

文章编号:1002-2082(2007)04-0445-04

马赫-曾德尔光纤干涉仪型梳状滤波器优化计算

王小力, 朱益清, 朱拓

(江南大学 理学院, 江苏 无锡 214112)

摘要: 提出了一种具有方波形输出谱的级联马赫-曾德尔光纤干涉仪型梳状滤波器的优化计算方法。利用传输矩阵法将级联马赫-曾德尔光纤干涉仪的输出光谱表示为显式函数, 采用独特的递推方法将理想的梳状滤波器的方波型输出函数展开, 当这2个函数的系数对比时, 有时候没有精确解, 此时利用Matlab, 通过特别的优化计算, 可以得到级联马赫-曾德尔光纤干涉仪的近似结构参数, 使其输出谱近似为方波。设计实例表明: 此种优化计算方法非常方便、灵活和有效。

关键词: 级联马赫-曾德尔干涉仪; 梳状滤波器; Matlab; 优化计算

中图分类号: TN253-32

文献标志码: A

Optimization calculation of interleaver made of cascade Mach-Zehnder fiber interferometer

WANG Xiao-li, ZHU Yi-qing, ZHU Tuo

(School of Science, Southern Yangtze University, Wuxi 214112, China)

Abstract: An optimization calculation of interleaver made of cascade Mach-Zehnder fiber interferometer with square wave is put forward. Based on transmit-matrix, the output spectrum from the cascade M-Z interferometer can be expressed as explicit function, the square wave output function of perfect interleaver can be expanded in a unique recursion way. Sometimes there is no accurate outcome when the terms of the two functions are compared, but approximate structure-parameter of cascade Mach-Zehnder fiber interferometer can be obtained by optimizing calculation method with Matlab, which can make the output-spectrum an approximate square wave. The design example indicates that this method is convenient, flexible and effective.

Key words: cascade Mach-Zehnder interferometer; interleaver; Matlab; optimization calculation

引言

密集波分复用(DWDM)系统的核心器件之一是光波分复用/解复用器。它的实现方法主要有:多腔介质薄膜滤波器(TFF)^[1-2];光纤光栅(FBG);熔融拉锥型(FBT)全光纤器件;阵列波导光栅(AWG)等。波分复用系统中,为了进一步提高带宽的利用率,信道间隔已从100GHz向50GHz甚至

更窄的方向发展。信道间隔越窄,对DWDM器件的要求就越高,其制造工艺的难度也越大,器件的造价也越高。梳状滤波器(Interleaver)技术的提出正是为了解决在DWDM系统中所遇到的上述问题。它是将信道分成奇偶2个群组从2个通道输出,每个通道上复用信号的信道间隔得到加倍。这样,使用信道间隔较宽的波分复用器就可以实现信道

密度较高的复用度, 达到增加带宽的利用率, 降低系统成本的目的。

Interleaver 技术实现方案多种多样, 主要包括光纤马赫-曾德尔干涉仪型^[3]、偏振光干涉型^[4]、迈克尔逊 G-T 干涉仪型^[5]、光纤光栅型^[6]和阵列波导光栅等。全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器由于其插入损耗小, 与光纤兼容性好以及具有梳状滤波等优点, 将是制作 Interleaver 的很好的技术方案, 但是单级马赫-曾德尔干涉仪滤波器的通带特性是正弦型的, 这要求光信号的频率必须很好地与滤波器的峰值频率吻合, 因而对激光器的性能要求较高, 不利于实际使用。如果采用多个耦合器串接的方法, 形成级联马赫-曾德尔干涉仪, 通过合理的设计, 可以使滤波器通带顶部的宽度和平坦性大大改善, 从而降低器件对光源波长的敏感性, 提高其输出的稳定性。

利用传统的传输矩阵法对级联马赫-曾德尔干

涉仪的输出谱函数进行了推导和分析, 并提出一种独特的递推方法, 将理想的梳状滤波器的方波型输出谱进行展开。当与级联马赫-曾德尔干涉仪的输出谱的显式函数进行对比时, 有时候会得不到精确的解。此时用 Matlab 进行特殊的优化计算, 通过多次优化, 可以确定近似的干涉臂臂长差序列组合和各个耦合器的耦合比, 设计出通带十分接近方波的级联马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器。当输出谱用傅里叶级数展开时, 也涉及到求解多项式系数的问题, 也可以用这种优化计算方法进行求解。因此, 凡涉及到 2 个多项式对比进行求解系数的计算时, 都可以用此种方法, 所以这种优化计算方法具有普遍的意义, 也是一种方便、灵活和有效的方法。

