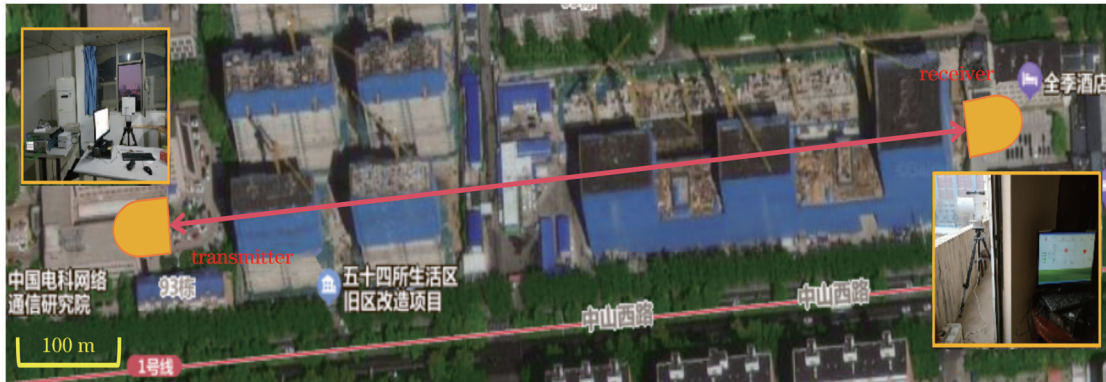


图 9 空间相干光通信系统实验装置

Fig. 9 Experimental setup of space coherent optical communication system

图 10 和图 11 给出了信号光和本振光频率差分别为 2.3 GHz 和 3.7 GHz 时实验采集信号的初始复振幅和载波同步星座图,同样地只给出了 X 偏振分量的结果。从图 10 和图 11 的结果可以看出,不同调制速率下接收信号均可以实现良好的载波同步,两图中信号分布差异主要由实验时不同的天气条件所致。其中频偏为 2.3 GHz 且调制速率分别为 2、5、10 GBaud 时解调星座图的 EVM 分别约为 7%、11% 和 13%;频偏为 3.7 GHz 且调制速率分别为 2、5、10 GBaud 时解调星座

图的 EVM 分别约为 7.3%、11.7% 和 14.2%。最终,利用所提载波同步算法实现了 DP-QPSK 相干光通信实验系统信号的 0 误码解调。

最后,利用 M 次方载波同步算法对频偏为 2.3 GHz 和 3.7 GHz 的实验数据进行处理,并与所提载波同步算法效果进行对比分析。结果表明,利用 M 次方载波同步算法得到的星座图 EVM 值与所提算法基本相同,这也是由相位模糊产生的机理决定的。但直接利用 M 次方载波同步算法会导致通信严重的误码,频偏

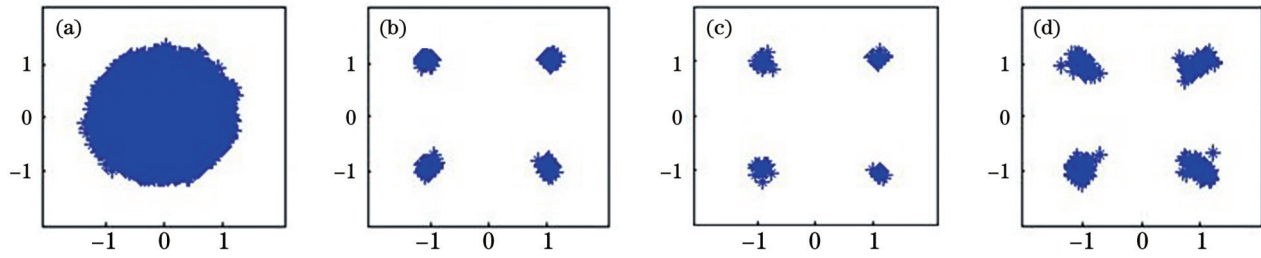


图 10 频偏为 2.3 GHz 时不同调制速率下实验系统信号载波同步结果。(a) 初始信号; (b) 2 GBaud; (c) 5 GBaud; (d) 10 GBaud
Fig. 10 Carrier synchronization results of experimental system signals with 2.3 GHz frequency offset under different modulation rates.
(a) Raw signal; (b) 2 GBaud; (c) 5 GBaud; (d) 10 GBaud

