

# 电子色散补偿技术在高速光传输系统中的应用

张翠红<sup>1,2</sup>, 李蔚<sup>1</sup>, 李海涛<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 光电子科学和工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 电子色散补偿(EDC)技术作为一种新的光纤色散补偿技术正在逐步进入实用化阶段。文章介绍和分析了 EDC 的一般电路结构和工作原理, 并通过对 10 Gbit/s 光传输系统的测试, 和对测试数据的分析, 验证了在 10 Gbit/s 光传输系统中 EDC 的补偿性能。

关键词: 电子色散补偿; 色散; 误码率; 色散代价

中图分类号: TN818 文献标志码: A 文章编号: 1005-8788(2006)06-0052-04

## Application of electronic dispersion compensation technology in high-speed optical transmission systems

Zhang Cuihong<sup>1,2</sup>, Li Wei<sup>1</sup>, Li Haitao<sup>2</sup>

(1. Institute of Optoelectronics Science and Engineering, HUST, Wuhan 430074, China;

2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: As a new technology for fiber dispersion compensation, Electronic Dispersion Compensation (EDC) is gradually being applied in practical projects. In this article, its general circuit structure and operating principle are introduced and analyzed and its compensation performance in 10 Gbit/s optical transmission systems verified by the system tests and the analysis of the test results.

Key words: Electronic Dispersion Compensation(EDC); dispersion; BER; dispersion penalty

不断提高的数据传输速率,使基于密集波分复用(DWDM)技术的光纤通信系统中的光纤色散成为限制传输距离的主要因素。在不加任何色散补偿的 G. 652 光纤线路上,10 Gbit/s 速率下电吸收调制激光器的色散受限距离仅为 80 km<sup>[1]</sup>。为了提高传输系统的传输距离,各种色散补偿技术不断出现并发展起来,如色散补偿光纤、色散补偿光栅、中点谱反转和电子色散补偿(EDC)等。

各种色散补偿方式各有特点,色散补偿光纤补偿波长范围宽,但损耗大;色散补偿光栅损耗小,但光谱通带很小,一个补偿光栅只能补偿一个通道。EDC 技术是一种新的光纤色散补偿技术,它可以和接收处理电路集成在一起。因此,有学者认为,EDC 将是实现小型化、低功率和低成本元器件的关键技术<sup>[2]</sup>。目前,已有多家器件商推出了可商用的器件样品,EDC 将逐步进入实用化阶段。

### 1 EDC 原理

由于光纤色散的影响,信号脉冲经过光纤传输后被展宽,产生码间干扰,导致接收端灵敏度降低,这就是所谓的色散代价。色散积累越多,码间干扰越严重,灵敏度降低越严重,即色散代价越大。

EDC 是基于电子滤波(均衡)技术进行光纤色

散补偿的,它通过对接收光信号在电域进行抽样,软件优化和信号复原,能有效地调整接收信号的波形,恢复由于色散、偏振模色散(PMD)和非线性引起的光信号展宽和失真,从而达到色散补偿的效果<sup>[3]</sup>。

带 EDC 的接收机框图如图 1 所示。假设光纤的传输函数为  $H(\omega)$ ,为了在接收端判决时消除码间干扰,在数据判决前增加了一个横向滤波器  $T(\omega)$ ,形成总的传输函数。由于光/电变换和前置放大过程基本呈线性关系,不会改变信号的波形,因此不列入传输函数。

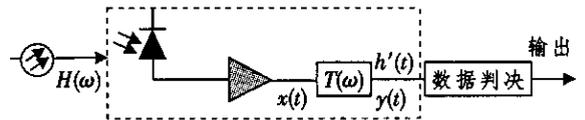


图 1 带 EDC 的接收机框图

$$H'(\omega) = H(\omega) \cdot T(\omega), \quad (1)$$

当  $H'(\omega)$  满足式(2)时,其输出信号  $y(t)$  没有码间干扰,即包含  $T(\omega)$  在内的  $H'(\omega)$  可以消除码间干扰。

$$H'_{eq} = \sum_i H' \left( \omega + \frac{2\pi i}{T_b} \right) = \begin{cases} \text{常数} & |\omega| \leq \pi/T_b \\ 0 & |\omega| > \pi/T_b \end{cases}, \quad (2)$$

