

基于耦合双环阵列的二维相干光码分多址编解码器

吉 喆 贾大功 张海伟 张红霞 张德龙 刘铁根 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 可集成、易调谐的光编解码器是光码分多址(OCDMA)系统集成化的关键模块之一。基于耦合双环阵列提出了一种新型的光编解码器。该编解码器通过调谐双环下载端反射波长以及集成于总线的相移器的相位,实现了 OCDMA 系统的二维相干编解码。基于耦合模理论,建立了耦合双环阵列的传输矩阵方程。用于编解码器的双环半径分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $48\ \mu\text{m}$,阵列中四组双环的反射中心波长分别为 1535, 1535.2, 1535.4, 1535.6 nm, 信道宽度为 17 GHz, 反射谱 3 dB 带宽约为 0.14 nm, 信号基本上不会出现干扰,保证了用户发送和接收信号的准确性。相应的自相关峰值旁瓣比(P/W)约为 5, 互相关峰值比(P/C)约为 7, 可以容纳用户数为 96 个。

关键词 光通信;光码分多址;环形微腔;光编解码器;二维相干编解码

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0506002

Two-Dimensional Coherent Optical En/Decoder Based on Parallel-Cascaded Coupled Micro-Ring Reflector

Ji Zhe Jia Dagong Zhang Haiwei Zhang Hongxia Zhang Delong
Liu Tiegen Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract One of the key modules in the integrated optical code division multiple access (OCDMA) system is highly integrated, easily tuning optical en/decoder. Two-dimensional coherent optical en/decoder based on parallel-cascaded coupled micro-ring reflector is proposed. This device can enable simultaneously to tune the wavelength hopping of dual-ring down load end and the phase of intergrated phase shifter in the bus. According to the coupled mode theory, transfer matrix equations for this cascaded reflector are established. The radii for this dual-ring resonator are $50\ \mu\text{m}$ and $48\ \mu\text{m}$, respectively. The resonant central wavelengths for each reflector are 1535, 1535.2, 1535.4, 1535.6 nm. Each reflected spectrum has a 3 dB bandwidth of 0.14 nm with a channel spacing of 17 GHz, ensuring the accuracy of the transmitted and received signals. Correspondingly, the number of possible users is 96 with autocorrelation peak sidelobe ratio (P/W) about 5 and cross-correlation peak ratio (P/C) about 7.

Key words optical communications; optical code division multiple access; micro-ring resonator; optical en/decoder; two-dimensional coherent en/decoding

OCIS codes 060.1155; 060.2330; 060.4510; 130.3120

1 引言

二维光码分多址(OCDMA)系统由于采用二维地址码序列标识用户,使得光脉冲在时域上和空间

或频域上同时扩展,极大增加了系统用户数,显著提高了系统性能,得到了越来越多研究者的关注^[1-8]。但目前常用的二维 OCDMA 系统主要是以光纤光

收稿日期: 2013-10-22; **收到修改稿日期**: 2013-12-26

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806, 2014CB340103)、国家自然科学基金(61377077)、天津市科技支撑重点项目(11ZCKFSF00400)

作者简介: 吉 喆(1983—),女,博士研究生,主要从事集成光码分多址编/解码技术、光纤通信等方面的研究。

E-mail: jiyoyou1001@126.com

导师简介: 贾大功(1972—),男,博士,副教授,主要从事光通信、光纤传感网等方面的研究。

E-mail: dagongjia@tju.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S042011620S)

栅阵列为编解码器的利用光强信息进行编解码的非相干系统^[3-5], 体积较大, 难以小型化, 并且用户扩频序列之间不可避免地存在多址干扰。而应用于二维 OCDMA 的相干系统, 利用光的相干特性, 依靠光信号的相位变化进行编解码, 可以利用双极性码进行编码, 因而可以获得严格正交的扩频序列, 码间干扰大大减弱^[6-8]。