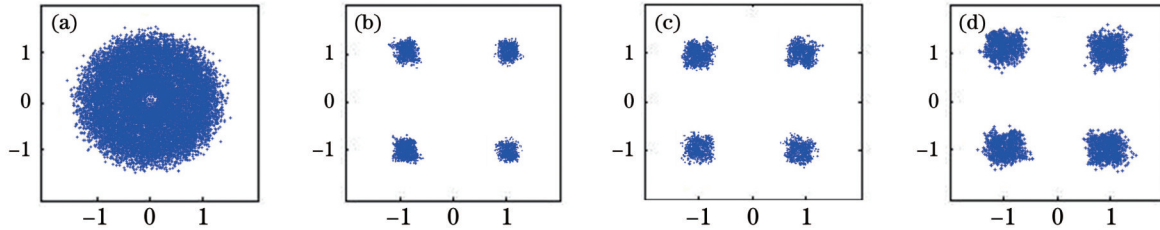


图 11 频偏为 3.7 GHz 时不同调制速率下实验系统信号载波同步结果。(a) 初始信号; (b) 2 GBaud; (c) 5 GBaud; (d) 10 GBaud
Fig. 11 Carrier synchronization results of experimental system signals with 3.7 GHz frequency offset under different modulation rates.
(a) Raw signal; (b) 2 GBaud; (c) 5 GBaud; (d) 10 GBaud

为 2.3 GHz 且调制速率分别为 2、5、10 GBaud 时系统误码率分别为 37.5%、25% 和 37.5%; 频偏为 3.7 GHz 且调制速率为 2、5、10 GBaud 时系统误码率均为 37.5%, 此时系统将无法工作。

4 结 论

提出了一种具备解频率模糊和消相位模糊能力的相干光通信系统载波同步算法, 并搭建了空间相干光通信仿真系统和实验系统, 验证了算法的有效性。虽然所提载波同步算法需要重复多次进行帧同步相关运算, 重复次数的数学期望为 $M^2/2$, 但一旦确定系统的调制格式, 载波同步解模糊过程执行逻辑是固定的, 具有典型的并行处理特征, 因此不会影响系统的运行速度。同时, 所提载波同步算法与系统通信速率无关, 系统调制阶数的增加会使得相关运算过程重复次数增加, 但不会影响算法同步效果, 可以应用于未来更高速率、更高阶调制格式的相干光通信系统。

参 考 文 献

- [1] 张一尘, 陈健, 赵梦鑫, 等. 相干光通信系统中的几何概率整形研究[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 1906002.
Zhang Y C, Chen J, Zhao M X, et al. Geometric probability shaping in coherent optical communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 1906002.
- [2] Xie P, Zhao Y F, Guan L Y, et al. Performance investigation of multi-aperture digital combining algorithm for satellite-to-ground coherent optical communication[J]. Optics Communications, 2023, 545: 129722.
- [3] 余子昊, 王栋皓, 汪洋, 等. 卫星激光通信快速反射镜研究进展及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1500003.
Yu Z H, Wang L H, Wang Y, et al. Research progress and
- development trend of fast steering mirror for satellite laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1500003.
- [4] Arikawa M, Ito T. Performance of mode diversity reception of a polarization-division-multiplexed signal for free-space optical communication under atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28263-28276.
- [5] Zhang Y Q, Xu M F, Pu M B, et al. Simultaneously enhancing capacity and security in free-space optical chaotic communication utilizing orbital angular momentum[J]. Photonics Research, 2023, 11(12): 2185.
- [6] Didier P, Dely H, Bonazzi T, et al. High-capacity free-space optical link in the midinfrared thermal atmospheric windows using unipolar quantum devices[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(5): 056004.
- [7] 任伟杰, 孙建锋, 周煜, 等. 多体制兼容相干探测卫星激光通信技术[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1206002.
Ren W J, Sun J F, Zhou Y, et al. Multi-system compatible coherent detection technology of satellite laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1206002.
- [8] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [9] 尹涵, 宋英雄, 李迎春, 等. 基于 MIMO 模式分集相干接收的自由空间光通信大气湍流补偿技术研究[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2306002.
Yin H, Song Y X, Li Y C, et al. Free-space optical communication atmospheric turbulence compensation based on multiple input multiple output mode diversity coherent reception [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2306002.
- [10] Ando T, Haraguchi E, Tajima K, et al. Coherent homodyne receiver with a compensator of Doppler shifts for inter orbit optical communication[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7923: 79230J.
- [11] Hoffmann S, Bhandare S, Pfau T, et al. Frequency and phase estimation for coherent QPSK transmission with unlocked DFB lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(18): 1569-1571.

