

优化二元相位取样光纤布喇格光栅及对色散和色散斜率补偿的应用*

刘玉敏^{1,2} 俞重远^{1,2} 杨红波^{1,2} 张 娜^{1,2} 张晓光^{1,2}

(1 北京邮电大学理学院, 北京 100876)

(2 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京, 100876)

摘 要 利用粒子群算法对二元相位取样光栅的周期相位调制进行优化设计, 在此基础上提出了基于二元相位取样光纤布喇格光栅的色散和色散斜率补偿技术. 通过光栅周期啾啾可以调整每个信道的带宽, 色散量由子光栅长度决定, 调整取样函数的啾啾系数可以改变色散斜率, 因此可以设计出用于波分复用系统的多信道色散补偿器件.

关键词 相位取样光栅; 色散补偿; 色散斜率补偿; 光通信

中图分类号 TN253; TN929. 11

文献标识码 A

0 引言

波分复用(WDM)是提高通信系统容量的非常有效的方法之一, 色散补偿在全光通信网中是关键的技术^[1,2]. 伴随着级联掺铒光纤放大器(EDFA)在高速率 WDM 系统中的广泛应用, 基本解决了光纤损耗问题, 光纤的色散成为系统的重要限制因素, 如何有效地解决波分复用系统的色散成为光纤通信的焦点. 针对色散的物理机制, 人们研究了各种色散补偿技术, 如色散支持法、预啾啾技术、色散补偿光纤法、频谱翻转法、啾啾光纤法等. 其中啾啾光纤光栅以其体积小、补偿率高, 易实现动态调谐等优点而成为色散补偿领域的研究热点^[3]. 随着密集波分复用系统的应用, 越来越多信道在同一根光纤中传输, 原先被人们忽略的色散斜率补偿问题开始逐渐显露出来, 并引起广泛关注^[4~6]. 取样光栅就是在传统的光栅基础上对光栅折射率的幅度或相位调制包络进行周期性取样制做而成, 能够同时对多个 WDM 信道进行色散补偿, 因此与传统单信道光纤光栅相比, 在 WDM 系统的色散补偿方面更具有优势^[7~9]. 幅度取样光栅在频域包络上表现为 sinc 函数的形式, 其频谱的第一级零点限制了能够利用的信道数目. 扩大信道数目的办法就是减小占空比, 这样带来的缺点是光敏光纤很多部分没有刻上光栅, 因此造成极大的浪费, 使得信道反射率总体下降. 当信道数目增加, 需要很高的折射率调制幅度, 对光纤的光敏性提出了很高的要求, 同时制作的光栅损耗也会变大. 相位取样光栅能够克服以上缺点^[8],

但连续的相位取样给制造相位掩模版带来困难. “Dammann”光栅^[9]是纯二元相位光栅, 用于产生等间隔等强度的光斑. 二元纯相位取样光纤布喇格光栅借用了“Dammann”光栅技术, 在光纤光栅的每个取样周期内引入多个 π 相移, 这样周期取样函数的傅里叶谱强度代表了光栅在该信道处的耦合强度. 与多级相位取样光栅相比, 二元相位取样光栅的优点是在取样周期内光栅的相位只有 0 和 π , 从理论上讲制作要简单些, 目前国内外尚未见到有关利用二元相位掩模版制作多信道光纤布喇格光栅的报道. 本文利用 PSO 算法对二元相位抽样光栅进行纯相位优化取样, 从而在理论上获得类似“Dammann”光栅性质的多个等强度的反射信道, 并通过合理的参数设计实现色散和色散斜率的同时补偿.

1 二元相位取样光栅的优化设计

设计二元相位取样光栅的关键是确定光栅每个周期内交错相位取样的段数, 以及每段相位取样的长度, 从而使取样函数中心的傅里叶强度相等, 并获得最大值. 本文利用粒子群优化(PSO)算法来设计每个光栅取样周期内的二元相位取样长度.

