

文章编号: 1004-4353(2020)02-0134-06

FBG 阵列的多重反射性能优化

王小燕¹, 邓翼强²

(1. 三明学院 机电工程学院; 2. 三明学院 现代教育技术中心: 福建 三明 365004)

摘要: 为抑制光脉冲经过布拉格光纤光栅(FBG)阵列时所产生的冗余次级迭代多重反射,运用模式耦合理论和行列式法分析了 FBG 的反射特性及各项参数,得到了在固定结构低损耗二阶 FBG 阵列中抑制光脉冲多重反射的最优化光栅各参数.将优化参数应用于基于二阶 FBG 阵列的相关函数(检验光系统)的结果显示,光脉冲的自相关程度提高了约 28.6%,互相关程度降低了约 37.0%.这表明通过优化配置参数可有效降低 FBG 阵列的多重反射,进而可提高光通信与光传感系统的信号精度.

关键词: 模式耦合; FBG 阵列; 多重反射; 光振幅不均; 脉冲展宽

中图分类号: TN253

文献标识码: A

Multi-reflection optimization of FBG array

WANG Xiaoyan¹, DENG Yiqiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Sanming University;
2. Modern Education Technical Center, Sanming University: Sanming 365004, China)

Abstract: Redundant secondary iterative multiple reflections are generated when the optical pulse signal passes through the fiber Bragg grating (FBG) array, which leads to signal degradation and sensor accuracy degradation. Optical mode coupling theory and determinant method are used to analyze the characteristics of FBG, and the optimal parameters of fixed structure 2-tap FBG array are obtained to suppress the multiple reflections of optical pulse. The application in a 2-tap FBG-based correlation function inspection system shows that the auto-correlation of the light pulse is increased by 28.6%, and the cross-correlation is decreased by 37.0%. The results indicate that the signal accuracy of the optical communication and optical sensing system can be improved efficiently by optimizing the configuration parameters to reduce the multiple reflection of the FBG array.

Keywords: mode coupling; FBG array; multi-reflection; non-uniform amplitudes; pulse broadening

0 引言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG)是通过强紫外激光光束对单模光纤纤芯进行侧向曝光后在纤芯内部形成的空间相位光栅.由于 FBG 与电元件相比具有无可比拟的抗电磁、抗腐蚀以及体积小、质量轻、高波长选择性等优势,因此被广泛应用于光纤通信、光纤传感等领域^[1].光纤光栅在应用中通常是将多个光栅并列形成光栅阵列,以此实现对光信号的处理或者传感;但光信号在通过光栅阵列时,多个光栅对光脉冲的多重往返反射会引起迭代的次级冗余反射光脉冲,进而降低 FBG 的性能.目前,针对提高光纤光栅性能的研究大多集中于某一特定的应用,如啁啾光纤光栅主要用于色散补偿和激

收稿日期: 2020-04-20

作者简介: 王小燕(1984—),女,博士,讲师,研究方向为光纤通信及光信号处理.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11803015);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JA15474)

光整形^[2-3],再生光纤光栅主要用于高温环境^[4],飞秒激光器主要用于精确的材料切除和改性^[5],等等. FBG 在上述的应用中虽取得了很好的效果,但光栅阵列中存在的多重冗余反射并未得到有效消除. 因此,本文应用光模式耦合理论和行列式矩阵分析法,通过分析 FBG 阵列的各结构参数对冗余的次级迭代多重反射的影响,利用光信号脉冲宽度、光栅长度和光栅反射率等的相互关系得出了有效降低多重反射的最优参数配置.

1 FBG 阵列的分析

1.1 FBG 的模式耦合理论

在光纤光栅中,因存在周期性的介电微扰,其会使光波导的模式间发生耦合. 布拉格光纤光栅的模式耦合主要发生在布拉格波长附近的沿反向传播的模式间^[6-7],如图 1 所示. 假设 $R(z)$ 和 $S(z)$ 分别表示模场沿 $+z$ 和 $-z$ 方向缓慢变化的幅度,则由耦合理论^[8-9] 可得:

$$\frac{dR}{dz} = i\delta R(z) + i\kappa S(z), \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\delta S(z) - i\kappa R(z). \quad (2)$$

其中: δ 是直流自耦合系数, $\delta \equiv \delta + \sigma$, σ 是模式间失谐量, $\sigma = (2\pi/\lambda)\bar{\delta}_{\text{neff}}$; κ 是交流耦合系数, $\kappa = \kappa^* = \pi\nu\bar{\delta}_{\text{neff}}/\lambda$, $\bar{\delta}_{\text{neff}}$ 是光栅有效折射率.

