

耦合条件对集成波导微环延时线性性能的影响

韩秀友 张佳宁 宋红妍 吴彭生 王凌华 滕 婕 李善锋 赵明山

(大连理工大学物理与光电工程学院光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要 对应用于光控相控阵系统的级联微环集成波导光延时线进行了研究,重点分析了波导微环耦合系数在过耦合和欠耦合状态下对其延时响应的影响。以三环级联光延时线结构为例,研究了无限制耦合条件和过耦合条件下得到的优化结构参数以及获得的延时性能。结果表明,在小的延时量目标下,无限制耦合条件比过耦合条件更有利于实现带内平坦的延时响应和幅度响应,对集成波导微环光延时线的设计与实现具有良好的参考价值。

关键词 集成光学;光延时线;微环谐振腔;耦合条件

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0613001

Influence of Coupling Conditions on Time Delay Line Characteristics of Integrated Waveguide Microring Resonators

Han Xiuyou Zhang Jianing Song Hongyan Wu Pengsheng Wang Linghua

Teng Jie Li Shanfen Zhao Mingshan

(Photonics Research Center, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The influence of coupling conditions of parallel-cascaded waveguide ring resonators on the time delay applications in the optically phased array antenna systems is analyzed. Two kinds of coupling conditions, over-coupling and restriction-free, are considered to achieve a certain target delay time by parallel-cascaded three ring resonators. The results show that the restriction-free coupling condition is better than the over-coupling one to obtain a flat time delay and amplitude response in the target delay bandwidth especially for the small target delay time, which is the advantage of ring-resonator-based tunable true time delay line.

Key words integrated optics; optical delay line; microring resonator; coupling conditions

OCIS codes 130.3120; 060.5625; 230.5750

1 引 言

与基于电相移器的传统相控阵天线系统相比,采用光延时线来实现天线阵元的相位控制和天线系统的波束扫描,可克服孔径效应和渡越时间的限制^[1],在大范围扫描角下实现大的瞬时带宽,同时在提高雷达分辨率、识别能力、解决多目标成像、抗电磁干扰、简化结构和减小体积等方面具有巨大的优势。

集成波导光延时线采用先进的光子集成工艺将延时通道制备于平面光波回路之上^[2,3],同时可进一步与激光光源、调制器和光电探测器等集成,有利

于减小光延时系统的体积,降低功耗,提高系统性能,其优势在空间光有效载荷系统中更为突出。

集成波导微环谐振腔利用其对光波的谐振效应,可使光波在环形腔内往返多次传输从而对光波产生一定的延时^[4],通过合理设计微环谐振腔结构和级联一定数目的微环谐振腔可以达到对延时量的良好控制,有望在基于集成波导光延时线的光控波束形成技术领域发挥重大的作用。

近年来,诸多研究机构对波导微环谐振腔的延时特性进行了大量研究,并在实验上获得了延时功

收稿日期: 2010-12-15; **收到修改稿日期**: 2011-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(60807015, 60577014, 61077015)、教育部高校博士点基金(200801411037)、中央高校基本科研业务费重点培育项目(DUT10ZDG03)和辽宁省自然科学基金(20102020)资助课题。

作者简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,主要从事集成光电子器件、微波光子学和聚合物光子学领域等方面的研究。E-mail: xyhan@dlut.edu.cn

能^[5~8],然而波导微环谐振腔的结构参数对其延时特性影响的研究并不十分完善,尤其是耦合条件对级联微环实现一定目标延时量的影响尚未见到报道。本文在先前波导微环延时性能研究的基础上^[9,10],对无限制耦合条件($0 \leq \kappa_i \leq 1$)和过耦合条件($\kappa_i > 1 - \gamma$)下级联微环实现一定目标延时量的功能进行了较为深入的分析,结果表明无限制耦合条件相对于过耦合条件有利于获得平坦的延时响应,尤其是在目标延时量较小的时候这种优势更为明显。

