



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101796757 A

(43) 申请公布日 2010. 08. 04

(21) 申请号 200880101892. 7

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

(22) 申请日 2008. 07. 28

代理人 王波波

(30) 优先权数据

11/834, 169 2007. 08. 06 US

(51) Int. Cl.

H04L 1/00 (2006. 01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 02. 04

H04B 10/00 (2006. 01)

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2008/009114 2008. 07. 28

(87) PCT申请的公布数据

W02009/020529 EN 2009. 02. 12

(71) 申请人 朗讯科技公司

地址 美国新泽西州

(72) 发明人 亚里安·J·德·琳达·范·薇格葛登

兰迪·克林顿·贾尔斯

史蒂芬·K·克洛基 刘翔

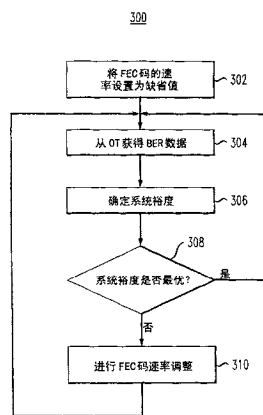
权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 5 页

(54) 发明名称

用于光传输系统的速率自适应前向纠错

(57) 摘要

一种光传输系统 (OTS), 具有多个光应答器 (OT), 所述多个光应答器 (OT) 经由一个或多个光链路而连接, 并适于使用相应的速率自适应前向纠错 (FEC) 码来彼此进行通信。在一个实施例中, OTS 具有速率控制单元 (RCU), 所述速率控制单元 (RCU) 适于将 OT 配置为基于针对两个相应的进行通信的 OT 之间的每个链路的估计的性能裕度 (306) 来动态调整 FEC 码的速率 (310), 以在维持充分但不过分的总体系统裕度的同时使得所述 OTS 的总体容量最优化。



1. 一种光传输系统,包括:  
经由一个或多个光链路而连接的多个光应答器 (OT);以及  
速率控制单元 (RCU),其中:  
所述多个 OT 中的至少第一 OT 和第二 OT 适于使用速率自适应前向纠错 (FEC) 码来彼此进行通信;以及  
所述 RCU 适于:(i) 估计所述第一 OT 与第二 OT 之间的光链路的性能裕度;以及 (ii) 将所述第一 OT 和第二 OT 配置为基于所估计的性能裕度来改变 FEC 码的速率。
2. 根据权利要求 1 所述的发明,其中,所述 RCU 还适于:(i) 确定所述第一 OT 和第二 OT 中的至少一个的误比特率 (BER);以及 (ii) 将所确定的 BER 与目标 BER 进行比较,以估计性能裕度。
3. 根据权利要求 1 所述的发明,其中,所述 RCU 还适于:基于所述第一 OT 与第二 OT 之间的光链路的一个或多个特性来估计性能裕度。
4. 根据权利要求 3 所述的发明,其中,所述一个或多个特性包括以下一个或多个:  
光链路的长度、通过光链路进行信号传输后的光信噪比、通过光链路传输的信号的波长、色散的量、偏振模散的量、光信道串扰、光纤非线性损失、滤光损失以及所述第一 OT 和第二 OT 中的至少一个的使用年数。
5. 根据权利要求 1 所述的发明,其中:  
所述第一 OT 和第二 OT 适于使用至少大约 10Gb/s 的光信号速率来彼此进行通信;以及  
所述第一 OT 与第二 OT 之间的通信的光信号速率在所述光传输系统的寿命期间是恒定的。
6. 根据权利要求 1 所述的发明,其中,所述第一 OT 和第二 OT 分隔至少 100km 的距离。
7. 根据权利要求 1 所述的发明,其中,所述 FEC 码包括低密度奇偶校验码、Reed-Solomon 码、卷积码和速率兼容码中的一个或多个。
8. 根据权利要求 1 所述的发明,其中,所述 RCU 适于:  
将所述第一 OT 与第二 OT 之间的通信的当前 BER 与目标 BER 进行比较,以确定当前性能裕度;  
将所述当前性能裕度与至少第一阈值进行比较;以及  
如果所述当前性能裕度小于所述第一阈值,则减小所述 FEC 码的速率。
9. 根据权利要求 8 所述的发明,其中,所述 RCU 还适于:  
将所述当前性能裕度与大于所述第一阈值的第二阈值进行比较;以及  
如果所述当前性能裕度大于所述第二阈值,则增大所述 FEC 码的速率。
10. 一种操作光传输系统的方法,包括:  
估计经由一个或多个光链路而连接的多个光应答器 (OT) 中的至少第一 OT 和第二 OT 之间的光链路的性能裕度,其中,所述第一 OT 和第二 OT 适于使用速率自适应前向纠错 (FEC) 码来彼此进行通信;以及  
将所述第一 OT 和第二 OT 配置为基于所估计的性能裕度来改变 FEC 码的速率。