求解由式(1) 和式(2) 组成的微分方程组可得输出信号与输入信号的幅度比:

$$\rho = S(-\frac{L}{2})/R(-\frac{L}{2}) = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L)}{\delta^2 \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L) + i\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L)},$$

由此可得 FBG 的反射率为

$$r = |\rho|^2 = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} L) - \delta^2/\kappa^2}. \quad (3)$$

1.2 FBG 阵列的行列式分析

由于光栅的折射率沿轴向是非均匀的,因此需要引入行列式矩阵算法来分析光栅特性. 图 2 中长度为 L 的非均匀光栅被等分为 M 个极小区间,由于分割后的极小区间其折射率变化极小,因此可将每个区间看作是均匀的光栅(用 2×2 矩阵来表示),进而图 2 所示的整段光栅可以用连乘矩阵表示^[10].

$$\begin{aligned} \text{令 } \begin{bmatrix} R(-\frac{L}{2}) \\ S(-\frac{L}{2}) \end{bmatrix} &= F \begin{bmatrix} R(\frac{L}{2}) \\ S(\frac{L}{2}) \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} R_0 \\ S(-\frac{L}{2}) \end{bmatrix} &= F_M \cdot F_{M-1} \cdot \dots \cdot F_i \cdot \dots \cdot F_1 \cdot \begin{bmatrix} R(-\frac{L}{2}) \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{式中 } F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\delta}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\delta}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \gamma_B \equiv \sqrt{\kappa^2 - \delta^2},$$

Δz 是光栅被分割后各极小区间的长度.

将行列式法应用到光栅阵列,并定义光栅刻入区、光栅间隔区的行列式分别为:

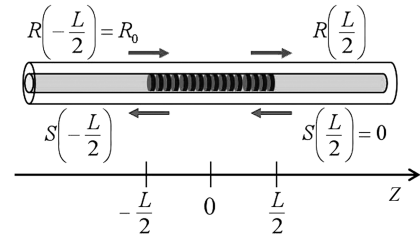


图 1 光纤光栅的光波耦合

$$F_1 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B L_{fbg}) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L_{fbg}) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L_{fbg}) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L_{fbg}) & \cosh(\gamma_B L_{fbg}) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L_{fbg}) \end{bmatrix},$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} \exp\left(-i \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} (L_b - L_{fbg})\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(i \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} (L_b - L_{fbg})\right) \end{bmatrix}.$$

图 3 为 FBG 阵列示意图. 图 3 中包含 a 个 FBG, 各 FBG 的长度为 L_{fbg} , FBG 间的间隔长度为 L_b . 将 F_1 和 F_2 代入式(4) 可得光栅阵列的光波导特性行列式, 为

$$\begin{bmatrix} R\left(\frac{L}{2}\right) \\ 0 \end{bmatrix} = (F_1 \cdot F_2)^{a-1} \cdot F_1 \cdot \begin{bmatrix} R_0 \\ S\left(-\frac{L}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}R_0 + T_{12}S\left(-\frac{L}{2}\right) \\ T_{21}R_0 + T_{22}S\left(-\frac{L}{2}\right) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由式(5) 可知, 光栅阵列的反射特性可表示为 $\rho = \frac{S\left(-\frac{L}{2}\right)}{R_0} = -\frac{T_{21}}{T_{22}}, r = \left| -\frac{T_{21}}{T_{22}} \right|^2$.