1.1 PSO 算法原理

PSO 算法与其它演化算法类似, 是基于群体的优化算法^[10,11], 根据群体中对个体的适应度将群体中的个体移动到好的区域. 与其它演化算法不同的是 PSO 算法不对个体使用演化算子, 而是将每个个体看作 d 维搜索空间中无体积的粒子, 该粒子以一定速度在空间中飞行, 飞行速度取决于本身的飞行经验以及群体同伴的飞行经验, 因而是一个动态调整的过程. 假设第 i 粒子的位置表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, 该粒子经历的最好位置为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$,

* 国家 863 计划(No. 2003AA311070)资助项目

Tel: 010-62281490 Email: liuyuminhqy@263.net

收稿日期: 2004-09-01

该位置对应的目标函数具有最好的适应度,就是对目标的误差最小. 群体中所有微粒经历过的最好位置用符号 p_g 表示, $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$, 微粒 i 的速度用 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 表示, 标准的粒子速度和位置的演化方程可以表示为^[8]

$$v_{id} = \omega v_{id} + \phi_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}) + \phi_2 \text{rand}() (p_{gd} - x_{id}) \quad (1a)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (1b)$$

式中 ω 表示惯性权重, ϕ_1, ϕ_2 为加速度常数, $\text{rand}()$ 为 $0 \sim 1$ 的随机数, 式(1a)第一项表示粒子先前的速度对下一代的影响, 第二项表示粒子的个体认知部分, 第三项表示粒子的社会信息共享合作影响. 标准的 PSO 算法中只引入了惯性权重, 为了进一步提高系统性能, 可以引入了综合权重 K , 表达式为 $K = 2|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|^{-1}$, 式中 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \varphi > 4$, 这样 PSO 的速度更新表达式为

$$v_{id} = K[v_{id} + \varphi_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}) + \varphi_2 \text{rand}() (p_{gd} - x_{id})] \quad (2)$$

本文中利用惯性权重与综合权重结合的办法来设计光栅, 速度和位置表达式表示为

$$v_{id} = K[\omega v_{id} + \varphi_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}) + \varphi_2 \text{rand}() (p_{gd} - x_{id})] \quad (3a)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (3b)$$

PSO 优化算法的另一个关键问题是设置适应度函数, 也就是评估每个粒子对目标的适应程度, 粒子越

接近目标, 该粒子的适应度越高, 同时误差也就越小, PSO 程序的伪代码可以表示如下:

初始化粒子群(随机产生)

Do

For $i=1$ to 粒子群数目

If $F(x_i) < F(p_i)$ then $p_i = x_i$;

$p_g = \min(p_{\text{neighbours}})$ (在拓扑结构中寻找最优值)

for $d=1$ to 优化变量个数

$$v_{i,d} = \omega v_{i,d} + \varphi_1 \text{rand}() (p_{i,d} - x_{i,d}) + \varphi_2 \text{rand}() (p_{g,d} - x_{i,d})$$

$$v_{i,d} = \text{sign}(v_{i,d} \min(\text{abs}(v_{i,d}), v_{\text{max}}))$$

$$x_{i,d} = x_{i,d} + v_{i,d}$$

Next d

Next i

Until 搜索条件结束(执行一定的叠代次数后, 或最优值的误差函数已经足够小)

其中 $\text{rand}()$ 表示 $0 \sim 1$ 之间的随机数, $\text{sign}()$ 为提取符号函数, $\min()$ 为取最小值函数, $F()$ 求解问题的适应度函数. 以上伪程序中为了避免使粒子陷入局部最小值, 引入了邻居拓扑结构^[9], 主要体现在考虑社会认同部分的影响时, 并不是受全局最好粒子的影响, 而是受该粒子在一定的拓扑结构内粒子的影响. 这样可以使粒子向群体最好粒子学习的过程变慢, 从而有利于扩展搜索空间. 采用如表 1 的粒子群拓扑结构, 假定整个群体有 20 个粒子构成.

