

文章编号: 1007-2861(2007)06-0669-05

格子结构平面光波导 interleaver 设计中的 Cesaro 方法

张娟

(上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要: 根据傅里叶级数的 Cesaro 方法和格子结构型与双折射型光交错复用器结构参数之间的数学等效关系, 提出一种格子结构平面光波导光交错复用器结构设计的新方法. 只需进行一步简单分析, 解一个简单方程组即可得到满足平坦化要求的所有结构参数. 采用该方法设计 25 GHz 三级级联格子结构的平面光波导型光交错复用器, 所得信道隔离度比文献结果有明显改善, 可满足 DWDM 通信对滤波器件的性能要求.

关键词: 光交错复用器; 偏振光干涉; 平面光波导; 傅里叶级数; Cesaro 方法

中图分类号: TN 929.11 **文献标识码:** A

Cesaro Means of Fourier Series in Designing Planar Lightwave Circuit-Type Lattice-Form Interleaver

ZHANG Juan

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the Cesaro means of Fourier series and the mathematical equivalence between structural parameters of the lattice-form and the birefringent interleavers, a new method for designing planar lightwave circuit (PLC)-type lattice-form interleavers is proposed. All structural parameters can be obtained with a single step of simple analysis and solution to a set of simple equations. As an example, a 25 GHz 3-lattice-cascaded PLC-type interleaver is designed. The resulting channel isolation is significantly improved compared to those obtained in the literature, indicating that the method can meet stringent design requirements of the DWDM system.

Key words: optical interleaver; polarized light interference; planar lightwave circuit; Fourier series; Cesaro means

光交错复用器(optical interleaver)具有将一组频率间隔较窄的光信号分离成两组信道间隔加倍的光信号的功能,在密集波分复用(DWDM)系统,特别是 50 GHz 信道间隔以下系统中具有非常重要的作用^[1].从 2000 年正式公开报道以来,光交错复用器

发展迅速,已经发展了多种解决方案.格子结构型光交错复用器是光交错复用器的一个典型方案,其基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪原理构建,由光学延迟线和定向耦合器构成的光学延迟线环路组成,光学延迟线可以是空间体元件,也可以是光纤或

收稿日期: 2007-03-13 **基金项目:** 上海市重点学科建设资助项目(T0102);上海市教委发展基金资助项目(05ZA45);2006 年度上海市高校选拔培养优秀青年教师专项基金资助项目

通信作者: 张娟(1976~),女,讲师,博士,研究方向为光通信器件与光学信号处理. E-mail: juanzhang@staff.shu.edu.cn

平面光波导.容易以小体积集成于衬底是利用平面光波环路(PLC)技术的平面光波导光交错复用器的显著特点之一.近年来集成光学和半导体工艺技术发展迅速,平面光波导光交错复用器现已成为光交错复用器技术发展的一个方向.

实际中为实现良好性能的格子结构平面光波导光交错复用器,往往采用多级延迟线环路结构.但多级格子结构设计方法较复杂,波形平坦度也不是很好^[2].因此结构参数的简单有效设计方法研究一直是多级平面光波导光交错复用器研究中的重点之一.

双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器也是实现光交错复用器的一个典型方案.该结构参数的设计常采用 Ammann 方法^[3].如 Carlsen 等利用 Ammann 方法计算得到了3块晶体级联结构当通带和阻带抖动不大于1%(即隔离度为-20 dB)时的一组结构参数^[4].但该方法要求各晶体厚度必须相同,且属于反推计算,因而设计具有高次阶余弦级数的光谱透射率波形时所需晶体数目较大,不利于实际应用,波形平坦度也不够好.近年来我们提出了一种傅里叶级数对比的正向搜索方法^[5],该方法不受晶体必须具有相同厚度的限制、属于正向求解,且整个计算和搜索过程均可利用计算机进行,因而较 Ammann 方法简单、省时,而且性能也得以提高,但该方法需要编程后令计算机在结构参数的一个较大的所有可能范围内逐一计算判别搜寻,计算机时仍较长.

研究表明,格子结构平面波导结构型和双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器的结构参数之间存在数学等效关系^[6],因此双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器与格子结构平面波导光交错复用器的结构参数设计方法可以相互通用,从而丰富了获取平面光波导光交错复用器优化结构参数的有效途径.

