

基于取样 FBG 的可调谐多通道微波光子滤波器

王小燕, 郑联慧

(三明学院 机电工程学院, 福建 三明 365004)

摘要:微波光子滤波器(MPF)的参数不可调,限制了其在全光网络中的应用。运用光模式耦合理论和矩阵行列式分析取样光纤布喇格光栅(FBG)的频谱特性,利用取样 FBG 的周期性排列结构,研究得到一种多通道 MPF 的多参数可调谐设计,并建立了基于四阶取样 FBG 阵列的多通道 MPF 的仿真模型。仿真结果表明:提高光栅的折射率变化率可增大 MPF 通道带宽;增加相邻 FBG 的光程差可增大 MPF 通道间隔;控制 FBG 温度以调谐 MPF 中心波长,使 MPF 在低通、高通、带通及带阻滤波器之间可灵活切换。

关键词:微波光子滤波器;取样光纤布喇格光栅;多通道;可调谐;光模式耦合

中图分类号: TN20 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Tunable multi-channel microwave photonic filter based on sampled FBG

WANG Xiaoyan, ZHENG Lianhui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Sanming University, Sanming Fujian 365004, China)

Abstract: Parameter intunability in microwave photonic filter(MPF) limits its application in all-optical networks. A multi-parameter tunable design of a multi-channel MPF by utilizing the structural characteristics of the periodic array of a sampled fiber Bragg grating (FBG) is proposed, using optical mode coupling theory and matrix determinant to analyze the spectrum characteristics of the sampled FBG. The simulation model of multi-channel MPF based on fourth-order sampling FBG array is established, and the simulation results show that the channel bandwidth of MPF can be increased by increasing the refractive index change rate; the channel interval of MPF can be increased by increasing the optical path difference of adjacent FBG; the center wavelength of MPF can be tuned by adjusting the temperature of FBG, so that MPF can swich flexibly between low-pass, high-pass, band-pass and band-stop filters.

Key words: microwave photonic filter; sampled fiber Bragg grating; multi-channel; tunable; optical mode coupling

0 引言

光域上的微波信号处理可以轻松克服电域中难以克服的电子瓶颈,在微波光通信系统中具有巨大的潜在应用价值。在光域上实现微波光子滤波器(MPF)的方法有许多,包括基于光纤耦合器的光纤滤波器^[1-2]、

基于光纤光栅的光纤滤波器^[3-6]、基于光纤干涉仪的光纤滤波器^[7-8]以及基于声光调制机制的声光滤波器^[9]等,但大多结构复杂或参数变化相对固定、滤波器性能单一和重构性差,不能满足实际工程需要。

光纤布喇格光栅(FBG)具有低损耗、低成本和结构设计灵巧等许多其它光元器件无可比拟的优势,近些年在微波光子信号处理领域受到越来越多科学家的青睐。赵彪等人^[10]通过调节马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的可调谐光延迟线,实现了基于啁啾布喇格光栅的反射波长可调谐的双通带 MPF,但其通带带宽及通带距离固定无法实现调谐。曹晔等人^[11]通过对光子晶体光纤填充温敏液体,改变温度使其具有不同双折射而实现滤波器自由频谱的可调,但这种方法需要以多波长

收稿日期:2020-06-13。

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

作者简介:王小燕(1984—),女,福建福清人,硕士,在读博士,讲师,目前就读于日本国立山梨大学。主要研究方向为光纤通信技术、布喇格光纤光栅的设计与应用和光信号处理等,负责并参与的省厅级、国家级项目 3 项。



光纤激光器作为光源,并且光子晶体光纤的高复杂度也给滤波器的实现增加了困难。周菲等人^[12]利用双相移光纤光栅分别对2个经相位调制的光信号的边带进行抑制,实现了通带中心频率或3 dB带宽可调,但这种工作方式要求具备双光源,并且双通带频率的带宽无法实现调谐。大多数类似的基于FBG的可调谐MPF的研究,要么对光源有较高要求,要么因结构复杂导致在工程应用中难以实现。本文通过控制FBG的环境温度实现对布喇格中心反射波长的调谐,应用模式耦合理论和行列式矩阵分析FBG阵列的频谱特性,实现基于FBG阵列的多通道MPF的多参数可调谐的设计。

1 FBG阵列的特性分析

1.1 基于模式耦合和行列式矩阵的FBG阵列的频谱特性^[13-14]

