

色散补偿技术原理及现有解决方案分析

林晓静

北京邮电大学电信工程学院, 北京 (100876)

E-mail: inlinly@126.com

摘要: 本文详细介绍了色散补偿技术的原理,以及色散补偿光纤和啁啾光纤光栅色散补偿等多种解决方案的特点。

关键词: 色散效应, 非线性效应, 色散补偿

中图分类号: TN915

1. 引言

目前, 光纤线性通信已不能满足现在信息处理传输的要求, 因为它存在着三个主要的缺陷: 其一是光纤的色散, 其二是光纤损耗, 其三是非线性^[1]。低损耗光纤和掺铒光纤放大器的广泛应用解决了高速光纤通信系统的传输损耗问题。光纤的色散又能有效抑制四波混频等非线性效应, 因此, 色散问题已成为光纤通信系统进行升级扩容的主要障碍。

受色散的影响, 传输速率为10Gbit / s、光脉冲宽度为50ps的系统只能传输40 km。传输速率为80Gbit / s时, 传输距离不足2 km。为了兼顾色散和非线性两种要素, 人们提出了一种折衷方案, 即将光纤的零色散点偏离1.55 μm窗口使之在1.55 μm波长处的色散不为零, 约有2~6 ps / km·nm的色散, 这就是G.655光纤。当光纤传输的速率较低、距离较短时, 采用G.655光纤进行传输的办法是可行的。但是, G.655光纤并没有解决色散问题, 高速、长距离传输中仍然需要色散补偿。并且由于其低色散, 光纤的非线性效应使通道间距为50GHz的波分复用(WDM)系统很难实现。而G.652光纤在1.55 μm窗口处的大色散可以有有效的抑制非线性, 通过色散补偿, 实现通道间距为50GHz的WDM系统的传输毫无问题。

迄今为止, 全世界铺设的光纤干线长达2亿公里以上, 其中的80%为G.652光纤。我国的八纵八横主要干线铺设的基本也都是G.652光纤。随着全球信息业务量的迅猛增加, 通信网络必然要进一步向高速大容量方向发展, 开发已有光通信系统的潜力, 在G.652光纤上开通高速系统^[2], 关键问题是色散补偿。

2. 色散补偿原理

2.1 色散及其表示

由于光纤中所传信号的不同频率成分, 或信号能量的各种模式成分, 在传输过程中, 因群速度不同互相散开, 引起传输信号波形失真, 脉冲展宽的物理现象称为色散。光纤色散的存在使传输的信号脉冲畸变, 从而限制了光纤的传输容量和传输带宽。从机理上说, 光纤色散分为材料色散, 波导色散和模式色散。前两种色散由于信号不是单一频率所引起, 后一种色散由于信号不是单一模式所引起。

当一束电磁波与电介质的束缚电子相互作用的时候, 介质的响应通常与光波的频率 ω 有关, 这种特性称为色散, 它表明折射率 $n(\omega)$ 对频率的依附关系。

光纤的色散效应可以用波矢 k 或传播常数 β 与频率的关系来表示, 即 $\beta(\omega)$ 。在中心频率 ω_0 处将 $\beta(\omega)$ 展开得到:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots$$

式中, $\beta_0 = n_0 \frac{\omega}{c}$, 表示介质在中心频率 ω_0 处的传播常数; $\beta_1 = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right)$, 等于群速

度的倒数; $\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right)$, 表示群速度色散, 和脉冲的展宽有关; β_3 为三阶色散参量。

2.2 由二阶色散效应引起的脉冲展宽

当不考虑高阶色散效应时, 光脉冲在单模光纤内传输的NLS方程可表示为:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial n^2} - \gamma |A|^2 A$$

式中, A 为脉冲包络的慢变振幅, T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间度量 ($T = t - z/v_g$)。