表 1 粒子群体邻居关系

个体	邻居	个体	邻居	个体	邻居	个体	邻居
1	2,3,4,5,6	6	1,4,5,14,15	11	3,10,12,14,19	16	8,9,10,18,20
2	1,3,7,8,9	7	2,3,5,9,13	12	4,5,8,11,17	17	8,12,13,18,19
3	1,2,7,10,11	8	2,4,12,16,17	13	7,15,17,19,20	18	10,14,15,16,17
4	1,6,8,9,12	9	2,4,7,10,16	14	6,11,15,18,19	19	11,13,14,17,20
5	1,6,7,12,20	10	3,9,11,16,18	15	6,13,14,18,20	20	5,13,15,16,19

对于粒子群中有更多粒子的情况, 可以进一步划分子群, 每个子群体有 20 个粒子, 每个子群体独自进行优化, 当执行一定的代数后, 子群之间进行全局优化, 全局优化一定次数后, 子群继续按照各自的拓扑结构优化. PSO 算法的子群结构决定了该算法具有先天的分布式处理和并行能力, 因此有能力处理大规模优化问题. 与其它智能优化算法相比, 粒子群算法结构相对简单, 没有类似遗传算法的交叉、变异等复杂操作. 粒子群算法只有 3 个控制参数, 容易找到合适的算法控制参数. 而模拟退火算法和遗传算法, 变异概率和退火温度的控制面临着具体问题的差别. 参数选择不当, 优化性能严重下降. 本文利用 PSO 进行优化设计选择的参数分别为: $\phi_1 = 1.1, \phi_2 = 3.0, \omega = \max\omega - (\max\omega - \min\omega) \cdot$

$\text{Iter}/\text{Loop}.$ $\max \omega, \min \omega$ 分别为惯性权重的最大值和最小值, Iter 和 Loop 分别为当前和最终叠代次数, 这样权重会从小变大变化, 以便在开始的时候扩大搜索范围, 搜索到一定程度后开始精细搜索.

1.2 取样周期内相位取样的优化设计

根据以上讨论, 来设计二元相位取样光栅. 首先将取样光栅周期分成六段, 每段交错进行相位取样, 幅度值为 $0, \pi$, 每个段的长度为优化目标, 六段总的长度之和为一个取样光栅周期. 六段长度数据就构成了 PSO 算法中的一个粒子, 因此每个粒子由长度为六的矢量构成, 矢量的长度就是粒子的维数. 为了计算光栅的傅里叶谱强度, 在光栅周期内等间隔的进行相位采样, 得到相位采样数据 $\text{phase}(1), \text{phase}(2), \dots, \text{phase}(m)$, 其中 m 是采样点数, 各个信

道的耦合强度取决于采样数据的傅里叶谱的强度. 信道强度可以表示为

$$f(1,2,\dots,m) = Abs[FFT(\exp(\text{iphase}(1)), \exp(\text{iphase}(2)) \dots \exp(\text{iphase}(m)))] \quad (4)$$

式中 i 为虚数, FFT 表示快速傅里叶变换, Abs 表示对傅里叶谱取模. 设计的目的是:

- 1) 使取样周期的频域包络中心附近的频谱强度大小一致;
- 2) 使取样光栅调制的频域包络中心附近频谱强度最大.

假定中心部分信道的频谱强度分量表示为 $f(p, p+1, \dots, q)$, 可以将设计的问题转化为受限的多目标优化问题, 多目标优化问题再转化为单一的目标函数, 采用的目标函数即为适应度函数可以表示为

$$fit = [\max(f(p), f(p+1), \dots, f(q)) - \min(f(p), f(p+1), \dots, f(q))] + 1/\text{mean}[f(p), f(p+1), \dots, f(q)] \quad (5)$$

最终目的是使式(5)取得最小值. 式(5)中第一项使中心频谱分量幅度一致, 第二项使频谱分量尽可能取最大值, $\text{mean}()$ 表示求平均值.