光纤光栅中周期性的介电微扰使得光波导模式间发生耦合,模式耦合主要是发生在布喇格波长附近的沿相反方向传播的模式间,假设 $M(z)$ 、 $N(z)$ 分别表示模场沿 $+z$ 、 $-z$ 方向缓慢变化的幅度,由耦合理论可得:

$$\frac{dM(z)}{dz} = i\sigma M(z) + i\kappa N(z) \quad (1)$$

$$\frac{dN(z)}{dz} = i\sigma N(z) - i\kappa^* M(z) \quad (2)$$

其中, σ 是直流自耦合系数, κ 是交流耦合系数($\kappa = \kappa^*$ = $\frac{\pi}{\lambda} \nu \bar{\delta}_{\text{neff}}$,式中 ν 是归一化频率, $\bar{\delta}_{\text{neff}}$ 是光栅有效折射率, λ 是反射光中心波长)。

求解由式(1)和式(2)组成的微分方程组,结合FBG边界条件,可以得到长度为 L_{FBG} 的FBG输出信号与输入信号的幅度比为:

$$\rho = \frac{N\left(-\frac{L_{\text{FBG}}}{2}\right)}{M\left(-\frac{L_{\text{FBG}}}{2}\right)} = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{\text{FBG}})}{\sigma^2 \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{\text{FBG}}) + i\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{\text{FBG}})} \quad (3)$$

单个FBG的反射率 Z 可表示为:

$$Z = |\rho|^2 = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{\text{FBG}})}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{\text{FBG}}) - \frac{\sigma^2}{\kappa^2}} \quad (4)$$

对于多个FBG并列使用的FBG阵列的频谱特性,

需要引入行列式矩阵算法来分析。图1为FBG阵列示意图,阵列中包含 n 个FBG,FBG阵列总长度为 L ,各子

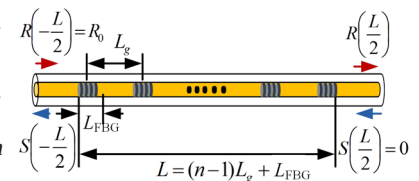


图1 FBG阵列的行列式矩阵分析

FBG长度为 L_{FBG} ,相邻FBG间的间隔为 L_g ,得到光栅阵列的光波导特性行列式为:

$$\begin{bmatrix} R\left(\frac{L}{2}\right) \\ S\left(\frac{L}{2}\right) \end{bmatrix} = F_1 \cdot F_{g1} \cdot F_2 \cdots F_{g(n-1)} \cdot F_n \cdot \begin{bmatrix} R\left(-\frac{L}{2}\right) \\ S\left(-\frac{L}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_0 \\ S\left(-\frac{L}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}R_0 + T_{12}S\left(-\frac{L}{2}\right) \\ T_{21}R_0 + T_{22}S\left(-\frac{L}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $R(-\frac{L}{2})$ 、 $R(\frac{L}{2})$ 、 $S(-\frac{L}{2})$ 、 $S(\frac{L}{2})$ 分别是FBG阵列的起始与结束位置光的反射系数、透射系数, R_0 是FBG阵列起始位置的反射系数, F_i 是第 i 个子FBG的反射特性的行列式, F_g 是相邻FBG的间隔区间的特性行列式, $T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$ 是整个FBG阵列的特性矩阵,是 F_i 、 F_g 累乘之后的结果。这样,结合光纤光栅的边界条件求解耦合模方程,即可对FBG阵列的频谱特性进行精确解析。

1.2 基于温度控制的反射布喇格波长的调谐^[14-15]

根据光纤光栅耦合模理论,只有满足一定相位匹配约束的光波才能被光栅反射,即

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (6)$$

如式(6)所示,FBG反射光谱的中心波长 λ_B 由光纤纤芯的有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 决定,因此可以通过改变 n_{eff} 和 Λ 达到调谐光栅滤波器的通带中心波长位置的目的。

FBG是对温度敏感的光无源器件,外界温度变化产生的热胀冷缩效应会使光栅周期 Λ 发生变化,纤芯的有效折射率 n_{eff} 也会随着弹光效应发生改变。当只考虑外界温度 T 变化时,导致 λ_B 的变化量为:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \cdot \Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \cdot \Delta a \right] \cdot \Lambda + 2 \cdot n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (7)$$

其中, $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 表示由热胀冷缩引起的弹光效应, ΔT 表示温度变化量; $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a}$ 表示热胀冷缩引起光纤芯径变化而产生的波导效应, a 为光纤芯径; Δa 是表示光纤芯