本工作在傅里叶级数对比法^[5]的基础上,基于傅里叶级数的 Cesaro 方法(Cesaro means of Fourier series)^[7]和上述结构参数的数学等效关系^[6],提出了一种格子结构平面光波导光交错复用器结构设计的新方法.只需通过一步简单分析,求解一个简单方程组和参数直接对应,即可得到系统的所有结构参数,从而大大简化了平面波导结构型光交错复用器的结构参数的计算,同时也优化了波形,可以满足较高的设计要求.

1 理论分析

1.1 周期矩形光谱透射率函数的傅里叶级数表示

数学上,一个理想的周期性矩形光谱透射率函数(见图1)可表示为

$$T(f) = \sum_n \text{rect}\left(\frac{f - n\Delta f}{\delta f}\right), \quad (1)$$

式中, δf 为光谱透过窗的宽度, Δf 为周期.

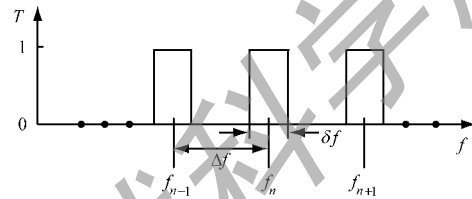


图1 理想的周期性矩形光谱透射率函数

Fig.1 Ideal periodical rectangle spectral transmittance

该周期性矩形光谱透射率函数可以用傅里叶级数表达为^[24]

$$T(f) = a_0 + a_1 \cos\left(2\pi \frac{f}{\Delta f}\right) + a_2 \cos\left(2\pi \frac{2f}{\Delta f}\right) + \dots + a_n \cos\left(2\pi \frac{nf}{\Delta f}\right) + \dots, \quad (2)$$

式中,傅里叶系数为

$$a_0 = \frac{\delta f}{\Delta f}, \quad (3)$$

$$a_n = 2 \frac{\delta f}{\Delta f} \text{sinc}\left(\frac{n\delta f}{\Delta f}\right), n \neq 0. \quad (4)$$

例如,对于窗口比 $\delta f/\Delta f$ 为 1/2 的周期矩形光谱透射率,可用傅里叶级数表达为

$$T(f) = \frac{1}{2} + \text{sinc}\left(\frac{\delta f}{\Delta f}\right) \cos\left(2\pi \frac{f}{\Delta f}\right) + \text{sinc}\left(\frac{3\delta f}{\Delta f}\right) \cos\left(2\pi \frac{3f}{\Delta f}\right) + \dots + \text{sinc}\left[\frac{(2N-1)\delta f}{\Delta f}\right] \cdot \cos\left[2\pi \frac{(2N-1)f}{\Delta f}\right] + \dots, \quad (5)$$

式中, $N =$ 自然数,该傅里叶级数项数 N 越多,则函数波形越逼近理想的周期性矩形函数,通常要求下的 N 需取上百项,如图2中3条曲线分别为 N 取4、10及100时的透窗函数图.

1.2 傅里叶级数的 Cesaro 方法

Cesaro 方法是一种只用少数几个傅里叶级数项即可得到较理想的函数图的一种表示方法^[15].如图2所示的 1/2 开口比理想周期性矩形函数,采用 Cesaro 方法该周期性矩形函数可用5阶傅里叶级数

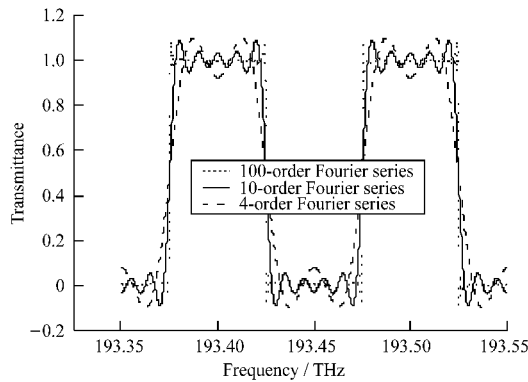


图 2 由 4、10 及 100 阶傅里叶级数项的透窗函数图

Fig.2 Transmittance function corresponding to 4, 10 and 100-order Fourier series

展开项表示为

$$T(f) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{15}{16} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f}{\Delta f}\right) + \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{9}{16} \cdot \cos\left(2\pi \frac{3f}{\Delta f}\right) + \frac{2}{5\pi} \cdot \frac{3}{16} \cdot \cos\left(2\pi \frac{5f}{\Delta f}\right), \quad (6)$$