以下数据为优化设计得到的取样周期内每段长度占整个周期的比例, 如图 1. 图 2 为对应的调制包络的中心部分傅里叶谱强度.

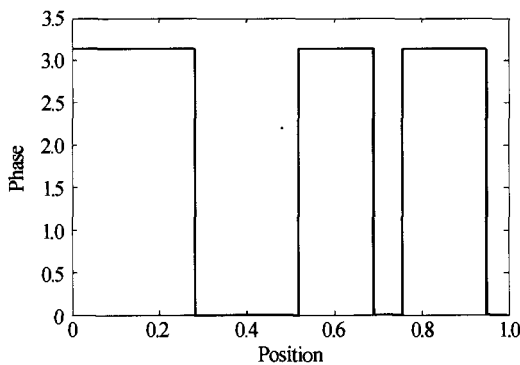


图 1 一个取样周期内的二元相位取样分布
Fig. 1 The phase sample distribution of a period

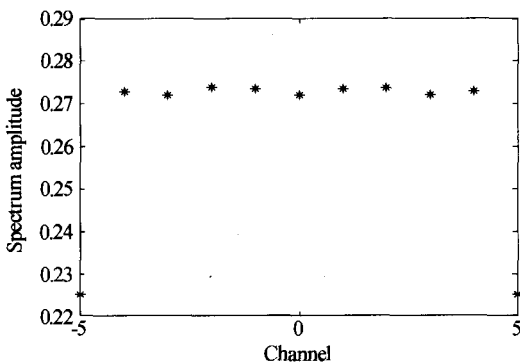


图 2 图 1 相位取样分布对应的傅里叶谱级数
Fig. 2 The fourier series of the phase sample

2 设计周期啁啾和取样周期啁啾用于色散和色散斜率补偿

要实现信道的色散和色散斜率补偿需要在光栅中引入两个参数: 光栅周期啁啾和抽样周期啁啾, 分别用于调整每个信道的色散和色散斜率. 利用传输矩阵法对以上优化的结果进行数值模拟, 取中心布喇格波长为 1550 nm, 光栅频谱间隔取 0.8 nm, 光栅反射谱间隔决定了光栅的取样周期 $P = \frac{\lambda_B}{2n_{\text{eff}}\Delta\lambda}$, 式中 n_{eff} 为光栅的等效折射率, $\Delta\lambda$ 为要设计的信道间隔, λ_B 是布喇格波长, 由光栅周期决定光栅周期啁啾采用线性啁啾, 啁啾带宽设计为 0.5 nm, 取样周期啁啾总的变化量为 2%, 光栅的有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 1.45$, 折射率调制的幅度调制为高斯切趾包络. 最大折射率调制幅度约为 $\delta n = 5 \times 10^{-4}$, 光栅长度为 10 cm. 图 3~图 5 分别 Matlab 仿真得到的光栅的反射、时延、和色散谱线, 其中可用信道数 11. 以上设计参数适合于补偿信道间隔为 100 GHz 的 WDM 系统. 每个信道的色散补偿量约为 1000 ps, 每个信道的带宽可以通过调整光栅的周期啁啾来调整. 而色散斜率可以根据实际的光纤类型来调整. 假定光纤的色散斜率为 S , 光栅取样周期啁啾量可

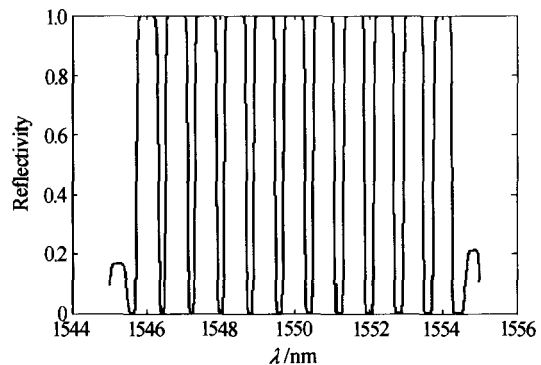


图 3 PSO 优化计算得到的反射谱曲线
Fig. 3 The calculated reflectivity spectrums by the PSO optimization