径的变化量。

结合式(6)、式(7)可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}}{\partial T} + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \cdot \frac{\Delta a}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \cdot \Delta T \quad (8)$$

令 $\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$, ξ 表示 FBG 的热光系数; $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$, α 表示 FBG 的热胀冷缩系数, 引入 $\eta = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot \Delta T}$, η

表示 FBG 的温度灵敏度, 则可以得到:

$$\eta = \xi + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}}{\partial T} + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \cdot \frac{\Delta a}{\partial T} + \alpha \quad (9)$$

其中, 弹光效应和波导效应对 FBG 温度灵敏度的影响远小于 ξ 和 α , 因此可以忽略。这样, 温度灵敏度可表示为:

$$\eta = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot \Delta T} = \xi + \alpha \quad (10)$$

当外界温度变化 ΔT 时, λ_B 的变化量可表示为:

$$\Delta\lambda_B = (\xi + \alpha) \cdot \lambda_B \cdot \Delta T \quad (11)$$

对于普通石英光纤, $\xi + \alpha$ 是一个恒定值, 大小为 $6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 由此可得在光纤通信窗口 C 波段, 即 FBG 反射光谱中心波长 1550 nm 处的 η 约为 $10.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。当环境温度从一般室温 22°C 升高到 32°C 时, 反射光谱中心波长将向长波方向漂移约 0.1 nm , 反之, 降低室温则可使反射谱向短波长方向漂移, 如图 2 所示。因此, 通过对 FBG 外加温控设备精确控制其温度, 可以实现基于 FBG 阵列的微波光子滤波器的中心波长的灵活调谐。

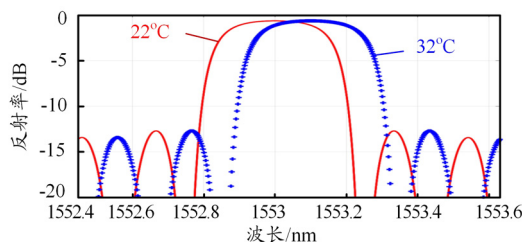


图2 布喇格中心波长的漂移

对于 $16 \times 2.5 \text{ Gb/s}$ 波分复用(WDM)系统, 其通道间隔为 0.8 nm , FBG 的布喇格反射波长调谐范围大于 0.4 nm 时可满足各通道高、低通滤波器之间的自由切换。由于温度每变化 10°C 波长漂移约 0.1 nm , 则温度调谐范围大于 40°C , 可满足系统需求。

2 基于取样FBG的MPF设计

MPF 属于横向滤波器, 也称为有限脉冲响应滤

波器, 如图 3 下部分所示, 对于输入信号 $x(t)$, 可以通过对各延迟单元 D 、乘法器系数 Z 的设计, 自由地实现具有各种期望特性的滤波。FBG 能够实现对布喇格波长光波的反射, 将若干个 FBG 单元按照一定设计排列, 各 FBG 对布喇格光波的反射率为乘法器系数 Z , 相邻 FBG 的间隔为延迟单元 D , 这样即可实现基于取样 FBG 的横向滤波器的设计, 如图 3 中上、下两部分的对照所示。本文以低通滤波器为例说明设计流程。

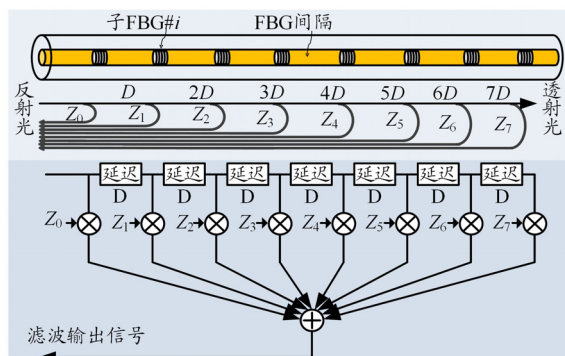


图3 基于取样FBG的横向滤波器

理想低通滤波器的频域特性是一个矩形函数如式(12)所示。其中, u 是阶跃函数, ω 是滤波器角频率, ω_0 是中心角频率。

$$H(\omega) = u(\omega + \omega_0) - u(\omega - \omega_0) \quad (12)$$

对式(12)逆傅里叶变换得到式(13)所示低通滤波器的脉冲响应, 其形状如图 4 上部分所示。

$$h(t) = F^{-1}\{H(\omega)\} = \frac{\omega_0}{\pi} \text{sinc}\{\omega_0(t - t_0)\} \quad (13)$$