其波形曲线如图 3 中的实线所示,虚线为该方法 7 阶傅里叶级数展开项对应的波形图。

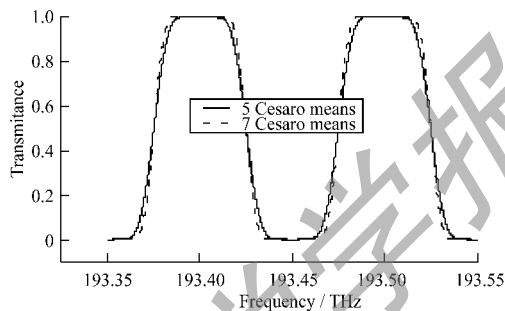


图 3 采用 5 阶和 7 阶傅里叶级数项的 Cesaro 方法表示的透窗函数图

Fig.3 Transmittance function corresponding to Cesaro means with 5-order and 7-order Fourier series

1.3 平坦化光谱透射率函数的产生

平面波导结构型光交错复用器的结构参数可通过以下几个步骤来得到。

第一步 利用琼斯矩阵表示法计算双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器光谱透射率的表达式(用 * 号标记该式)。

第二步 双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器的所有结构参数值的获得.具体做法为:首先比较 (*) 式与利用 Cesaro 方法表示的傅里叶级数表达式,使两式相等,可确定式 (*) 中包括常数项在内的各阶余弦级数项的系数值.再通过观察 (*) 式中常

数项及各偶数项余弦级数的系数表达式,同时考虑到前面得到的常数项及各偶数项余弦级数的系数值,可确定某类结构参数间的关系和某一结构参数的大小.其余结构参数值的确定则可通过求解由各奇数项余弦级数的系数构成的一个联立方程组而直接得到。

这样就得到了双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器的所有结构参数值。

第三步 平面波导结构型光交错复用器的结构参数的获得.具体做法为:在前面得到的双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器结构参数的基础上,直接利用双折射晶体偏振光干涉型光交错复用器和平面波导环形格子结构型光交错复用器两者结构参数的等效关系,即可得到平面波导结构型光交错复用器的结构参数。

利用得到的平面波导结构型光交错复用器的结构参数计算平坦化光谱透过率曲线。

1.4 结构参数的等效

平面波导结构型和偏振光干涉型光交错复用器的结构参数满足一定关系,具体可表达为

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \theta_1, \\ \varphi_2 &= \theta_2 - \theta_1, \\ &\vdots \\ \varphi_i &= \theta_i - \theta_{i-1}, \\ \varphi_{i+1} &= \theta_p - \theta_i, \\ \Phi_i &= t_i. \end{aligned} \quad (7)$$

式中: φ_i 为平面波导结构型光交错复用器中第 i 个耦合器的相位因子, Φ_i 为第 i 个相位延迟线的相位延迟; θ_i 为偏振光干涉型光交错复用器中第 i 个晶体的方位角,其定义为晶体的慢轴(或快轴)与起偏器的透光方向的夹角; θ_p 为检偏器与起偏器透光方向的夹角,简称为检偏器的方位角; t_i 为第 i 个晶体的相位差,其表示为 $t_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_i \cdot d_i$, Δn_i 和 d_i 为第 i 个晶体的折射率差和厚度, λ 为波长.只要知道了两者其中一个的结构参数,则另一个的结构参数可直接由式(7)得到。

2 设计实例

我们以设计一个 3 级平面波导环形格子结构型光交错复用器的情况为例,用于 25 GHz 间隔波分复用信号的奇偶分离,其结构如图 4 所示。

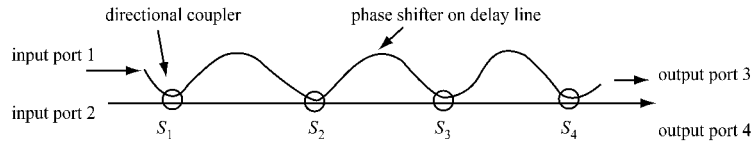


图4 平面波导结构光交错复用器的结构示意图

Fig.4 Schematic drawing of PLC-type interleaver

按照1.3节的设计方法,首先利用琼斯矩阵方法计算3块晶体级联结构偏振光干涉型光交错复用器的光谱透射率,具体表达式为

$$T(f) = a_0 + a_1 \cos(t_1) + a_2 \cos(t_2) + a_3 \cos(t_3) + a_4 \cos(t_1 + t_2) + a_5 \cos(t_1 + t_3) + a_6 \cos(t_2 + t_3) + a_7 \cos(t_3 - t_2) + a_8 \cos(t_3 - t_1) + a_9 \cos(t_2 - t_1) + a_{10} \cos(t_1 + t_2 + t_3) + a_{11} \cos(t_3 + t_2 - t_1) + a_{12} \cos(t_3 - t_2 + t_1) + a_{13} \cos(t_1 + t_2 - t_3). \quad (8)$$

