

光格型 FIR 增益均衡滤波器设计^{* *}葛春风, 张瑞峰^{*}, 胡智勇, 王书慧, 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电技术重点实验室, 天津 300072)

摘要:为了避免传统的经验方法设计增益均衡滤波器(GEF)的主观性和不确定性,将电子学格型有限冲激响应(FIR)数字滤波的概念和算法移植到光学格型滤波器,提出一种基于掺 Er 光纤放大器(EDFA)自发增益(ASE)谱的频率采样设计法和光格型 GEF 的设计方案。该滤波器由数个各种分光比的波导耦合器经由具有单位时延差的光波导级连构成。分析了根据目标传递函数求解光格型阵列参数的算法,进而针对实际的 ASE 谱设计了 40 阶的 GEF,在 1 527~1 564 nm 波段内的增益平坦波动小于 ± 0.4 dB,并具有线性相频响应特性和互易性。

关键词:光格型 FIR 滤波器; 增益均衡滤波器(GEF); 频率采样法

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2004)09-1074-05

Design of Optical Lattice FIR Gain Equalization Filters

GE Chun-feng, ZHANG Rui-feng^{*}, HU Zhi-yong, WANG Shu-hui, LI Shi-chen

(College of Precision Instrument Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Sciences, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to avoid the subjectivity and indeterminacy of the traditional design method for gain equalization filter(GEF), this paper presents a novel frequency sampling method based on the amplified spontaneous emission(ASE) spectrum of erbium-doped fiber amplifier(EDFA) and an optical lattice GEF design scheme. The concept and design algorithm of the mature lattice(FIR) digital filtering are transplanted to the optical lattice network consisting of cascaded couplers with different coupling ratio which are delayed by optical wave guide with unit delay inequality. Therefore, a filter consisting of 40 cascading couplers was produced, with the gain ripple being only ± 0.4 dB from 1 527 nm to 1 564 nm. The filter also has linear phase-frequency response characteristics and reciprocal capacity.

Key words: optical lattice FIR filter; gain equalized filter(GEF); frequency sampling method

1 引言

掺 Er 光纤放大器(EDFA)的增益均衡问题一直受到人们的关注,解决的技术路线主要有两条:改进掺铒光纤(EDF)的材料特性^[1];增益均衡滤波器(GEF)。其中有多种实现途径:光纤 Bragg 光栅^[2](FBG),长周期光纤光栅(LPFG)^[3],声光可调谐滤波器^[4]及 Mach-Zehnder 滤波器^[5]等。这些方法普遍存在滤波器的传递函数和自发(ASE)谱之间的匹配要靠设计经验来保证的缺点。鉴于此,本文将电的数字滤波器概念以及成熟的算法移植到光滤波器,并

结合光学元件的特性加以改造,提出了一种基于 EDFA ASE 谱的频率采样方法来设计增益均衡滤波器,实现了精密平坦 EDFA 的 ASE 谱之目的。

2 基本理论

光格型滤波器的网络由不同分光比的耦合器通过有单位时延的干涉臂级联构成,如图 1(a)所示。其中, c_k 和 s_k 分别是耦合器直通臂和耦合臂的振幅传递系数, $c_k = \cos \theta_k$, $s_k = \sin \theta_k$, θ_k 是耦合器的耦合角, s_k 的平方即耦合器的分光比, ϕ_k 是相位偏移量; $\Delta\tau$ 是单位延时, $\Delta\tau = n\Delta L/c$, c 为光速, n 为光延时线

* 收稿日期:2003-12-21 修订日期:2004-06-04

* E-mail: zhangruifeng@eyou.com

的折射率, ΔL 为几何程差。滤波器的系统响应函数 $H(\omega)$ 是单位冲击响应 $h(t)$ 的傅立叶变换。为求光滤波器的系统函数先求其单位冲击响应, 假设从端口 1 输入 $\delta(t)$ 的光信号, 对应频域全波段光信号, 考察

输出端口 2 的响应特性; 可知从输入端到输出有 $N+1$ 条路径, 相邻路径所需的时间依次相差 $\Delta\tau$; 最后在输出端口这 $N+1$ 路光权重相加, 权重因子 c_k 是耦合器的耦合系数。得到