其中, t 是脉冲响应的的时间, t_0 是中心时间。对滤波器的脉冲响应(即图 4 上部分的时域波形)以固定时间间隔、中心对称进行取样, 可得取样后的脉冲值与 FBG 阵列中各子 FBG 的反射率 R 相对应。根据取样脉冲值的符号极性, 若相邻 FBG 符号相同, 则其相位差为 0 ; 若相邻 FBG 符号相异, 则其相位差为 π 。在取样 FBG 阵列中, 相位差通过调节相邻 FBG 间的光程差进行控制。

在实验室中对 FBG 阵列进行取样时, 其取样函数

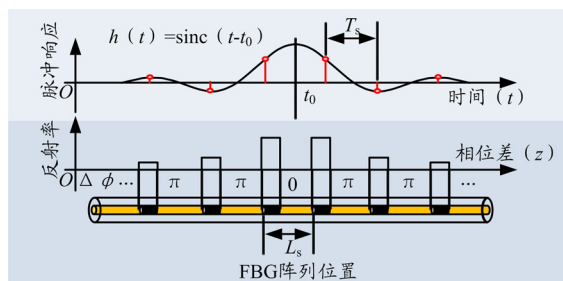


图4 基于取样FBG的低通滤波器

并非理想的脉冲函数,而是由在纤芯中写入FBG时照射在光纤纤芯的紫外光的轮廓决定。为了便于数值模拟,假设紫外光轮廓为矩形脉冲如图4下部分所示,对式(13)所示脉冲响应按周期 T_s 进行取样,得到周期为 T_s 、幅度为 T_g 的矩形脉冲序列(即为取样信号),如图4上、下两部分的对应关系。将式(13)的脉冲响应乘以 T_s 的脉冲序列(即图4上部分的采样信号),再与幅度为 T_g 的矩形脉冲进行卷积,即可得到实际信号如式(14)所示。

$$\hat{h}(t) = \left\{ \left(\frac{\omega_0}{\pi} \text{sinc}\{\omega_0(t-t_0)\} \right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t-kT_s) \right\} * \text{rect}\left(\frac{t}{T_g}\right) \quad (14)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为单位脉冲函数, $\text{rect}(\cdot)$ 为单位矩形函数,*为卷积, k 为常数。

对式(14)所示低通滤波器的时间脉冲响应进行取样,并傅里叶变换后可得:

$$\begin{aligned} \hat{H}_h(\omega) &= F\{\hat{h}_h(t)\} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left(\frac{\omega_0}{\pi} \text{sinc}(\omega_0(t-t_0)) \right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t-kT_s) \right\} * \text{rect}\left(\frac{t}{T_g}\right) e^{-j\omega t} dt \end{aligned} \quad (15)$$

运用傅里叶变换性质及相应的公式对式(15)进行计算可得:

$$\begin{aligned} \hat{H}_h(\omega) &= F\{\hat{h}_h(t)\} = \frac{\omega_0}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\omega - \omega_0 - \frac{2\pi k}{T_s}\right) \times \\ &\quad \left\{ -jT_g \text{sinc}\left[\frac{(\omega - \omega_0)T_g}{2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

这样,便得到中心频率为 ω_0 的取样FBG阵列型低通滤波器的频率响应。频率响应是sinc函数经过矩形加窗取样后的函数。

3 多通道 MPF 的多参数可调谐设计

取样FBG是由若干个FBG按一定设计顺序排列组成的结构,当各FBG以相同间隔排列时,由傅里叶变换的性质可知,其频谱特性必然呈周期性重复变化。利用这个特性可以设计多通道滤波器。因此,本文依据模式耦合和行列式矩阵的理论,建立了一个基于四阶取样FBG阵列的多通道MPF的仿真模型,用于分析各参数变化对MPF频谱特性的影响。

首先,本文设置FBG的布喇格波长 $\lambda_B=1553$ nm,最大折射率变化量为 $\delta_{\text{neff}}=1.2 \times 10^{-5}$ 。这里的最大折射率变化量指的是,FBG阵列中具有最大反射率的子FBG的折射率变化量,其它各子FBG的反射率则以此为标准进行设置。依据式(16)所示低通滤波器的频率响应