式中,

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2} [1 + \cos 2\theta_1 \cos 2(\theta_2 - \theta_1) \cdot \cos 2(\theta_3 - \theta_2) \cos 2(\theta_p - \theta_3)], \\ a_1 &= -\frac{1}{2} \cos 2(\theta_p - \theta_3) \cos 2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin 2\theta_1 \sin 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_2 &= -\frac{1}{2} \cos 2\theta_1 \cos 2(\theta_p - \theta_3) \cdot \sin 2(\theta_3 - \theta_2) \sin 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_3 &= -\frac{1}{2} \cos 2\theta_1 \sin 2(\theta_p - \theta_3) \cdot \sin 2(\theta_3 - \theta_2) \cos 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_4 &= -\frac{1}{2} \cos^2(\theta_2 - \theta_1) \cos 2(\theta_p - \theta_3) \cdot \sin 2(\theta_3 - \theta_2) \sin 2\theta_1, \\ a_5 &= \frac{1}{4} \sin 2\theta_1 \sin 2(\theta_p - \theta_3) \cdot \sin 2(\theta_3 - \theta_2) \sin 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_6 &= -\frac{1}{2} \cos 2\theta_1 \cos^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_7 &= \frac{1}{2} \cos 2\theta_1 \sin^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_8 &= \frac{1}{4} \sin 2\theta_1 \sin^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2(\theta_2 - \theta_1), \\ a_9 &= \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin^2(\theta_2 - \theta_1) \cdot \cos 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2(\theta_3 - \theta_2), \\ a_{10} &= -\frac{1}{2} \cos^2(\theta_2 - \theta_1) \cos^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2\theta_1, \\ a_{11} &= \frac{1}{2} \cos^2(\theta_3 - \theta_2) \sin^2(\theta_2 - \theta_1) \cdot \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2\theta_1, \\ a_{12} &= -\frac{1}{2} \sin^2(\theta_2 - \theta_1) \cdot \sin^2(\theta_3 - \theta_2) \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2\theta_1, \\ a_{13} &= \frac{1}{2} \cos^2(\theta_2 - \theta_1) \sin^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin 2(\theta_p - \theta_3) \sin 2\theta_1. \end{aligned} \quad (9)$$

为得到式(6)所示的平坦化光谱透射率,应使式(8)和式(6)尽可能的相等.对比式(8)和式(6),可得到式(8)中常数项为1/2;1、3、5阶傅里叶级数项系数分别为 $\frac{15}{8\pi}$ 、 $\frac{3}{8\pi}$ 和 $\frac{3}{40\pi}$;2、4阶傅里叶级数项系数为零.考虑到式(8)及各余弦级数的系数表达式,可知为使常数项为1/2和偶数项余弦级数的系数为零,晶体厚度比应为1:2:2及晶体1的方位角 $\theta_1 = 45^\circ$.晶体2、3及检偏器的方位角 θ_2 、 θ_3 及 θ_p 则可通过直接求解下面方程组而得到:

$$\begin{cases} a_1 + a_8 + a_9 + a_{12} + a_{13} = \frac{15}{8\pi}, \\ a_4 + a_5 + a_{11} = \frac{3}{8\pi}, \\ a_{10} = \frac{3}{40\pi}. \end{cases} \quad (10)$$

式中, a_1 、 a_8 、 a_9 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_4 、 a_5 、 a_{11} 、 a_{10} 为式(9)所示.求解该方程组得到的晶体及检偏器的方位角依次为: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 103.49^\circ$, $\theta_3 = -95.59^\circ$, $\theta_p = 0.03^\circ$,其所对应的光谱透射率波形为图5中的曲线C,其中曲线D为文献[5]中结构参数 $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = -69^\circ$, $\theta_3 = 81^\circ$, $\theta_p = 0^\circ$ 对应的波形图,曲线B为