硅基光学微环谐振腔具有成本低、体积小(在微米量级)、品质因数高($10^4 - 10^8$)^[9-10]、损耗低(约 2 dB/cm)^[11] 的特点, 并且不需要用额外的腔面或光栅来提供光反馈, 十分有利于与其他光电子器件的集成, 易于调谐, 符合未来 OCDMA 编解码器小型化、低成本、易集成、可调谐的要求, 得到研究者的关注和研究^[12-15]。Agarwal 等^[12-13] 设计了利用 4 阶微环形谐振器阵列实现的频谱相位编码器, 但是该编解码方案仅适用于一维 OCDMA 系统, 限制了用户容量。Wang 等^[14] 提出并设计了一种利用等大双耦合环阵列的反射波长和相移器的相位进行二维相干编码方案。但是用于编码的反射谱与传输谱在同一总线上进行传输, 难免发生干扰, 并且需要额外的光学环形器进行光路控制, 限制了该结构的实际应用。基于以上几方面, 本文提出了一种基于双耦合微环形谐振腔阵列的二维相干 OCDMA 编码方案。按照双环带通滤波的特性, 利用下载端反射谱波长以及相移器的相位, 实现波长和相位的二维调谐。从实验仿真所得结果来看, 该结构既符合 OCDMA 对编解码器的性能要求, 同时将总线信号与反射信号分开, 降低了对系统额外器件的要求, 十分易于实用化。

2 耦合双环阵列理论分析

由双环组成的耦合结构如图 1(a) 所示, 它是由

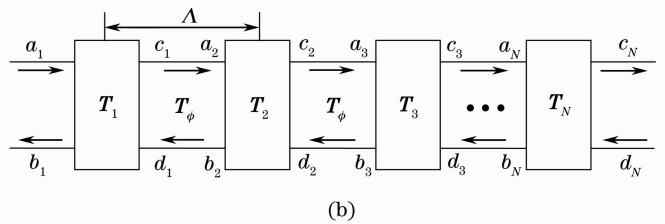
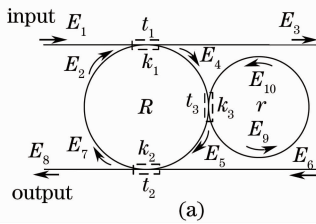


图 1 (a) 耦合双环示意图; (b) 耦合双环阵列示意图

Fig.1 (a) Schematic of the dual-microring resonator; (b) schematic of parallel-cascaded dual-ring resonator

作为编解码器的核心, 首先考虑双环阵列的传输矩阵方程。根据(1)式可以得到输入端 E_1 和上下载端 E_6 与输出端 E_3 和下载端 E_8 的传输方程

$$\begin{cases} E_3 = UE_1 + VE_6, \\ E_8 = VE_1 + U'E_6. \end{cases} \quad (2)$$

两根光波导与两个半径不等的微环组成, 这里大环与上下波导分别耦合, 小环只与大环发生环间耦合, 不与上下波导耦合。大环半径为 R , 小环半径为 r 。 E_1, E_3, E_6 和 E_8 分别代表输入端、传输端和上 / 下载端的光场复振幅; E_2, E_4, E_5, E_7, E_9 和 E_{10} 分别代表耦合进入大环和小环的光场复振幅, 箭头代表光的传播方向。在图 1(a) 中所示的三个耦合区域中(大环与上 / 下波导耦合区域, 两环之间的耦合区域), 传输系数分别为 t_1, t_2, t_3 , 对应的耦合系数分别为 k_1, k_2, k_3 。其中, k_1, k_2 均为直波导-环间耦合系数; k_3 为双环间的耦合系数。在耦合无损耗的情况下满足 $k_1^2 + t_1^2 = 1, k_2^2 + t_2^2 = 1$ 和 $k_3^2 + t_3^2 = 1$ 。假设无上载信号($E_6 = 0$) 根据耦合模理论, 可以得到各部分光场之间的传输关系为

$$\begin{cases} E_2 = E_7 \tau_{1,L/2} \exp(i\theta_{1,L/2}), \\ E_3 = t_1 E_1 + ik_1 E_2, \\ E_4 = ik_1 E_1 + t_1 E_2, \\ E_5 = t_3 E_4 \tau_{1,L/4} \exp(i\theta_{1,L/4}) + ik_3 E_{10}, \\ E_7 = t_2 E_5 \tau_{1,L/4} \exp(i\theta_{1,L/4}) + ik_2 E_6, \\ E_8 = ik_2 E_5 \tau_{1,L/4} \exp(i\theta_{1,L/4}) + t_2 E_6, \\ E_9 = ik_3 E_4 \tau_{1,L/4} \exp(i\theta_{1,L/4}) + t_3 E_{10}, \\ E_{10} = E_9 \tau_2 \exp(i\theta_2), \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\tau_{1,L/4}$ 和 $\tau_{1,L/2}$ 分别表示光经过大环 1/4 环长和 1/2 环长时的衰减因子; 相应的, $\theta_{1,L/4}, \theta_{1,L/2}, \theta_2$ 分别表示光在大环周长 1/4 长度处、1/2 长度处和经过小环后的相位变化。图 1(b) 为 N 组耦合双环结构的并联形式。两相邻列间的距离为 Λ , 该距离为毫米量级, 远大于双环与双环间由于倏逝场作用而发生耦合的距离(微米量级), 所以不考虑在传输过程中两相邻列之间微环的耦合。