- [12] 许云祥, 吴斌, 汪勃. 卫星相干光通信多普勒频移开环估计技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0922004.
Xu Y X, Wu B, Wang B. Open-loop Doppler frequency shift estimation in satellite coherent optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0922004.
- [13] Viterbi A J, Viterbi A M. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4): 543-551.
- [14] Fang X, Wang Y C, Ding D, et al. Pilot-aided phase noise suppression for coherent optical OFDM/OQAM[C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu China. New York: IEEE Press, 2019.
- [15] Pfau T, Hoffmann S, Noé R. Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for M-QAM constellations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 989-999.
- [16] Cao Y W, Yu S, Shen J, et al. Frequency estimation for optical coherent MPSK system without removing modulated data phase [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(10): 691-693.
- [17] 张杰, 邱琪. 一种高精度的四次方载波相位恢复算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 130604.
Zhang J, Qiu Q. High-precision fourth power carrier phase recovery algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 130604.
- [18] 管海军, 刘云清, 张凤晶. 基于数字相位恢复算法的正交相移键控自由空间相干光通信系统[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1131-1138.
Guan H J, Liu Y Q, Zhang F J. Coherent free-space optical communication system with quadrature phase-shift keying modulation using a digital phase recovery algorithm[J]. Chinese Optics, 2019, 12(5): 1131-1138.
- [19] 何碧旺. 卫星光通信中基于轨道预测的零差频率捕获技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 2-4.
He B W. Research on homodyne frequency acquisition technology based on orbit prediction in satellite optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 2-4.
- [20] 宁金娜. 高动态光通信多普勒频移模拟器的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020: 9-11.
Ning J N. Design and implementation of high dynamic optical communication Doppler frequency shift simulator[D]. Xi'an: Xidian University, 2020: 9-11.
- [21] 陈洁. 窄线宽激光器相位噪声测量技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Chen J. Study on phase noise measurement technology of narrow linewidth laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [22] 瞿青, 曹召良, 胡立发, 等. 位相差值法测量大气湍流格林伍德频率[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 121-129.
Qu Q, Cao Z L, Hu L F, et al. Greenwood frequency measurement of atmospheric turbulence by phase difference method[J]. Chinese Optics, 2015, 8(1): 121-129.
- [23] 李新阳, 姜文汉, 王春红, 等. 激光实际大气水平传输湍流畸变波前的功率谱分析 II: 波前相位与格林伍德频率[J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1035-1042.
Li X Y, Jiang W H, Wang C H, et al. Power spectra analysis of the disturbed wavefront in laser beam horizontal atmospheric propagation II: wavefront phase and greenwood frequency[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(8): 1035-1042.
- [24] Savory S J. Digital coherent optical receivers: algorithms and subsystems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1164-1179.

Unwrapping Phase Ambiguity Carrier Synchronization Algorithm for Coherent Optical Communication

Li Huagui^{1,2*}, Li Shaobo^{1,2}, Liu Xuchao^{1,2}, Ma Shuquan^{1,2}

¹Optical Communication Research Center, 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;

²Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Application, Shijiazhuang 050081, Hebei, China