2 不同耦合条件下单环的响应特性

波导微环谐振腔结构如图1所示, κ 为环形波导与直波导构成耦合器的交叉强度耦合系数, γ 为环形谐振腔波导的强度损耗因子(无损耗时 $\gamma = 1$,有损耗时 $\gamma < 1$)。光波绕环一周所经历的相移为 $\phi = \omega T_s + \varphi$,其中 $\omega = 2\pi f$ 为角频率, $f = c/\lambda$, λ 为光波波长, c 为真空中的光速, $T_s = nL/c$ 为光波绕环一周所需的时间, n 为波导的有效折射率, L 为波导微环的周长, φ 为光波经过波导微环的附加相移(可以利用波导的热光效应或电光效应获得)。

根据传输矩阵法,在考虑波导损耗的条件下,单环谐振腔的光场传输函数为^[11,12]

$$H(\phi) = \frac{E_4}{E_1} = \frac{\sqrt{1-\kappa} - \sqrt{\gamma} \exp(-j\phi)}{1 - \sqrt{1-\kappa} \sqrt{\gamma} \exp(-j\phi)}. \quad (1)$$

在忽略附加相移 φ 的情况下,谐振频率的周相移量应满足 $\phi = \omega T_s = 2m\pi (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 。当 $\gamma = 1 - \kappa$ 时,这是熟知的临界耦合条件, $\kappa < 1 - \gamma$ 和 $\kappa > 1 - \gamma$ 分别称为欠耦合条件和过耦合条件^[12,13]。

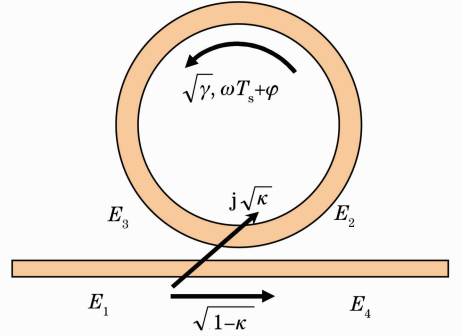


图1 波导微环谐振腔结构示意图

Fig.1 Schematic map of the waveguide microring resonator

2.1 相位响应

根据光场传递函数(1)式,由公式

$$\Phi(\phi) = \arctan \left[\frac{\text{Im } H(\phi)}{\text{Re } H(\phi)} \right]$$

求出不同耦合条件下单环谐振腔的相位响应函数为

$$\Phi(\phi) = \arctan \left(\frac{\sin \phi}{1 - \cos \phi} \right) - \arctan \left(\frac{\gamma \sin \phi}{1 - \gamma \cos \phi} \right), \quad (\kappa = 1 - \gamma) \quad (2)$$

$$\Phi(\phi) = \arctan \left[\frac{\sqrt{\gamma} \sin \phi}{\sqrt{1-\kappa} - \sqrt{\gamma} \cos \phi} \right] - \arctan \left[\frac{\sqrt{1-\kappa} \sqrt{\gamma} \sin \phi}{1 - \sqrt{1-\kappa} \sqrt{\gamma} \cos \phi} \right], \quad (\kappa < 1 - \gamma) \quad (3)$$

$$\Phi(\phi) = \pi - \phi - \arctan \left[\frac{\sqrt{1-\kappa} \sin \phi}{\sqrt{\gamma} - \sqrt{1-\kappa} \cos \phi} \right] - \arctan \left[\frac{\sqrt{1-\kappa} \sqrt{\gamma} \sin \phi}{1 - \sqrt{1-\kappa} \sqrt{\gamma} \cos \phi} \right]. \quad (\kappa > 1 - \gamma) \quad (4)$$

由(2)~(4)式分析在周损耗因子固定为 $\gamma = 0.9$ 的条件下,耦合系数大小对微环谐振腔相位响应的影响,相位响应曲线绘于图2。由图2可以看出,在过耦合条件下($\kappa = 0.2, \kappa > 1 - \gamma$)谐振频率的相移量为 π ,在谐振频率附近相移量随频率线性变化(曲线斜率为负),该特性可以用于微波光子学领域中的光子相移器^[14]。在欠耦合条件下($\kappa = 0.05, \kappa < 1 - \gamma$)谐振频率的相移量为0,这也可由(2)式在 $\phi = 2m\pi$ 的情况下推导得出。此时谐振频率附近的相移量也随频率呈线性变化,但曲线斜率为正;当远离谐振频率时,相移量随频率偏离量的增大而减小。在临界耦合条件下($\kappa = 0.1, \kappa = 1 - \gamma$)谐振频率处相位响应曲线的斜率趋于无限大。