函数的取样值,设置FBG阵列中最大反射率值(即图4上部分最中心2个取样值)为0.85,依据取样周期对频率响应函数进行采样取值,可得四阶FBG阵列的反射率分布为 $[-0.16, 0.85, 0.85, -0.16]$,这里数值前的“-”号代表相邻FBG间的相位发生了 π 变化。将各相邻FBG的间隔设置为2.5 mm,得到如图5所示多通道带通滤波器的频谱。其中,各通带3 dB带宽约为17.4 GHz,相邻通道间隔约为0.29 nm。同时,中心通带与第三级通带的最大反射率差约为0.7 dB。可以看出,各通带反射特性相近,多通道结构MPF中不同通道的滤波特性相对稳定。

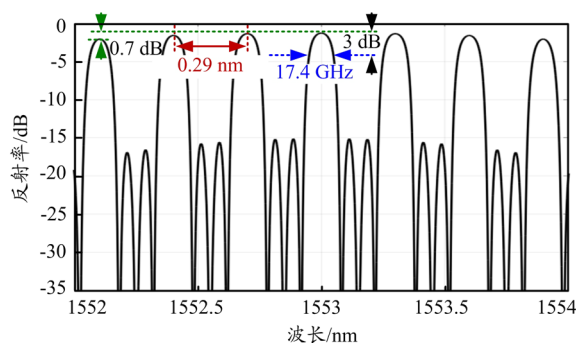


图5 基于取样FBG的多通道滤波器的频谱

然后,依据FBG的模式耦合分析结果,通过对比FBG阵列参数的设置实现微波光子滤波器的各参数的调谐。对于各子FBG反射率固定的FBG阵列,改变光栅的最大折射率变化量 δ_{neff} 可以实现通道带宽的调节。通道带宽随折射率变化量 δ_{neff} 的变化情况如图6所示,设置 δ_{neff} 的值分别为 3.5×10^{-5} 、 1.2×10^{-5} 、 0.4×10^{-5} ,得到频谱曲线分别如图中绿色线、蓝色“+”线和红色线所示。可以看出,其3 dB带宽随着 δ_{neff} 的减小而降低,分别约为18.1 GHz、17.4 GHz和16.7 GHz。另外,依据傅里叶变换的周期性调节FBG阵列中各子FBG间的间隔,即改变经相邻子FBG反射的光程差,可以实现多通道滤波器的滤波特性中各通道间的距离的控制,通道间隔随相邻FBG光程差的变化如图7所

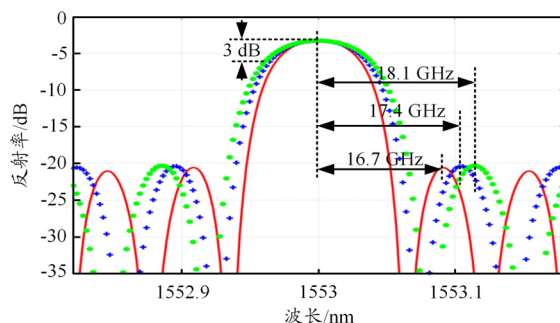


图6 通道带宽随折射率变化率的变化

示。可以看出,各FBG间隔为1.25 mm、2.5 mm和5 mm的模拟结果分别如黄色线、蓝色“+”线和红色线所示,得到多通道滤波器的各通道间隔分别为0.15 nm、0.29 nm和0.73 nm。由模拟结果分析可得,随着FBG间隔的减小,滤波器的各通道间隔拉大,并且与FBG间隔的变化值成反比,同时各通道的带宽随着FBG间隔的减小而增加。

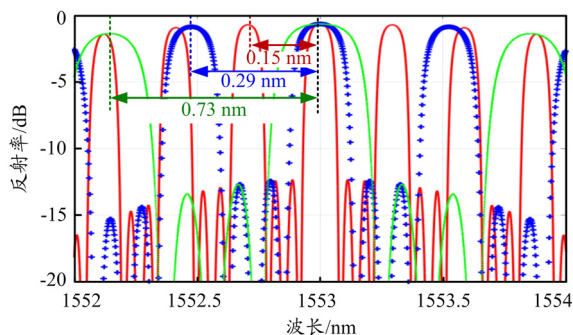


图7 通道间隔随相邻FBG光程差的变化

对于图6所示滤波器频谱,可以看作是中心波长为1553 nm的带通滤波器,亦可看作是中心波长为1552.92 nm的高通滤波器,或者是1553.08 nm的低通滤波器。从1.2节分析可知,控制FBG阵列的环境温度便可实现FBG反射布喇格波长的调谐,进而控制滤波器的中心波长,即通过温度控制可以实现滤波器在高通、低通、带通及带阻之间灵活切换,完成了基于FBG阵列的多通道微波光子滤波器的多参数可调谐的设计。