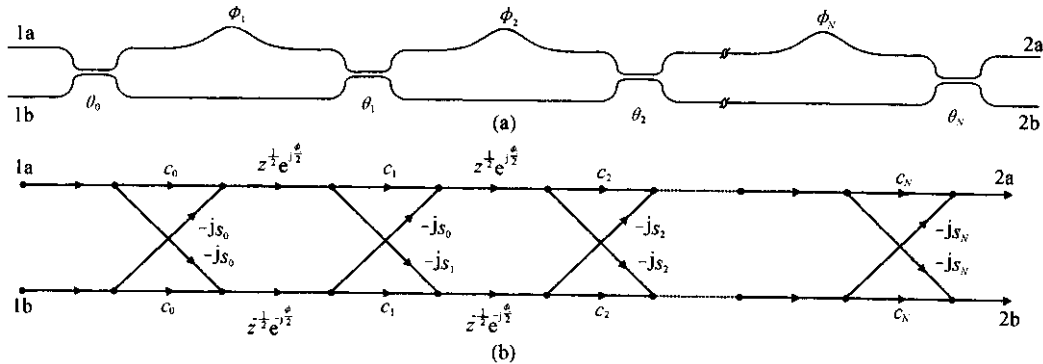


图 1 (a) 光格型滤波网络的结构; (b) 光格型滤波器的信号流图

Fig. 1 (a) Structure of optical lattice filter network; (b) Signal flow-chart of optical lattice filter

$$h(t) = \sum_{k=0}^{N} c_k \delta(t - k\Delta\tau) \quad (1)$$

对式(1)作傅立叶变换, 可得

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{N} c_k e^{-j\omega\Delta\tau} \quad (2)$$

式中, ω 是光角频率。式(2) 是滤波器的幅频响应函数 $H(\omega)$ 的傅立叶级数展开。如果已知 $H(\omega)$, 将其按式(2) 展开, 求出系数 c_k , 最终就能在物理上实现所求的滤波函数^[6]。本文采用 z 变换的方法解决这个问题^[7]。将式(2) 中的 $e^{-j\omega\Delta\tau}$ 用 z^{-1} 代替, 实现 z 变换, 得到光数字滤波器的传递函数, 即有

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N} c_k z^{-k} \quad (3)$$

可以看出, 式(3) 恰恰是有限冲激响应 FIR 的表达形式, 如果取 $z^{-1} = e^{-j\omega\Delta\tau}$, 即可得到光频的传递函数 $H(\omega)$ 。

分析光格型滤波网络, 不考虑耦合器的附加损耗和干涉臂的传输损耗, 从图 1(b) 可以得到第 k 个传输单元的散射矩阵表达式 S_k 为^[8]

$$S_k = \begin{bmatrix} c_k e^{j\frac{\phi_k}{2}} z^{\frac{1}{2}} & -js_k e^{j\frac{\phi_k}{2}} z^{-\frac{1}{2}} \\ -js_k e^{j\frac{\phi_k}{2}} z^{\frac{1}{2}} & c_k e^{-j\frac{\phi_k}{2}} z^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将 $N+1$ 个单元散射矩阵连乘, 可以得到输出电场振幅和输入电场振幅之间的传递关系为

$$\begin{pmatrix} E_{out 1} \\ E_{out 2} \end{pmatrix} = \prod_{k=0}^N S_k \begin{pmatrix} E_{in 1} \\ E_{in 2} \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} E_{in 1} \\ E_{in 2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

由于 S_k 满足条件 $S_k S_k^+ = 1$, 所以是酉矩阵, 而且它们的乘积 S 也是酉矩阵, 这也符合无源无耗的二端口网络的散射矩阵是酉矩阵。把 S 写成为

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}(z) & S_{12}(z) \\ S_{21}(z) & S_{22}(z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中的 $S_{11}(z)$ 和 $S_{21}(z)$ 分别对应光信号从端口 1a 输入从端口 2a 输出和从端口 2b 输出时的滤波传递函数, 同理 $S_{12}(z)$ 和 $S_{22}(z)$ 表示端口 1b 和端口 2a 和端口 2b 之间的传递函数。 $S_{11}(z)$ 和 $S_{22}(z)$ 以及 $S_{21}(z)$ 和 $S_{12}(z)$ 之间分别满足^[9]

$$S_{22}(z) = S_{11}^*\left(\frac{1}{z^*}\right), \quad S_{12}(z) = -S_{21}^*\left(\frac{1}{z^*}\right) \quad (7)$$