1 基本理论

级联马赫-曾德尔光纤干涉仪是由多个光纤耦合器通过干涉臂串联组成的, 其结构如图 1 所示。

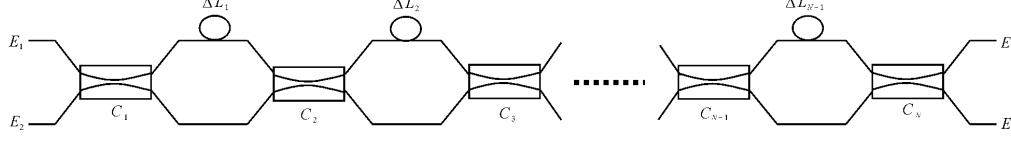


图 1 级联马赫-曾德尔光纤干涉仪的结构图

Fig. 1 The structure of cascade Mach-Zehnder fiber interferometer

第 i 个耦合器的传输矩阵可表示为

$$S_i = \begin{bmatrix} k_i / \sqrt{1+k_i^2} & -j / \sqrt{1+k_i^2} \\ -j / \sqrt{1+k_i^2} & k_i / \sqrt{1+k_i^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若 κ 为耦合系数, d 为耦合器的有效耦合长度, 令 $k = \cos(\kappa d) / \sin(\kappa d)$, k 是耦合器的光场耦合比。

光纤干涉臂是一个简单的双延迟线系统, 其传输矩阵也可统一表示为

$$T_i = \begin{bmatrix} \exp(j\theta_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 θ_i 是第 i 个干涉臂的臂长差 ΔL_i 所引起的位相差, $\theta_i = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L_i$, 其中 n 是光纤的折射率, λ 是光在真空中的波长。当干涉臂的臂长差为整数时, 利用 Matlab 的符号运算功能可以很方便地得到输出谱函数的具体表示式:

$$I = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(k\theta) \quad (3)$$

式中 k 为整数。可见级联马赫-曾德尔光纤干涉仪

的输出函数包含了若干余弦函数项。

理想的梳状滤波器应该具有方波型的输出谱。如果能把方波近似地表示为若干项余弦函数的和, 就可以与前面得到的级联马赫-曾德尔干涉仪的输出谱函数进行对比, 利用 Matlab 进行优化计算, 找出合适的结构参数, 使其输出谱的形状近似为方波。方波可以用傅里叶级数展开得到余弦函数和的多项式, 但如果与输出谱函数比较, 就要舍弃较多项, 这样就会形成比较大的抖动, 所以得到的输出谱函数效果不理想。可以采用下面一种递推方法, 用余弦多项式构造比较理想的方波, 其中 θ 表示弧度, 设

$$f_0 = \cos^2 \theta$$

$$f_1 = f_0 \cdot (2 - f_0)$$

$$f_2 = (1 - f_1) \cdot [2 - (1 - f_1)]$$

$$f_3 = f_2 \cdot (2 - f_2)$$

$$f_4 = (1 - f_3) \cdot [2 - (1 - f_3)]$$

借助于 Matlab 的运算, 可得到 f_4 的具体表达式:

$$\begin{aligned}
 f_4 = & \frac{1092744413}{2147483648} + \frac{40343091}{67108864} \cos(2\theta) - \\
 & \frac{1906365}{134217728} \cos(4\theta) - \frac{8439823}{67108864} \cos(6\theta) + \\
 & \frac{1930103}{268435456} \cos(8\theta) + \\
 & \frac{1912511}{67108864} \cos(10\theta) - \\
 & \frac{285895}{134217728} \cos(12\theta) + \dots - \\
 & \frac{1}{2147483648} \cos(32\theta) \quad (4)
 \end{aligned}$$

函数 f_4 随 θ 的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可以看到这时已经有了比较好的效果。当只保留 f_4 的前 7 项时, 对曲线没有太大的影响。所以, 可以用(4)式的前 7 项作为模拟曲线的基准。注意到这些余弦函数都为偶数余弦, 而对(3)式分析可知, 选取合适的干涉臂的臂长差, 也可以使输出的余弦函数为偶数余弦。这样就可以对 2 个多项式进行对比和求解系数, 以确定干涉仪的结构参数。