4 结束语

本文应用光模式耦合理论和矩阵行列式分析法模拟分析了FBG阵列的频谱特性,通过建立基于四阶采样FBG的MPF模型,对多通道MPF的多参数可调谐设计进行了验证。该设计克服了大多可调谐MPF中对光源有特殊要求的限制,结构简单,在波分复用系统中有广阔的应用前景。但同时,设计尚存如下欠缺点需考虑完善或改进:①实际应用中,若要实现FBG阵列中各参数的实时在线控制,需额外添加参数控制设备,如外加感应设备用于控制FBG的折射率变化等。如何低成本而有效地实现参数的实时在线调谐将是未来研究的方向之一。②FBG温度调谐精度受温度变化的限制。控制温度的极高或极低将导致温控波长漂移的精度下降,可考虑结合施加应力等其它途径,对波长调谐做进一步分析,以增强其调谐的精度和灵活性。③FBG阵列的周期性排列实现了多通道滤波,

但也限制了通道的整体带宽。对此,可考虑设计FBG阵列的非周期性排列,通过对各通道独立加窗等信号处理方式,实现各通道参数的独立设计。

参考文献:

- [1] SUN X. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism [J]. Opt. Lett., 2007, 32 (17): 2484–2486.
- [2] KASHYAP R. Forty Years of Fiber Bragg Gratings: State of the Art Ultra-long FBGs for Linear and Nonlinear Applications. Challenges and Opportunities [C]// Photonic Networks and Devices, July 2–5, 2018, Zurich, Switzerland. Zurich: OSA, 2018: JM1A-1–JM1A-2.
- [3] REZA M, MARI A R F, JOSE A. Design of an FBG-based Phase-only (All-pass) Filter for Energy-efficient All-optical Clock Recovery [C]// Bragg Gratings Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides, July 27–31, 2014, Barcelona, Spain. Barcelona: OSA, 2014: BM4D.7-1–BM4D.7-2.
- [4] HU J, CHEN F, ZHANG C, et al. Application of high-precision temperature-controlled FBG filter and light source self-calibration technique in the BOTDR sensor system [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10 (7): 072901-1–072901-4.
- [5] RICCHIUTI A L, BARRERA D, SALES S, et al. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques [J]. Optics Express, 2013, 21 (23): 28175–28181.
- [6] HUANG Y, LI Y, TONG G, et al. Filter properties of chirped fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity: a potential wavelength stabilizer of diode laser [J]. Applied Optics, 2013, 52 (13): 3094–3099.
- [7] ZHOU B, JIANG H, WANG R, et al. Optical Fiber Fabry-Perot Filter With Tunable Cavity for High-Precision Resonance Wavelength Adjustment [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (14): 2950–2954.
- [8] WEI L, TATEL G. Wavelength Continuously Tunable All-Fiber Flat-Top Comb Filter Based on a Dual-Pass Mach-Zehnder Interferometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37 (15): 3740–3749.
- [9] ZHANG C, WANG H, ZHANG Z, et al. Non-radio-frequency signal tuned acousto-optic tunable filter [J]. Optics Express, 2018, 26 (2): 1049–1054.
- [10] 赵彪, 杜鹏飞, 沃江海, 等. 基于啁啾光纤布喇格光栅的可调谐双通道微波光子滤波器 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (3): 48–52.
- [11] 曹晔, 杨菁芃, 童峥嵘, 等. 基于高双折射光子晶体光纤与光栅对的微波光子滤波器 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2018, 51 (1): 34–37.
- [12] 周霁, 徐恩明, 张祖兴, 等. 基于双光源的可调谐微波光子滤波器 [J]. 光电子·激光, 2018, 29 (10): 1039–1045.
- [13] JUNG Y, CHOI S, JEONG Y S, et al. Hollow optical fiber core mode blocker for acousto-optic tunable bandpass filter [C]// Conference on Lasers and Electro-Optics, May 16–21, 2004, San Francisco, USA. San Francisco: OSA, 2004, CThMM6-1–CThMM6-2.
- [14] 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.
- [15] CAUCHETEUR C, GUO T, ALBERT J. Polarization-Assisted Fiber Bragg Grating Sensors: Tutorial and Review [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35 (16): 3311–3322.