定义 $X^*(z) \equiv X^*\left(\frac{1}{z^*}\right)$, 且令 $F(z) = S_{11}(z)$; $H(z) = S_{21}(z)$, 则式(6)可化简为

$$S = \begin{bmatrix} F(z) & -H^*(z) \\ H(z) & F^*(z) \end{bmatrix}$$

S 是酉矩阵, 则有

$$F(z)F^*(z) + H(z)H^*(z) = 1 \quad (8)$$

成立。由于前面每个传输单元取的是 $z^{\pm\frac{1}{2}}$, 为得到 $H(z)$ 和 $F(z)$ 的关于 z 的整数次幂形式, 可以提出公因子 $z^{\frac{N}{2}}$, 这样便于后面的滤波器设计。

$$\begin{cases} F(z) = \left(\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}\right) z^{\frac{N}{2}} \\ H(z) = j \left(\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}\right) z^{\frac{N}{2}} \end{cases} \quad (9)$$

现在面临的问题是如何选择恰当的光学格型阵列的各种参数来实现滤波函数 $H(z)$ 。首先, 根据 2b 端口的目标滤波函数 $H_0(z)$ 设计逼近传递函数 $H(z)$, 并且为了满足式(8) 需要对其作归一化处理^[8]。其次, 要确定由单位时延决定的干涉臂长差, 如果要得到自由谱域(FSR)为 f_0 的滤波器, 则选择臂长差 ΔL 使得时延为 $\Delta\tau = 1/f_0$ 。

由于 $F(z)$ 和 $F^*(z)$ 的零点共轭互易成对, 就是

说,如果 α_k 是 $F(z)$ 的零点,则 $1/\alpha_k^*$ 是 $F^*(z)$ 的零点。所以,由式(8)和 2b 端口的传递函数 $H(z)$ 求出 $F(z)$ 的零点为

$$F(z)F^*(z) = \alpha_0 \alpha_0^* \prod_{k=1}^N (z - \alpha_k) \left(\frac{1}{z} - \alpha_k^* \right) = 1 - H(z)H^*(z) \quad (10)$$

可知 $F(z)F^*(z)$ 和 $1 - H(z)H^*(z)$ 的零点相同,共轭互易成对出现 $(\alpha_k, 1/\alpha_k^*)$ 。那么,从 $1 - H(z)H^*(z)$ 每一对共轭互易零点中选择其中一个,组合在一起就是 $F(z)$ 的零点,一共有 2^N 种不同的选择方案。这些方案对应的滤波器有相同的幅频响应,不同的相频响应。根据选择出的零点求出多项式 $F(z)$ 的系数 $\tilde{\alpha}_k$ 。为了满足式(8),必须对求出的系数 $\tilde{\alpha}_k$ 加以修正。把 $z=1$ 代入式(10),可以得到 α_0 的幅值为

其幅角和 $H(z)$ 之 b_0 的幅角差 π 。将所有的 $\tilde{\alpha}_k$ 都除以 $\tilde{\alpha}_0/\alpha_0$,就能得到 $F(z)$ 的最终系数 α_k 。

然后,用迭代的方法根据 $H(z)$ 和 $F(z)$ 计算出光格型滤波器的各个耦合器的耦合角 θ_k 和每个传输单元的相位偏移量 φ_k ^[8]。

$$|\alpha_0| = \sqrt{\frac{1 - H(1)H^*(1)}{\prod_{k=1}^N (1 - \alpha_k)(1 - \alpha_k^*)}} \quad (11)$$

3 GBF 的设计

应用上述光格型滤波器理论设计 GEF。图 2 是 ANDO AQ6315A 光谱仪测得的自制 C 波段 EDFA 的 ASE 谱,把谱线的 TRCE 以波长和功率 2 个一维数组(1000 个元素)的形式存储下来,用 PC 机作归一化处理,将谱线反转得到光域的目标滤波函数 $H_0(z)$ 的曲线(如图 3),采用数字信号处理中的频率采样法根据处理后的数据在 Z 变换域设计了 GEF 的 40 阶目标滤波函数 $H(z)$,其系数 b_k 见表 1 所示。