引入一个对初始脉宽 T_0 归一化的时间量 $\tau = \frac{T}{T_0}$ 。同样, 引入归一化振幅 U , $A(z, \tau) = \sqrt{P_0} U(z, \tau)$ 。当 $L \ll L_{NL}$, 而 $L \approx L_D$ 时, 忽略吸收效应和非线性效应, 在脉冲的演变过程中, GVD起主要作用。利用分步傅里叶方法, 当输入为高斯脉冲时, 可以得到图1:

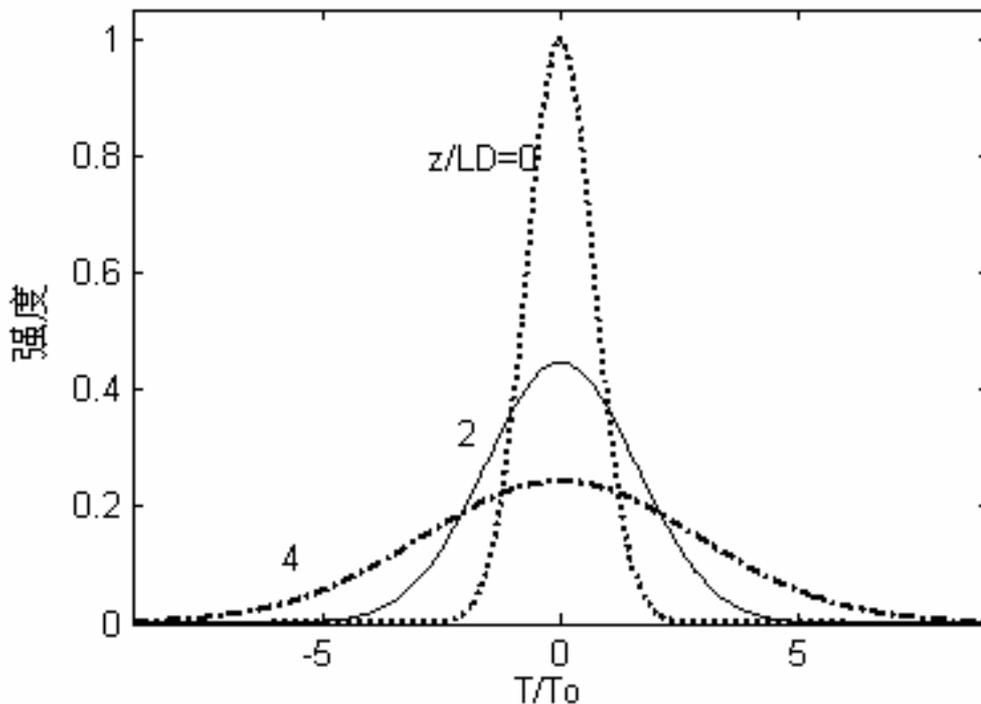


图1、光纤内由色散所致的高斯脉冲展宽

点线表示 $z=0$ 时, $|U(z,T)|^2$ 的图形, 实线表示 $z=2L_D$ 时, $|U(z,T)|^2$ 的图形, 点划线表示 $z=4L_D$ 时, $|U(z,T)|^2$ 的图形。从上图可以看出, 随着 z 的增加, 高斯脉冲在逐渐展宽, 其振幅在逐渐减小。另外, 脉冲的形状保持不变。

2.3 高阶色散效应

仍然忽略光纤的吸收效应和非线性效应。设 L_D' ($L_D' = T_0 / |\beta_3|$) 为与高阶色散有关的色散长度, 当 $L_D' \leq L_D$ 时, β_3 就不能够忽略, β_2 和 β_3 要同时考虑, 高阶色散起主导作用。此时:

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 U}{\partial T^3}$$

图2给出了无初始啁啾脉冲在 $z=5L_D'$ 处的两种情况, 虚线表示 $\beta_2=0$ 时的脉冲形状, 实线表示 $L_D = L_D'$ 时的脉冲形状。从图2中可以看到, 由于TOD会引起脉冲形状畸变, 会在脉冲的一个沿附近形成非对称的振荡结构。当 $\beta_3 < 0$, 振荡出现在脉冲的后沿。对于 $\beta_2=0$ 的情况, 振荡幅度增大, 谷底逐渐趋于零。然而, 对于极小的 β_2 , 这种振荡也会明显减小。当 $L_D = L_D'$ 时, 振荡几乎消失, 脉冲后沿出现一长长的拖尾。

