

文章编号: 1001-3806(2002)03-0194-04

动态色散补偿技术的研究进展

李 琳 蔡海文 赵 岭 方祖捷 陈高庭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

摘要: 概述了光通信网中动态色散补偿技术。对常见的几种动态色散补偿技术的机制、特点及其实现方法进行了分析比较。

关键词: 色散补偿; 光纤光栅; 虚像位相阵列

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

Progress of tunable dispersion compensation

Li Lin, Cai Haiwen, Zhao Ling, Fang Zujie, Chen Gaoting

(Shanghai Institute of Optics and Fime Mechanics, CAS, Shanghai, 201800)

Abstract: The techniques of tunable dispersion compensation are discussed in the paper. The mechanism, properties and performance for several techniques of tunable dispersion compensation are analyzed and compared.

Key words: dispersion compensation; fiber grating; virtual imaged phased array

引 言

近年来,超大容量密集波分复用系统的发展不仅发掘了无穷无尽的光传输容量,而且也成为业务爆炸式发展的催化剂和光通信传输网灵活光节点的基础。实用化光通信网络的单波传输速率已达到 10 Gbit/s 量级甚至 40 Gbit/s,色散已成为光信号传输质量劣化、误码率增加的不可忽视因素。实践证明,无论是主干网,还是城域网,光传输系统的色散补偿都是维护传输质量的必要单元。与此同时,光通信网络相关支撑器件的多样化和可配置功能使得普通点到点波分复用通信系统拥有灵活节点,实现高效的灵活组网。城域网通过不同拓扑结构将具有不同传输物理特性的子网络连接。特别是光交换/路由器、光分插复用器等关键光节点技术能完成光节点处任意光纤端口之间的光信号交换及选路,增加光网络传输路径不确定性。而光信号色散、光脉冲展宽与路径密切相关,色散补偿单元必须具备动态可调谐功能才适应下一代光通信网发展需要。从国内外实验研究来看,动态色散补偿技术对优化光

网络传输质量、充分发挥组网灵活性起到重要作用,已成为研究色散问题的下一个发展方向。

1 动态色散补偿技术

动态色散补偿可简单看作色散补偿单元和动态调节单元的组合。通常使用的色散补偿单元不具备可调谐功能,色散数值和工作波段随着色散补偿单元结构参数确定而固定,缺少使用灵活性和可配置功能。目前,色散补偿单元可调谐功能主要有以下两种方法实现:一是在固定式色散补偿单元上附加一个调谐单元,通过控制调谐单元状态实现动态色散补偿;另一种是调节色散补偿单元本身结构的物理参数,以改变色散补偿响应。目前动态色散补偿技术主要有以下几种。

1.1 啁啾光纤光栅

啁啾光纤光栅是通过改变沿光纤轴向的光栅周期、平均折射率或者同时改变两者来实现。它具有良好的色散特性,是一种市场前景看好的色散补偿器件。与色散位移光纤相比,啁啾光纤光栅具有色散补偿量较大,与光纤兼容性好,插入损耗小,结构紧凑等优势。由于环境温度和施加光栅应变将导致啁啾光纤光栅响应波长的漂移,漂移量为:

$$\lambda = \left[\lambda_0 + (dn/dt)/n \right] T + \left\{ -0.5 n_{\text{eff}}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right\} \quad (1)$$

从上式可以看到,前一项为温度对光栅的扰动,其大

作者简介:李 琳,女,1975 年 9 月出生。博士研究生。主要从事光通信光纤光栅和基于光纤光栅的无源器件的研究。

收稿日期:2001-04-03;收到修改稿日期:2001-09-11

小与光纤材料的热膨胀系数、温度变化 T 相关; 后一项为应变对光栅的扰动, 其大小与外加应变、光弹张量 $P_{i,j}$ 有关。利用光纤对应变和温度的响应特性, 实现啁啾光纤光栅动态调谐功能。

