

基于光子晶体光纤的相位再生器的设计及优化^{*}

席丽霞[†] 唐先锋 王少康 张晓光

(北京邮电大学信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876)

(2008 年 11 月 18 日收到, 2008 年 11 月 30 日收到修改稿)

采用光子晶体光纤构成一个 Sagnac 环, 在锁相本地振荡抽运源的驱动下, 形成一个相位再生器, 实现对差分相移键控调制信号的相位和幅度再生. 理论推导了入射光信号经过相位再生器后的光场分布, 讨论了不同入射信号光功率下, 抽运光与信号光的相位差以及光子晶体光纤长度对信号功率增益的影响, 给出了相位再生器的最优参数, 数值模拟了信号再生前后的相位分布、强度分布及误码率, 取得了很好的再生效果.

关键词: 光通信, 相位再生, 光子晶体, 差分相移键控信号

PACC: 4230Q, 4280S, 4265, 4225K

1. 引 言

近几年来, 在高速光通信系统中, 差分相移键控 (DPSK) 码因其优异的性能受到了广泛关注, 被认为是一种很有发展前途的调制格式^[1,2].

DPSK 是利用相邻码载波间的相位差来传递信息的, 相邻码载波相位差为 π 时表示二进制符号“1”, 相位差为 0 时表示二进制符号“0”, 反之亦然. 由于光信号的相位不能被接收器直接测量, 采用如图 1 所示的接收装置, 先经过两臂时延相差一个比特周期的马赫-曾德尔干涉仪对信号解调, 即将相位信息转换为强度信息, 再用平衡接收机接收. 假定接收端部分的各个元件均无损耗, 且光电二极管的响应度为 1, 则平衡接收机输出的电流可表示为

$$\begin{aligned} u(t) &= |E_p(t)|^2 - |E_m(t)|^2 \\ &= \frac{1}{4} |E(t-T) - E(t)|^2 \\ &\quad - \frac{1}{4} |E(t-T) + E(t)|^2. \quad (1) \end{aligned}$$

在没有任何噪声和损耗的理想情况下, 相邻码元间的相位差将严格为 0 或者 π , 如果将光强归一化, $u(t)$ 将得到或为 +1, 或为 -1 的值. 然而, 信号在传输的过程中会受到各种因素的影响而畸变, 导致误码产生.

对于 DPSK 系统, 除了时间抖动对它产生影响

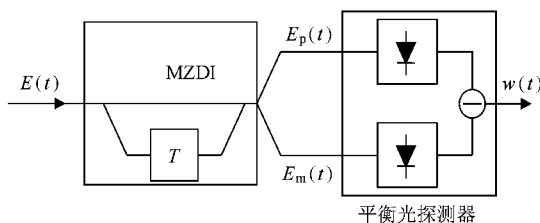


图 1 DPSK 接收机

外, 更主要的局限来源于线性的和非线性的相位噪声. 线性相位噪声主要由激光器本身的相位抖动以及光放大器中自发辐射的随机相位分布引起. 对于非线性相位噪声, 在单信道传输系统中, 主要通过自相位调制将放大器产生的幅度噪声及光纤色散引起的波形畸变转变成非线性相位噪声; 对于波分复用系统, 则主要通过交叉相位调制和四波混频将放大器产生的幅度噪声及色散引起的波形畸变转变成非线性的相位噪声. 实验已经证明, 当相位噪声中的非线性相位噪声占优势时, DPSK 信号平衡解调的接收灵敏度优势将会丧失^[3]. 降低非线性相位噪声的影响, 实现 DPSK 的相位再生十分重要^[4-8]. 文献[6-8]是用基于高非线性光纤的相位敏感放大器实现信号的相位再生. 相位敏感放大器的结构一般为干涉仪型.

考虑到光子晶体光纤的高非线性特性, 本文利用光子晶体光纤和 50:50 耦合器构成的 Sagnac 环作

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 2009AA01Z224)资助的课题.