## 用于光传输系统的速率自适应前向纠错

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光传输系统 (OTS), 更具体地涉及在 OTS 的寿命期间通过利用速率自适应前向纠错 (FEC) 来改进 OTS 的容量和 / 或成本效率。

### 背景技术

[0002] 在当前光传输系统 (OTS) 中, 波分复用 (WDM) 广泛用于提供充分的数据传输容量。根据同步光网络 (SONET) 标准并基于所预计的业务量需求和光链路状况, 通常将每个 WDM 信道的光信号的数据速率 (这里称为“光信号速率”) 指定为 2.5、10 或 40Gb/s。一旦在系统部署阶段进行设置了, 光信号速率就通常在 OTS 的整个寿命期间保持固定, 这是因为由于硬件和软件的变化而使得无法改变光信号速率或者改变光信号速率的成本极高。

[0003] 为了满足指定的服务质量 (QoS) 要求, 一般需要每个 WDM 信道保证相对较低的输出误比特率 (BER), 典型地为  $10^{-16}$  量级。由于期望在 OTS 的整个寿命期间满足 QoS 要求, 在部署阶段向每个 WDM 信道分配实质初始性能裕度, 以容许由于系统组件 (如光发射机、放大器、接收机、滤波器和复用器 / 解复用器) 的老化以及光链路状况的总体退化而造成的随后的性能裕度损失。通常将性能裕度定义为实际信号质量 (品质因数) 与系统被视为具有刚好可接受的性能时的阈值品质因数之间的差异, 以分贝 (dB) 表示。品质因数 (以 dB 表示) 与 BER 的关系如下:

$$[0004] \quad \text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{10^{Q(\text{dB})/20}}{\sqrt{2}} \right) \quad (1)$$

[0005] 例如, 对于  $10^{-3}$  的 BER, 品质因数是 9.8dB。由于因老化而造成的典型的性能裕度损失是在大约 20 年 (光网络 / 系统运营商指定的典型寿命) 内大约 4dB, 因此当前 OTS 常被配置为在系统的寿命开始 (BOL) 时具有大约 4dB 的额外性能裕度, 以保证在其寿命内可靠地进行操作。

[0006] 此外, 两个光应答器 (OT) 之间的给定传输链路的性能裕度取决于传输链路的情况, 例如, 信号传输后的光信噪比 (OSNR)、色散 (CD) 和偏振模散 (PMD) 特性、WDM 串扰以及滤光损失。信号传输后的 OSNR 进一步取决于光纤中的信号衰减、信号功率和光放大。在给定时刻, 不同 WDM 信道通常具有不同的性能裕度。由于可以根据需要来重新路由给定的 WDM 信道以在两个 OT 之间建立不同传输链路, 并且可以对信号波长进行调谐, 因此 WDM 信道的性能裕度可以随时间显著变化 (例如, 起伏不定)。该变化可以反过来影响 OTS 的总体吞吐量和 / 或需要初始额外性能裕度进一步增大为超过大约 4dB 的老化容许值。

### 发明内容

[0007] 本发明的典型实施例提供了一种光传输系统 (OTS), 具有多个光应答器 (OT), 所述多个光应答器 (OT) 经由一个或多个光链路连接, 并适于使用相应的速率自适应前向纠错 (FEC) 码来彼此进行通信。所述 OTS 具有速率控制单元 (RCU), 所述速率控制单元 (RCU) 适于将 OT 配置为基于针对两个相应的进行通信的 OT 之间的每个链路的估计的性能裕度来

