

基于串行最小频移键控的 8 进制调制研究

陶 理 迟 楠

(复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要 提出了一种新型的基于串行结构的最小频移键控调制技术, 产生了相位连续, 频谱宽度窄, 每码元时间有两次 $\pi/2$ 相移, 类似于传统最小频移键控调制信号, 给出了该调制方案的理论推导, 并将其应用于 8 进制的多维多阶调制系统中。理论和仿真分析了不同的 8 进制调制方案在频谱特性, 残留色散容限, 自相位调制容限的不同, 还分析了其受到系统滤波带宽的影响。最后仿真实现了通过 350 km 的色散完全补偿的光纤 120 Gb/s 的数据传输。

关键词 光通信; 多维多阶调制; 串行最小频移键控; 传输性能

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0406003

An Octal Modulation Scheme Based on Serial Minimum Frequency Shift Keying Modulation Format

Tao Li Chi Nan

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract An advanced serial minimum frequency-shift keying (SMSK) modulation scheme is proposed. SMSK signal has a narrow power spectrum, and continuous phase shift that changes $\pi/2$ twice during one symbol time, which is similar to traditional minimum frequency-shifts (MSK) signal. The principle of generating the optical SMSK signal and its implementation in octal multi-dimensional and multi-level modulation scheme is presented. Theoretical analysis is given to modulated spectra, residual dispersion tolerance, self-phase modulation (SPM) tolerance and effect of filter bandwidth on it. 120 Gb/s simulated transmission over 350 km fiber link with dispersion compensation is demonstrated.

Key words optical communications; multi-dimensional and multi-level modulation; serial minimum frequency-shift keying modulation; transmission performance

OCIS codes 060.2330; 060.4080; 060.5060

1 引 言

近年随着网络业务量的不断增长, 对网络带宽容量的要求不断提高, 目前光通信商用系统多采用二进制强度调制, 其频谱效率仅为 0.2 (bit/s)/Hz, 而在无线通信中多电平调制已经广泛应用, 为了提高传输容量和网络带宽利用率, 寻求新型的超高速光传输调制方式成为了研究热点^[1~3]。最小频移键控(MSK)作为一种新型的调制格式, 具有相位连

续, 频谱能量集中, 边带衰落快等特点, 其调制产生方式已有广泛研究, 有的是驱动方式的不同^[4,5], 有的是调制结构的不同^[6~10], 对这些方案也有许多分析和比较^[11,12]。目前, 在多维多阶调制方面已有许多研究成果, 有基于差分相位变换调制法(DPSK)的 4 进制调制技术^[13~15], 有基于四进制相移键控(QPSK)的 16 进制的调制技术^[16], 有基于偏振复用的调制技术^[17~19]。

收稿日期: 2011-11-09; **收到修改稿日期**: 2011-12-07

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(600837004, 61177071)、中国博士后基金项目(20090460593)、上海博士后自然科学基金(10R21411600)和上海市曙光学者基金资助课题。

作者简介: 陶 理(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事光通信系统及调制格式等方面的研究。

E-mail: taoli522930@gmail.com

导师简介: 迟 楠(1974—), 女, 博士, 教授, 主要从事光通信系统、光标记交换等方面的研究。

E-mail: nanchi@fudan.edu.cn(通信联系人)

本文提出了一种新型的串行 MSK (SMSK) 调制方案,产生的信号具有相位连续,频带能量集中,每码元时间有两次 $\pi/2$ 相移,类似于传统 MSK 信号,同时由于发射机结构为串行,降低了器件复杂度并提高了发射机的稳定性。给出了该调制方案的理论推导,同时将该串行调制方式应用于多维多阶调制中,产生了 8 进制 2 幅移键控(ASK)-SMSK 信号,并与同等条件下其他 8 进制调制方式进行了比较,分析其频谱特性,残留色散容限,自相位调制 (SPM)容限和滤波器容限,最后比较了不同方案经过光纤传输的误码率曲线。

