

基于啁啾光纤光栅的色散管理^{*}

谭中伟[†] 宁提纲 刘 艳 陈 勇 曹继红 董小伟 马丽娜 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2005 年 5 月 8 日收到, 2005 年 10 月 8 日收到修改稿)

本文通过数值仿真对基于啁啾光纤光栅的单信道的色散管理进行了研究,并在 1500km 的 10Gb/s 单信道传输系统中进行了实验验证. 本文还通过分析啁啾光纤光栅引入的信道间随机时延差对交叉相位调制的抑制作用,发现了基于啁啾光纤光栅的多信道系统的色散管理的新的特点.

关键词: 光纤通信, 色散补偿, 啁啾光纤光栅

PACC: 4280F, 4280S, 4281D

1. 引 言

在超长距离传输系统中,色散管理是必须考虑的问题. 在没有非线性效应的情况下,总的光纤色散可以在传输几千公里之后、接收机之前用色散补偿模块完全补偿而不会降低系统性能. 但是,当非线性的作用不能忽略时,情况则变得不同. 同信道光脉冲之间和不同信道的光脉冲之间的非线性作用,使光信号恶化,仅在接收端进行色散补偿无法使光脉冲信号得到恢复. 一个常用的解决方法是进行周期性的色散管理,对光纤的色散逐段进行补偿^[1]. 这样,每个周期内的总的色散量基本为零,减小同信道光脉冲之间的作用,而线路中的色散量确比较大,可以抑制光脉冲之间的作用^[2]. 色散图的优化主要包括优化前补偿、链路补偿和后补偿色散量,一般需要通过大量的数值模拟计算确定.

对于超长距离、高速率的 DWDM 传输系统来说,色散管理是抑制非线性效应的重要手段. 啁啾光纤光栅色散补偿是一种行之有效的色散补偿方案,它具有成本低、结构简单、插入损耗小、性能可靠等优点^[3]. 由于光纤光栅具有体积小、插损低、非线性小、窄带等特点,基于光纤光栅的色散管理与基于 DCF 的色散管理具有一些不同的特点.

本文采用分布傅立叶方法对光脉冲的传输方程进行数值求解^[4],由于该方法采用了有限傅立叶变

换(FFT)算法,因此运算速度较快,是最为常用的求解光脉冲传输的方法. 光纤的色散是 $17\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$,色散斜率是 $0.058\text{nm}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$. 非线性系数为 $0.0013\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,衰减指数 $0.2\text{dB}/\text{km}$. 使用的放大器的参噪声指数为 4. 每段光纤的长度为 100km.

2. 基于光纤光栅的单信道超长距离传输系统中的色散管理

在超长距离 DWDM 系统中,限制系统性能的主要因素是光放大器的 ASE 噪声(低信道功率)和光纤非线性引起的噪声(高信道功率),因此需要控制入纤功率,在减小 ASE 噪声和减小光纤非线性这两个互相矛盾的要求之间找到平衡点.

在 DCF 色散补偿的系统中,由于在 1550nm 处,DCF 的色散是正常色散,会增强自相位调制的作用,导致脉冲分叉,而且,由于 DCF 的芯径较小($20\mu\text{m}^2$ 左右),其非线性作用较强,因此,需要严格控制 DCF 的入纤功率,有时把它放在传输光纤之后,但由于 DCF 的插损较大,经常需要对它进行单独放大^[5]. 在使用光纤光栅色散补偿时,光纤光栅作为一个窄带滤波器,能把大部分带外的 ASE 滤除,有效提高系统的信噪比. 而且,由于光纤光栅的插损小、非线性小,可以不用对它进行专门的放大,而可以把它连接在放大器之后.

在超长距离 DWDM 系统中,非线性效应主要体

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)批准号 2001AA120201,北京市自然科学基金(4052023)和北京交通大学专项研究员基金资助的课题.