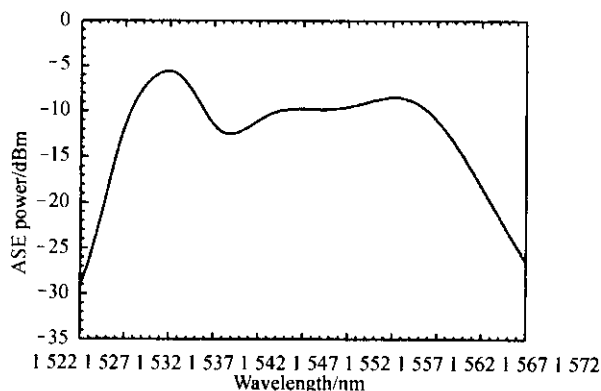


图 2 EDFA 的 ASE 谱

Fig. 2 ASE spectrum of EDFA

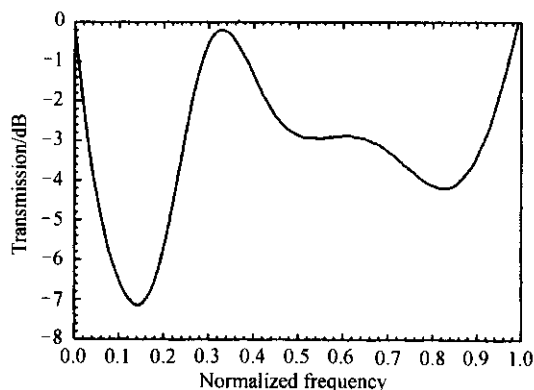


图 3 光域的目标滤波函数曲线

Fig. 3 Curve of target filter function in optical domain

表 1 40 阶 GEF 数据表

Tab. 1 Data sheet of 40 orders GEF

k	b_k	$\tilde{\alpha}_k$	α_k	θ_k	φ_k
0	0.000 8	0.000 0	-0.000 6	-0.699 6	0
1	0.000 3	0.776 7	-0.000 5	0.183 0	0
2	0.001 1	2.333 3	-0.001 5	0.308 0	0
3	0.000 3	4.413 2	-0.002 9	0.898 2	0
4	0.001 8	2.909 4	-0.001 9	0.662 7	0
5	0.000 4	1.837 1	-0.001 2	0.584 7	0
6	0.004 5	14.177 2	-0.009 2	0.435 6	0
7	0.002 9	-4.927 2	0.003 2	0.699 3	0
8	0.010 5	11.840 7	-0.007 7	0.067 1	0
9	0.002 4	32.672 1	-0.021 2	0.413 1	0
10	0.007 3	-4.794 2	0.003 1	0.554 2	0
11	-0.010 4	1.679 8	-0.001 1	0.511 4	0
12	0.014 5	108.056 6	-0.070 1	0.068 4	0
13	0.018 0	-57.257 0	0.037 1	0.596 2	0
14	0.084 6	120.471 8	-0.078 2	0.142 0	0
15	0.028 0	296.278 3	-0.192 2	0.567 2	0
16	0.026 8	-42.244 1	0.027 4	0.110 3	0
17	-0.077 9	-104.365 0	0.067 7	0.662 5	0
18	-0.051 1	20.538 1	-0.013 3	1.025 0	0
19	-0.011 4	-908.685 0	0.589 6	0.664 3	0
20	0.525 6	-370.331 0	0.240 3	0.165 7	0
21	-0.011 4	222.611 8	-0.144 4	0.664 3	0
22	-0.051 1	-431.656 0	0.280 1	1.025 0	0
23	-0.077 9	40.801 9	-0.026 5	0.662 5	0
24	0.026 8	-256.618 0	0.166 5	0.110 3	0
25	0.028 0	403.595 3	-0.261 9	0.567 2	0
26	0.084 6	-114.654 0	0.074 4	0.142 0	0
27	0.018 0	-109.175 0	0.070 8	0.596 2	0
28	0.014 5	-87.588 5	0.056 8	0.068 4	0
29	-0.010 4	32.348 3	-0.0210	0.511 4	0
30	0.007 3	45.711 8	-0.029 7	0.554 2	0
31	0.002 4	-25.905 3	0.016 8	0.413 1	0
32	0.010 5	-10.308 4	0.006 7	0.067 1	0
33	0.002 9	2.345 4	-0.001 5	0.699 3	0
34	0.004 5	-4.468 7	0.002 9	0.435 6	0
35	0.000 4	-3.350 5	0.002 2	0.584 7	0
36	0.001 8	-6.989 5	0.004 5	0.662 7	0
37	0.000 3	4.280 6	-0.002 8	0.898 2	0
38	0.001 1	-1.017 0	0.000 7	0.308 0	0
39	0.000 3	-0.035 6	0.000 0	0.183 0	0
40	0.000 8	-1.411 9	0.000 9	0.699 6	0