2 SMSK 调制及其多维多阶调制原理

2.1 基于 SMSK 的 8 进制信号发射机

在传统的 MSK 信号调制方案中,发射机的结构是并行的,并且利用马赫-曾德尔延时干涉仪 (MZDI)对产生的 MSK 信号进行直接解调。本文

提出的 SMSK 信号发射机的主要特点是将 MZDI 应用到发射机端,利用 MZDI 延时干涉的特性使得能够利用串行结构产生 SMSK 信号。如图 1(a)所示,从激光器发出的光经过由射频源驱动的 MZM1 调制产生载波抑制归零(CSRZ)信号,传输的比特信息通过 MZM2 加载到 CSRZ 信号上,然后被调制的光波在 MZDI 入射端分为两路,一路进行 $T_b/2$ (T_b 为码元时间)延时,一路进行 $\pi/2$ 的相移,两路光在 MZDI 输出端进行耦合,最后产生了 SMSK 信号,如图 1(b)所示,可以看到该信号在幅度上有一定的抖动,在相位上是连续的。值得指出的是,该信号的相位在一个码元时间内有两次 $\pi/2$ 的相移,而典型的 MSK 信号一个码元时间内只有一次 $\pi/2$ 的相移。SMSK 信号产生方案相对于传统的 MSK 方案来说,虽然降低了一定的频带利用率,但带来的优势是降低发射机的复杂度,并且由于是串行方式,提高了系统的稳定性,同时该信号还具备传统 MSK 信号相位连续的特点。

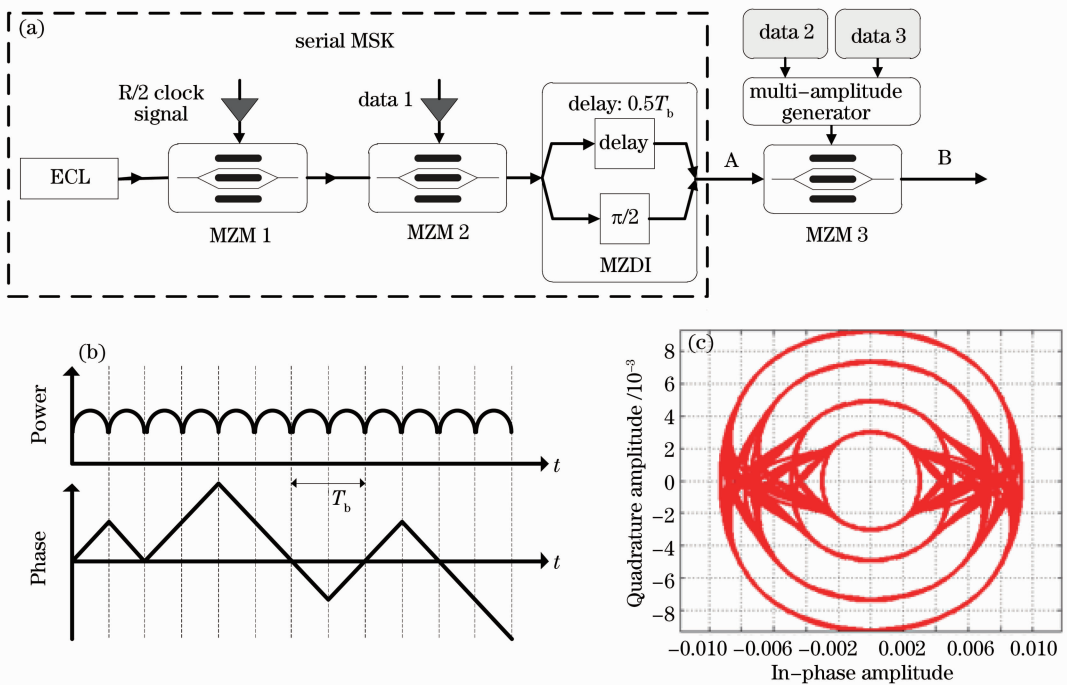


图 1 (a)基于串行 MSK 调制的 8 进制信号发射机; (b)产生的串行 MSK 信号幅度与相移变化示意图; (c)产生的 8 进制信号的轨迹图

Fig. 1 (a) Octal signal transmitter based on serial MSK modulation; (b) amplitude and phase shift of the generated serial MSK signal; (c) trajectory of the generated octal signal

为了进一步利用信号频带,提高调制的频谱效率,因而将对 SMSK 信号再进行多维多阶调制。将在该基于串行结构的 SMSK 信号上进行 2 阶幅度调制,发射机结构如图 1(a)所示。产生的连续相位