可以证明,

$$T(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-jnT_b \omega}, \quad (3)$$

其中,

$$C_n = \frac{T_b}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T_b}}^{\frac{\pi}{T_b}} \frac{T_b}{\sum_i H\left(\omega + \frac{2\pi i}{T_b}\right)} e^{jn\omega T_b} d\omega. \quad (4)$$

由上式可见,  $C_n$ 、 $T(\omega)$  完全由  $H(\omega)$  决定。对式(3)进行傅里叶反变换可得到单位冲击响应  $h_T(t)$ :

$$h_T(t) = F^{-1}[T(\omega)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \delta(t - nT_b). \quad (5)$$

由式(5)可知,  $T(\omega)$  实际上是由无数个横向排列的延迟单元构成的抽头延迟线加上一些可变增益放大器组成。每个延迟单元的延迟时间等于码元宽度  $T_b$ , 每个延迟线抽头的信号经可变增益放大器加权后输出。由于实际通信中通常只是一个码元脉冲对相邻的少数几个码元产生串扰, 因此实际应用的横向滤波器只需要一定数量的抽头, 适当调节抽头加权值就可以有效减小码间串扰。

## 2 EDC 常用实现结构

实际上, 电子均衡在信号处理领域已经是一种成熟的技术, 有很多种实现结构, 比较典型的有前馈均衡器(FFE)、判决反馈均衡器(DFE)、固定延迟树查询(FDTS)和最大似然序列估计法(MLSE)。其中, MLSE 补偿性能最好, 但这种方法一般使用数字式设计, 需要复杂的数字信号处理方法去执行滤波, 且消耗能量大, 不适合一般的 10 Gbit/s 系统应用<sup>[4]</sup>。为了实现自适应补偿, 最常用的是 FFE 和 DFE 组合的实现结构, 如图 2 所示。

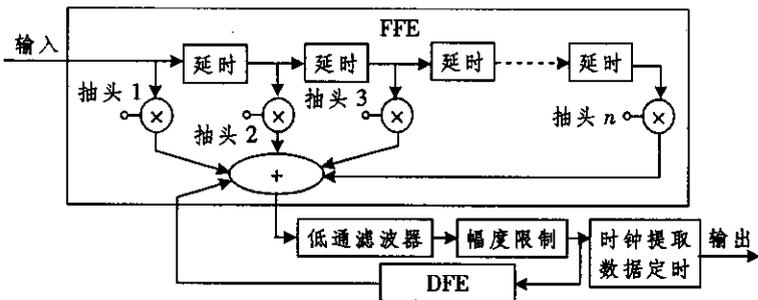


图 2 FFE 和 DFE 组合均衡结构示意图

FFE 一般由一个采用横向滤波器结构的有限冲击响应滤波器(FIR)构成, 输入信号通过分级延时电路, 将每一节的输出加权累加得到滤波器的输出。

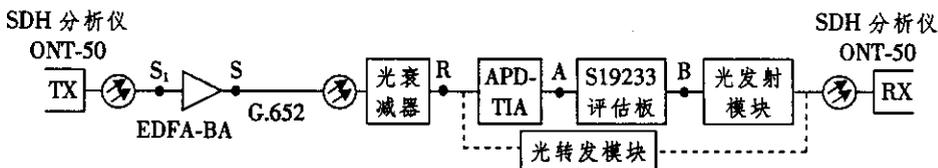


图 4 EDC 评估测试系统

FFE 是一个线性滤波器, 它可以设计成具有和光纤传输相反的传输特性, 从而抵消色散的线性成分。DFE 的主要作用是补偿失真信号的非线性成分。它和判决器一起构成反馈回路, 用均方误差(MSE)准则优化均衡器系数<sup>[3]</sup>, 基于前面探测到的信号动态调节判决阈值电平, 消除码间干扰(ISI)。