[†] E-mail: tanzw@vip.sina.com

现在信道内的码间干扰和信道间的码间干扰. 由于色散的作用, 光脉冲发生展宽, 当展宽到一定程度时, 同信道光脉冲之间发生交叠, 产生干涉现象, 这就是信道内的码间干扰^[2]. 为了减小码间干扰, 应该使光纤线路上的累积色散量减小到最小, 这样就需要采用分布式的色散补偿. 对于 100km 的光纤间距和补偿量为 150km 的光纤光栅来说, 每两个光纤光栅可以补偿 300km 的光纤, 但在这三段光纤之间就会有 $C_3^2 = 3$ 种不同的连接方式. 则 3000km 总的色散图如图 2 所示.

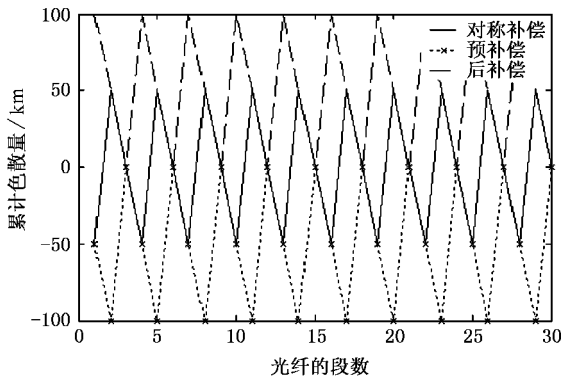


图 1 三种不同色散补偿方案的色散图

针对对称补偿、预补偿和后补偿计算传输 1500km 后得到的 Q 值分别为 12.4, 10.4 和 10.6. 计算结果表明, 采用对称补偿的方式得到的结果最好, 这是因为使用对称补偿时, 线路上积累的最大色散量为 50km 光纤的色散, 而其他的两种分别对应着最大色散量为 100km 光纤的色散, 因此, 它的脉冲展宽最小, 发生的信道内的码间干扰最小. 因此, 我们在实际搭建系统时, 都按照积累的最大色散量最小的标准来选择色散补偿器的位置.

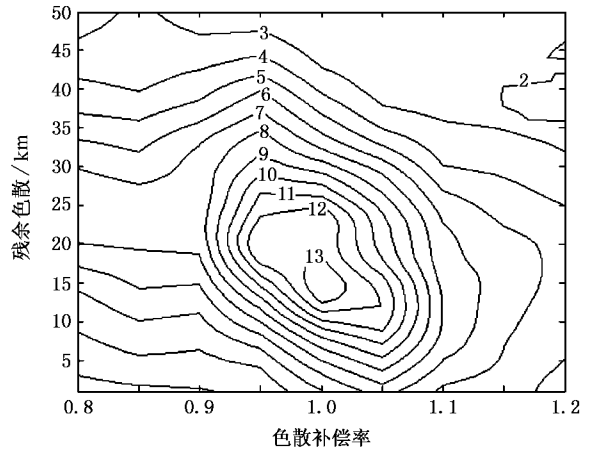


图 2 计算单路信号 1500km 在不同色散补偿率和不同残余色散得到的 Q 值

图 2 中所示为计算得到的单路信号在不同色散补偿率和不同残余色散得到的 1500km 处的 Q 值. 系统性能在色散补偿率为 1, 略微有点欠补偿时达到最优.

3. 单信道超长距离传输系统的实验

我们使用啁啾光纤光栅色散补偿实现了在 G.652 光纤上 1500km 的单路 10Gb/s 的 NRZ 码的传输. 我们在此系统上对基于光纤光栅的色散管理的规律进行了实验验证.