调制信号耦合进入第三个 MZM,利用一个四电平的电信号驱动 MZM3,产生 8 进制 (3 bit/ baud) 2ASK-SMSK 调制信号。图 1(c)所示为产生的 8 进制信号的轨迹图,可以发现信号在相位是连续的,

幅度上的变化说明信号受到了 2 阶幅度调制。

2.2 调制原理

该部分将理论推导串行 MSK 方案的产生原理。MZM 的传输方程为

$$T_E = \frac{1}{2} \{ \exp(j\phi_1) + \exp[j(\phi_2 + \phi)] \}, \quad (1)$$

式中 ϕ_1, ϕ_2 分别是 MZM 上下臂驱动信号引起的相位变化, ϕ 是由偏置电压引起的光相移。假设 MZM 工作在推挽方式下, 则(1)式可以变为

$$T_E = \frac{1}{2} \{ \exp(j\phi_1 + \phi) + \exp[-j(\phi_1 + \phi)] \} = \cos(\phi_1 + \phi). \quad (2)$$

假设理想的输入光场表达式为 $S = A \exp(j2\pi f_0 t)$, 输入的 MZM 驱动电信号表达式为

$v = \frac{V_\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2T_b} t\right)$, 输入的调制比特信号表达式为 $u = V_\pi a(t)$, 这里 A 表示光信号幅度, f_0 为激光器发射频率, V_π 是在 MZM 一个臂上引起 π 相位变化的电压大小, $a(t)$ 为承载的数字传输信号。

在串行 SMSK 方案中, MZM1 的偏置点设置在调制器的传输零点处, MZM2 的偏置点设置在调制器的传输最大点处, 因而从激光器出射的光波经过 MZM1 之后的表达式为

$$E_{\text{out1}} = A \exp(j2\pi f_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right) + \frac{\pi}{2}\right], \quad (3)$$

经过 MZM2 之后的表达式为

$$E_{\text{out2}} = A \exp(j2\pi f_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right) + \frac{\pi}{2}\right] \cos[\pi a(t)]. \quad (4)$$

经过 MZDI 之后表达式为

$$E_{\text{serial}} = \frac{\sqrt{2}}{2} A \exp(j2\pi f_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right) + \frac{\pi}{2}\right] \cos[\pi a(t)] + \frac{\sqrt{2}}{2} A \exp(j2\pi f_0 t) \times \cos\left\{\frac{\pi}{2} \sin\left[\frac{\pi}{T_b} \left(t - \frac{T_b}{2}\right)\right] + \frac{\pi}{2}\right\} \cos\left[\pi a\left(t - \frac{T_b}{2}\right)\right] \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) = \frac{\sqrt{2}}{2} A \exp(j2\pi f_0 t) \left\{ -\sin\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right] \cos[\pi a(t)] + j \sin\left[\frac{\pi}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right] \cos\left[\pi a\left(t - \frac{T_b}{2}\right)\right] \right\}. \quad (5)$$

由于输入的数据信号 $a(t)$ 有两个幅度, 分别代表比特“0”和“1”, 因此 $\cos[\pi b(t)] \cos[\pi a(t)]$ 等于 1 或者 -1, 从(5)式可以得到输出光信号功率表达式为

$$P = E_{\text{serial}} E_{\text{serial}}^* = \frac{1}{2} A^2 \left\{ \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right] + \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right] \right\}. \quad (6)$$

利用三角函数展开和雅可比-安格尔恒等式并忽略六阶贝塞尔量, (6)式可变为

$$P = \frac{1}{4} A^2 \left\{ 2 - \left[J_0(\pi) + 2J_2(\pi) \cos\left(\frac{2\pi}{T_b} t\right) + 2J_4(\pi) \cos\left(\frac{4\pi}{T_b} t\right) + \dots \right] - \left[J_0(\pi) - 2J_2(\pi) \cos\left(\frac{2\pi}{T_b} t\right) + 2J_4(\pi) \cos\left(\frac{4\pi}{T_b} t\right) + \dots \right] \right\} \approx \frac{1}{2} A^2 \left[1 - 2J_4(\pi) \cos\left(\frac{4\pi}{T_b} t\right) \right]. \quad (7)$$