1.1.1 温度调谐型啁啾光纤光栅 在外界温度影响下, 啁啾光纤光栅的局部反射波长响应随着局部温度的变化由(1)式表达。在光纤光栅研究早期, 人们就致力于用温度封装来稳定光纤光栅 Bragg 波长。延续温度封装技术, 诸多温度调谐技术也相继出现, 例如光纤外层镀膜、光纤重涂覆温度敏感材料等方法。Benjamin 等就采用镀膜技术在啁啾光纤光栅外层制备一个光纤分布式加热器^[1]。这种加热器实际是一层包覆在光纤芯层外的金属膜, 由于金属膜厚度沿着光纤轴向呈线性变化, 形成阻值随位置渐变的加热电阻(如图 1 所示)。当金属膜两端通上电流时, 啁啾光纤光栅在长度方向产生近似线性分布的温度梯度场, 那么啁啾光纤光栅 Bragg 波长随通电电流发生漂移。这种技术关键在于镀金属薄膜工艺, 如果镀膜控制技术能确保加热电阻呈线性变化^[2], 那么啁啾光纤光栅响应谱上时延抖动可降到 10ps 量级, 使得啁啾光纤光栅色散补偿性能优化。此外, 温度控制电压小, 结构紧凑, 制备简单也是这种技术优势。

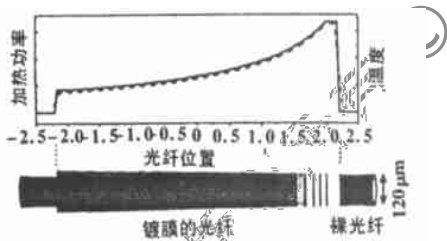


图 1 金属膜的厚度、加热功率和温度变化随光纤位置变化曲线

1.1.2 应力调谐型啁啾光纤光栅 应变对光纤光栅的扰动要比温度对光纤光栅的扰动明显, 因而应变调谐方式的调谐范围大, 响应速度较快。通常应变调节机构有悬臂梁、电磁拉伸、侧应力挤压^[3]。

其中悬臂梁方式结构简单, 在可调节波长范围内色散量随应力变化的线性度较好(如图 2), Garthe^[4]等人用这种色散补偿单元进行传输实验, 传输速率 10 Gbit/s、传输跨

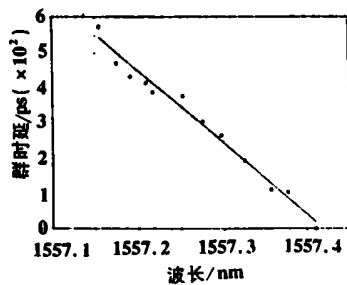


图 2 悬臂梁弯曲 1mm 时光纤光栅群时延

度 160km 的功率代价在 0.8dB ~ 1.2dB, 色散补偿较好。此外, 电磁拉伸方式也使用较多, 它的调节范围比悬臂量大些, 但是封装后尺寸不会太小, 不满足结构紧凑需求。

1.1.3 取样啁啾光纤光栅 啁啾光纤光栅的色散补偿量与光栅长度表达为

$$D_f L_f = \text{grating}/ = (2 n_{\text{eff}} L_g / c) \quad (2)$$

式中, D_f 为光纤色散系数(约 20ps/nm), L_f, L_g 分别为光纤跨度和光栅长度, n_{eff} 光栅有效折射率, c 为光速, 为光栅使用带宽。当所需补偿系统色散量给定时, 啁啾光纤光栅长度越长, 可补偿带宽就越大。通常采用级联单个啁啾光纤光栅方法来扩展使用带宽, 用于补偿 WDM 系统中多个信道的级联光纤光栅可达 1m 甚至更长, 制备工艺复杂要求高, 封装和使用极不方便。

取样光纤光栅是解决光纤光栅可使用带宽较小的有效途径。依照耦合模理论, 光栅折射率分布的空间特性决定了光栅光谱的响应, 其空间频谱的每一个傅里叶分量决定了反射谱中对应的反射峰。啁啾光纤光栅在周期为 P 、采样率 $r = 1/P$ 的矩形取样函数调制下, 其反射谱上会出现周期性的反射峰, 反射峰之间的间隔为:

$$= \frac{\lambda^2}{2 n_{\text{eff}} P} \quad (3)$$

式中, λ_B 为 Bragg 波长, P 为取样函数周期。适当选取取样周期 P , 使得反射峰之间间隔等于光信号信道间隔就能实现多信道同时进行色散补偿。图 3 所示是在取样周期为 1mm、采样率为 75% 条件下, 啁啾光纤光栅的反射谱^[5], 能同时补偿 3 个信道。取样函数的选取影响反射谱包络的形状, 减小采样率能使反射谱顶部较平坦, 增加色散补偿信道数。此外, WDM 系统中各个信道色散情况不同, 给啁啾光纤光栅一定的应力, 可调节各个信道色散数值, 色散数值调节范围在 - 200ps/nm ~ - 1200ps/nm, 群时延抖动一般小于 40ps。在 120km 背靠背式传输系统中实验, 取样啁啾光纤光栅的功率代价小于 0.5dB。

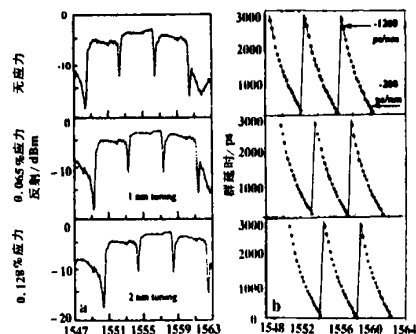


图 3 不同应力下啁啾光纤光栅的反射谱和时延谱

1.2 虚像相位阵列(VIPA)

虚像相位阵列是最近引起注意的体光学色散补偿方法。它主要利用光信号的角度色散特性,其工作原理如图4所示^[6]。光信号从光纤端面出射后,经准直透镜、半柱面镜会聚到镜面玻璃板上。镜面玻璃板前表面镀全反膜(100%),后表面镀高反膜(反射率大于95%),在靠近玻璃板下端镀增透膜以便会聚后的光信号低损耗进入镜面玻璃板。镜面玻璃板是产生角度色散的关键元件,其透射函数可写为:

$$T = \frac{|E_{out}|}{|E_{in}|} = \frac{t}{1 + rr^* - 2r\cos(2\theta)} \quad (4)$$

式中, t, r 分别为高反膜的透射率和反射率, $2\theta = 4nd\cos\theta/l$ 为光信号在镜面玻璃板中以角度 θ 入射时往返一周的光程。从透射函数的形式,我们可得出以下结论:透射函数形式与 F-P 干涉仪的透射函数形式相似,存在自由频谱宽度(FSR);透射函数极大值出现在 $2\theta = (2m + 1)\pi$ 处,不同波长的光会在不同角度出现极大值,这样角度色散将光信号分离开,角度色散值在 $0.4 \sim 2.5 \text{deg/nm}$ 。在镜面玻璃板后,由会聚镜和反射镜面组成回路系统使得不同波长的光按不同路径返回。因为波长较短的光色散角度偏上,走过光程长,波长较长的光色散角度偏下,走过光程短,这样正好补偿常规光纤的正色散。

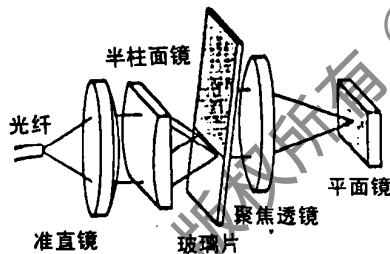


图4 虚像相位阵列工作原理

这种色散补偿方法的特点在于可调范围大,基本不受带宽限制。Shiirasaki 等^[7]人的实验中,调节 VIPA 中光回路系统的长度,色散数值在 -2000ps/nm 到 $+2000 \text{ps/nm}$ 内连续变化,可同时补偿 DWDM 系统信道间隔 100GHz 的光信道 60 个,理论上插入损耗仅 5dB ,偏振相关损耗仅 0.1dB 。虚像相位阵列也是动态可调节色散补偿元件,根据实际情况不同,只需调节回路系统中会聚透镜距离反射透镜位置,就能灵活改变虚像相位阵列的色散补偿量。

1.3 APF 滤波

APF(即 all-pass filter)是一种相位响应系统(如图5所示),系统响应函数可表示为: $H(w) =$

$|H(w)| e^{i\phi(w)}$ 。实现该系统的方法有许多种,其中最简单、易实现的是光纤环行振荡器。耦合器同侧的输出端延迟一定相位后反馈到入射端口,其响应函数可表达为:

$$H(w) = \frac{e^{i\omega T} - \cos\theta}{e^{i\omega T} \cos\theta - 1} = |H(w)| e^{i\phi(w)} \quad (5)$$