横向滤波器基本结构如图 3 所示<sup>[4]</sup>。

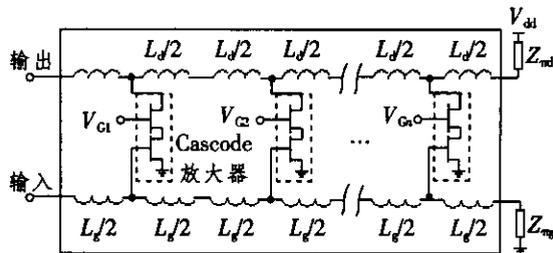


图 3 分布式横向滤波器的基本结构

在输入线路, 电感  $L_g$  和 Cascode 放大器(射地—基地放大器)的输入电容  $C_{in}$  构成特性阻抗为  $Z_{pg} = \sqrt{L_g/C_{in}}$  的传输线; 在漏极输出,  $L_d$  和 Cascode 放大器的输出电容  $C_{out}$  构成特性阻抗为  $Z_{pd} = \sqrt{L_d/C_{out}}$  的传输线。取  $Z_{ng} = Z_{nd} = Z_n$ , 滤波器的增益可表示为

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{1}{2} Z_n e^{-j\frac{1}{2}(\phi_d + \phi_g)} \sum_{n=1}^N g_{nm} e^{-j(n-1)(\phi_d + \phi_g)}, \quad (6)$$

式中,  $\phi_d = \omega \sqrt{L_d C_d} = \omega \tau_d$  和  $\phi_g = \omega \sqrt{L_g C_g} = \omega \tau_g$  是对应于漏极传输线和栅极传输线在两个放大器之间的相位延时,  $\omega$  为信号角频率。  $g_{nm}$  是第  $n$  级放大器的跨导, 通过  $V_{Gn}$  电压控制。  $\tau_d$  和  $\tau_g$  分别为两个放大器之间栅极和漏极传输线的时间延时。

通过控制栅极电压  $V_{Gn}$  来控制  $g_{nm}$ , 从而控制每级延时响应输出的加权值, 最终可控制 FFE 滤波器的输出。

## 3 色散补偿试验研究

测试系统如图 4 所示, 信号速率为 9.953 Gbit/s, EDC 性能测试采用的是

AMCC的S19233评估板。S19233是一款接收部分带有EDC和限幅放大器功能的双向时钟提取和数据定时(CDR)仪器。无EDC的传输性能采用光转发模块替代评估板光/电/光转换部分进行测试。最后通过对测试结果的对比,分析EDC的性能。