输出信号的相位表达式如下:

$$\tan \varphi = - \frac{A \exp(j2\pi f_0 t) \sin\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right] \cos\left[\pi a\left(t - \frac{T_b}{2}\right)\right]}{A \exp(j2\pi f_0 t) \sin\left[\frac{\pi}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right] \cos[\pi a(t)]}. \quad (8)$$

(8)式可以化简为

$$\tan \varphi = \pm \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2} \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{2} \cos\left(\frac{\pi}{T_b} t\right)\right]}. \quad (9)$$

从(7)式可以看出, 由于四阶贝塞尔函数值较小, 产生的 SMSK 信号幅度为一个常量加上一个很小的变化量。从(9)式可以得到该信号相位是连续

的, 如图 1(b)所示。

然后对 SMSK 信号上再进行 2 阶幅度调制, 产生 8 进制 2ASK-SMSK 调制信号。

3 仿真及结果分析

为了分析 2 节提到的 8 进制 SMSK 调制信号的传输特性, 基于通用的商业软件 VPI 按图 2 所示

进行了系统搭建和仿真。仿真基本参数如表 1 所示,为了更好的分析,将在相同仿真环境下,比较另外两种 8 进制的调制方式 2ASK-DPSK 和 ASK-DQPSK。在仿真系统中,设定的系统码元速率为 40 Gbaud/s,则对于 8 进制系统来说,其传输速率为

120 Gb/s。为了获得各种方案的最优性能,各种方案用于在相位调制之后的幅度调制的驱动电平均进行了优化。在接收机端,对这三种方案均进行相干解调。

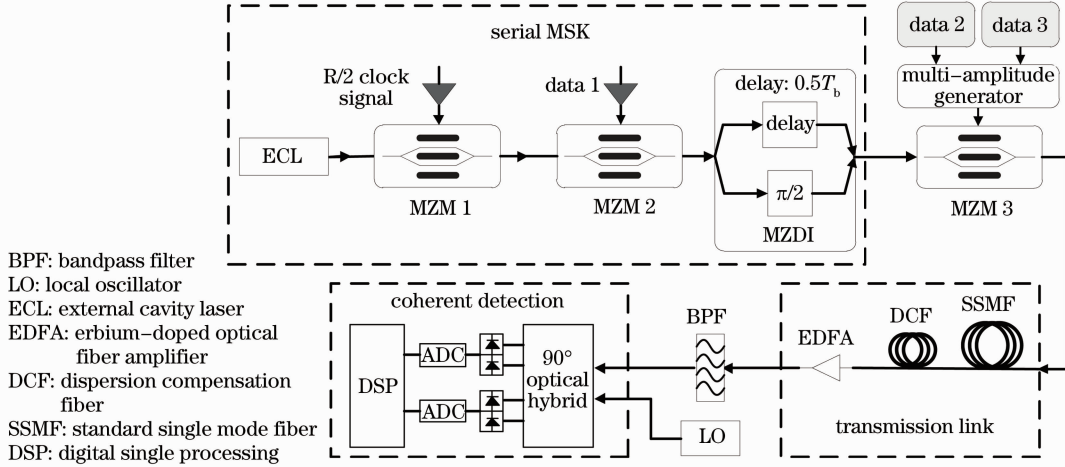


图 2 8 进制 2ASK-SMSK 信号传输系统框图

Fig. 2 Block diagram of octal 2ASK-SMSK transmission system

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Category	Value
Number of bits	1024
Dispersion D of SSMF / [ps/(nm·km)]	16
Dispersion D of DCF / [ps/(nm·km)]	-100
Loss coefficient of SSMF / (dB/km)	0.2
Nonlinear refractive index of SSMF / (m ² /W)	2.6×10^{-20}
Effective area of SSMF / μm^2	80
Fiber span	50 km SSMF+8 km DCF
Symbol rate / (Gbaud/s)	40
Amplification scheme	EDFA
Laser frequency / THz	193.1