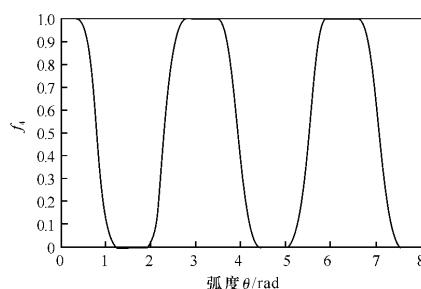


图 2 函数 f_4 随 θ 的变化曲线

Fig. 2 Variation of function f_4 with θ

2 优化计算方法

当所用耦合器比较少时, 展开项比较简单, 用 Matlab 里面的 solve 语句可以直接求解; 当耦合器比较多时, solve 语句已经无法得到结果, 此时可以用 Matlab 里面优化工具箱中的 fmincon() 函数进行求解, 想办法构造 fmincon() 函数的受限式和主值式, 然后用 while 语句进行循环求解, 得到比较好的优化解。

当用输出谱函数与上面特殊的递推方法推出的方波近似展开式进行系数比较的时候, 主要遇到下面 2 个方面的问题:

1) 当没有精确解(大多数情况是没有精确解)时, 只能找优化解, 这就要求各个系数的系数比最

接近(误差最小);

2) 对于找的参数, 有时候画出的曲线形状符合要求, 但波峰的平坦部分不能达到最大值 1, 而波谷的平坦部分也不能到 0, 这与我们的要求不符。

对于以上 2 个问题, 正好可以据此要求构造 fmincon() 函数的受限式和主值式, 以下是具体解决方法。

1) 用展开式(4)作为比较式, 先算出 $\cos(2\theta)$, $\cos(4\theta)$, $\cos(6\theta)$, $\cos(8\theta)$, $\cos(10\theta)$ 的系数与 $\cos(12\theta)$ 的系数的标准比值, 分别为 $a_2 = 282$, $a_4 = 6.67$, $a_6 = 59.1$, $a_8 = 3.36$, $a_{10} = 13.4$ 。当选定了干涉臂的臂长差时, 可以得到输出谱函数。此时用下式作为 fmincon() 函数中的受限式:

$$f = (a_{i0}/a_{12} - a_i)/a_i \quad (5)$$

式中: a_{i0} ($i=2, 4, 6, 8, 10$) 为输出谱函数对应的 $\cos(i\theta)$ 的系数; a_{12} 为 $\cos(12\theta)$ 的系数; a_i ($i=2, 4, 6, 8, 10$) 为展开式的系数的标准比值。

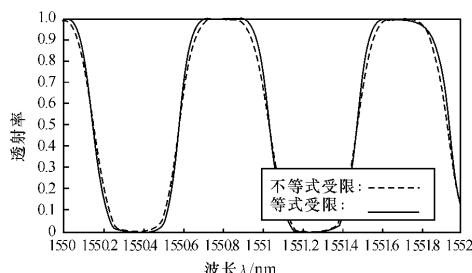
当要求展开式的级数比较多时, 同样可以用这种方法得出 fmincon() 函数中的受限式。

2) 为了使得到的曲线波峰的平坦部分能尽量达到最大值 1, 而波谷的平坦部分也尽量达到 0, 可以用下式作为 fmincon() 函数的主值式:

$$f = 1 - [(I(\pi/2) - I(0))/(1 + k_i^2)]^2 \quad (6)$$

式中: $I(\pi/2)$ 表示输出谱函数在 $f = \pi/2$ 时的表达式; $I(0)$ 表示输出谱函数在 $f = 0$ 时的表达式; k_i ($i=2, 4, 6, \dots$) 为待求的分光比。

fmincon() 函数的受限形式有 2 种, 一种为不等式受限 c[], 另一种为等式受限 ceq[]。其实这 2 种受限式有比较相同的功能。但在解决此类优化问题时, 等式受限比不等式受限更加有效, 更加精确, 可以得到更好的结果。例如, 设计一个在 1550 nm 波段、复用信道的波长间隔为 0.8 nm 的滤波器(假设光纤的纤芯折射率 $n = 1.457$, 则 $K = 1.0295$), 当用 5 个耦合器, 干涉臂的臂长差取 $\Delta L = K [2, -2, -4, 4]$ mm 时, 将不等式受限 c[] 设为空, 将得到的受限式导入等式受限 ceq[], 可以得到一组近似 k 值, $k = [-0.0685, 1.0711, 0.6350, 0.4639, -0.1443]$; 当将等式受限 ceq[] 设为空, 而将得到的受限式导入不等式受限 c[] 时, 可以得到另一组近似 k 值, $k = [16.8552, 1.0000, 0.5889, 0.3895, 16.9146]$ 。将 2 组 k 值带入输出谱函数, 得到 2 组输出谱函数曲线, 可以看出, 用等式受限得出的结果明显优于不等式受限。得到的结果如图 3 所示。