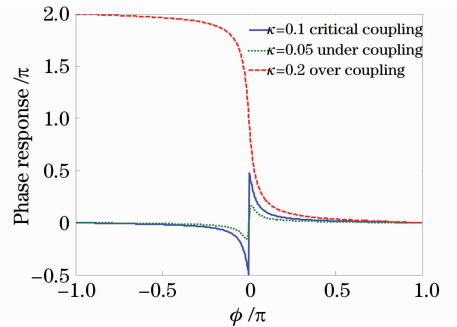


图2 不同耦合条件下微环谐振腔的相位响应($\gamma = 0.9$)

Fig.2 Phase response of the microring resonator at different coupling conditions ($\gamma = 0.9$)

2.2 延时响应

根据相位响应函数(2)~(4)式,由公式 $\tau(\phi) =$

$-\frac{d\Phi(\phi)}{d\phi} \frac{d\phi}{d\omega}$ 可以求出不同耦合条件下单环的延时响应函数

$$\tau(\phi) = \frac{1 - \gamma^2}{1 - 2\gamma\cos\phi + \gamma^2} \frac{T_s}{2}, \quad (\kappa = 1 - \gamma) \quad (5)$$

$$\tau(\phi) = \frac{\gamma - \sqrt{\gamma} \sqrt{1 - \kappa} \cos\phi}{(1 - \kappa) - 2\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi} T_s + \frac{\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi - (1 - \kappa)\gamma}{1 - 2\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi + (1 - \kappa)\gamma} T_s, \quad (\kappa < 1 - \gamma) \quad (6)$$

$$\tau(\phi) = T_s + \frac{\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi - (1 - \kappa)}{(1 - \kappa) + \gamma - 2\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi} T_s + \frac{\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi - (1 - \kappa)\gamma}{1 + (1 - \kappa)\gamma - 2\sqrt{1 - \kappa} \sqrt{\gamma} \cos\phi} T_s, \quad (\kappa > 1 - \gamma) \quad (7)$$

图 3 给出了不同耦合条件下单环的延时响应曲线,根据延时响应的定义公式

$$\tau(\phi) = -\frac{d\Phi(\phi)}{d\phi} \frac{d\phi}{d\omega}$$

图 3 中单环的归一化延时量大小应当是图 2 中相位响应曲线的斜率负值。由图 3 可以看出在欠耦合条件下($\kappa=0.05, \kappa < 1 - \gamma$)谐振频率处的延时量为负,这一特性是“慢快光”领域研究的热点^[15,16],在以下的分析中可以看出,该特性对于级联微环获得平坦的延时响应也非常有用。同时可以看出,在过耦合($\kappa=0.2, \kappa > 1 - \gamma$)和临界耦合($\kappa=0.1, \kappa = 1 - \gamma$)条件下谐振频率处的延时量均为正,并且临界耦合条件下的延时量远远大于过耦合条件下的延时量。

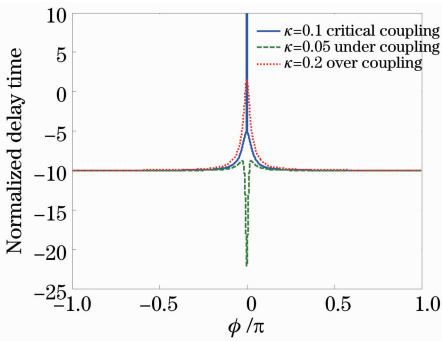


图 3 不同耦合条件下微环谐振腔的延时响应($\gamma=0.9$)

Fig. 3 Time-delay response of the microring resonator under different coupling conditions ($\gamma=0.9$)

2.3 幅度响应

图 4 给出了与图 3 相同参数条件下微环输出归一化强度的响应曲线。可以看出,在临界耦合条件($\kappa = 0.1, \kappa = 1 - \gamma$)下谐振频率光波的输出强度为零,尽管该条件下的延时量比过耦合条件($\kappa = 0.2$,