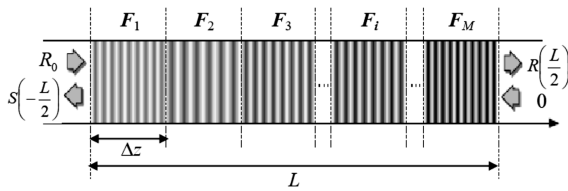


图 2 FBG 的传输矩阵行列式

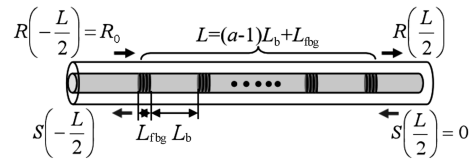


图 3 光纤光栅的阵列行列式

2 FBG 阵列反射谱中的多重反射

图 4 是光脉冲经过二阶光栅阵列的光线传输示意图. 图 4 中, 光脉冲每经过一个光栅时, 一部分光脉冲被往回反射, 其余部分光脉冲则继续传往下一个光栅. 从阵列中的第 2 个光栅起, 反射回的光脉冲在经过前面的光栅时, 总有部分光被折回重复反射, 如图 4 中的光线 ③ 所示. 为了分析光线 ③ 所示的多重反射光波对 FBG 阵列传输特性的影响, 本文利用光耦合理论和行列式矩阵模拟分析光导波在光栅阵列中的耦合情况, 得到如图 5 所示的反射脉冲. 图 5 中的脉冲信号 ①、② 与图 4 中的反射光 ①、② 相对应, 这 2 个脉冲信号是由 2 个光栅经过 1 次反射得到的脉冲信号. 图 5 中的信号 ③ 与图 4 中的多重反射光 ③ 相对应, 该反射脉冲信号是光在光栅阵列中传输时由次级迭代多重反射导致的冗余形成的. 显然可知, 这些迭代多重反射光脉冲在光信号处理和光传感过程中会造成信号劣化、频带利用率降低、传感精度下降等问题.

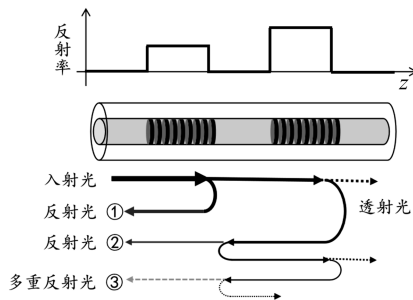


图 4 二阶光栅阵列中的多重反射

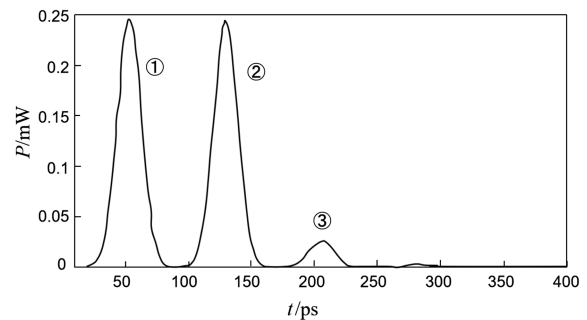


图 5 二阶光栅阵列的反射光脉冲

3 FBG 阵列多重反射特性的优化

3.1 FBG 阵列的各参数优化

由式(3)知,在理想实验室环境下,影响 FBG 反射率的因素主要包括 FBG 长度、模式间的失谐量 σ 和交流耦合系数 κ ,其中 σ 和 κ 是光栅有效折射率 \bar{n}_{eff} 和布拉格反射波长 λ_B 的函数;因此,可以认为常规 FBG 的反射率主要由 FBG 长度、光栅有效折射率和布拉格反射波长决定.基于此,本文依据模式耦合理论建立一个常规二阶 FBG 阵列模型,用以考察上述参数变化对 FBG 阵列多重反射特性的影响.

常规 FBG 的光栅长度一般为毫米级,因此在调整上述参数的过程中本文只考虑 1、2、3、4 mm 的光栅长度对多重反射特性的影响.在考察模型中将 FBG 阵列中的 2 个子 FBG 的结构参数设置为完全相同,并固定每个子 FBG 的反射率,然后通过调整光栅的有效折射率来改变 FBG 的长度.令输入光脉冲的功率为 1 mW,频域带宽为 0.07 nm,由此得到的光反射脉冲如图 6 所示.由图 6 中不同长度光栅的多重反射值得到图 7 所示的曲线图.由图 7 可以看出,FBG 阵列的多重反射率随 FBG 长度的增加而降低,当 FBG 的光栅长度增加到 4 mm 时,其多重反射率比 1 mm 长度时下降了约 19.7%.

布拉格反射波长虽然是由光系统决定的一个确定值,但在调整参数过程中发现,对于同一波长的输入光脉冲,不同的频谱宽度对多重反射率也有较大影响.如图 8 所示,在其他各参数不变的情况下,当脉冲带宽由图 6 的 0.07 nm 扩大至 0.2 nm 时,多重反射率降低了约 36.6%.由此可以看出,增大输入光脉冲的带宽可有效降低 FBG 阵列的多重反射率.