动态调整 FEC 码的速率,以在维持充分但不过分的总系统裕度的同时优化所述 OTS 的总体容量。有利地,与可比较的现有技术 OTS 中相比,本发明的 OTS 中系统资源利用不足的程度得到显著的降低。

[0008] 根据一个实施例,本发明的光传输系统包括:(A) 经由一个或多个光链路而连接的多个光应答器(OT);以及(B) 速率控制单元(RCU)。所述多个 OT 中的至少第一 OT 和第二 OT 适于使用速率自适应前向纠错(FEC)码来彼此进行通信。所述 RCU 适于:(i) 估计所述第一 OT 与第二 OT 之间的光链路的性能裕度;以及(ii) 将所述第一 OT 和第二 OT 配置为基于所估计的性能裕度来改变 FEC 码的速率。

[0009] 根据另一实施例,本发明的操作光传输系统的方法包括以下步骤个:(A) 估计经由一个或多个光链路而连接的多个光应答器(OT)中的至少第一 OT 与第二 OT 之间的光链路的性能裕度,其中,所述第一 OT 和第二 OT 适于使用速率自适应前向纠错(FEC)码来彼此进行通信;以及(B) 将所述第一 OT 和第二 OT 配置为基于所估计的性能裕度来改变 FEC 码的速率。

### 附图说明

[0010] 通过以下的详细说明、所附权利要求以及附图,本发明的其他方面、特征和优点将变得更显而易见,在附图中:

[0011] 图 1 示出了根据本发明一个实施例的光传输系统(OTS)的框图;

[0012] 图 2 示出了根据本发明一个实施例的、可用在图 1 所示的 OTS 的光应答器中的发射机和接收机数据处理器框图;

[0013] 图 3 示出了根据本发明一个实施例的操作图 1 中的 OTS 的方法流程图;以及

[0014] 图 4A-C 分别以图示方式对现有技术 OTS 的典型特性与图 1 所示的 OTS 的实施例进行比较。

### 具体实施方式

[0015] 一般地,与通信信道相关联的噪声可以导致接收机处的误差。前向纠错(FEC)技术,例如采用 RS(Reed-Solomon)和 BCH(Bose-Chaudhuri-Hocquenghem)码的那些 FEC 技术,通过给数据添加冗余来改进光信道的可靠性,这在接收机处用以检测和纠正误差。通常,更多冗余能够实现更可靠的通信,但代价是消耗附加带宽或降低吞吐量。

[0016] FEC 码的特征在于 FEC 码速率  $R_c$ ,其被定义为原始信息比特数  $k$  与所发送的总比特数  $n$  之比,即,  $R_c = k/n$ ,后者包括信息比特和冗余比特。FEC 码速率的特征还在于 FEC 开销速率  $R_0$  的方面, FEC 开销速率  $R_0$  被定义为冗余比特数与 FEC 帧中的原始信息比特数之比,即,  $R_0 = (n-k)/k$ 。FEC 码速率与 FEC 开销速率之间的关系由下式给出:  $R_c = (1+R_0)^{-1}$ 。

[0017] 使用 FEC 的主要优点在于可以显著增大信号信道的性能裕度。例如,具有 7% 开销的典型 RS FEC 码可以将 BER 从纠正前的大约  $6 \times 10^{-5}$  降低至纠正后的小于大约  $10^{-16}$ ,从而有效地将性能裕度增大大约 6.5dB。类似地,具有 7% 开销的低密度奇偶校验(LDPC)FEC 码可以将 BER 从纠正前的大约  $1 \times 10^{-3}$  降低至纠正后的小于大约  $10^{-16}$ ,从而将性能裕度增大大约 8.5dB。可以基于对软解码或其他合适的先进解码技术的使用来进一步提高 FEC 码的性能裕度。FEC 提供的增大的性能裕度常被称为“编码增益”。在