$H_0(z)$ 是一个 FIR 滤波器,具有线性的相频响应特性,其幅频响应和相频响应曲线如图 4 所示。

比对图 3 和图 4 可以看到, $H(z)$ 和 $H_0(z)$ 非常接近,接下来解决如何用光的格型网络来实现 $H_0(z)$ 的问题,也就是求解各耦合器的耦合角 θ_k 。应用

式(9)~(18)编程计算,在式(10)关于 $F(z)$ 零点选择过程中,选取了单位圆内的一部分零点和单位圆外的一部分零点,图 5(a)是 $1-H(z)H^*(z)$ 的零点分布,(b)是从中选出的 $F(z)$ 的零点,表 1 是滤波器设计过程当中得到的各种数据和最终结果。

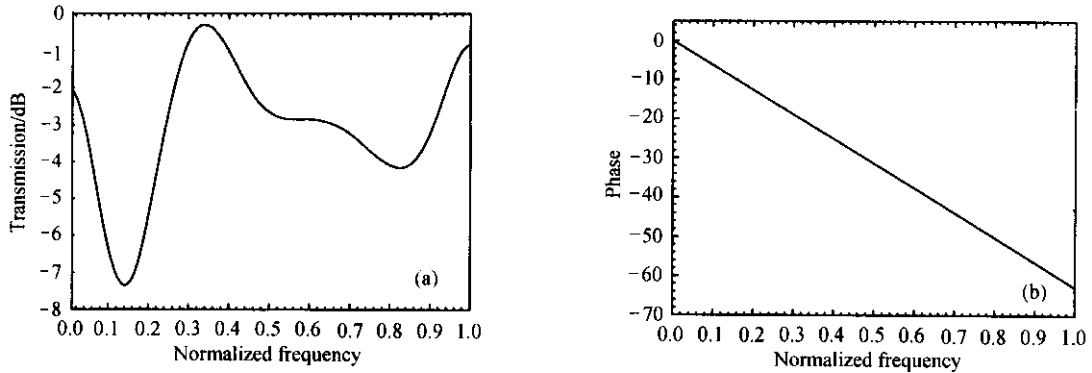


图 4 z 变换域目标滤波函数 (a) 幅频特性曲线和 (b) 相频特性曲线

Fig. 4 Curve of target filter function in z transform (a) amplitude frequency characteristics (b) phase frequency characteristics