由于接收灵敏度受接收信号光信噪比的影响,因此,为了降低光信噪比对接收灵敏度的影响,尽量采用相同的入纤光功率和相同的接收光功率进行测试。

如图4,掺铒光纤放大器(EDFA)的输入点 $S_1$

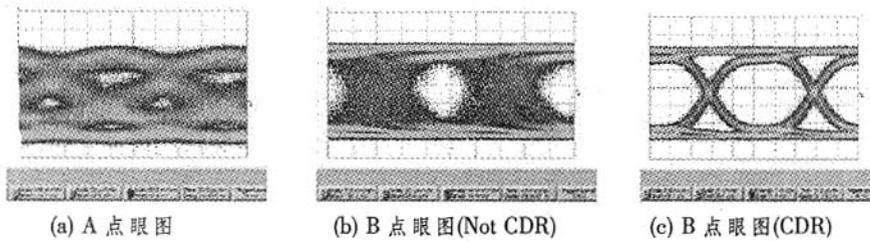


图5 经过147 km光纤传输后A、B点眼图

通过测试,将数据进行外推拟合,得到经过各种距离传输后R点接收误码率和接收光功率的关系曲线,如图6和图7所示。

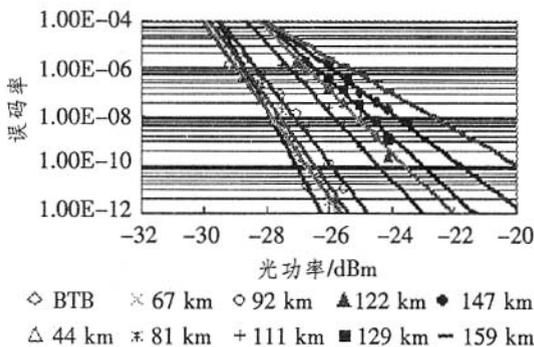


图6 无EDC时R点接收情况

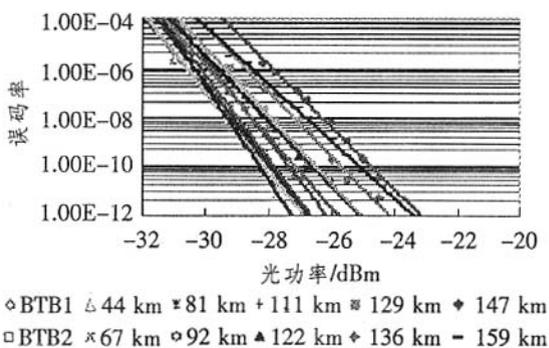


图7 带EDC时R点接收情况

通过上述的曲线拟合,得到各种传输距离产生的通道代价,如表1所示。

的光功率为0.5 dBm,输出点S(入纤)的光功率为+10 dBm,在G.652光纤上的传输距离 $L$ 分别为44、67、81、92、111、122、136、147和159 km(加线放中继)。

当传输距离 $L$ 为147 km时,接收端APD-TIA输出点A和S19233输出点B(限放和CDR)的信号眼图如图5所示。由图5可见,A点的信号眼图抖动和码间干扰非常严重,眼图中心非常窄,经过EDC均衡后,B点眼图得到改善,可以较清晰地分辨出眼图中心,再经CDR电路后可输出清晰眼图。

表1 通道代价和传输距离的关系

传输距离/km	通道代价/dB	
	无EDC	有EDC
0	0	1.44
44	0.56	0.43
67	0.55	0
81	0.59	0.51
92	1.54	0.63
111	3.49	1.15
122	4.41	2.10
129	5.11	1.85
136	—	3.01
147	6.50	4.05
159	8.97	3.93

由表1可见,在无EDC的条件下,当传输距离 $<92$  km时,传输的通道代价 $<2$  dB;当传输距离达到111 km以上时,通道代价增加到3 dB以上,且随传输距离的增加迅速增大。当传输距离达到159 km后,色散代价急剧增加。增加EDC后,传输距离为129 km时,通道代价可以保持在2 dB以内,且随传输距离的增加,通道代价增长比较缓慢;在149 km单跨距传输和159 km双跨距传输的代价也仅为4 dB左右。测试所得159 km的传输代价比149 km小,是因为159 km采用双跨距传输,光信噪比较高。

从测试结果看,S19233在自动补偿范围上有一定限制,在较长距离传输时,需要增加固定补偿量。

在增加预补偿后,最佳接收条件偏移到一定的传输距离,而其背靠背(BTB)灵敏度降低。图7中BTB1为无预补偿时背靠背的测试曲线,BTB2为149 km最佳预补偿时背靠背的测试曲线,此时最佳接收条件是传输67 km左右。

通过对表1所得数据进行曲线拟合而得到的传输通道代价与传输距离的关系如图8所示。可见,增加EDC后长距离传输的通道代价较无EDC时小,且随着传输距离的增加差距增大。当传输距离为129 km时,通道代价相差约3 dB,而当传输距离增加到159 km后,差距增加到5 dB。