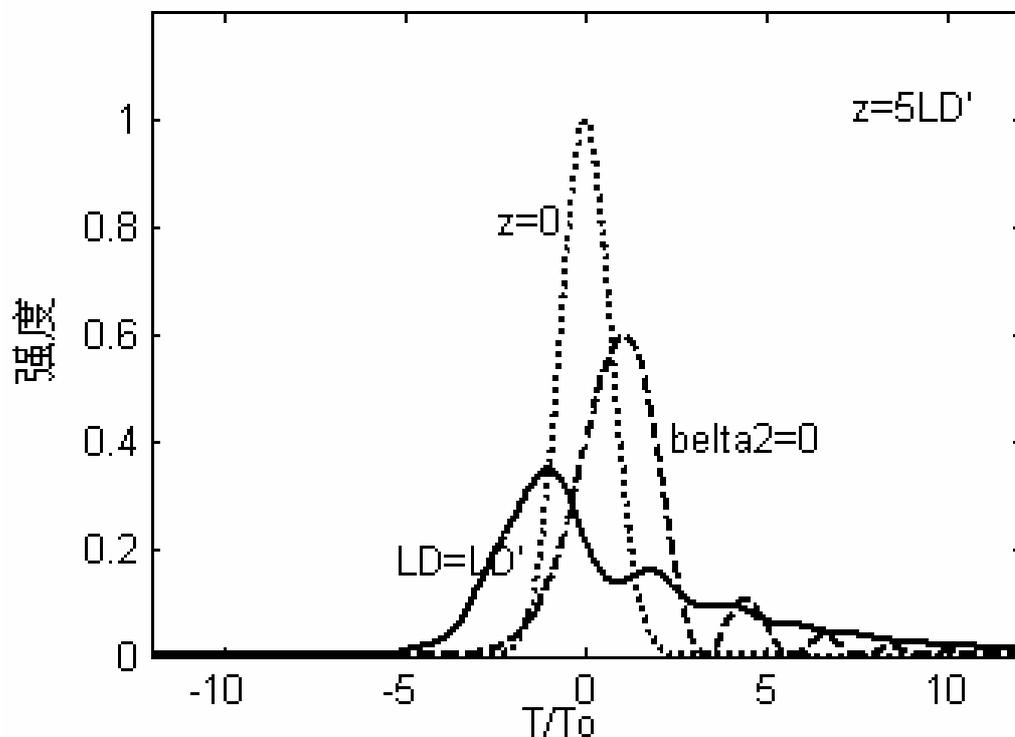


图2、 $z=0$ 处的高斯脉冲（点线）考虑高阶色散是在 $z=5L_D'$ 处的脉冲形状

2.4 色散补偿

尽管从防止脉冲展宽的观点来看, 工作在零色散波长是很合适的, 但是, 实际设计中还

要考虑其他的因素。例如，在波分复用(WDM)系统中，在零色散波长处最多只能安排一个信道，而且,当色散效应很小的情况下，会发生很强的四波混频，这使 WDM系统不能工作在零色散区，这样，由GVD引起的脉冲展宽就很严重了。

在考虑 β_2 和 β_3 同时起作用的情况下，采用周期等于放大器间隔的周期色散排布，放大器用来补偿每段光纤的损耗，每对放大器之间恰好有两种光纤，这两种光纤的 β_2 和 β_3 的符号分别相反，这样使平均色散降到很小的值。理想的情况，当：

$$\beta_{21}L_1 + \beta_{22}L_2 = 0 \quad \text{且} \quad \beta_{31}L_1 + \beta_{32}L_2 = 0$$