式中, $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为延时相位, $\cos\theta$ 为耦合器分束比。根据色散系数定义,可得到色散数值为:

$$D = \frac{w^2}{2c} \cdot \frac{8\cos\theta(1 - \cos^2\theta)\sin 2\theta}{(1 + \cos^2\theta - 2\cos 2\theta)^2} \quad (6)$$

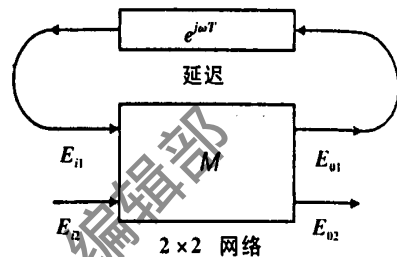


图5 单级 APF 系统示意图

图6是在环臂长 $l = 1 \text{mm}$ 、分束比 $50/50$ 的条件下,做出光纤环行振荡器的色散曲线。从图中可看到:光纤环行振荡器的色散曲线呈周期结构,在极值附近色散数值随波长呈近似线性关系,但是振荡周期小,可利用带宽较窄。

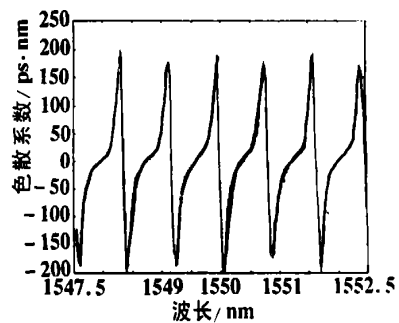


图6 光环行振荡器的色散曲线

这种技术的另外一个特点是将单级 APF 结构级联,设计每级相位延迟量,可成为 WDM 系统高阶色散补偿单元。该技术的局限性在于必须平衡色散最大量和可使用带宽(与自由频谱宽相关)之间关系^[8]。

1.4 双波导耦合

光网络中大多数有源器件是半导体材料平面波导工艺制作,如果将色散补偿单元也做在半导体平面波导上就可实现集成光回路。Peschel^[9]等人就利用非对称双波导耦合实现色散补偿。这种非对称双波导耦合原理是:当结构参数不同的平面波导靠近时,波导中导模之间发生耦合,在耦合区域内形成叠

加模式,叠加模式在频率谐振区域内产生很大色散值(如图 7 所示)。从图中我们可以看到,色散数值

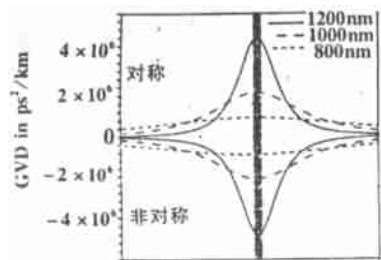


图 7 双波导耦合中叠加模式的色散曲线(间隔为 1200nm,1000nm,800nm)

的大小与平面波导之间的距离有关,平面波导间距 1200nm 时,色散数值越大,随着间距减小,色散数值也相应减小,而且光信号频率偏离平面

波导共振频率失谐时,色散数值快速下降,也存在最大色散量和可使用带宽之间的矛盾关系。通过调节平面波导之间距离,就可选择所需色散补偿量的大小。这种技术易于集成,在输出、输入端口同时集成模式转换器件,能更好选择波导中叠加模式和提高色散补偿效率(如图 8)。

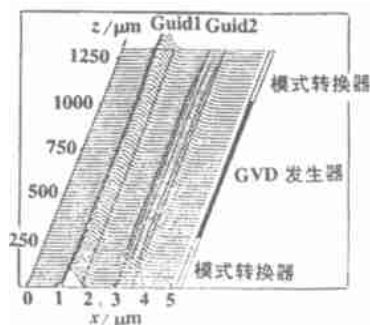


图 8 由波导耦合式 GVD 发生器和两个模式转换器组成的色散补偿器的场传输示意图

2 结束语

概述了光通信网络中几种主要动态色散补偿技术,并分析各种技术的特点及应用局限。这些动态色散补偿技术满足了光通信网络多节点灵活组网发展趋势的需求,为光网络向大容量、高速率和复杂结构发展提供保障。但也注意到,这些动态色散补偿技术的响应时间一般在毫秒级,对于在不同用户间建立通路来说稍微长了。因而色散补偿技术研究的热点将聚焦在如何实现自动、快速进行色散补偿。