以下公开中描述了典型的 LDPC FEC 码:(1) 美国专利申请公开 No. 2007/0113147 ;(2) J. Hagenauer, "Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC Codes) and Their Applications," IEEE Trans. Commun., vol. 36, no. 4, pp. 389-400, Apr. 1988 ;(3) M. R. Yazdani and A. H. Banihashemi, "On Construction of Rate-Compatible Low-Density Parity-Check Codes," IEEE Commun. Letters, vol. 8, no. 3, pp. 159-161, Mar. 2004 ;以及 (4) N. Chen, Y. Chang, and D. Yang, "Generation of Rate-Compatible LDPC Codes Based on Linear Transformation," Communications and Electronics, ICCE--First International Conference, Oct. 2006, pp. 311-314, 所有这些公开的教导通过引用合并于此。

[0018] 在光通信中, FEC 用在例如:(i) 长距离 OTS, 以减少 3R(重新定时、重新整形、重传)再生器的数目;以及(ii) 波分复用(WDM)系统, 以增大各个 WDM 信道的数据速率。例如, 在美国专利 No. 6, 829, 741 中公开了 FEC 码在同步光网络(SONET)系统和同步数字体系(SDH)系统中的使用, 该美国专利的教导通过引用合并于此。例如, 在 G. Kramer, A. Ashikhmin, A. J. van Wijngaarden, and X. Wei, "Spectral efficiency of coded phase-shift keying for fiber-optic communication," J. Lightwave Technol., 2003, vol. 21, pp. 2438-2445 中公开了 RS 和 LDPC FEC 码在传输开关键控(OOK)和差分移相键控(DPSK)光信号中的使用, 该文章的教导通过引用合并于此。

[0019] 假设被指定为对于光传输系统(OTS)来说可接受的、FEC 解码后的 BER(以下称为“纠正后的 BER”)是  $10^{-16}$ , 这意味着对于每  $10^{16}$  个解码信息比特来说平均一个比特误差被视为可容忍的。这还意味着误差事件的概率甚至比这更低, 这是由于如果超出了码的纠错能力, 则 FEC 码的输出通常产生多个误差。在部署时, 采用 RS FEC 码的现有技术 OTS 可能被配置为具有至少大约  $10^{-9}$  的纠正前 BER, 以提供在  $6 \times 10^{-5}$  的相应 BER 阈值之上大约 4dB 的额外性能裕度, 从而容许由于系统老化而造成的性能裕度损失。然而, OTS 中 FEC 的现有技术方案的一个问题在于: 在寿命开始(BOL)时, 性能裕度通常过高。具有过高的性能裕度意味着在实质的一段时间内, 系统在总体吞吐量或成本效率方面的一些潜力仍未被利用, 这通常是网络运营商不期望的。

[0020] 通过提供以下 OTS 来解决现有技术中的问题: 其中, 在 OTS 的寿命内, 可以按需要来调整 FEC 编码增益, 以维持对于 OTS 的当前状况来说充足但不过分的性能裕度。例如, 在 OTS 的 BOL 时, 可以使用相对较高的 FEC 码速率(相对较小的 FEC 开销速率)来提供刚好够 OTS 具有足够性能裕度的编码增益。随着 OTS 的老化, 可以降低 FEC 码速率(可以提高 FEC 开销速率)以提供更多编码增益并补偿性能裕度损失。此外, 可以在 OTS 的重新配置期间进行 FEC 速率调整, 以容许传输链路状况的改变。该方案的一个重要属性在于: 给定 WDM 信道的光信号速率保持固定(例如, 处于 10 或 40Gb/s), 使得不需要硬件改变(例如, 时钟和数据恢复(CDR)电路的改变), 并且诸如色散、偏振模散、光纤非线性以及滤光之类的传输障碍的效果保持不受码速率调整的影响。利用该方案, OTS 可以有利地在其整个寿命期间维持充分但不过分的性能裕度以及可能的网络重新配置。尽管在 FEC 码速率的每次向上调整之后有效的系统数据传输容量都可能稍微减小, 但与可比较的现有技术 OTS 中相比, 在本发明的 OTS 中, 总体系统吞吐量(或容量)以及系统资源利用的程度明显更高。

[0021] 图 1 示出了根据本发明一个实施例的 OTS 100 的框图。OTS 100 经由光链路(例如, 光纤)102a 和 102c 连接至外部光传输网络, 并被示意性地示为具有经由光链路(例如