3.1 频谱分析

图 3 给出了三种调制方式的频谱图。为了较好的分析其频带特性,在仿真中加入了频率分辨率的限制,其分辨率为 0.01 nm。可以看出,ASK-DQPSK 与 2ASK-DPSK 方案的频谱接近,但 ASK-DQPSK 方案能量较为集中在主瓣,因而衰落稍快。对于本文提出的 2ASK-SMSK 方案,可以发现其频谱具有不对称性,其主要原因是在发射机中 MZDI 模块既具有形成连续相位的功能,也具有梳状滤波的功能,其波长衰落点由 MZDI 上下臂延时与相移决定。在前面部分提到该 SMSK 方案近似与 MSK 方案,从其频谱也可以看出,与 MSK 方案一样,频谱能量集中,并且具有较快的衰落。

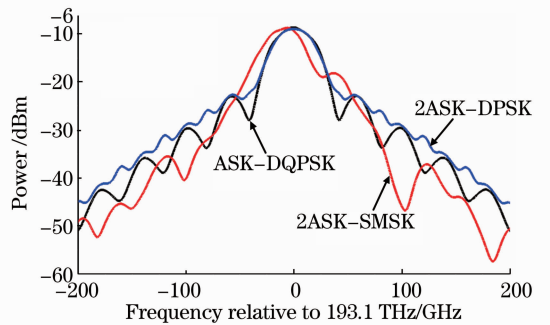


图 3 三种 8 进制方案频谱图

Fig. 3 Spectra of three octal modulation schemes

3.2 残留色散容限

在仿真中,为了评估三种方案的残留色散容限,将传输距离固定为一个环路,改变色散补偿光纤的

色散系数来实现不同的残留色散。同时将入纤功率降低到 0.5 mW，从而使得光纤非线性的影响可以忽略不计。

图 4 给出了三种调制方式的残留色散容限图。在仿真中当残留色散增加 18 ps/nm 以上或降低到 -20 ps/nm 以下时，在误码率 R_{BE} 等于 10^{-3} 时功率代价急剧增大。从变化趋势中可以看出 ASK-DQPSK 方案具有最好的残留色散容限，而对于其它两种调制方案，在正残留色散和负残留处各有优势。这主要是由于 2ASK-SMSK 方案由于滤波带来的频谱不对称性导致的正负残留色散容限不同。

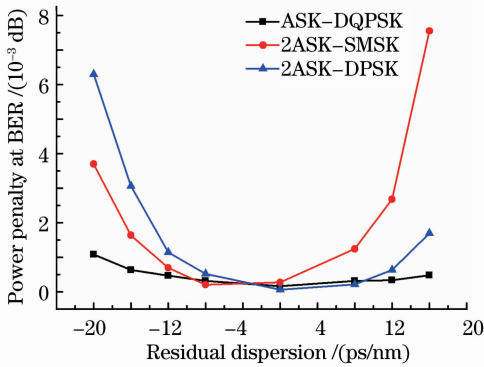


图 4 三种方案对残留色散容限图

Fig. 4 Residual dispersion tolerance in different schemes

3.3 SPM

为了分析三种方案的非线性的容限，将传输距离固定为 4 个环路，共 350 km，改变入纤功率，从而估测三种方案对 SPM 的容限。整个传输链路中每个环路色散完全补偿，并且利用掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行功率补偿。

图 5 给出了三种调制方式的对 SPM 容限图，可以发现 2ASK-DPSK 具有最优的对 SPM 的容限，而 ASK-DQPSK 的容限最差，这是因为由于功率变

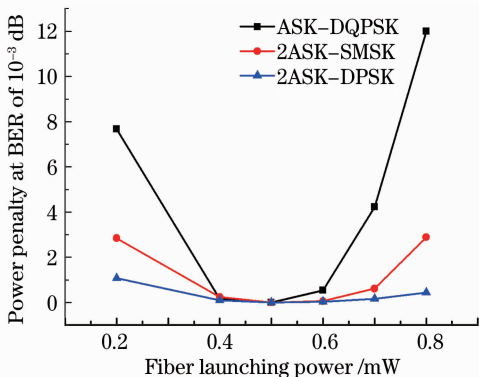


图 5 三种方案对 SPM 容限图

Fig. 5 SPM tolerance in different schemes

化带来的自相位调制对于 DQPSK 相位的影响更大。还可以发现，三种方案整体对 SPM 的容限并不高，当功率达到 0.8 mW 时，就会引起较大的功率代价，主要原因是三种方案均进行了幅度调制，功率变化较快，在入纤功率升高时，带来的自相位调制对信号产生的影响较大。