色散得到完全补偿。其中 β_{2j} 和 β_{3j} 分别是长为 L_j 的光纤的GVD和TOD参量。

在 $L_D = L_D'$ ， $5\beta_{21} = \beta_{22}$ 和 $5\beta_{31} = \beta_{32}$ 的情况下，得到 $z = 5L_D$ 、 $z = 5.5L_D$ 和 $z = 6L_D$ 时脉冲的形状,如图3所示。

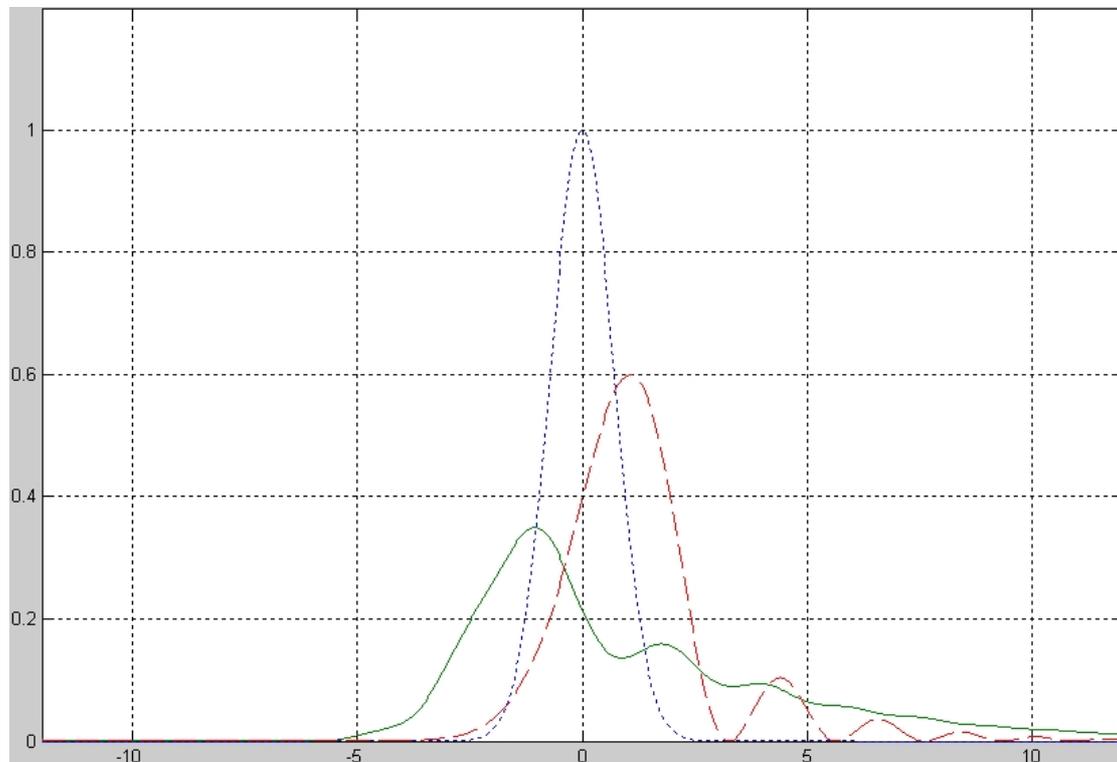


图3、考虑高阶色散的高斯脉冲色散补偿过程中脉冲形状

图3为 $z = 5L_D$ （蓝线）、 $z = 5.5L_D$ （红线）和 $z = 6L_D$ （绿线）时脉冲的形状。从图中可以看出，脉冲在传播6倍色散长度时被完全补偿。

3. 现有较成熟的色散补偿技术

上面介绍的几种色散补偿方法，由于存在不同的缺陷，难于在实际的光纤传输系统中真正实用化。目前发展最成熟的技术主要是色散补偿光纤(DCF-Dispersion Compensation Fiber)和啁啾光纤光栅(CFBG-Chirped Fiber Bragg Grating)色散补偿。

3.1 色散补偿光纤(DCF) [3]