$\kappa > 1 - \gamma$)下的延时量大(如图 3 所示),但是由于微环中存在损耗,在谐振效应下谐振频率光波的绝大部分能量在微环传输中损耗掉,因此临界耦合条件通常不用于光延时功能。

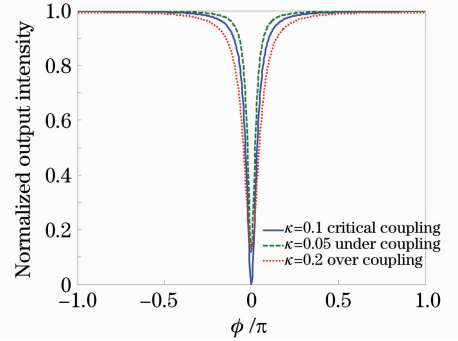


图 4 不同耦合条件下微环谐振腔的归一化输出强度($\gamma=0.9$)

Fig. 4 Normalized output intensity of the micro ring resonator under different coupling conditions ($\gamma=0.9$)

3 级联微环的延时特性

3.1 级联微环延时响应

由 N 个波导微环谐振腔级联构成的光延时线单元(如图 5 所示,给出了三环级联的例子),其总的延时量为

$$\tau_{\text{total}}(f) = \sum_{l=1}^N \tau_l(f), \quad (8)$$

式中 $\tau_l(f)$ 为单个微环的延时响应函数,其表达式如(5)~(7)式所示($\phi = 2\pi f T_s + \phi_l$),在这里为了表示方便,可将其统一写成如下的形式:

$$\tau_l(f) = \frac{T_s}{2} \cdot \frac{1 - \gamma_l(1 - \kappa_l)}{1 + \gamma_l(1 - \kappa_l) - 2\sqrt{1 - \kappa_l} \sqrt{\gamma_l} \cos(2\pi f T_s + \phi_l)} + \frac{T_s}{2} \cdot \frac{\gamma_l - (1 - \kappa_l)}{(1 - \kappa_l) + \gamma_l - 2\sqrt{1 - \kappa_l} \sqrt{\gamma_l} \cos(2\pi f T_s + \phi_l)}. \quad (9)$$

式中假定光波在每个微环中绕环一周的时间相等均为 T_s ,这对于实际波导器件设计和制备是可行的。

3.2 设计过程

基于微环的谐振效应,采用级联微环结构,通过对耦合系数和附加相移的调节可以实现一定范围内延时量的连续可调功能,这对于高分辨率的相控阵天线系统具有极大的吸引力。基于微环的光延时线其可达到的最大延时量与延时带宽之间存在互相制约关系^[17],因此通常利用微环结构在小的延时量目标下来获得连续可调功能,如要获得大的延时量,可以将微环结构与

基于光开关切换的延时线结构相结合^[5],从而可以降低集成波导光延时线的复杂程度和制备工艺难度。于是基于微环的光延时线设计目标为一定的延时量目标下获得带内平坦的连续可调延时功能。

定义度量因子 ϵ 来表征 N 个级联波导微环谐振腔所产生的延时量与目标延时 T_D 的差别:

$$\epsilon = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [\tau_{\text{total}}(f) - T_D]^2 df, \quad (10)$$

式中 f_{\min} 和 f_{\max} 表示延时带宽的起始频率和终止频率。将度量因子 ϵ 作为优化设计的判据,由(10)式可以看出,为了获得带内平坦的延时响应,应对波导微环的结构参数进行优化,以使得 ϵ 具有足够小的值。

以三个微环级联为例(如图5所示)进行设计与分析,微环的初始谐振频率为 $f_0 = 193.55 \times 10^{12}$ Hz (对应波长为 1550 nm),光波绕环一周的时间为 $T_s = 80$ ps^[8],微环的周损耗因子均为 $\gamma = 0.6$,目标延时带宽为 3 GHz。在优化设计过程中考虑两种耦合条件,1)所有微环的结构参数均满足过耦合条件,即耦合系数与周损耗因子之间满足 $\kappa_l > 1 - \gamma$ 的限制条件;2)微环的结构参数不加限制,即耦合系数可以在 $0 \leq \kappa_l \leq 1$ 之间任意取值,也就是说级联微环中的某些微环可以工作在欠耦合条件下。