由(2)式即可得到耦合双环输入端和输出端的传输

矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/U & -V/U \\ V/U & U' - V^2/U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{E}_6 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其传输矩阵即 $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1/U & -V/U \\ V/U & U' - V^2/U \end{bmatrix}$ 。其中 $U =$

E_3/E_1 为主信道输入端口至输出端口的复振幅传递函数, $U' = E_8/E_6$ 为主信道上载端口与下载端口的复振幅传递函数, $V = E_8/E_1$ 为主信道输入端口至下载信道输出端口的复振幅传递函数。结合(1)式可分别得到

$$\frac{E_8}{E_1} = \frac{-k_1 k_2 \tau_1^{1/2} \exp(i\theta_1/2) [t_3 - \tau_2 \exp(i\theta_2)]}{1 - t_3 \tau_2 \exp(i\theta_2) - t_1 t_2 \tau_1 \exp(i\theta_1) [t_3 - \tau_2 \exp(i\theta_2)]}, \quad (4)$$

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{t_1 [1 - t_3 \tau_2 \exp(i\theta_2)] - t_2 \tau_1 \exp(i\theta_1) [t_3 - \tau_2 \exp(i\theta_2)]}{1 - t_3 \tau_2 \exp(i\theta_2) - t_1 t_2 \tau_1 \exp(i\theta_1) [t_3 - \tau_2 \exp(i\theta_2)]}, \quad (5)$$

$$\frac{E_8}{E_6} = \frac{t_2 [1 - t_3 \tau_2 \exp(i\theta_2)] - t_1 \tau_1 \exp(i\theta_1) [t_3 - \tau_2 \exp(i\theta_2)]}{1 - t_3 \tau_2 \exp(i\theta_2) - t_1 t_2 \tau_1 \exp(i\theta_1) [t_3 - \tau_2 \exp(i\theta_2)]}. \quad (6)$$

直波导的传输常数为 β , 则传输距离 Λ 时, 相应直波

导的传输方程 \mathbf{T}_β 为 $\mathbf{T}_\beta = \begin{bmatrix} \exp(j\beta\Lambda) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta\Lambda) \end{bmatrix}$ 。

根据双环间的传输矩阵 \mathbf{T} 与直波导传输矩阵 \mathbf{T}_β 即可得到 N 列耦合双环阵列的传输方程

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{T}_\beta \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_\beta \cdots \mathbf{T}_N \begin{bmatrix} c_N \\ d_N \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据(7)式可以得到双环阵列的频域响应函数, 对其进行傅里叶逆变换后即可得到与其对应的时域响应函数。

3 耦合双环阵列编解码原理

利用双环阵列下载端反射波长以及集成于总线的相移器的相位实现二维(2D)相干编解码。其中, 双环反射波长 λ 可表示为 $\lambda = L_z n/m$, L_z 为光经过双环的路径长度, n 为耦合双环的有效折射率, m 为谐振级数。在相邻双环间的总线上集成一个相移器, 根据地址码改变反射谱的相位, 其中 π 相位用“ -1 ”表示, 0 相位用“ 1 ”表示。当一束具有 $\Delta\lambda$ 带宽的光波经过耦合双环时, 满足谐振条件的波长将被

反射并且通过相移器发生相位的反转, 其余的波长将继续往前传播, 并依次发生反射和相位调谐, 从而实现二维编码。波长和相位的精细调谐是通过微加热器实现的。通过调节微环上的热阻器件和热电冷却器可控制微环形谐振器的波长变化, 通过控制总线上的热光相移加热器可实现相位从 $0 \sim \pi$ 之间的连续调节。