[†] 通信联系人. E-mail: xilixia@263.net, xilixia@gmail.com

为相位再生器,理论推导了入射光信号经过相位再生器后的光场分布,讨论了不同入射信号光功率下,抽运光与信号光的相位差以及光子晶体光纤长度对信号功率增益的影响,对相位再生器进行参数优化,数值模拟了信号相位再生前后的相位分布、强度分布及误码率,证明了相位再生器的良好再生效果.

2. 理论分析

为了使再生器在实验中更容易实现,我们采用 50:50 的耦合器和光子晶体光纤构成一个 Sagnac 环形干涉仪,在锁相本地振荡抽运源的驱动下,形成一个相位再生器,如图 2 所示,其中 OC 为光环行器.下面对相位再生器实现相位及幅度再生的理论进行推导.

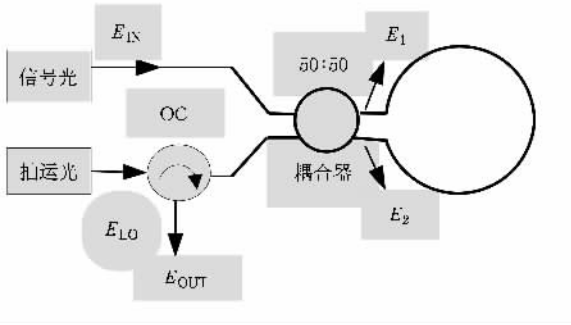


图 2 相位再生器结构图

假定信号光和抽运光具有相同的振动方向和频率,用 E_{IN} 和 E_{LO} 分别表示输入的信号光和抽运光.经耦合器后形成传播方向相反的两束光 E_1 和 E_2 ,其表达式为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{LO} + jE_{IN}),$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{IN} + jE_{LO}),$$

经光子晶体光纤后产生不同的相移, ϕ_1 和 ϕ_2 分别表示沿顺时针方向和逆时针方向传播的光产生的非线性相移,则有

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \gamma L (E_1 E_1^*) \\ &= \frac{\gamma L}{2} (E_{LO} + jE_{IN})(E_{LO}^* - jE_{IN}^*), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_2 &= \gamma L (E_2 E_2^*) \\ &= \frac{\gamma L}{2} (E_{IN} + jE_{LO})(E_{IN}^* - jE_{LO}^*), \quad (3) \end{aligned}$$

其中, $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_2$ 为光子晶体光纤的非线性系数, L 为光子晶体光纤的长度.经相位再生器后输出的信号光 E_{OUT} 的表达式为

$$\begin{aligned} E_{OUT} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(E_1 e^{j\phi_1} + jE_2 e^{j\phi_2}) \\ &= \frac{E_{LO}}{2}(e^{j\phi_1} - e^{j\phi_2}) + j\frac{E_{IN}}{2}(e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2}). \quad (4) \end{aligned}$$

将(2)和(3)式代入(4)式并整理得

$$E_{OUT} = e^{j\phi_0}(jE_{LO}\sin\phi_{nl} + jE_{IN}\cos\phi_{nl}), \quad (5)$$

其中

$$\phi_0 = \frac{\gamma L}{2}(|E_{LO}|^2 + |E_{IN}|^2),$$

$$\phi_{nl} = \gamma L |E_{LO}| |E_{IN}| \sin(\delta)$$

为非线性相移差, $\delta = \phi_{LO} - \phi_{IN}$ 为抽运光与信号光的输入相位差.经相位再生器后输出信号光功率为

$$\begin{aligned} P_{OUT} &= E_{OUT} E_{OUT}^* = P_{IN} \cos^2 \phi_{nl} + P_{LO} \sin^2 \phi_{nl} \\ &\quad + \sqrt{P_{IN} P_{LO}} \sin(2\phi_{nl}) \cos \delta. \quad (6) \end{aligned}$$

从(5)和(6)式可以看出,经相位再生器后输出信号的光功率不仅与信号光和抽运光的光功率有关,还取决于两者的输入相位差,即信号光和抽运光之间的耦合是相位敏感的.因此,可以通过选取适当的入射光功率、抽运光功率、入射光与抽运光的相位差以及光子晶体光纤的长度,使输出光功率最大,以实现信号再生的目的.