光纤) 102b 而彼此连接的光分插复用器 (OADM) 110a-b。每个 OADM 110 可以插入和 / 或分光源自和 / 或送往相应光应答器 (OT) 120 的光信号。例如, OT 120a、c 被配置为从由 OTS 100 传输的 WDM 复用中接收分别由 OADM 110a-b 分出的光信号。类似地, OT 120b、d 被配置为产生光信号, 以分别通过 OADM 110a-b 添加至 WDM 复用。

[0022] OT 120a-d 中的每一个适于使用速率自适应 FEC (RAF)。更具体地, 对于至少一个 WDM 信道, OT 120 利用其速率  $R_c$  可按需要调整的 FEC 码, 而光信号速率保持为固定 (不变)。在一个实施例中, OT 120 被配置为使用速率兼容 RS FEC 码, 该码的速率  $R_c$  可以被设置为以下值中的任一个:  $15/16$ 、 $7/8$ 、 $3/4$  和  $1/2$ , 其分别转换为大约 6.2、7.6、8.9 和 10.2 dB 的总编码增益。在另一实施例中, OT 120 被配置为使用 LDPC FEC 码, 该码的速率  $R_c$  可从以下值中选择:  $15/16$ 、 $7/8$ 、 $3/4$ 、 $1/2$  和  $3/8$ , 以分别获得大约 8、9、10.5、12 和 13.5 dB 的总编码增益。

[0023] OT 120a-d 中的每一个使用的 FEC 码速率是由速率控制单元 (RCU) 130 控制的。在一个实施例中, 通过运行 FEC 码以及检测和纠正误差, OT 120 能够向 RCU 130 提供 BER 信息。通过从各个 OT 120 收集和分析 BER 信息, RCU 130 能够确定每个光链路和 / 或 WDM 信道的当前性能裕度。如果 RCU 130 确定当前性能裕度是充分的, 则 RCU 不采取任何动作。然而, 如果 RCU 130 确定当前性能裕度已降至预定阈值以下, 则 RCU 将 OT 120 中的适当 OT 配置为改变其相应的 FEC 码速率。优选地, RCU 130 适于选择为两个进行通信的 OT 之间的传输链路提供可接受性能裕度的 FEC 码的最高可能速率。例如, 当期望所估计的性能不足小于 1 dB 时, RCU 130 可以将运行具有速率  $R_c = 15/16$  的 LDPC FEC 码的 OT 120 配置为将其  $R_c$  值改变为  $7/8$ 。所产生的总编码增益改变转换为大约 1 dB 的性能裕度增加, 这可能足以克服这种不足。

[0024] 在另一实施例中, RCU 130 可以基于针对两个进行通信的 OT 之间的 WDM 信道中的每一个而预测的性能裕度来执行 FEC 码速率调整。所预测的性能裕度可以从两个进行通信的 OT 之间的光传输链路的状况推导。这些状况由多个参数描述, 这些参数例如是链路长度、通过链路传输后的光信噪比 (OSNR)、两个进行通信的 OT 正在发送和接收的光信号的波长、色散 (CD) 和偏振模散 (PMD) 特性、WDM 串扰、光纤非线性损失、滤光损失以及每个 OT 的使用年数。然而, 应注意, 不同 WDM 信道不需要具有相等的 FEC 码速率。

[0025] 在一个实施例中, RCU 130 还适于将两个进行通信的 OT 配置为将原始信息数据分割为与同步光网络 (SONET) 标准兼容的数据支流。更具体地, 分割出的数据支流可以具有大约 40 Gb/s (OC768)、10 Gb/s (OC192)、2.5 Gb/s (OC48)、622 Mb/s (OC12) 和 155 Mb/s (OC3) 的信息速率。表 1 示出了将 42.7 Gb/s 和 10.7 Gb/s 光信号分割为不同 FEC 速率下的与 SONET 兼容的数据支流的示例性分割。注意, “哑” 数据可能必须被添加至信息数据和冗余 FEC 数据, 以填充由于 SONET 光信号具有固定总体数据速率而导致仍保持可用的时隙。

[0026] 表 1. 将光信号数据分割为与 SONET 兼容的数据支流的示例性分割

[0027]