结合图 2(a) 说明具体编解码过程。编码器由四组耦合双环组成。按照时间顺序, 跳频码对应波长分别为 $\{\lambda_2, \lambda_1, \lambda_4, \lambda_3\}$; 双极性码对应相位分别为 $\{0, \pi, 0, \pi\}$ 。当光脉冲耦合进入直波导后, t_1 时刻, 波长为 λ_2 , 相位为 0 , 调节热阻器件和热电冷却器, 使得第一组双环只能反射波长 λ_2 , 无相位改变, 如图 2(b) 所示。与此同时, 剩余的三个波长继续传输。 t_2 时刻, 第二组双环只能反射波长 λ_1 , 并且经过相移器后相位改变 π 。以此类推, λ_4, λ_3 以相同的方式反射, 相位分别改变 0 和 π 。在接收端, 将发射端用户的耦合双环阵列的位置反向排布, 相移器改变相反的相位, 其他参数不变, 便可构成匹配的解码器。

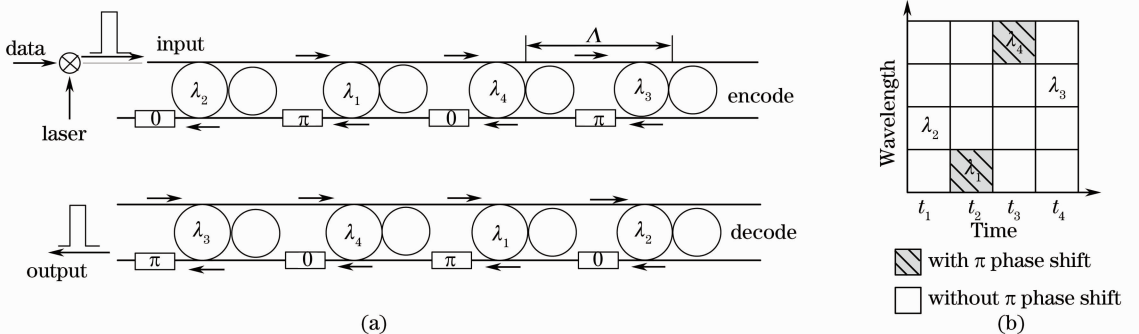


图 2 (a) 耦合双环阵列编解码原理示意图; (b) 二维地址码示意图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of proposed optical en/decoder; (b) 2D optical code

利用双环的反射峰进行波长跳频编码,要同时满足较高的反射峰和适中的 3 dB 带宽。当 k_1 与 k_2 不相等时,会造成双环传输中额外的损耗,这里选择 $k_1 = k_2$ 。根据(7)式,可以得到双环耦合系数 k_1, k_3 与反射峰强度、反射峰 3 dB 带宽的关系。图 3(a) 为 k_1 与反射峰归一化强度的关系。当 k_3 固定时,随着 k_1 的增大,双环反射峰的归一化强度逐渐增大。这主要是由于 k_1 的增大使得耦合进入双环的总光强增大,并且在 k_1 值相同的情况下,较小的 k_3 值可以保证更多的光进行反射,造成更高的反射峰强度。同理,当 k_1 相同时, k_3 的增大使得耦合进入小环的光强增大,因而反射峰强度逐渐减小。图 3(b) 为 k_3 与反射峰归一化强度的关系。 k_1, k_3 与 3 dB 带宽的趋

势与各自对于反射峰强度的趋势相同。此外对比图 3 中的(c)与(d)可以发现,在 k_1 和 k_3 相同的变化区间内, k_1 的变化对 3 dB 带宽的变化起主导作用。结合图 3(a)~(d)可以发现,对于双环的耦合系数来说,在 k_1 取得较大值,满足高入射光强的同时,选择小的 k_3 值既能满足高的反射峰强度,也能满足较好的 3 dB 带宽,保证编解码器的性能。选择 $k_1 = k_2 = 0.4, k_3 = 0.1$, 大环半径为 $50 \mu\text{m}$, 小环半径为 $48 \mu\text{m}$, 折射率均为 3, 此时反射峰归一化强度接近 1, 3 dB 带宽约为 0.14 nm , 自由光谱范围(FSR)约为 2.6 nm , 对应双环可调谐总的波长约为 5.2 nm 。四组双环阵列的反射中心波长分别 $1535, 1535.2, 1535.4, 1535.6 \text{ nm}$ 。