Carlsen 等人的结构参数 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -14.5^\circ, \theta_3 = 9.93^\circ, \theta_p = 0^\circ$ 对应的波形图, 曲线 A 为文献 [2] 中 Oguma 等人的结构参数 $C_1 = 50\%, C_2 = 70\%, C_3 = 10\%$ 对应的波形图. 可以看出, 曲线 C 比 B、A 的隔离度得到提高; 与 D 相比, 在平顶部分吻合很好, 隔离度仅略有下降, 仍然可以满足较高设计要求. 上述结果是考虑 5 阶傅里叶级数项而得到的, 若考虑 7 阶傅里叶级数项, 波形可得到进一步优化. 以上证明了该方法的有效性: 采用更加简单的计算方法, 获得了能满足较高设计要求的结构参数. 最后再计算平面波导环形格子结构型光交错复用器的结构参数. 将 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 103.49^\circ, \theta_3 = -95.59^\circ, \theta_p = 0.03$ 代入两者结构参数的等效关系式 (7) 可得 4 个耦合器的相位因子分别为 $\varphi_1 = \pi/4, \varphi_2 = 0.324\pi, \varphi_3 = -96.165\pi, \varphi_4 = 0.531\pi$. 对应的奇偶信道波形见图 6.

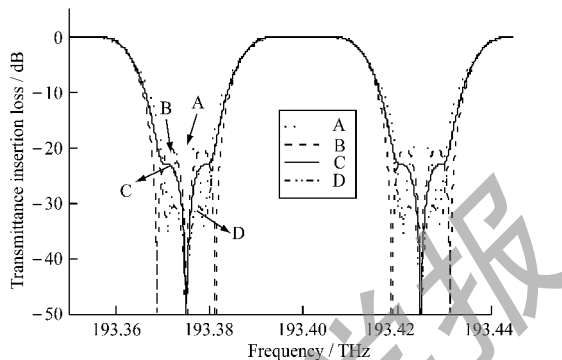


图 5 不同设计方法得到的结构参数对应的波形

Fig.5 Transmittance insertion loss corresponding to structural parameters obtained by different methods

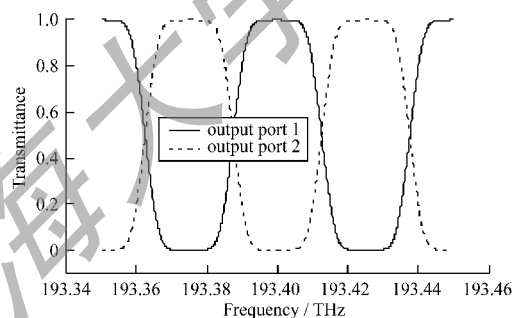


图 6 两输出端口的波形曲线

Fig.6 Transmittance function of the two output ports

3 结束语

平面波导格子结构型光交错复用器是一种很有发展潜力的光交错复用器的典型方案. 目前用于设计该结构的设计方法较复杂, 设计结果也不是很理想. 本工作在近年研究偏振光干涉型光交错复用器的基础上, 提出了一种基于傅里叶级数的 Cesaro 方法的设计方法, 只需简单两个步骤就可得到所需平坦化要求的所有结构参数值. 在此基础上, 再利用一个简单的格子结构型与偏振光干涉型光交错复用器结构参数之间的数学等效关系, 即可直接对格子结构型光交错复用器的结构参数进行设计. 该方法还可用于其它一切需要平坦化光谱透射率函数的滤波器.

参考文献:

- [1] SHINE B, BAUTISTA J. Interleavers make high-channel-count system economical [J]. *Lightwave*, 2000(8):140-144.
- [2] OGUMA M, JINGUJI K, KITOH T, et al. Flat-passband interleaver filter with 200 GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure [J]. *Elect Lett*, 2000, 36(15):1299-1300.
- [3] AMMANN E O. Synthesis of optical birefringent networks [C]// *Progress in Optic IX*, Amsterdam, North-Holland, 1971:123-177.
- [4] CARLSEN W J, BUHRER C F. Flat passband birefringent wavelength-division multiplexers [J]. *Electron Lett*, 1987, 23(3):106-107.
- [5] ZHANG J, LIU L R, ZHOU Y, et al. Flattening spectral transmittance of birefringent interleaver filter [J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, 50(13):2031-2041.
- [6] ZHANG J, LIU L R, ZHOU Y. Novel and simple approach for designing lattice-form interleaver filter [J]. *Optics Express*, 2003, 11(18):2217-2224.
- [7] EDWARDS R E. Fourier series: a modern introduction volume I [M]. 2nd ed. Beijing: Word Publishing Corporation, 1979:78-103.

(编辑:陈海清)