采用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数^[18]来求解(10)式,以获得最小度量因子 ϵ 下波导微环谐振腔的结构参数。fmincon 函数通常表示为

$$\min f(x), \quad \text{subject to } l \leq x \leq u, \\ g(x) \leq 0, \quad g_{\text{eq}}(x) = 0 \quad (11)$$

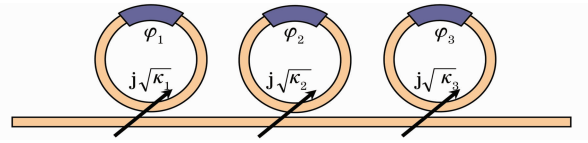


图5 三环级联集成波导光延时线结构示意图

Fig. 5 Schematic of parallel-cascaded three ring resonators based integrated waveguide optical delay line

式中 l 和 u 分别表示矢变量 x 取值的下限和上限, $f(x), g(x)$ 和 $g_{\text{eq}}(x)$ 是关于矢变量 x 的非线性函数。对于本文的优化设计问题,非线性函数 $f(x)$ 即为(10)式,矢变量 x 应为各个微环谐振腔的耦合系数 κ_l 和附加相移 φ_l 。

考虑到波导微环谐振腔的周期性滤波特性,附加相移 φ_l 应满足如下关系式:

$$-\pi < \varphi_l < \pi, \quad (12)$$

根据上述两种耦合条件,耦合系数应满足以下关系式:

$$(1 - \gamma) < \kappa_l \leq 1, \quad \text{over coupling} \quad (13)$$

$$0 \leq \kappa_l \leq 1, \quad \text{restriction free} \quad (14)$$

由限制条件(12)~(14)式,利用(11)式进行编程即可求出一定延时量目标下微环的优化结构参数。

3.3 结果与讨论

表1给出了两种耦合条件下为实现一系列延时量目标三环级联光延时线的优化结构参数及度量因子和延时抖动。从表1中可以看出,如果所有微环的耦合系数都限制在过耦合条件($\kappa_l > 1 - \gamma$)下,其度量因子和延时抖动均比无限制耦合条件下的要大,尤其是在延时量目标较小的时候,如图6(a)~(d)给出的延时量目标为30,50,70和90 ps的延时

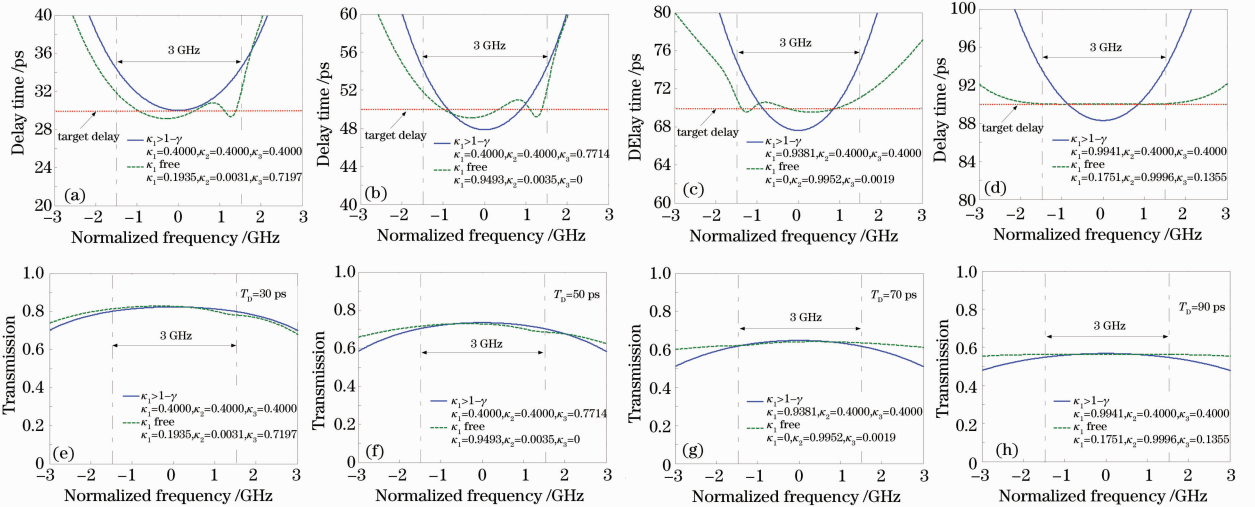


图6 两种耦合条件下三环级联光延时线延时响应(a), (b), (c), (d)与幅度响应(e), (f), (g), (h)的比较

Fig. 6 Time delay response (a), (b), (c), (d) and the transmission amplitude response (e), (f), (g), (h) comparison of parallel-cascaded three ring resonators under the two kinds of coupling conditions ($\gamma = 0.6$) for different target delay time