3. 数值仿真

假定输入的抽运光功率 $P_{LO} = 20$ mW,考虑入射光功率分别为 0.2 2 4 6 8 和 20 mW 情况下,功率增益随入射光与抽运光的输入相位差的变化关系,如图 3 所示,其中光子晶体光纤的非线性系数 $\gamma = 11$ W⁻¹ km⁻¹,光子晶体长度取 $L = 12$ km.可以看出,对不同入射光功率,功率增益随输入相位差的变化是不同的,随着入射光功率的增大,增益饱和效应越来越明显,对于入射光功率为 4 6 和 8 mW 时,虽然功率增益不是太大,但对于一定范围内的输入相位差却是比较平坦的,这对于以后的实验实现是很有利的,因此我们把入射信号光功率的范围限定在 4—8 mW.

下面讨论初始功率分别为 4 6 和 8 mW 的信号

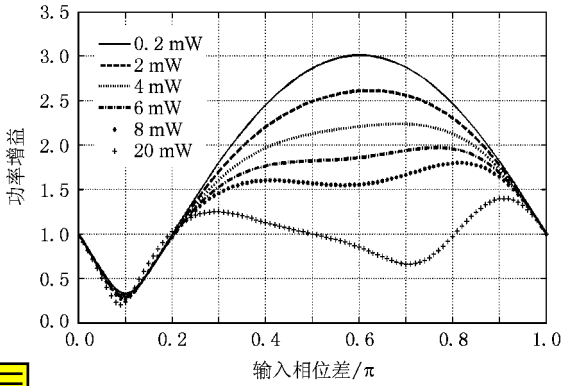


图 3 功率增益与输入相位差的关系曲线

mW, $P_{LO} = 20 \text{ mW}$, $\delta = 0.6\pi$, $\gamma = 11 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$.

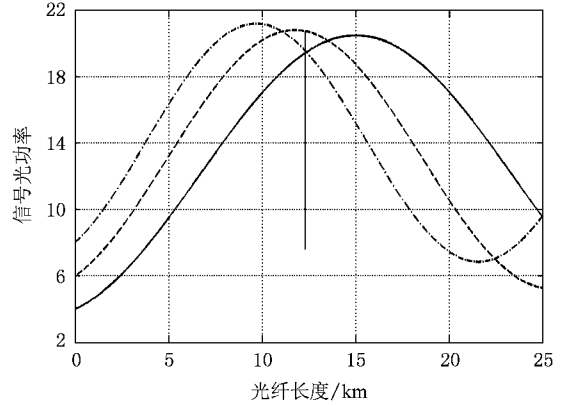


图 4 信号光功率与光纤长度的关系

光功率随光纤传输长度之间的对应关系,如图 4 所示.由图可知,当光子晶体光纤长度位于 11—13 km 时,初始入射光功率为 4—8 mW 的信号光输出的功率都在 18 mW 以上, $P_{IN} = 6 \text{ mW}$ 的信号光输出功率最大,对于 $L = 12 \text{ km}$ 时, $P_{IN} = 4 \text{ mW}$ 和 $P_{IN} = 8 \text{ mW}$ 的信号光输出的光功率相同,并且与 $P_{IN} = 6 \text{ mW}$ 信号光的输出功率相差最小.因此,选择 $L = 12 \text{ km}$ 和 $P_{IN} = 6 \text{ mW}$ 为最佳光纤长度和最佳入射光功率.

根据上面的讨论,给出我们所设计的相位敏感放大器的最优参数,它们分别为 $L = 12 \text{ km}$, $P_{IN} = 6$

下面通过数值仿真验证相位再生器的再生效果.我们采用一个非常简单的模型来量化加在 DPSK 信号中的噪声,添加噪声后的方程如下所示:

$$E_{\text{after}} = E_{\text{before}}(1 + N_A)e^{jN_P}, \quad (7)$$

其中, N_A 表示附加的振幅噪声的比例,其取值在 ± 0.2 范围内随机变化, N_P 描述的是相位噪声,取值范围是 $\pm \pi/4$.图 5 为添加噪声后的振幅与相位分布的极坐标图以及接收机输出电流的柱状统计分布图.