我们使用的是长飞公司生产的 G.652 光纤, 它在 1550nm 附近的损耗为 0.2dB/km, 测试得到它在 1556nm 附近的色散为 16.6ps/km. 传输时仅使用掺铒光纤放大器(EDFA)来补偿光纤的损耗, 放大器的间距为 100km. 光纤光栅的长度为 140cm, 啁啾量为

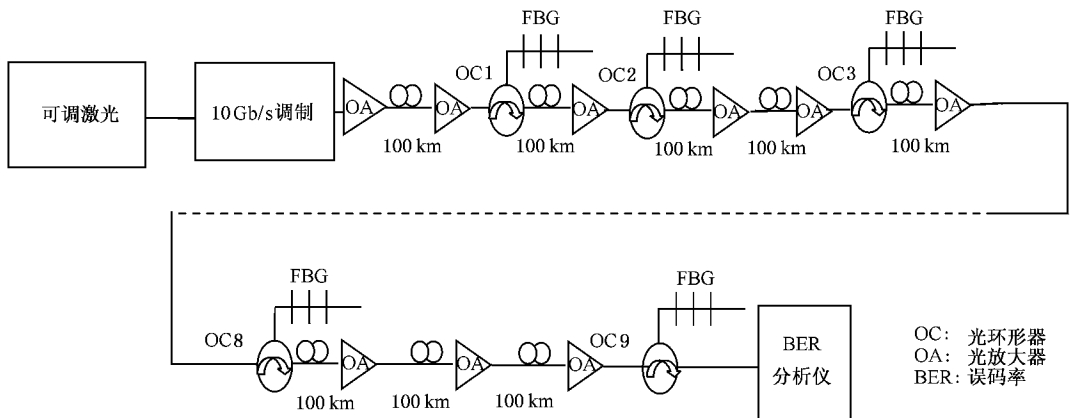


图 3 光纤光栅色散补偿实现的 G.652 光纤上 10Gb/s 传输 1500km 的系统结构图

0.37, 每根啁啾光纤光栅能补偿 150km 光纤的色散, 这样每两根光纤光栅补偿三段光纤的色散. 采用如图 1 所示对称补偿方案时, 系统的结构图如图 3 所示. 激光经过 LiNiO₃ 调制器产生 10Gb/s 的 NRZ 码的光信号, 光纤的入纤功率为 4dBm, 色散补偿器的插损小于 5dB, 完全由该节点处的 EDFA 补偿. 放大器的噪声指数为 4dB 左右. 信号传输 1500 km 后, 由误码仪测得系统的误码率 $< 10^{-12}$, 功率代价小于 3dB; 而在采用预补偿方案和后补偿方案进行色散补偿时, 系统的功率代价都大于 5dB; 如果不采用分布式的色散补偿方式, 而在传输后进行集中补偿时, 传输到 1000km 时就不能达到零误码.

因此, 在设计一个超长距离的传输系统时, 应该采用对称的色散补偿方案, 使光纤线路上的累积色散量减小到最小. 这样可以最大程度地抑制非线性效应, 使系统性能达到最优.

4. 基于光纤光栅的多信道超长距离传输系统中的色散管理

与单信道的传输系统相比, 交叉相位调制是多信道系统中最主要的非线性效应. 有人曾用波分复用器和光纤延迟线构成交叉相位调制器来减弱 DWDM 系统中的四波混频效应^[6], 后来, Bragg 光纤光栅也有用来抑制交叉相位调制效应^[7]. 但是, 由于它们都是在系统中引入专门的器件来抑制非线性效应, 不仅增加了系统的复杂程度, 而且大大增加了成本, 因此没有得到广泛应用. 功率管理和色散管理仍然是解决克服非线性效应的主要手段. 我们发现, 在多信道系统中, 由于啁啾光纤光栅本身就具有引入信道间随机时延差的作用, 因此其色散管理更为简单、有效.

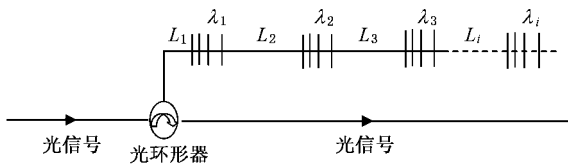


图 4 光纤光栅色散补偿器的结构示意图

一个基于啁啾光纤光栅的色散补偿器如图 4 所示. 对于一个每段进行放大的由 N 段光纤组成的光纤链路, 假设每一段光纤中产生的交叉相位调制引起的相移为 ϕ_1 , 它的幅度和相角分别为 $\Delta\phi_1$ 和 ϕ_1 .