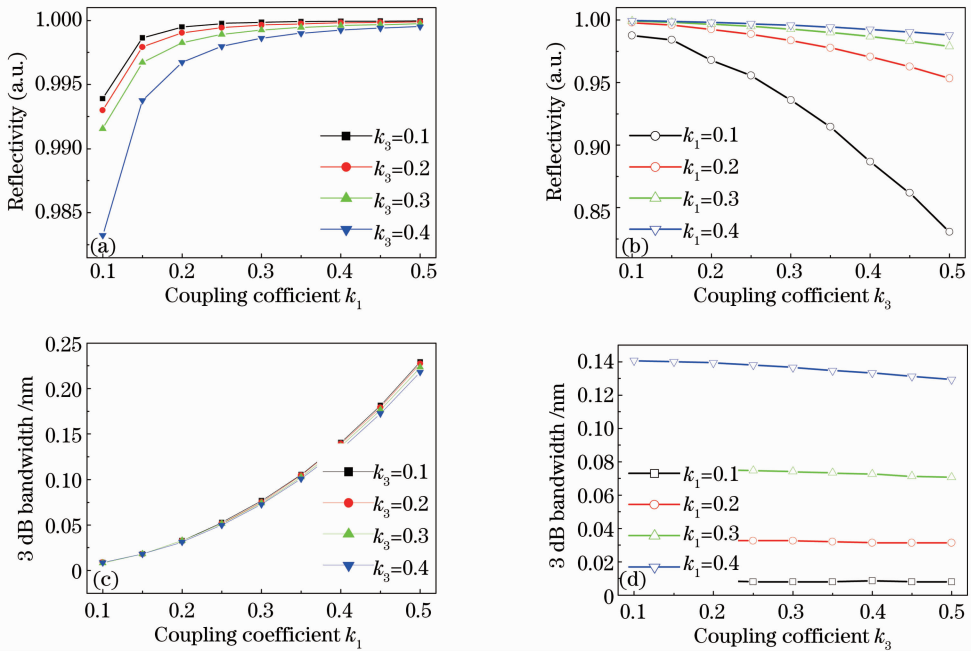


图 3 双环耦合系数与反射峰归一化强度和 3 dB 带宽的关系

Fig. 3 Peak reflectivity and 3 dB bandwidth versus coupling coefficient k_1 and k_3

利用(4)式和(7)式进行傅里叶逆变换得到双环阵列编码器/解码器的时域响应函数 $h(t)$ 和 $h^+(-t)$, 上标“+”表示复共轭。那么当光脉冲 $x(t)$ 耦合进入双环并被反射时,经过双环编码器后的信号可以表示为 $x(t) * h(t)$, 同理,经过双环阵列解码器最终的时域输出为 $x(t) * h(t) * h^+(-t)$, 这里“*”表示卷积。利用 Matlab 编程仿真可得到不同码字的编码器时域输出波形。仿真中, $\Lambda = 6 \text{ nm}$, 码片周期约为 $n\Lambda/c = 0.06 \text{ ns}$, 相应的码片速率约为 17 GHz , c 为光速。四组双环阵列的反射中心波长分别 $1535, 1535.2, 1535.4, 1535.6 \text{ nm}$ 。如图 4(a)和(c)是码

字为跳频码 $\{1, 2, 3, 4\}$ 和双极码 $\{1, 1, 1, 1\}$ 时,不同波长对应的编码器反射率以及编码器输出的时域波形。类似的,图 4(b)和(d)是码字为跳频码 $\{2, 1, 4, 3\}$ 和双极码 $\{1, -1, -1, 1\}$ 时,不同波长对应的编码器反射率和编码器输出的时域波形。图 4(a)和(b)中编码后频谱的抖动主要是由于相邻双环阵列间的反射串扰造成的,这可以通过适当增加相邻列间的距离得到改善。图 5(a)给出了双环阵列编解码器的归一化自相关和互相关仿真波形,从图中发现当解码阵列与编码阵列匹配时,输出尖锐的自相关峰;当二者不匹配时,输出类似于白噪声的互相关。