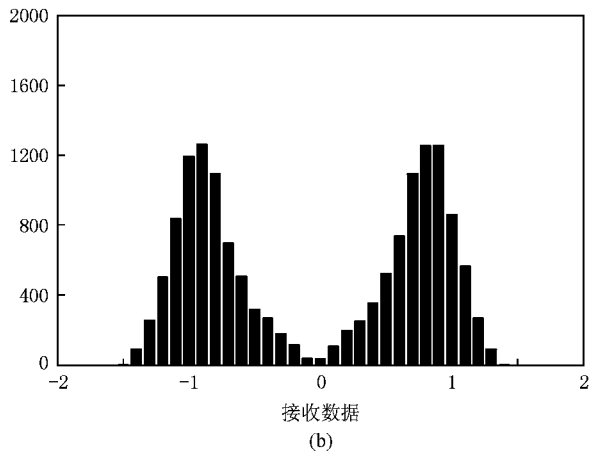
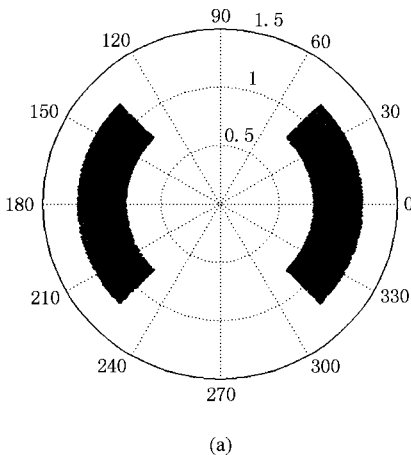


图 5 添加噪声后的 DPSK 信号 (a) 振幅与相位分布 (b) 接收机输出信号柱状统计图

利用前面优化后的相位再生器对添加噪声后的信号再生,再生后的振幅与相位分布的极坐标图以及接收机输出电流的柱状统计分布如图 6 所示,可以看出,再生后的信号相位基本上集中在了 0 和 π

附近,平衡接收机输出电流则集中在 ± 1 附近.我们还数值仿真了不同光信噪比下再生前后的误码率,如图 7 所示,再生后误码率至少降低了 15 个量级,可见再生效果良好.