图3 不同 k 值的马赫-曾德尔光纤干涉仪输出谱Fig. 3 Output spectrum of M-Z fiber interferometer with different k

`fmincon()` 函数中受限式的个数与未知数的个数也有一定关系, 受限式的个数最好与未知数的个数相等。如果受限式的个数多于未知数, 此时如果将受限式全部作为等式受限, 会得不到结果; 这时可以在等式受限式不超过未知数的情况下, 将部分受限式作为不等式受限, 这样可以得出结果。当使用较少的耦合器时, 同样可以用(4)式作为比较式, 此时也会得到 5 个受限式, 多于未知数。可以将其中的部分受限式作为不等式受限来计算, 在等式受限式个数不超过未知数个数的情况下, 也可以得到比较好的结果。例如, 如果用 4 个耦合器进行设计, 可以选择干涉臂的臂长差为 $\Delta L = K[6, -2, 4]$ mm, 用 2 个受限式作为不等式受限, 可以得到一组近似 k 值, $k = [24.5449, -1.1497, -1.6479, -4.4449]$, 将 k 值带入输出谱函数, 得到输出谱曲线, 如图 4 所示。可以看出, 此时曲线也有比较好的效果。

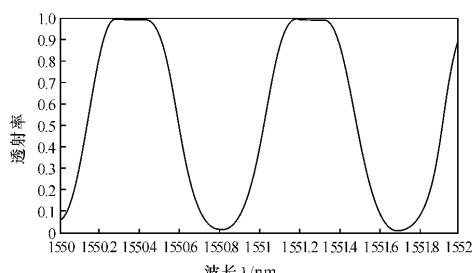


图4 级联马赫-曾德尔光纤干涉仪的输出谱

($N = 4$; $\Delta L = K[6, -2, 4]$ mm; $k = [24.5449, -1.1497, -1.6479, -4.4449]$)

Fig. 4 Output spectrum of cascaded M-Z fiber interferometer
($N = 4$; $\Delta L = K[6, -2, 4]$ mm; $k = [24.5449, -1.1497, -1.6479, -4.4449]$)

果有一定影响。此时可以在Matlab 中用while 循环语句, 直到`fmincon()` 函数中的`fval` 小于某个值(如 0.01); 选取使`fval` 最小的那一组 k 值, 就得到了最优解。

3 结束语

利用传输矩阵的方法推导出级联马赫-曾德尔干涉仪的输出谱函数并分析其特点, 提出了一种独特的方波函数递推展开方法, 用 Matlab 优化工具箱中的`fmincon()` 函数进行优化计算, 利用展开式和输出谱的特点构造`fmincon()` 函数中的受限式和主值式, 并用 while 语句得到最优解。理论上, 不管耦合器的个数是多少, 只要干涉臂的臂长差选取合适的比例, 通过以上优化计算方法总能找到一组合适的解, 使输出谱最优。凡涉及到 2 个多项式对比进行求解系数的计算时, 都可以用此种方法, 所以这种优化计算方法具有普遍的指导意义, 也是一种方便、灵活和有效的方法。

参考文献:

- [1] MINOWA J, FUJI Y. Dielectric multilayer thin-film filters for WDM transmission systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(3): 116-121.
- [2] KAJIKAWA M, KATAOKA I. A design method of optical bandpass filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(9): 300-305.
- [3] 苏鹏, 杨华勇, 李智忠, 等. 对称结构光纤光栅耦合器及其应用[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 133-136.
SU Peng, YANG Hua-yong, LI Zhi-zhong, et al. Symmetric fiber grating coupler and its application [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 133-136. (in Chinese)
- [4] TAI K, CHANG B. Wavelength-interleaving bidirectional circulators[J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2001, 13(4): 320-322.
- [5] DINGEL B B, IZUTSU M. Multifunction optical filter with a Michelson-Gires-Tournois interferometer for wavelength-division multiplexed network system applications[J]. Optical Letters, 1998, 23(14): 1099-1101.
- [6] 李志全, 许明妍, 汤敬, 等. 光纤光栅传感系统信号解调技术的研究[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 36-41.
LI Zhi-quan, XU Ming-yan, TANG Jing, et al. Study on techniques of signal demodulation in fiber Bragg grating sensing system[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(4): 36-41. (in Chinese)

当用这种优化方法求解时, 初始值的选取对结