两个信道之间的时延是 τ_n , θ 是光信号的初始相位. 对一个用色散补偿光纤进行色散补偿的系统来说, 光信号经过每段光纤的色散被完全补偿时, 光脉冲波形基本得到了恢复, 交叉相位调制引起的相移是相同的, 这样, 经过 N 段光纤之后, 交叉相位调制引起的总的相移是^[8]

$$\Delta\Phi_{1,N} = N\Delta\Phi_1, \quad (1)$$

但对于基于窄带的啁啾光纤光栅的色散补偿器来说, 第 λ_i 个波长的信道经历的时延为 $\tau_i = \sum_l 2L_l/c_n$, 所以两个信道间会增加 $2\pi(\tau_k - \tau_j)$ 的时延. 因为光纤光栅之间的光纤长度是随机的, 所以每段光纤产生的交叉相位调制引起的相移的相位是随机的, 所以总的相移的幅度可以表示为

$$\Delta\Phi_{1,N} = \Delta\Phi_1 \sum_n \cos(\phi_n), \quad (2)$$

ϕ_n 是一个随机变量, 所以 $\cos(\phi_n)$ 满足在 $[-1, 1]$ 上的均匀分布, 它的均值是 $\mu = 0$, 均方差为 $\sigma^2 = 1$, $\cos(\phi_n)$ 的和肯定要小于 N . 根据中心极限定律^[9], 如果 N 足够大, N 个随机变量的和的均值和方差分别为 $n\mu$ 和 $n\sigma^2$. 也就是说, 在最差的情况下, N 段光纤的交叉相位调制引起的总的相移是每段光纤的 \sqrt{N} 倍.

以上的讨论是考虑光纤的色散被完全补偿的情况. 由于完全的色散补偿使光信号经过每一段光纤后脉冲形状得到了恢复, 使交叉相位调制效应累积起来, 形成了交叉相位调制的谐振. 在实际的超长距离传输系统中, 使用更复杂一些的色散管理来取代完全的色散补偿, 色散补偿率一般不等于 1, 这样经过每个放大器之后的光脉冲都会因为色散走离而使它们的交叉相位调制不同, 避免交叉相位调制的谐振^[10]. 然而, 因为 G.652 光纤的色散量较大, 当线路的色散补偿率与 1 相差较大时, 累积的色散量会较大, 信道内的光脉冲会发生交叠, 使系统性能恶化. 这样, 抑制信道内的码间串扰和信道间的码间串扰对于色散管理的要求是相互矛盾的. 因此, 对于用 DCF 补偿的 G.652 光纤的超长距离传输系统来说, 最优的色散补偿率的范围和残余色散量容限太窄, 以至于它在实际中应用几乎是不可能的^[11].

在最优的色散补偿率的 10Gb/s 波分复用系统中, 交叉相位调制是最主要的非线性效应^[11]. 由于光纤光栅之间引入的随机时延差能够抑制交叉相位调制效应, 则在基于光纤光栅的波分复用系统中, 每段光纤内产生的交叉相位调制产生的相移都是随机

的,因此,即使在色散补偿率为 1 的时候,也不会发生交叉相位调制效应的谐振.这样,就避免了抑制信道内的码间串扰和信道间的码间串扰之间的矛盾,最优的色散补偿率的范围和残余色散量容限都有所增加.