表 1 不同耦合条件下三环级联集成波导光延时线的优化结构参数($\gamma=0.6$)

Table 1 Optimized structural parameters of parallel-cascaded three ring resonators based integrated waveguide optical delay line under different coupling conditions ($\gamma=0.6$)

T_D/ps	Coupling condition restriction*	Optimized coupling coefficients κ_l and additional phase shifts φ_l	Metric factor ϵ/ps^2	Delay ripple	
				min /ps	max /ps
30	Yes	[0.4000, 3.1416, 0.4000, 3.1416, 0.4000, 3.1416]	3.64×10^3	0.00	4.40
	No	[0.1935, -2.5001, 0.0031, -0.6753, 0.7197, 3.1416]	4.74×10^2	-0.85	1.89
50	Yes	[0.4000, 3.1416, 0.4000, 3.1416, 0.7714, 3.1416]	3.69×10^3	-2.15	4.39
	No	[0.9434, -3.0127, 0.0035, -0.6669, 0.0000, 0.0000]	5.59×10^2	-0.10	1.94
70	Yes	[0.9381, 3.1416, 0.4000, 3.1416, 0.4000, 3.1416]	4.72×10^3	-2.40	5.00
	No	[0.0000, 0.0000, 0.9952, 3.0116, 0.0019, 0.6620]	1.72×10^2	-0.46	1.10
90	Yes	[0.9941, 3.1416, 0.4000, 3.1416, 0.4000, 3.1416]	2.66×10^3	-2.71	3.81
	No	[0.1751, -3.1391, 0.9996, 0.0000, 0.1355, 3.1384]	1.24×10	0.00	0.03
110	Yes	[0.9972, 0.0000, 0.4106, 3.1416, 0.4100, 3.1416]	1.51	-0.12	0.06
	No	[0.9972, 0.0000, 0.4105, 3.1416, 0.4102, 3.1416]	1.51	-0.12	0.06
130	Yes	[0.9939, 0.0000, 0.7447, 3.1415, 0.4000, -3.1412]	4.54	-0.12	0.18
	No	[0.9950, 0.0000, 0.8721, -3.1416, 0.0000, 0.0000]	2.62	-0.07	0.15
150	Yes	[0.9156, 3.1416, 0.9918, 0.0000, 0.4000, 3.1416]	6.05	-0.08	0.26
	No	[0.0000, 0.0000, 0.9956, 0.0000, 0.9764, 3.1416]	1.05	-0.01	0.13
170	Yes	[0.9933, 3.1416, 0.4000, -3.1415, 0.9951, 0.0000]	1.50	0.02	0.17
	No	[0.9993, 1.2890, 0.2718, -3.1004, 0.9992, -0.9698]	0.04	-0.13	0.01
190	Yes	[0.9939, -1.0057, 0.9939, 1.0198, 0.5945, -3.1347]	1.50×10^{-3}	0.02	0.03
	No	[0.9939, -1.0103, 0.9939, 1.0152, 0.5945, -3.1392]	1.50×10^{-3}	0.02	0.03
210	Yes	[0.9909, -0.9059, 0.9909, 0.9087, 0.8181, -3.1402]	3.80×10^{-3}	0.01	0.02
	No	[0.9909, -0.9059, 0.9909, 0.9087, 0.8181, -3.1402]	3.80×10^{-3}	0.01	0.02

* Yes: over coupling, $\kappa_l > 1 - \gamma$; No: restriction free, $0 \leq \kappa_l \leq 1$.