3.4 滤波效应

由于网络传输系统中，信号的传输带宽是受限的，受到各种有源无源光器件的影响，了解信号对于滤波效应的容限是必要的。在仿真中，传输链路为 350 km，入纤功率为 0.5 mW，以降低光纤非线性的影响，利用 EDFA 补偿功率衰减，并且链路进行完全的色散补偿。通过调节接收机端滤波器的带宽，分析滤波带宽对三种方案的影响。

从图 6 可以看出，ASK-DQPSK 方案具有较好的滤波容限，因为其信号频谱的能量更加集中在主瓣，边带衰落较快，而 2ASK-DPSK 的滤波容限不如 2ASK-SMSK，这是因为其频谱边带衰落比 2ASK-SMSK 的缓慢。

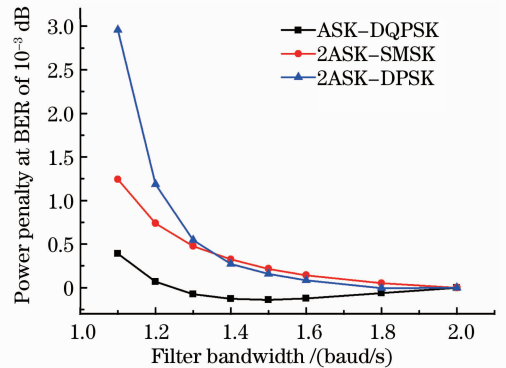


图 6 滤波器带宽对三种方案的影响

Fig. 6 Effect of filter bandwidth in different schemes

3.5 传输 BER 特性

最后，将分析三种方案的传输误码率特性。在仿真中，传输链路为 4 个环路共 350 km，入纤功率为 0.5 mW，以降低光纤非线性的影响，利用 EDFA 补偿功率衰减，并且链路进行完全的色散补偿。由于传输比特速率为 120 Gb/s，故将在 R_{BE} 等于 10^{-6} 处比较各方案的性能。在图 7 给出了背靠背 (BTB) 传输和经过光纤传输链路传输的 R_{BE} 曲线，可以发现在 BTB 传输方式下，2ASK-DPSK 性能最优 (如方形符号所示)，而另外两种方案性能接近，而当经过 350 km 光纤传输链路后，ASK-DQPSK 方案的 R_{BE} 特性严重劣化 (如圆形符号所示)，而本文提出的 2ASK-SMSK 方案在误码率 R_{BE} 等于 10^{-6} 处有 4 dB

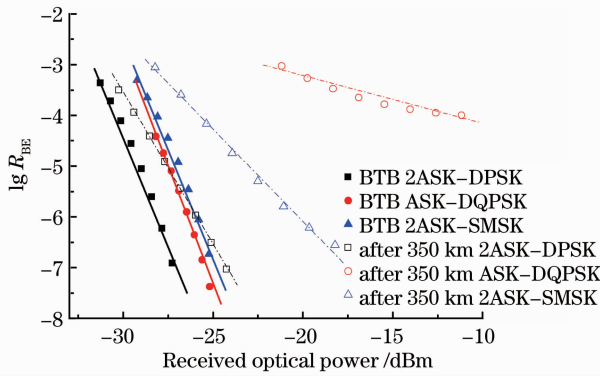


图7 三种8进制方案的误码率特性

Fig. 7 BER performance of three octal schemes

的劣化(如三角符号所示)。

4 结 论

提出了一种串行改进的MSK调制方案,产生的信号具有相位连续,频带能量集中且存在非对称特性,每码元时间有两次 $\pi/2$ 相移,具备传统MSK信号的特点,由于发射机结构为串行,降低了系统实现的复杂度并提高了发射机的稳定性。同时将该串行调制方式应用于多维多阶调制中,产生了8进制2ASK-SMSK信号,并与同等条件下其他8进制调制方式进行了比较,与其他两种8进制调制方案2ASK-DPSK和ASK-DQPSK相比,发现这三种方案在残留色散容限,SPM容限和对滤波器带宽的容限方面性能各有优劣,本文提出的方案在各种性能分析方面均具有适中的性能。最后仿真实现了经过350 km光纤的120 Gb/s的数据传输,相对于背靠背传输,在误码率为 10^{-6} 处,接收机性能有4 dB的劣化。