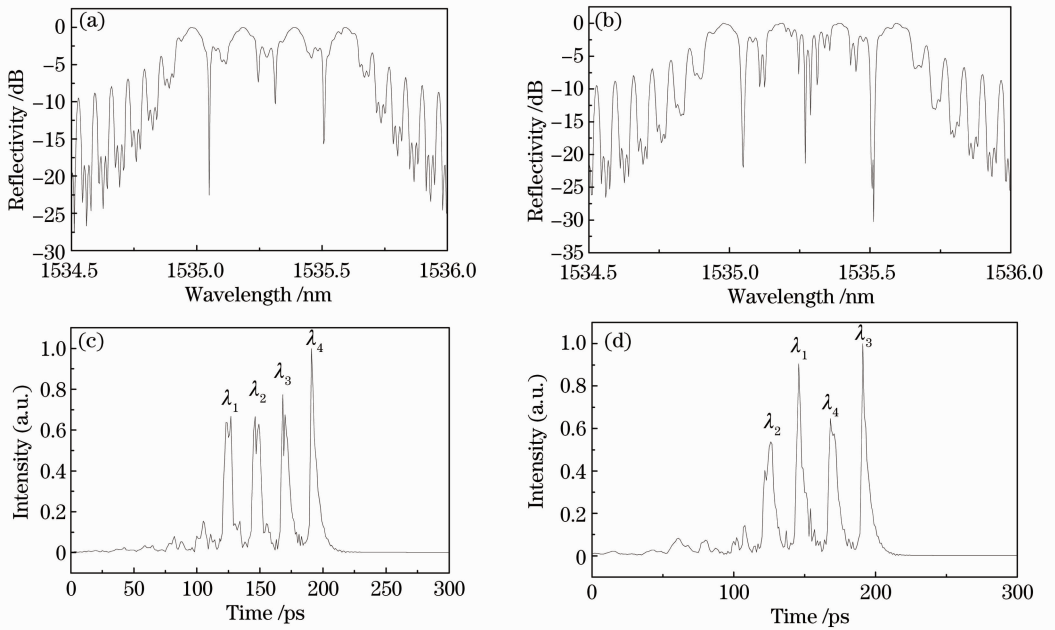


图 4 不同码字对应的编码后的光谱图与时域波形图。(a) $\{1,2,3,4\}$; (b) $\{1,1,1,1\}$; (c) $\{2,1,4,3\}$; (d) $\{1,-1,-1,1\}$

Fig. 4 Encoded spectra and corresponding encoded waveforms for different codes. (a) $\{1,2,3,4\}$; (b) $\{1,1,1,1\}$; (c) $\{2,1,4,3\}$; (d) $\{1,-1,-1,1\}$

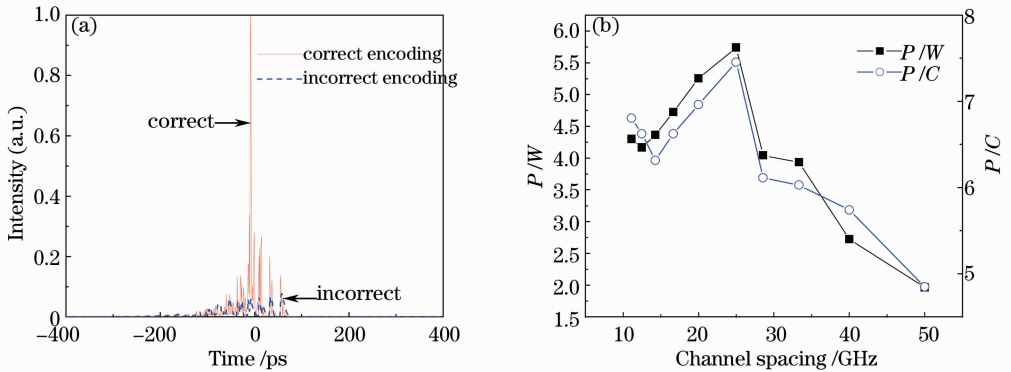


图 5 (a) 匹配与非匹配的光解码器波形图; (b) P/W 与 P/C 和不同信道宽度的关系

Fig. 5 (a) Correct/incorrect decoding signal; (b) P/W and P/C versus different channel spacings

编解码器性能的优劣可通过自相关峰值旁瓣比 P/W (自相关峰值和最大旁瓣的强度比) 和互相关峰值比 P/C (自相关峰值与互相关峰值的强度比) 进行评价。 P/W 越大, 则光码字越容易识别。 P/C 越大, 表明抗干扰能力越强。图 5(b) 给出了不同信道宽度下的自/互相关峰值比。可以发现较小的信道宽度和过大的信道宽度都会造成 P/W 与 P/C 下降。较小的信道宽度下, 反射波不能被有效利用, 增加了传输距离, 因而会造成较高的旁瓣; 过大的信道宽度下, 双环阵列之间的间距很窄, 使得地址码的长度不能被有效利用, 增加了信道间的串扰, 导致了 P/W 和 P/C 的下降。仿真中选择双环阵列的间距为 6 mm, 信道宽度约为 17 GHz, 此时 P/W 约为 5,