色散补偿光纤是一种具有较大负色散系数和负色散斜率的特殊光纤，由于普通单模光纤

在1550nm 窗口具有17ps / nm / km左右的色散，并具有正的色散斜率，因此可将其直接接入普通单模光纤传输系统中，使整条光纤线路在EDFA提供的增益波长范围内满足WDM 系统对光纤色散的要求，如图4所示。早在20世纪70年代就提出了色散补偿光纤这种技术，其生产工艺比较复杂，成本较高，但应用简便。

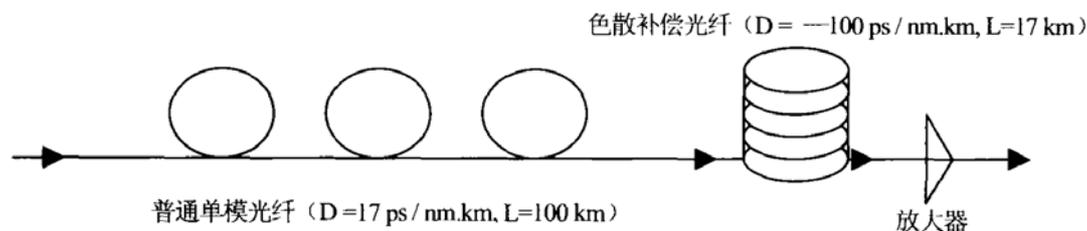


图4 DCF色散补偿结构示意图

色散补偿光纤已经在全世界的高速通信系统中得到了广泛应用，许多传输系统都是通过DCF+G. 652光纤实现的。为了提高传输距离，有的传输系统采用了DCF+G. 652光纤+特殊光纤组合，也就是通常所说的色散管理。OFC'2001上，日本NEC 报道了总的传输容量为10. 92Tb / s的传输系统^[4]，就是利用DCF+PSCF(Pure Silica Core Fiber)+RDF(Reversed Dispersion Fiber)，实现了S+C+L波段、40Gb / s光信号的117km传输。阿尔卡特报道了在C+L波段，DCF+Teralight光纤实现传输距离100km，传输容量为10. 2Tb / s(256×42. 7Gb / s)的传输系统^[5]。这两个系统都没给出功率代价值。

虽然DCF已被广泛应用于现有的光纤通信系统，但利用其进行色散补偿尚存在大损耗、低色散和色散斜率不匹配的缺陷。各国研究人员已对DCF所存在的问题引起了重视，ECOC和OFC会议上就有多篇文章提到新型DCF的研制，但这些光纤均需要特殊设计，造价很高，而且其增大负色散必然又使得DCF的有效截面积减小，这样又容易产生非线性，造成了二者的相互矛盾。

按照工作原理的不同，色散补偿光纤可分为单模色散补偿光纤和双模色散补偿光纤两种基本类型。单模色散补偿光纤的基本原理是在纤芯使用高折射率差或多包层以增强LP₀₁模式的负波导色散。双模色散补偿光纤的基本原理是将LP₀₁模变成LP₁₁模，色散补偿后再由LP₁₁模变成LP₀₁模，由于模式变换的复杂性，故双模DCF的实际应用较少。

3.2 啁啾光纤光栅(CFBG)色散补偿

采用适当的光源和光纤增敏技术，几乎可以在各种光纤上不同程度地写入光栅^[6~9]。光纤光栅就是光敏光纤在选定波长光照射后形成的折射率呈固定周期性分布的一种无源光器件。光纤光栅进行色散补偿的示意图如图5所示。光波经过光栅后起到色散均衡的作用，从而实现色散补偿。