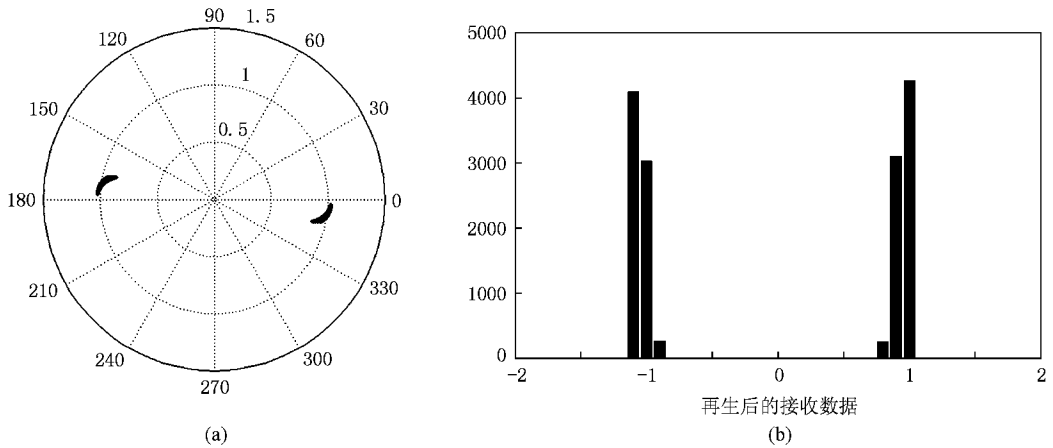


图 6 再生后的 DPSK 信号 (a) 振幅与相位分布 (b) 接收机输出信号柱状统计图

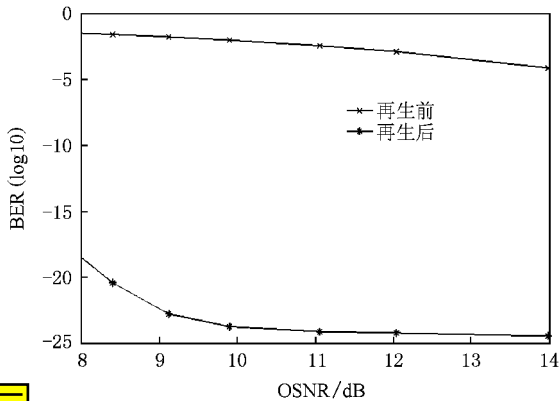


图 7 再生前后误码率的比较

4. 结 论

本文设计了基于光子晶体光纤的 Sagnac 环形相位再生器,该再生器结构简单,实验上很容易,解决了干涉仪型相位再生器两臂中高非线性光纤长度必须严格相等的实验实现难题;通过理论分析和数值仿真得到了相位再生器的最优参数,为相位再生器的实验实现提供了切实可行的参考数据,抽运光和信号光的相位差实验上可以通过锁相器实现,入射信号光和抽运光功率的控制可以通过可调谐衰减器实现,光子晶体光纤的非线性系数是根据商用的光子晶体光纤的参数来选择的;仿真实验证实再生效果良好,误码率至少可降低 15 个量级。

- [1] Zhao F, Fu M X, Lu Y Q, Liu S H 2007 *Chin. Phys.* **16** 11
- [2] Lin Y M, Liang R S, Lu Y Q, Lu H, Guo B H, Liu S H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3931 [in Chinese] [林一满、梁瑞生、路轶群、路洪、郭邦红、刘颂豪 2007 物理学报 **56** 3931]
- [3] Kim H, Gnauck A H. 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 320
- [4] Matsumoto M. 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1055
- [5] Jansen S L, van den Borne D, Khoe G D, de Waardt H, Monsalve

C C, Spalter S, Krummrich P M OFC2005, Th05, Anaheim CA.

- [6] Striegler A, Meissner M, Cvecek K, Sponsel K, Leuchs G, Schmauss B 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 639
- [7] Coussore K, Kim C, Li G 2004 *Opt. Lett.* **28** 2357
- [8] Coussore K, Kim I, Han Y, Kim C, Li G 2005 *Opt. Express* **13** 3945

Design and optimization of phase regenerator with photonic crystal fiber^{*}

Xi Li-Xia[†] Tang Xian-Feng Wang Shao-Kang Zhang Xiao-Guang

(*Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications (BUPT) , Ministry of Education ,
Institute of Information Photonics and Optical Communications , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876 , China*)

(Received 18 November 2008 ; revised manuscript received 30 November 2008)

Abstract

Amplification and simultaneous phase regeneration of differential phase-shift keying (DPSK) signals is demonstrated using a phase regenerator. Phase regeneration is achieved in a Sagnac fiber interferometer comprised of photonic crystal fiber operating in an un-depleted pump regime. The formula of signal after phase regenerator is derived. For different incident power of signal , the relations between signal-pump phase difference and signal gain are discussed , as well as the influence of fiber length on signal output intensity. The optimum parameters of the phase regenerator are given. The distributions of phase and intensities for both the non-regenerated and regenerated signals are simulated. Simulations show that nearly ideal regeneration can be achieved for the DPSK signals.

Keywords : optical communications , phase regeneration , photonic crystal fiber , differential phase-shift keying signal

PACC : 4230Q 4280S 4265 4225K

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA01Z224).

[†] Corresponding author. E-mail : xilixia@263.net , xilixia@gmail.com