P/C 约为 7。

选择四组双环阵列进行二维编码时, 可以容纳的用户约为 $4! \times 2^3 / 2 = 96$, 当再增加一组双环进行编码时, 可容纳的用户将增加到 960。随着双环阵列个数的增加, 系统可以容纳的用户数呈 e 指数增长趋势。当双环阵列的个数分别为 7, 8, 9 时, 可以容纳用户分别为 $161280, 2.58048 \times 10^6, 6.4486 \times 10^7$ 。但是随着双环数量的增多, 需要减小环长来获得更大的 FSR 以覆盖更多的编码波长。

5 结 论

提出并设计了一种基于耦合双环阵列的二维编

解码器。根据耦合模传输理论,建立其传输矩阵方程。实验仿真结果表明,由四组双环阵列构成的编解码器,在反射峰值约为 1,3 dB 带宽约为 0.14 nm,信道宽度为 17 GHz 时,可以获得的 P/W 约为 5, P/C 约为 7,此时可以容纳用户 96 个,满足 OCDMA 系统对编解码性能的要求。并且随着双环组个数的增加,可容纳用户数呈 e 指数增长。当双环个数为 9 时,可以容纳用户为 9.28973×10^8 。该编解码方案具有可集成度高,体积小,成本低,用户容量易扩展的优点,符合 OCDMA 系统发展趋势对编解码器性能的要求。

参 考 文 献

- 1 Li Chuanqi, Zhou Xu, Song Biao, *et al.*. A new OCDMA passive access network and its performance analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 660–664.
李传起,周 谱,宋 标,等. 一种光码分多址无源接入网及其性能研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 660–664.
- 2 Li Chuanqi, Chen Hui, Zhou Xu, *et al.*. The research on OCDMA encoder/decoder based on photonic crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2879–2883.
李传起,陈 晖,周 谱,等. 基于光子晶体波导的光码分多址编解码实现研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2879–2883.
- 3 Li Chuanqi, Zhou Xu, Zhu Yingchun, *et al.*. The spectral analysis of the fiber grating arrays encoder/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3277–3281.
李传起,周 谱,朱迎春,等. 光纤光栅阵列编解码器反射谱性能研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3277–3281.
- 4 Dong Pei, Jilin Zheng. A novel total-dispersion-compensating en/decoder for time-spread/wavelength-hopping OCDM system [C]. *Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO)*, 2012.
- 5 Zheng Jilin, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Mlti-user 10 Gb/s optical code division multiple access experiment [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s105007.
郑吉林,王 荣,蒲 涛,等. 码分多址系统 10 Gb/s 多用户系统实验[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s105007.
- 6 Y Zhang, H W Chen, Z J Si, *et al.*. Design of FBG en/decoders in coherent 2-D time-wavelength OCDMA systems [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(11): 891–893.
- 7 F F Hou, M Yang. Design of FBG en/decoders in coherent 2D time-polarization OCDMA systems [J]. *J Optical Communications*, 2012, 33(4): 249–252.
- 8 Yan Hui, Qiu Kun, Ling Yun. Impact analysis of beat noise on coherent OCDMA system [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(4): 851–856.
闫 辉,邱 昆,凌 云. 相干光码分多址系统中拍频噪声的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 851–856.
- 9 T J Kippenberg, S M Spillane, K J Vahala. Demonstration of ultra-high-Q small mode volume toroid microcavities on a chip [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(25): 6113–6115.
- 10 Nai Lin, Lan Jiang, Sumei Wang, *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a microring resonator [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(5): 052802.
- 11 W Bogaerts, P D Heyn, T V Vaerenbergh, *et al.*. Silicon microring resonators [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47–73.
- 12 A Agarwal, P Toliver, R Menendez, *et al.*. Spectrally efficient six-user coherent OCDMA system using reconfigurable integrated ring resonator circuits [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(18): 1952–1954.
- 13 A Agarwal, P Toliver, R Menendez, *et al.*. Fully programmable ring-resonator-based integrated photonic circuit for phase coherent applications [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 77–87.
- 14 X Wang, Z S Gao. Novel reconfigurable two-dimensional coherent optical en/decoder based on coupled micro-ring reflector [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(9): 591–593.
- 15 H Akhavan. Active microdisk resonators in an optical code division multiple access system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 717–722.

栏目编辑: 王晓球