响应曲线所示。这是由于级联微环中的某个微环处于欠耦合状态下,其提供的“负”延时在一定程度上抵消了其它处于过耦合状态下的微环提供的“正”延时,减小了带宽内的延时抖动,从而使得最终延时响应更为平坦。同时从图 6(e)~(h)的幅度响应曲线可以看出,无限制耦合条件更有利于获得平坦的幅度响应。当延时量目标增大到一定程度后,两种耦合条件下优化得到的微环结构参数基本相同,其均工作在过耦合条件下,如表 1 中给出的延时量目标为 190 ps 和 210 ps 的情况。因此,对于小的延时量目标,无限制耦合条件比过耦合条件更有利于获得平坦的延时响应和幅度响应。

和幅度响应。

参 考 文 献

- 1 José Capmany, Dalma Novak. Microwave photonics combines two worlds [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 319~330
- 2 M. A. Piqueras, G. Grosskopf, B. Vidal *et al.*. Optically beamformed beam-switched adaptive antennas for fixed and mobile broad-band wireless access networks [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 887~899
- 3 Brie Howley, Xiaolong Wang, Maggie Chen *et al.*. Reconfigurable delay time polymer planar lightwave circuit for an X-band phased-array antenna demonstration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 883~890
- 4 G. Lenz, B. J. Eggleton, C. K. Madsen *et al.*. Optical delay lines based on optical filters [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(4): 525~532
- 5 Mahmoud S. Rasras, Christi K. Madsen, Mark A. Cappuzzo *et al.*. Integrated resonance-enhanced variable optical delay lines [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 834~836
- 6 Joyce K. S. Poon, Lin Zhu, Guy A. DeRose *et al.*. Polymer microring coupled-resonator optical waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1843~1849
- 7 Tian He, Zhang Yundong, Wang Nan *et al.*. Control of group velocity in an annular chain of microring coupled-resonator optical waveguides [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(22): 3047~3050
- 8 L. Zhuang, C. G. H. Roeloffzen, R. G. Heideman *et al.*

4 结 论

对级联微环的延时特性进行了分析,重点研究了波导微环耦合系数在过耦合和欠耦合状态下对其延时响应的影响。以三环级联光延时线结构为例,分析了无限制耦合条件和过耦合条件下的延时响应特性,结果表明在小的延时量目标下,无限制耦合条件比过耦合条件更有利于实现带内平坦的延时响应

- Single-chip ring resonator-based 1×8 optical beam forming network in CMOS-compatible waveguide technology [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(15): 1130~1132
- 9 Han Xiuyou, Song Hongyan, Zhang Jianing *et al.*. Study on the integrated waveguide optical delay line based on microring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 782~786
韩秀友, 宋红妍, 张佳宁 等. 微环谐振腔集成波导光延时线研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 782~786
- 10 Zhang Jianing, Han Xiuyou, Song Hongyan *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2098~2103
张佳宁, 韩秀友, 宋红妍 等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2098~2103
- 11 A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 321~322
- 12 H. Tazawa, Ying-Hao Kuo, I. Dunayevskiy *et al.*. Ring resonator-based electrooptic polymer traveling-wave modulator [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(9): 3514~3519
- 13 V. M. Menon, W. Tong, S. R. Forrest. Control of quality factor and critical coupling in microring resonators through integration of a semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1343~1345
- 14 Qingjiang Chang, Qiang Li, Ziyang Zhang *et al.*. A tunable broadband photonic RF phase shifter based on a silicon microring resonator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(1): 60~62
- 15 John, E. Heebner, Robert W. Boyd. Slow and fast light in resonator-coupled waveguides [J]. *J. Modern Opt.*, 2002, **49**(14/15): 2629~2636
- 16 H. P. Uranus, L. Zhuang, C. G. H. Roeloffzen *et al.*. Direct experimental observation of pulse temporal behavior in integrated-optical ring-resonator with negative group velocity [C]. 13th European Conference on Integrated Optics (ECIO '2007), Copenhagen, Denmark, 25-27 April 2007, Post-Deadline Paper
- 17 Mohammad Fakhrazadeh, Sujeet K. Chaudhuri, S. Safavi-Naeini. Optical beamforming with tunable ring resonators [C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. 10.1109/APS.2008.4618977; 1~4
- 18 Chen Jie. Matlab Bible [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. 169~172
陈杰. Matlab 宝典 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007. 169~172