图 5 和图 6 比较了不同色散补偿率和不同残余色散时信道间有无随机时延差的系统的 Q 值.计算是仍使用图 3 中的结构,8 个 10Gb/s 的随机信号注入到光纤中,每信道的入纤功率为 2dB.光纤的总长度为 $15 \times 100\text{km}$,每 100km 进行一次放大和色散补偿.光纤光栅和环形器的总的插损是 5dB.光纤和色散补偿器的损耗都由放大器完全补偿.放大器的噪

声指数是 4.由于光纤光栅的非线性小,把色散补偿器放置在放大器之后,以减小入纤的光功率,而且能起到滤除 ASE 噪声的作用.为了进行对比,同样对一个基于 DCF 的系统进行模拟.DCF 的色散是 $-85\text{ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$,色散斜率为 $0.29\text{nm}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-2}$.两个系统的色散和色散斜率都被完全补偿.8 个信道的波长从 1545nm 到 1552nm,波长间隔 1nm 和 0.5nm.因为邻近信道的交叉相位调制的作用较大,频带边缘的信道的交叉相位调制噪声较弱,而频带中心的信道与信道号基本无关,所以图 5 和图 6 都是针对第 4 信道进行计算.

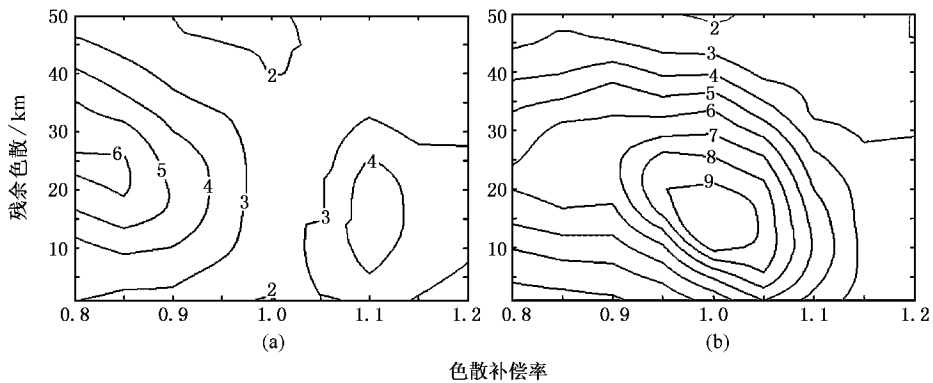


图 5 有信道间时延差的系统和没有信道间时延差的系统在不同色散补偿率和残余色散输出 Q 值 (1500km, 8 信道, 1nm 间隔)

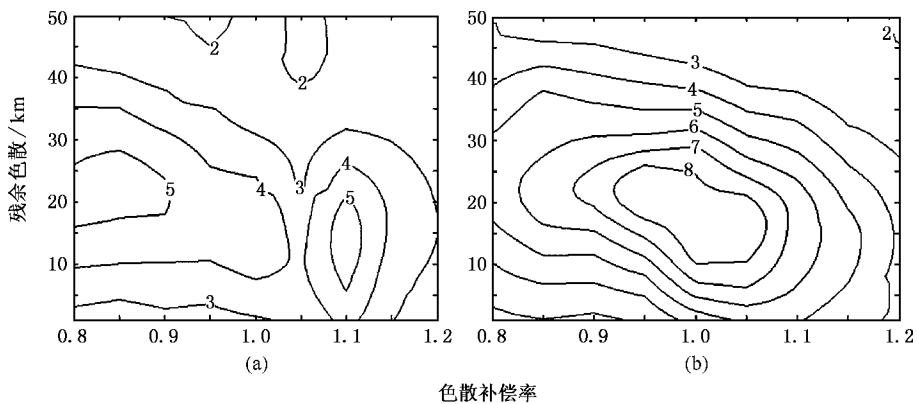


图 6 有信道间时延差的系统和没有信道间时延差的系统在不同色散补偿率和残余色散输出 Q 值 (1500km, 8 信道, 0.5nm 间隔)

从图中可以看出信道间没有随机时延差(基于 DCF)的系统,其最优的色散补偿率范围和残余色散的容限都非常小.这是由于光纤的色散较大,系统的色散补偿率要接近 1,否则脉冲将发生严重的展宽,信道内的码间串扰将比较严重;而系统的色散补偿