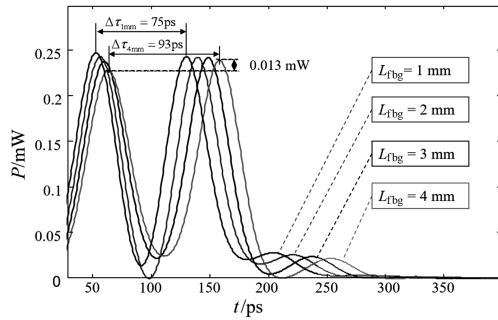


图 6 不同光栅长度的反射脉冲(输入脉冲带宽 0.07 nm)

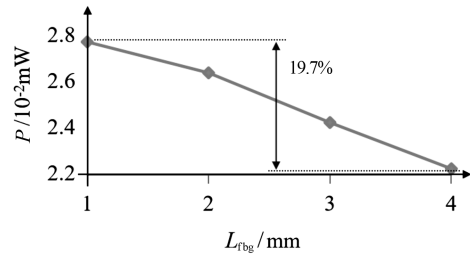


图 7 不同光栅长度的多重反射率

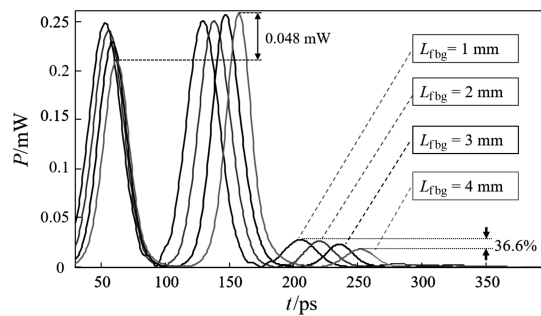


图 8 不同光栅长度的反射脉冲(输入脉冲带宽 0.2 nm)

另外,观察图 6 和图 8 中的反射脉冲可以发现,在光栅长度为 1 mm 的光栅阵列中,2 个光栅的反射脉冲的振幅基本一致,但随着 FBG 光栅长度的增加,二者的反射脉冲的振幅差逐渐增大.例如:图 6 中,当输入信号的频谱带宽为 0.07 nm,FBG 长度由 1 mm 增至 4 mm 时,二者的振幅差增加到 0.013 mW;图 8 中,当输入信号的频谱带宽为 0.2 nm,FBG 长度由 1 mm 增至 4 mm 时,二者的振幅差增加到 0.048 mW.同时,由图 6 和图 8 还可以看到,随着 FBG 光栅长度的增加,光脉冲通过光栅的时间变长,导致 2 个反射脉冲之间的延迟时间 $\Delta\tau$ 变长.如图 6 中,FBG 光栅长度为 1 mm 时,2 个脉冲间的延迟时

间约为 75 ps; 当 FBG 光栅长度增加到 4 mm 时, 2 个脉冲间的延迟时间增加至 93 ps.

由以上可知, 增加光栅长度和输入信号的频谱带宽虽然可以有效降低多重反射率, 但是同时也增加了 FBG 反射脉冲的振幅差和脉冲延迟. 对此, 若固定光栅的最高反射率, 通过降低纤芯有效折射率的方法来增加光栅长度, 虽可适当调节反射脉冲的振幅差, 但会导致光栅频谱宽度变窄, 降低光脉冲的通过速率(不同脉冲间的延迟时间变长); 若固定光栅长度, 通过增加纤芯有效折射率来提高光栅反射率, 虽可增加光栅频谱宽度, 缩小反射脉冲的延迟时间, 但过高的反射率会使频谱顶部出现饱和并导致带宽不足. 综合上述分析可知, 若既要有效降低 FBG 阵列的多重反射率, 又要保证 FBG 阵列的整体反射特性不受影响, 调整光栅时必须综合考虑输入脉冲的频谱宽度、单光栅长度、光栅阵列长度、光栅有效折射率和各光栅反射脉冲的振幅.