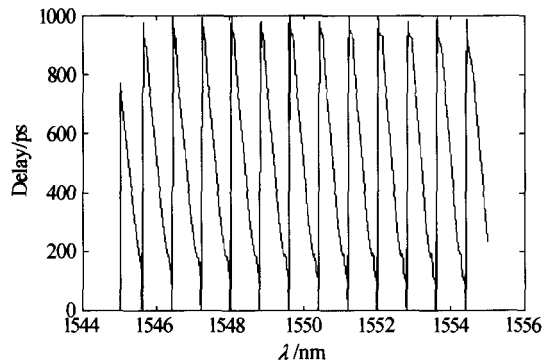


图 4 PSO 优化计算得到的时延谱线
Fig. 4 The calculated delay spectrums by the PSO optimization

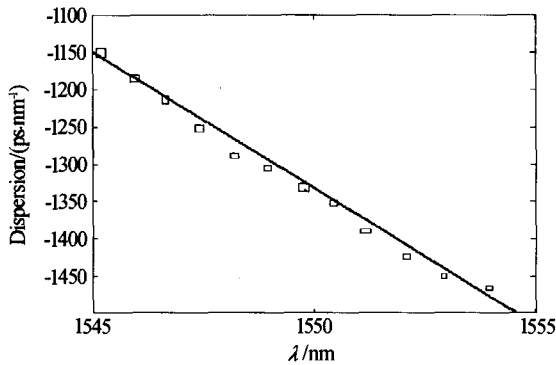


图5 优化计算得到的取样周期啁啾的光栅色散谱线
Fig. 5 The calculated dispersion spectrums by the PSO optimization

以由式决定^[8]

$$\delta P = (S/D) P_0 \Delta \lambda_{ch} \quad (6)$$

式中 D 为信道的色散参数, $P_0 \approx 1$ mm 为初始取样周期决定了信道间隔, δP 为取样周期啁啾量, 该值的大小取决于补偿光纤的类型以及补偿信道的间隔.

数值仿真中选择 $\frac{\delta P}{P_0} = 1.5\%$. 由图 5 可以看出, 光栅的色散近似线性变化.

3 结论

利用 PSO 算法对二元相位取样光纤布喇格光栅的相位取样分布进行了优化, PSO 算法是一种基于群体的优化算法, 而遗传算法和模拟退火算法则针对个体实行更新和变异, 与这些传统的智能优化算法相比, PSO 算法结构相对简单, 容易掌握对算法参数的控制, 而遗传算法或模拟退火算法, 则要复杂得多, 变异算子、交叉算子或退火温度等参数的控制通常与所解决的问题情况有关, 如果参数不当, 效率和优化性能将明显下降. PSO 算法则只有三个控制参数, 控制参数的变化对所解决问题不敏感; 通过控制叠代权重可以扩大搜索空间, 实现从粗放搜索到精细搜索, 另外本文中利用拓扑结构和多子群优化技术来提高搜索成功概率, 数值结果进一步验证了粒子群算法的有效性. 在 PSO 算法成功解决相位分布优化的基础上, 利用传输矩阵法对光栅周期和取样周期沿光栅长度方向线性啁啾变化的光栅特性进行了数值分析. 结果表明通过合理的调整光栅周期和取样周期的啁啾参数, 可以实现多信道色散和色散斜率的同时补偿. 由于对光栅的利用率为 100%, 当信道数目增加时, 纯相位取样光栅大大减少了对光栅最大折射率调制幅度的限制, 克服了对光敏光纤的强光敏性的依赖, 同时二元相位取样

光纤布喇格光栅的制作要比多元相位光栅制作要简单, 是很有前途的多信道色散和色散斜率补偿器件, 适合于多信道的 WDM 色散补偿系统.