	$R_c = 15/16$	$R_c = 7/8$	$R_c = 3/4$	$R_c = 5/8$	$R_c = 1/2$	$R_c = 3/8$	$R_c = 1/4$
42.7-Gb/s	1× 0C768	3× 0C192 2×0C48 3×0C12	3× 0C192 3×0C12	2× 0C192 2×0C48 2×0C12	2× 0C192 2×0C12	1× 0C192 2×0C48 1×0C12	1× 0C192 1×0C12
10.7-Gb/s	1× 0C192	3×0C48 2×0C12 3×0C3	3×0C48 3×0C3	2×0C48 2×0C12 2×0C3	2×0C48 2×0C3	1×0C48 2×0C12 1×0C3	1×0C48 1×0C3

[0028] 在另一实施例中, RCU 130 还适于将两个进行通信的 OT 配置为将原始信息数据分割为与以太网标准兼容的数据支流。例如 10Gb/s、1Gb/s、100Mb/s 和 10Mb/s 的数据速率与以太网标准 (参见 IEEE 标准 802.3) 兼容。

[0029] 与其中一般与自动重传请求 (ARQ) 相结合地使用速率兼容码以及根据需要来发送冗余比特的无线网络不同, OTS 100 优选地被配置为始终将冗余比特与信息比特一起发送。这种优选的一个重要的原因在于: 在光传输网络中, 发射机与相应接收机之间的距离可以非常大, 例如, 比 100km 长, 常常是 1,000km 量级, 甚至更长。因此, 与冗余比特的 ARQ 和重传相关联的时延可以不利地较大。为了避免这种时延, OT 120 中的任一个都不被配置为使用 ARQ。取而代之的是, RCU130 连续地与 OT 120 进行通信, 以能够基于 BER 信息、光链路状况和业务量需求来在需要时调整 FEC 码速率。此外, 如上所述, 在两个进行通信的 OT 之间的传输链路的重新配置期间, 可能需要 FEC 速率调整, 并且可以基于所预测的链路状况和业务量需求来“预先确定”所期望的速率。在这种情况下, RCU 130 可以被配置为在不依赖于来自 OT 的当前 BER 信息的情况下调整 FEC 码速率。

[0030] 图 2 示出了根据本发明一个实施例的可用在例如 OT 120 中的接收机数据处理器 (RDP) 220a 和发射机数据处理器 (TDP) 220b 的框图。RDP 220a 具有光检测器 (图 2 未明确示出), 该光检测器适于将光信号 (例如, 经由通信链路接收) 转换为比特流 221 的相应电信号。比特流 221 以由在发射机处采用的 FEC 码所定义的比例来承载信息比特和冗余比特。例如, 对于速率为  $R_c = p/(p+q)$  的 FEC 码, 其中  $p$  和  $q$  是正整数, 比特流 221 包含每  $p$  个信息比特有  $q$  个冗余比特。由比特流 221 提供的比特是在缓存器 222 中缓存的, 并在去交织器 (D-INT) 224 中去交织, 以产生多个比特流 225-1 至 225-N, 其中每个比特流的比特率比比特流 221 低  $N$  倍。FEC 解码器 226 接收比特流 225, 并应用与在发射机处使用的 FEC 编码算法相匹配的 FEC 解码算法。解码算法的输出是承载了恢复后的信息比特的多个比特流 227-1 至 227-k。根据特定 FEC 编码算法,  $N$  可以与  $k$  不同或相同。比特流 227 是在交织器 (INT) 228 中适当交织的, 以产生与由远程客户端应用至发射机的原始信息比特流相对应的比特流 229。比特流 229 存储于缓存器 230, 例如以进一步分发至本地客户端。注意, 可以应用根据在发射机中使用的分割规则将信息比特流 229 分割为与 SONET 兼容的数据支流的进一步分割。这些分割规则取决于 FEC 速率, 并且表 1 示出了示例性分割。

[0031] TDP 220b 具有缓存器 202, 存储要发送至具有 RDP (如 RDP 220a) 的远程接收机的信息比特。缓存器 202 经由比特流 203 将所存储的信息比特应用至去交织器 (D-INT) 204, 在去交织器 (D-INT) 204 中, 该比特流被适当地去交织以产生多个比特流 205-1 至 205-k。