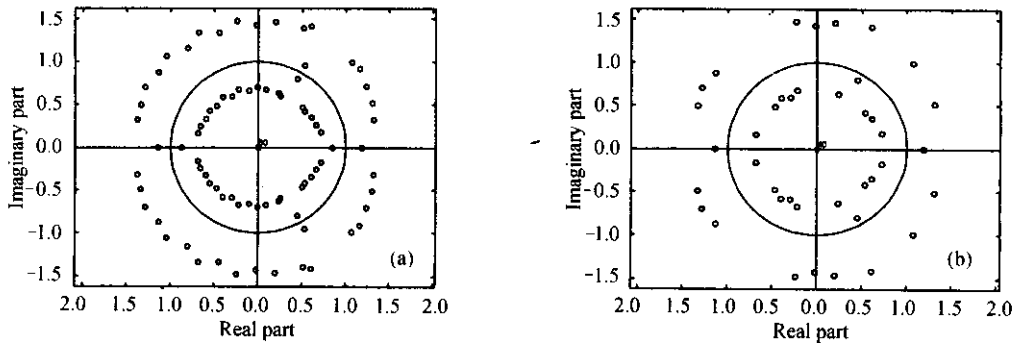


图 5 (a) $1-H(z)H^*(z)$ 的零点分布; (b) $F(z)$ 的零点分布

Fig. 5 (a) zero distribution of $1-H(z)H^*(z)$; (b) zero distribution of $F(z)$

利用求得的光格型阵列的参数计算了所设计的格型 GEF 的幅频响应曲线(图 6 所示),图 7 是经过

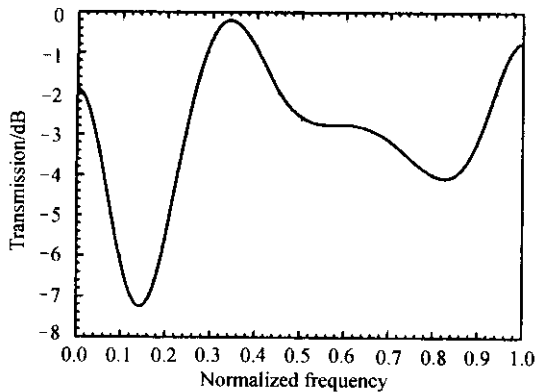


图 6 光格型 GEF 的幅频响应特性曲线

Fig. 6 Amplitude frequency response characteristics curve of optical lattice GEF

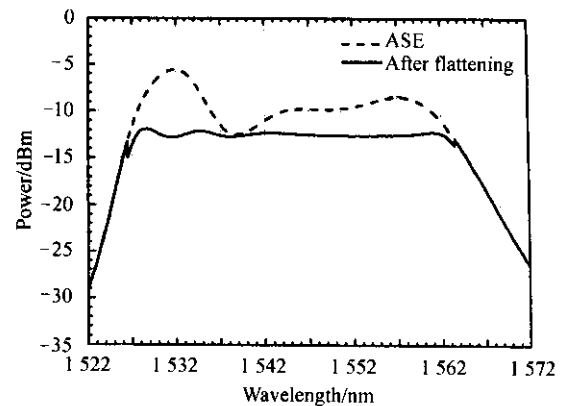


图 7 增益均衡之后的 ASE 谱

Fig. 7 ASE spectrum after gain equalization

该滤波器平坦化后的 ASE 谱,增益波动小于 ± 0.4 dB。其优点是精密平坦了 EDFA 的 ASE 谱;具有线

性相频响应特性,对通过的 DWDM 光信号不会造成由于色散导致的脉冲展宽;属于互易器件,应用方便。但由于所需的耦合器较多(41 个),所以用光纤型耦合器实现此滤波器不太现实,最好选用波导耦合器。

参考文献:

- [1] Yamada M, Kanamori T, Terunnma Y, *et al.* Fluoride-based erbium-doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(7):882-884.
- [2] Liaw S K, Ho K P, Chi S. Dynamic power-equalized EDFA module based on strain tunable fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(7):797-799.
- [3] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, *et al.* Long-period fiber-grating-based gain equalizers[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(4):336-338.
- [4] Yun S K, Lee B W, Kim H K, *et al.* Dynamic erbium-doped fiber amplifier based on active gain flattening with fiber acousto-optic tunable filter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(10):1229-1231.
- [5] Yamada M, Mori A, Kobaysdhi K, *et al.* Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, **10**(9):1244-1246.
- [6] Zhang Ruifeng, Ge Chunfeng, Wang Shuhui, *et al.* Optimized design of all fiber interleaver[J]. *J of Optoelectronics · Laser* (光电子 · 激光), 2003, **13**(5):496-500. (in Chinese)
- [7] Kawachi M, Jinguji K. Planar lightwave circuit for optical signal processing[A]. *In: OFC '94*[C]. San Jose, USA, 1994.
- [8] Jinguji K, Kawachi M. Synthesis of coherent two-port lattice-form optical delay-line circuit[J]. *J Lightw Technol*, 1995, **13**(1):72-82.
- [9] Madsen C K, Zhao J H. Optical filter design and analysis: a signal processing approach [M]. New York: John & Sons, 1999.

作者简介:

葛春风 (1972—), 黑龙江省人, 副教授, 主要研究方向为光纤通信。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>