参 考 文 献

- Li Tao, Jiangbo Zhu, Junwen Zhang *et al.*. A modulation scheme for 100 Gb/s modified minimum-shift keying format based on imbalanced bias in IQ components [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2011, **17**(6): 601~607
- Zou Shumin, Shao Yufeng, Zheng Xi *et al.*. Study on generation of all-optical orthogonal frequency division multiplexing signals based multi-tones modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706004
- 邹书敏, 邵宇丰, 郑曦等. 基于多边带调制产生全光正交频分复用信号的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706004
- Zhang Junwen, Shao Yufeng, Fang Wuliang *et al.*. Research of single carrier frequency domain equalization based on single sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1971~1976

- 张俊文, 邵宇丰, 方武良等. 基于单边带调制单载波频域均衡技术的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1971~1976
- M. Ohm, J. Speidel. Optical minimum-shift keying with direct detection (MSK/DD) [C]. *SPIE*, 2004, **5281**: 150~161
- Jinyu Mo, Yang Jing Wen, Yixin Wang *et al.*. Externally modulated optical minimum shift keying format [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(10): 3151~3160
- Le Nguyen Binh, Thanh Liem Huynh. Single and dual-Level minimum shift keying optical transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(5): 522~537
- Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Akito Chiba *et al.*. Optical MSK transmitter using a monolithically integrated quad Mach-Zehnder IQ modulator [C]. *ECOC*, 2009, 5. 2. 1
- J. Mo, Y. J. Wen, Y. Dong *et al.*. Optical minimum-shift keying format and its dispersion tolerance [C]. *OFC*, 2005, JThB12
- Guo-Wei Lu, Takahide Sakamoto, Akito Chiba *et al.*. 80-Gb/s optical MSK generation using a monolithically integrated quad-Mach-Zehnder IQ modulator [C]. *OFC*, 2010, OWN5
- Yi Dong, Peigang Hu, Yikai Su *et al.*. Generation of 16-Gb/s MSK signal using a single 10-GHz SSB modulator and simplified encoder/decoder [C]. *OFC*, 2006, JThB40
- Nanchi, Wuliang Fang, Yufeng Shao *et al.*. High speed optical transmission utilizing constant envelope modulation based on frequency shift keying and minimum-shift keying [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 837~843
- Bo Huang, Nan Chi, Yufeng Shao *et al.*. Analysis of smooth phase modulation formats compared with conventional QPSK and BPSK using coherent detection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 856~858
- Junwen Zhang, Yufeng Shao, Wuliang Fang *et al.*. Novel orthogonal modulation format DRZ-FSK/DPSK for high-speed long-haul optical communication [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 852~855
- Michael Ohm, Joachim Speidel. Quaternary optical ASK-DPSK and receivers with direct detection [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 159~161
- Kenro Sekine, Nobuhiko Kikuchi, Shinya Sasaki. Modulation parameter tolerance for 8- and 16-APSK (amplitude- and phase-shift keying) signals [C]. *OFC*, 2005, JThB13
- K. Sekine, N. Kikuchi, S. Sasaki. 40 Gb/s, 16-ary (4 bit/symbol) optical modulation/demodulation scheme [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(7): 430~432
- Jianjun Yu, Xiang Zhou, Mingfang Huang *et al.*. 17 Tb/s (161×114 Gb/s) PolMux-RZ-8PSK transmission over 662 km of ultra-low loss fiber using C-band EDFA amplification and digital coherent detection [C]. *ECOC*, 2008, Th. 3. E. 2
- Jianjun Yu, Xiang Zhou. Novel schemes to generate multi-level modulation formats for ultra-capacity coherent detection transmission systems [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 823~830
- Feng Yong, Wen He, Zhang Hanyi. Digital optical coherent detection of polarization-multiplexed differential phase shift keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1268~1273
- 冯勇, 闻和, 张汉一. 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1268~1273

栏目编辑: 谢婧