根据以上分析, 本文通过调试参数, 最终得到如图 9 所示的优化设计结果. 图 9 中的 3 条线分别表示不同输入信号带宽在不同光栅长度下的多重反射脉冲的功率值. 由图 9 可以看出, 当输入脉冲带宽为 0.52 nm、光栅长度为 3 mm 时, FBG 阵列的多重反射率最低; 但此时带宽过大, 反射脉冲发生畸变. 当输入脉冲带宽不变, 光栅长度超过 3 mm 时, 多重反射率升高(光栅的频域带宽不足所致). 经对图 9 综合分析, 当输入脉冲带宽为 0.34 nm、光栅长度为 4 mm 时, 光栅阵列可得最优参数解. 图 10 为运用该优化参数得到的不同光栅长度的反射脉冲图. 由图 10 可以看出, 在该优化参数下光栅阵列的多重反射率降低了 43.3%, 这表明本文给出的光栅阵列的最优参数解是有效的.

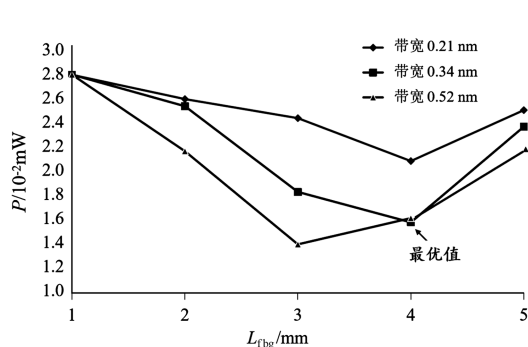


图 9 参数优化后的多重反射率

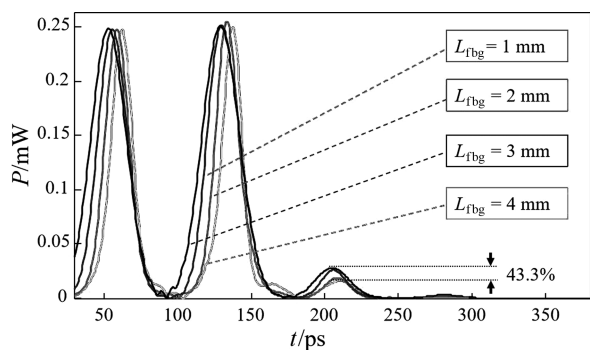


图 10 不同光栅长度的反射脉冲(输入脉冲带宽 0.34 nm)

3.2 参数优化结果在光系统中的检验

将参数优化前后的 FBG 阵列分别应用于图 11 所示的光信号处理系统中. 图中, 输入光脉冲的脉冲幅度为 10 ps, 频域带宽为 0.34 nm, FBG 阵列 1 为设计优化对象.

光脉冲经过 FBG 阵列 1 后得到被编码的脉冲. 编码脉冲经分波器分成两路: 一路经过与编码阵列相同的 FBG 阵列 1 得到输出信号 1, 即 FBG 阵列编码信号的自相关输出; 另一路经过与编码阵列不同的 FBG 阵列 2 得到输出信号 2, 即 FBG 阵列编码信号的互相关输出.

图 12 是光脉冲调整前后的 FBG 阵列的自相关和互相关的光波形图. 其中图 12(a)是参数调整前的 FBG 阵列的仿真结果, 图的最上方是原始 FBG 阵列结构和光脉冲经过 FBG 阵列之后的输出编码脉冲; 图 12(b)是参数优化后的仿真结果, 图的最上方是优化后的 FBG 阵列结构和优化后的输出编码脉冲. 由图 12 可以看出: 参数优化后, 反射光脉冲的振幅均匀一致, 多重反射率得到有效降低, 自相关的输出功率提高了约 28.6%, 互相关的输出功率下降了约 37.0%.