FEC 编码器 206 接收比特流 205, 并将 FEC 编码算法应用至比特流 205, 以产生承载了原始信息比特和冗余比特的多个比特流 207-1 至 207-N。例如, FEC 编码器 206 可以使用速率为  $R_c = p/(p+q)$  的 FEC 码来产生每  $p$  个信息比特有  $q$  个冗余比特 (见框 206a)。比特流 207 是在交织器 (INT) 208 中交织的, 以产生与比特流 207 相对应的交织后的比特流 209。在输出缓存器 210 中对比特流 209 的 FEC 编码后比特进行缓存, 并经由输出比特流 211 将比特流 209 的 FEC 编码后比特应用至光调制器 (图 2 未明确示出), 该光调制器产生光信号 (例如表示 SONET 帧) 以发送至远程接收机。

[0032] RCU 130 控制由编码器 206 和解码器 226 使用的 FEC 码速率。在数据处理器 220a-b 被配置为彼此进行通信 (例如经由光链路 102b) 的情况下, RCU 130 将编码器 206 和解码器 226 配置为分别运行具有相同 FEC 码速率的互补的 FEC 编码和解码算法。当需要执行速率调整时, RCU 130 将两个 OT 220a-b 都配置为调整其 FEC 码速率, 使得保持 FEC 编码和解码算法的互补特性。

[0033] 在一个实施例中, 编码器 206 和解码器 226 使用速率兼容码, 在速率兼容码中, 将 FEC 速率较高的码中的码字比特嵌入 FEC 速率较低的码中。该方案的一个优点在于: 可以使用编码器和解码器的常见硬件实现来对整个码族进行编码和解码。可以例如通过对冗余比特进行打孔、扩展冗余比特或者通过对 FEC 奇偶校验矩阵进行线性变换, 来实现速率兼容码。典型的速率兼容码在以下公开中描述: (1) 美国专利 No. 6, 892, 342; 以及 (2) 美国专利申请公开 No. 2007/0022362, 这两个公开的教导通过引用合并于此; 以及 (3) 以上记载的 Hagenauer、Yazdani 等人以及 Chen 等人的公开。

[0034] 图 3 示出了根据本发明一个实施例的操作 OTS 100 的方法 300 的流程图。在方法 300 的步骤 302, RCU 130 (仍然参见图 1-2) 将各个 OT 120 配置为使用相应的初始 (缺省) FEC 码速率。这些初始速率可以基于例如 OTS 的拓扑、设计和光链路预算。可以在例如 OTS 100 的初始部署时执行步骤 302。在步骤 304, RCU 130 与 OT 120 进行通信, 以获得每个光链路 102 和 / 或 WDM 信道的 BER 数据。在步骤 306, RCU 130 处理在步骤 304 收集的 BER 数据以确定性能裕度。这种确定可以包括: 将该 BER 与目标 BER 值进行比较。

[0035] 在步骤 308, RCU 130 确定性能裕度是否是最优的。在一个实现中, 术语“最优的”是指所确定的性能裕度既不过高也不太低。在步骤 308 的一个实现中, 将所确定的性能裕度与两个阈值 (例如, 上阈值和下阈值) 进行比较, 以确定当前性能裕度是否落在这两个阈值所定义的范围之内。上阈值和下阈值通常是基于总体系统性能考虑来设置的, 该总体系统性能考虑可以包括但不限于: 系统容量、业务量需求和 / 或编码 / 解码时延。例如, 在一个系统配置中, 下阈值可以被设置在大约 0.2dB, 上阈值可以被设置在大约 1.6dB。如果在步骤 308 确定性能裕度处于期望范围之内, 则 RCU 130 不采取任何动作, 并且方法 300 的处理返回至步骤 304。然而, 如果确定性能裕度处于期望范围之外, 则方法 300 的处理前进至步骤 310。