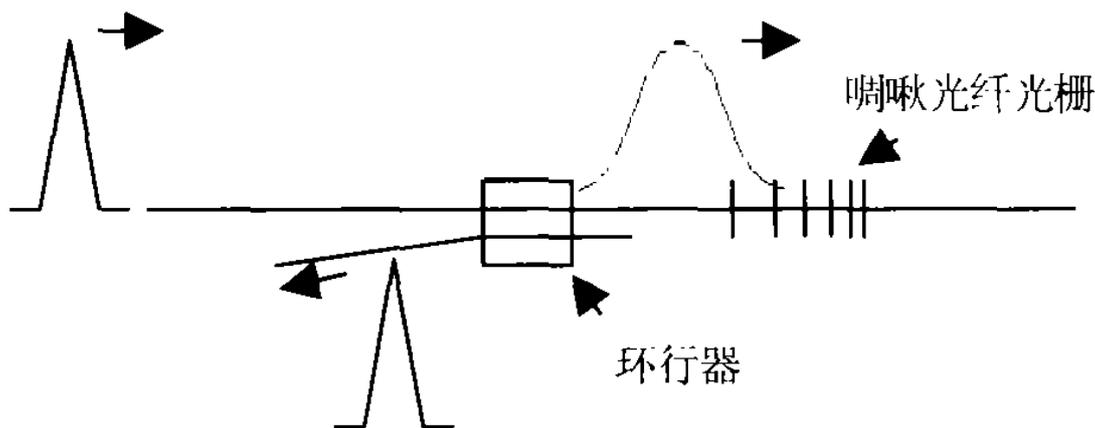


图5 光线光栅色散补偿示意图

其基本原理是：啁啾光纤光栅中，谐振波是位置的函数，因此不同波长的入射光在啁啾光纤光栅的不同位置上反射并具有不同的时延，短波长分量经受的时延长，长波长分量经受的时延短，光栅所引入的时延与光纤中传输时造成的时延正好相反，二者引入的时延差相互抵消，使脉冲宽度得以恢复。图6为光纤光栅的反射谱和时延曲线。可以看到带宽范围内的时延曲线基本为一条直线，其斜率就是该光纤光栅所能补偿的色散量。

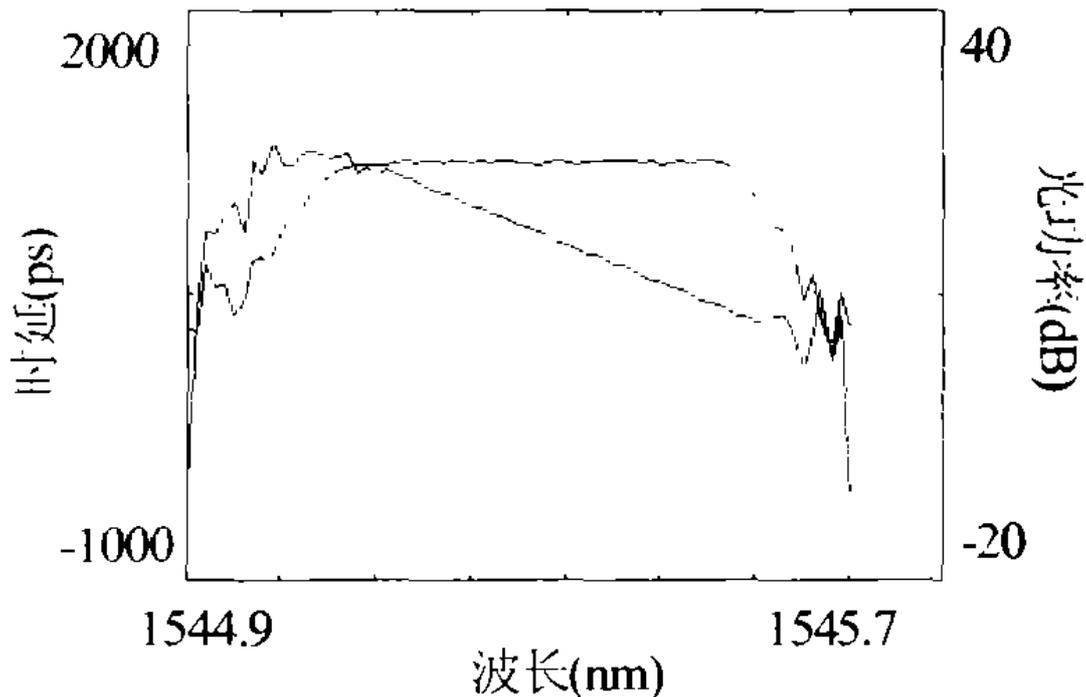


图6 光线光栅的反射谱和时延曲线

啁啾光纤光栅与现有光纤系统兼容性好，具有较低的传输损耗和插入损耗，色散补偿量大，能够实现光纤色散和色散斜率的同时补偿，折射率调制可以根据需要来通过不同的曝光过程加以控制，且价格低廉，易于大批量生产。因此，啁啾光纤光栅色散补偿器已被公认为具有很好应用前景的色散解决方案。