参 考 文 献

- [1] Eggleton B J, Rogers J A, Westbrook P S *et al.* IEEE Photo Technol Lett, 1999, 11 (7) :854 ~ 856.
- [2] Rogers J A, Eggleton B J, Pedrazzani J R *et al.* A P L, 1999, 74 (21) :3131 ~ 3133.
- [3] Komukai T, Miyajima Y, Nakazawa M. J A P, 1995, 34 :L306 ~ L308.
- [4] Garthe D, Epworth R E, Lee W S *et al.* Electron Lett, 1994, 30 (25) :2159 ~ 2160.
- [5] Cai J X, Feng K M, Willner A E *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11 (11) :1455 ~ 1457.
- [6] Shirasaki M. Opt Lett, 1996, 21(5) :366 ~ 368.
- [7] Shirasaki M. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(12) :1598 ~ 1600.
- [8] Lenz G, Madsen C K. J Lightwave Technology, 1999, 17(7) :1248 ~ 1254.
- [9] Peschel U, Peschel T, Lederer F. A P L, 1995, 67(15) :2111 ~ 2113.

(上接第 193 页)

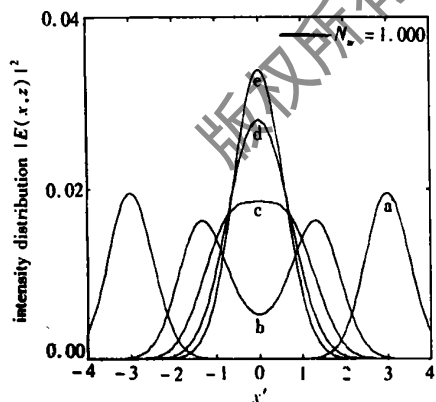


Fig. 2 Same as Fig. 1 but in Fresnel diffraction region ($N_w = 1.0$)

场强演变出了多峰结构值。因此,虽然从数学结构上看,双曲余弦平方-高斯光束仍属复宗量光束类,在衍射过程中其数学形式也发生改变,但在近场衍射区及在参数较小的远场衍射区仍能保持场的分布结构不变。

参 考 文 献

- [1] Casperson L W, Hall D G, Tovar A A. J O S A, 1997, A12 :3341 ~ 3348.

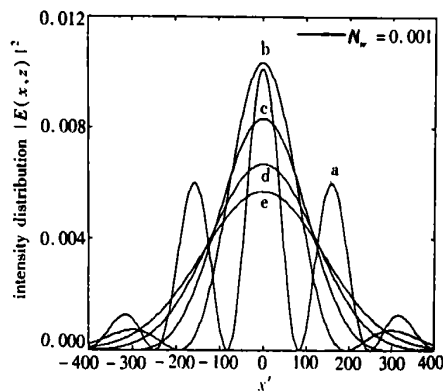


Fig. 3 Same as Fig. 1 but in Fraunhofer diffraction region ($N_w = 0.001$)

- [2] Casperson L W, Tovar A A. J O S A, 1998, A15 :954.
- [3] L ÜB D, Ma H. J Mod Opt, 1999, 46 :719 ~ 723.
- [4] L ÜB D, Zhang B, Ma H. Opt Lett, 1999, 24 :640 ~ 643.
- [5] L ÜB D, Ma H, Zhang B. Opt Commun, 1999, 164 :165 ~ 170.
- [6] Strohschein J D, Sequin H J J, Capjack C E. Appl Opt, 1998, 37 :1045 ~ 1048.
- [7] L ÜB D, Ma H. J O S A, 2000, A17 :2005 ~ 2009.
- [8] Sheppard C J R, Saghaei S. Opt Commun, 1996, 132 :144 ~ 152.