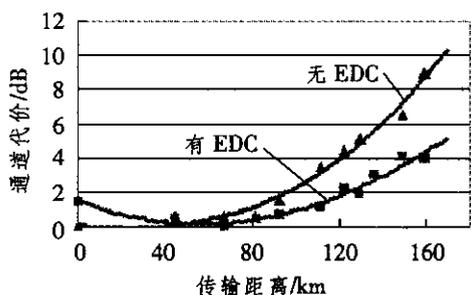


图8 通道代价和传输距离的关系

(上接第34页)

Failure)、手动倒换(Controlled Switchover)、自动倒换(Auto Switchover)、接管(Takeover)和使备用(Standby)。在具体软件程序中,以消息原语的方式收发这些命令并控制各个状态间的切换。下面简要说明一下此流程:

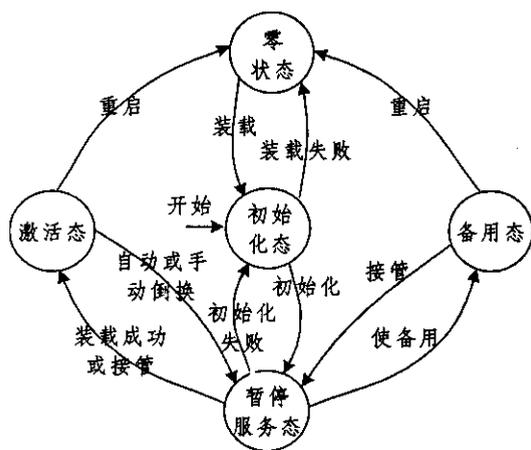


图4 主备用状态机

初始化使得主备用各自接收相应的配置信息,并转入对应的工作状态(激活或者备用)。设备出现异常或人为重启后,转入零状态并重新进行系统装载。系统装载成功后进入初始化态,并转入对应的

## 4 结论

通过对10 Gbit/s光传输系统的测试研究,实现了在G.652光纤上2 dB通道代价的传输距离从92 km提升到129 km。通过对实验数据的分析发现,与无色散补偿的传输性能相比,增加EDC后线路传输性能得到改善,延长了线路的色散受限传输距离。且当传输距离进一步增加时,由色散积累导致的色散代价的增长速度也有所降低。

参考文献:

- [1] OIF EDC White paper-2005, Electronic dispersion compensation for 10 Gbit/s 1 550 nm optical links [S].
- [2] Michael Lawton. 在300米传统多模光纤上传输串行10 GBE信号的标准化进程[J]. 网络电信, 2005, 7(8):34-37.
- [3] 黄文玲. EDC技术:谁是最最后的赢家?[J]. 电子产品世界, 2005, (12):84-92.
- [4] Jamani Y, Freundorfer A P. An Active Transversal Filter MMIC for Very High-Speed Lightwave Systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(6): 836-838.

工作状态(激活或者备用)。如果主用(激活态)发生错误或人为手动倒换时,进入暂停服务态等待处理。此时若错误修复则返回,否则将被备用接管。备用收到接管(Takeover)命令后先进入暂停服务态,待装载配置成功后进入激活态,从而完成主备的倒换。

我们采用C语言编程方式实现了主备状态机的功能。测试结果表明达到预期效果。今后的任务是实用化的研究。

## 3 结束语

软交换网络技术作为目前流行的NGN技术,其网络的可靠性是当前研究的重点和热点。AMG作为软交换的关键部件,其HA的研究与实现具有重要意义。本文从AMG的HA的硬件体系与软件体系两方面进行研究,提出了一种高效并且切实可行的解决方案。

参考文献:

- [1] YD/T 1243.3-2002, 媒体网关设备技术要求——综合接入媒体网关[S].
- [2] TRILLIUM. DFT/HA core [Z]. USA: Trillium company, 2003.