Abstract

Objective Coherent optical communication technology possesses a significantly higher communication rate and receiver sensitivity, which has been applied in fiber optic networks and space optical communication by researchers. Compared with the optical fiber channel, the space atmospheric channel possesses significant randomness and fluctuation, and the relative motion between the terminals will introduce an additional Doppler frequency shift. Thus, the frequency offset and phase noise of the space optical communication systems are characterized by a large fluctuation range and a fast-changing rate. Traditional coherent optical communication systems realize carrier synchronization mainly by reference light method, optical phase-locked loop method, and digital signal processor (DSP) open-loop carrier synchronization method. However, it is difficult to implement the reference light method in space atmospheric channels with a large dynamic range. The tuning rate of the optical phase-locked loop method is slow, leading to poor performance. Besides, these two methods will lead to a more complex system. An open-loop synchronization scheme is recommended by researchers, although there is phase ambiguity when an open-loop synchronization scheme is used in large dynamic link conditions. Therefore, the optimization of open-loop synchronization schemes is of great significance for meeting the needs of different space optical communication

applications. We aim to develop a carrier synchronization algorithm to solve the phase ambiguity problem of coherent optical communication systems with a large frequency offset and large phase noise and to provide a competitive carrier synchronization method for space coherent optical communication systems. We believe that this will be helpful for the development and application of space coherent optical communication technology.

Methods Considering the simple implementation and small computation of the M th power carrier synchronization algorithm, we realize the carrier synchronization algorithm by optimizing the M th power carrier synchronization algorithm. The principle of the M th power carrier synchronization algorithm is analyzed, and the regular phase ambiguity is found, namely that the phase ambiguity can be treated as one of the M situations. It should be noted that both the actual frequency offset ambiguity and phase noise ambiguity are randomly distributed in the M situations. The adopted enumeration method is simple and effective. To decrease the computation of the procedure as much as possible, the unwrapping phase ambiguity procedure is combined with the frame synchronization process. In the unwrapping phase ambiguity procedure, different combinations of frequency offset ambiguity and phase noise ambiguity are tried until the frame synchronization is successful. The different combinations can be tried in parallel to improve signal processing speed. The carrier synchronization algorithm is applied in free-space dual polarization-quadrature phase shift keying (DP-QPSK) coherent optical communication systems to verify the effectiveness.

Results and Discussions A DP-QPSK free-space coherent optical communication simulation system is built in OptiSystem, and frequency offset and phase noise are characterized by changing laser frequency and linewidth. Also, a DP-QPSK free-space coherent optical communication experimental system is built between two buildings 600 m apart. The simulation and experimental results show that our carrier synchronization algorithm is effective for DP-QPSK coherent optical communication systems, and the error vector magnitude (EVM) value of the carrier synchronization constellation is always less than 15% (Figs. 7, 10, and 11). Besides, the quality of demodulation constellation is independent of frequency offset, phase noise, and modulation parameters, and the bit error rate is 0% (Fig. 8). In the experimental system, comparative analysis of our carrier synchronization algorithm and M th power carrier synchronization algorithm is carried out. Although it is a fact that the demodulation constellation EVM values using the M th power carrier synchronization algorithm are almost the same as our carrier synchronization algorithm, but the bit error rate will be up to 37.5% or 25% when the M th power carrier synchronization algorithm is applied directly. Thus, it is essential to unwrap phase ambiguity for space coherent optical communication applications.

Conclusions We propose an unwrapping phase ambiguity carrier synchronization algorithm for the free-space coherent optical communication system. To verify the effectiveness of the carrier synchronization algorithm, we build a free-space DP-QPSK coherent optical communication simulation system and experimental system with different frequency offsets and phase noises. Our carrier synchronization algorithm requires correlation operations of the frame synchronization process to be implemented multiple times, whose mathematical expectation is $M^2/2$. However, once the modulation format of the system is determined, the operational logic of the unwrapping phase ambiguity process is fixed. Thus, the unwrapping phase ambiguity process can be operated in parallel to improve signal processing speed. Besides, the frequency offset and phase noise compensation range of the proposed carrier synchronization algorithm are not constrained by the modulation rate and modulation order of the coherent optical communication system. A higher modulation order system needs to increase the implement times of correlation operations in the frame synchronization process, while the carrier synchronization effect is almost not influenced. The carrier synchronization algorithm may be applied to future coherent optical communication systems with a higher communication rate and modulation format.

Key words optical communications; coherent optical communication; coherent detection; carrier synchronization; unwrapping phase ambiguity; frame synchronization