目前，光栅的温度漂移、时延纹波、光功率波动和包层模附加损耗大等，是实现光纤光栅色散补偿实用化系统必须解决的几个主要问题。OFC'2003上，有多篇文章谈到了光纤光

栅色散补偿器的研究, 对以上几个问题都已经提出了多种行之有效的解决方法^[10~12]。

4. 结论

随着光纤传输损耗问题的基本解决, 光纤色散和非线性问题随即成为发展高速、大容量光通信系统的主要障碍。由于光纤的色散能够有效抑制四波混频等非线性效应, 因此对光通信系统进行升级扩容的关键将集中体现在色散问题上。改变光纤的零色散点是一个折中方案, 但不能从根本上解决问题。究竟采取何种技术和手段才能经济有效地解决光纤色散问题, 是目前国际光通信领域的主要研究热点之一。本文分析表明, 光纤光栅在光纤的色散补偿中将发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] Madsen CK, Lena G. Optical all pass filters for phase response design with application for dispersion compensation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(7): 994~996.
- [2] Park Y, Lee ST. A novel wavelength stabilization scheme using a fiber grating for WDM transmission[J]. IEEE Photonics Technology Letters. 1998, 10(10): 1446~1448.
- [3] Alleston SB, Harper P, Penketh IS, et al. 40Gb/s single channel dispersion managed pulse propagation in standard fiber over 509km[J]. Electron. Lett., 1999,35(1): 57~59.
- [4] Kiyoshi Fukuchi. 10. 92-Tb/s(273×40-Gb/s)triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment[C]. OFC'2001, PD24-I-PD24-3
- [5] Bigo S. 10. 2Tbit/s(256 x42. 7Gb/s PDM/WDM)transmission over 100km TeraLight™ fiber with 1. 28bit/s/Hz spectral efficiency[C]. OFC'2001, PD25-1-PD25-3
- [6] Dong L. Enhanced photo sensitivity in tin codoped germano-silicate optical fibres[J]. Photon Tech Lett,1995, 7: 1048~1050.
- [7] Dong L. Strong photo sensitive gratings in tin-doped phospho-silicate optical fibres[J]. opt Lett,1995, 20: 1982~1984.
- [8] Williams DL, Ainslie B J. Enhanced UV photosensitivity in Boron codoped germanosilicate fibres[J]. Electronics Letters January1993, 29 (1): 45~47.
- [9] Broer M M. Ultraviolet-induced distributed feed-back gratings in Ce3 doped silica fibres[J]. opt Lett,1991, 16: 1391~1393.
- [10] Wakabayashi S, Baba A, Mofiya H. Tunable dispersion slope compensator based chirped FBGS with temperature distribution for 160Gb/s[C]. OFC'2003, 30~31.
- [11] Sakamoto A, Kimu N, Okude S, et al. Tunable second order dispersion compensator using FBG with double ring structure[J]. OFC'2003, 37~38.
- [12] Kintaka K, Nishii J. Low temperature sensitive waveguide FBG using Ge,B,F-doped SiO2 films[C]. OFC'2003, 52~53

Dispersive compensation principle and solutions

Lin Xiaojing

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing (100876)

Abstract

In this paper, the author presents the principle of dispersive compensation in detail and the characteristic of two kinds of solutions --- dispersive compensation fiber and chirped fiber grating dispersive compensation.

Keywords: dispersion, nonlinear, dispersive compensation