参考文献

- 1 刘玉敏, 俞重远, 张晓光. 一种新型的可调谐非线性啁啾光纤光栅制造技术. 光通信研究, 2003, 5(10): 71~72
Liu Y M, Yu Z Y, Zhang X G. Study on Optical Communication, 2003, 5(10): 71~72
- 2 位恒政, 张志刚, 王淮生, 等. 飞秒脉冲制作啁啾光纤光栅的理论研究. 光子学报, 2004, 33(9): 1050~1053
Wei H Z, Zhang Z G, Wang H S, et al. Acta Photonica Sinica 2004, 33(9): 1050~1053
- 3 吴强, 余重秀, 辛雨, 等. 16 × 10Gb/s 啁啾光纤光栅色散补偿系统性能研究. 光子学报, 2003, 32(4): 451~453
Wu Q, Yu C X, Xin Y, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 451~453
- 4 Loh W H, Zhou F Q, Pan J J. Sampled fiber grating based dispersion slope compensation. IEEE Photonics Technology Lett, 1999, 11(10): 1041~1135
- 5 Nielsen T N, Eggleton B J, Rogers J A, et al. Dynamic post dispersion optimization at 40Gb/s using a tunable fiber Bragg grating. IEEE Photonics Technology Lett, 2000, 12(2): 173~175
- 6 刘玉敏, 俞重远, 杨红波, 等. 长周期光纤光栅级联作为没分复用隔离滤波器的研究. 光子学报, 2005, 34(4): 516~519
Liu Y M, Yu Z Y, Yang H B, et al. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(4): 516~519
- 7 Hojoon L, Govind P A. Purely phase-sampled fiber Bragg gratings for broad-band dispersion and dispersion slope compensation. IEEE Photonics Technology Lett, 2003, 15(8): 1041~1135
- 8 Kazimir Y. K, Rowland A S. Three-step design optimization for multi-channel fibre Bragg gratings. Optics Express, 2003, 11(9): 1029~1038
- 9 Dammann H, Gortler K. High-efficiency in line multiple imaging by means of multiple phase holograms. Opt Commun, 1971, 3(2): 312~315
- 10 Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58~73
- 11 Liu Y M, Yu Z Y, Zhang J Z, et al. Optimization design of flat-band long-period grating. J Chinese Optics Lett, 2004, 2(4): 200~202

Application of Dispersion and Dispersion Slope Compensation Based on Optimization of Binary Phase-Sampled Fiber Bragg Gratings

Liu Yumin^{1,2}, Yu Zhongyuan^{1,2}, Yang Hongbo^{1,2}, Zhang Na^{1,2}, Zhang Xiaoguang^{1,2}

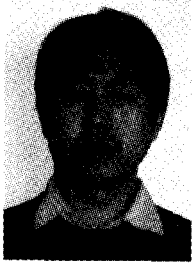
¹ School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

² Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies Ministry of Education, Beijing 100876

Received date: 2004-09-01

Abstract The binary phase-sampled fiber Bragg grating was optimized based on the particle swarm optimization method. Through the method, the dispersion and dispersion slope compensation technology were proposed by the binary phase-sampled fiber Bragg gratings. The bandwidth of each channel could be adjusted by the chirped period of the grating, and the total dispersion of each channel was dependent on the length of the seed grating. Finally the dispersion slope could be altered by adjusting the sampled function. So this technology is very attractive in design the multi-channel dispersion compensation devices for wavelength division multiplex system.

Keywords Phase-sampled fiber Bragg grating; Dispersion compensation; Dispersion slope compensation, Optical communication



Liu Yumin was born in Dingzhou, Hebei Province, China, and in 1976. He received his B. S degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. He began his M. S studies in the Beijing University of Posts and Telecommunications from Sep. 2000. Now he is pursuing the Ph. D. degree. His interests are nonlinear optics and critical technology of high-speed optical communication.