率要接近 1 的时候,如上文所示的,又会引起交叉相位调制的谐振.因此,对基于 DCF + G.652 光纤的系统来说,抑制其自相位调制和交叉相位调制的要求是相互矛盾的,因此,它的色散补偿率范围和残余色散的容限都非常小,实际上,很难运用到超长距离的

DWDM 系统中.相对而言,基于光纤光栅色散补偿的系统,它的色散管理能同时满足信道内的码间串扰和信道间码间串扰的要求,不仅系统的性能得到了提高,最优的色散补偿率范围和残余色散的容限都明显增大了.在使用 G.652 光纤和 EDFA 的超长距离波分复用系统中,使用光纤光栅来进行色散补偿的波分复用系统的色散管理比使用 DCF 更为简单有效.而且,这种基于光纤光栅色散管理的超长距离 DWDM 系统线路上仅由 G.652 光纤、EDFA 和光纤光栅组成,放大器间距 100km,且不需要对色散补偿模块提供专门的放大,因此,系统造价很低.

5. 结 论

本文主要通过数值计算研究了基于啁啾光纤光栅的色散管理,并对单信道系统的计算结果进行了实验验证.在传统的色散管理方式中,需要采用的复杂色散图来避免发生交叉相位调制效应的谐振^[10,12],而本文发现,由于啁啾光纤光栅引入的信道间随机时延差对交叉相位调制有显著地抑制作用,所以,基于光纤光栅的色散管理不需要采用复杂的色散图,因此更为简单、有效.

- [1] Masatoshi S , Noboru E 2003 *Journal of Lightwave Technology* **21** (8) 916
- [2] Agrawal G 2002 *Fiber-Optic Communication Systems* , third edition (New York : John Wiley & Sons Inc) 279
- [3] Pei L , Jian S S , Ni T G , Jian W , Li T J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 615 [in Chinese] 裴 丽、简水生、延凤平、宁提纲、简 伟、李唐军 2003 *物理学报* **52** 615]
- [4] Agrawal G 2002 *非线性光纤光学原理及应用* 第 34 页(北京 : 电子工业出版社)
- [5] Gruner-Nielsen L , Knudsen S N , Edvold B , Nishimura M , Kanamori H 1997 *Fiber Integ* **16** 277
- [6] Kyo Inoue 1993 *Journal of Lightwave Technology* **11** 455
- [7] Bellotti G , Bigo S , Cortes P , Gauchard S , Laroche S 2000 , *IEEE Photonics Technology Letters* **12** 1403
- [8] Chiang T K , Kagi N , Marhic M E , Kazovsky L G 1996 *Journal of Lightwave Technology* **14** 249
- [9] William P *et al* 1993 Institute of Electrical and Electronics Engineers , Inc ,
- [10] Nelson L E , Jopson R M , Gnauk A H , Chraplyvy A R 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 907
- [11] Wu M , Way W I 2004 *Journal of Lightwave Technology* **22** 1483
- [12] Masatoshi Suzuki , Noboru Edagawa 2003 *Journal of Lightwave Technology* **21** 916

Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-haul DWDM system *

Tan Zhong-Wei Ning Ti-Gang Liu Yan Chen Yong Cao Ji-Hong Dong Xiao-Wei Ma Li-Na Jian Shui-Sheng

(Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

(Received 8 May 2005 ; revised manuscript received 8 October 2005)

Abstract

The dispersion management based on chirped fiber gratings in single channel system is studied by numerical simulation and tested in a 10Gb/s system on 1500km G.652 fiber. In this article , the suppression of the XPM effects by the random time delay between channels induced by the chirped fiber gratings is also studied. The special characteristics of the dispersion management based on chirped fiber gratings are found.

Keywords : optical communication , dispersion compensation , chirped fiber grating

PACC : 4280F , 4280S , 4281D

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2001AA120201) , Beijing Natural Science Foundation (4052023) and the Zhuan Xiang Yanjiuyuan Foundation by Beijing Jiaotong University.

† E-mail : tanzw@vip.sina.com