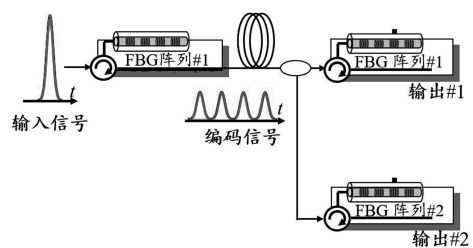


图 11 光栅阵列的自相关和互相关系统

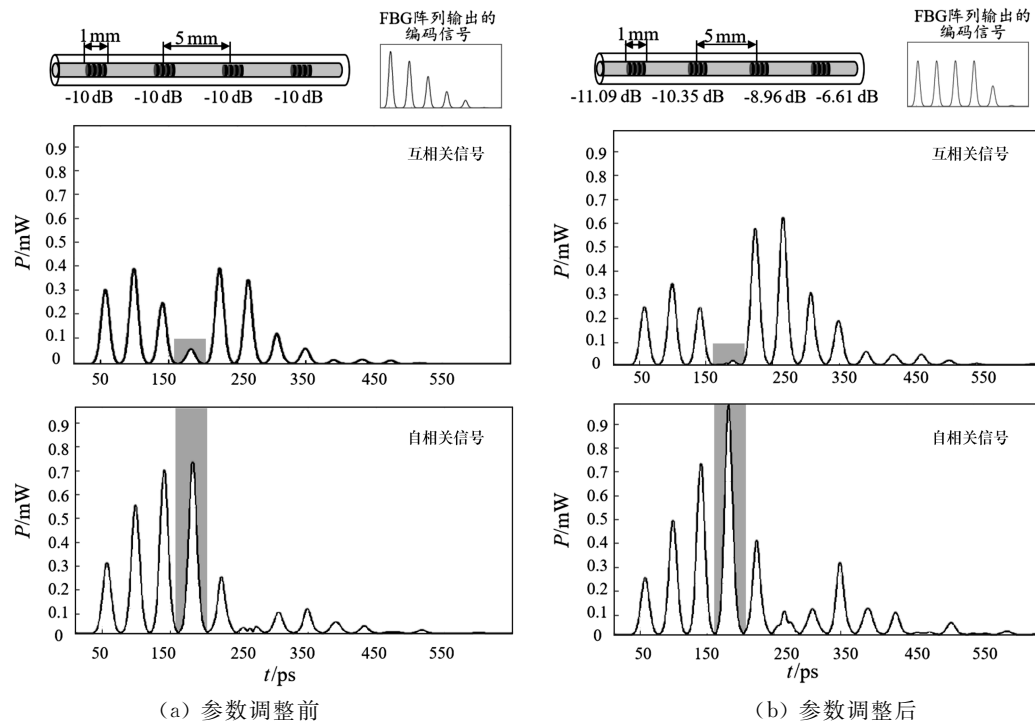


图12 参数调整前后的脉冲信号的自相关和互相关

4 结束语

本文通过分析 FBG 阵列的各参数对反射光脉冲中多重反射的影响,对二阶 FBG 阵列的各参数进行了优化.结果显示,优化后的 FBG 阵列的多重反射率比优化前降低了 43.3%.将优化后的参数应用于基于 FBG 阵列的自相关和互相关的系统中显示,自相关的输出功率提高了约 28.6%,互相关的输出功率降低了约 37.0%.上述结果表明,本文方法可有效地降低 FBG 阵列的多重反射,进而可提高光通信与光传感系统的信号精度.

本文分析中所用的 FBG 为常规 FBG,若对有效折射率发生变化的啁啾光纤光栅以及光栅长度较长的长周期光纤光栅等特殊光栅的参数进行优化,还需额外考虑其他因素,如光栅格子周期、纤芯折射率调制速率等.因此,在今后的研究中我们将对特殊的光栅开展研究,以使本文方法适用于多种不同光栅阵列的多重反射性能的优化.

参考文献:

- [1] WANG C, YAO J. Fiber Bragg gratings for microwave photonics subsystems[J]. Optics Express, 2013,19(21): 22868-22884.
- [2] HUANG Y, LI Y, ZHU H, et al. Tunable superstructure fiber Bragg grating with chirp-distribution modulation based on the effect of external stress[J]. Optics Letters, 2012,37(18):3918-3920.
- [3] 戴慧芳,陈鹏,赵靖寅,等.啁啾体布拉格光栅的脉冲响应特性[J].光学学报,2019,39(10):1005002.
- [4] 薛渊泽,王学峰,罗明明,等.再生光纤布拉格光栅的研究进展[J].激光与光电子学进展,2018,55(2):020007.
- [5] WANG Y, LI Z, LIU S, et al. Parallel-integrated fiber Bragg gratings inscribed by femtosecond laser point-by-point technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019,37(10):2185-2193.
- [6] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. IEEE J Lightwave Technol, 1997,15(8):1277-1294.
- [7] 饶云江,王义平,朱涛.光纤光栅原理及应用[M].北京:科学出版社,2006:110-130.
- [8] YARIV A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. IEEE J Quantum Electron, 1973,9(9):919-933.
- [9] KOGELNIK H. Guided-Wave Optoelectronics[M]. New York: Springer-Verlag, 1990.
- [10] 谢海鹤,林振衡,颜黄苹,等.膜层传输矩阵理论在布拉格光纤光栅分析中的应用[J].光子学报,2015,44(11): 1106003.