[0036] 在步骤 310, RCU 130 将各个 OT 120 配置为进行适当的 FEC 码速率调整。FEC 码速率调整可以包括向上速率调整和 / 或向下速率调整。更具体地, 如果确定性能裕度过高, 则可以执行向上速率调整。当缺省 FEC 码速率被证明为太过保守时, 向上速率调整很可能紧跟在初始部署阶段之后。此外, 当预定网络重新配置被预测为使将两个进行通信的 OT 相连接的 WDM 信道的性能裕度增大时, RCU 130 可以具有必需的知识, 并经由适当的向上速率



调整来指定新的 FEC 速率,以得到最优性能裕度。在一个实施例中,步骤 310 选择为进行通信的 OT 之间的传输链路提供可接受性能裕度的 FEC 码的最高可能速率。

[0037] 如果确定性能裕度太低,则执行向下速率调整。如上所示,由于系统组件的老化以及光链路状况的总体退化,可以在 OTS 100 的寿命期间执行多种向下速率调整。此外,当预定网络重新配置被预测为使 WDM 信道的性能裕度减小时,RCU 130 可以具有必需的知识,并经由适当的向下速率调整来指定新的 FEC 速率,以得到最优性能裕度。在步骤 310 之后,方法 300 的处理返回至步骤 304。注意,在步骤 300 中,RCU 130 可以并行地动态优化多个 WDM 信道的 FEC 速率。

[0038] 图 4A-C 分别以图示方式对现有技术 OTS 的典型特性与 OTS 100(以下称为 OTS 400) 的实施例进行比较。更具体地,在图 4A-C 中的每一个图中,现有技术 OTS 和 OTS 400 各自的特性分别由虚线和实线示出。现有技术 OTS 具有多个 2.5Gb/s OT,运行具有固定速率 ( $R_c$ ) 239/255 的 RS FEC 码。OTS 400 具有多个 10Gb/s OT,运行速率自适应 LDPC FEC 码。现有技术系统中的 2.5Gb/s 光信号速率低于 OTS 400 中的 10Gb/s 光信号速率,这是由于现有技术 OTS 不能使用 10Gb/s OT 来达到大约 4dB 的所需最初性能裕度。

[0039] 图 4A 针对这两个 OTS 示出了性能裕度作为时间(所使用的年数)的函数。注意,图 4A 中(图 4B-C 中也是如此)的时间分辨率是一年。在现有技术 OTS 中,性能裕度随时间从 BOL 时的大约 4dB 线性减小至寿命结束(EOL)时的大约 0dB,其中 EOL 与 BOL 相距 20 年。在 OTS 400 中,FEC 码速率被设置为 BOL 时的  $R_c = 7/8$ ,这提供了大约 0.8dB 的性能裕度。性能裕度随时间线性减小,直到在四分之一一年期间的某个时间性能裕度跨过被指定为大约 0.2dB 的下阈值为止。在该点处,根据方法 300(见图 3)将 FEC 码速率向下调整至  $R_c = 3/4$ 。这种速率调整将性能裕度增大至大约 1.6dB。此后,性能裕度线性减小,直到在十二分之一一年期间的某个时间性能裕度再次跨下阈值为止。在该点处,根据方法 300 进一步将 FEC 码速率向下调整至  $R_c = 1/2$ 。后一次速率调整将性能裕度增大至大约 1.4dB。此后,性能裕度线性减小,直到在十九分之一一年期间的某个时间性能裕度再一次跨下阈值为止。在该点处,根据方法 300 进一步将 FEC 码速率向下调整至  $R_c = 3/8$ 。这种速率调整将性能裕度带回到大约 1.6dB。此后,性能裕度线性减小,直到在 EOL 时停止使用 OTS 为止。

[0040] 图 4B 针对这两个 OTS 示出了归一化系统容量作为时间的函数。如这里所使用的,术语“系统容量”是指用于传输信息比特的系统容量或吞吐量。在现有技术 OTS 中,系统容量从 BOL 至 EOL 保持固定。在 OTS 400 中,在第一次、第二次和第三次速率调整之前以及在第三次速率调整之后,系统容量分别是现有技术系统的系统容量的大约 3.7、3.2、2.1 和 1.6 倍。有利地,OTS 400 提供了比现有技术 OTS 平均多出大约 2.5 倍的系统容量。

[0041] 图 4C 针对这两个 OTS 示出了每信息比特的归一化成本作为时间的函数。对于图 4C,假定在这两个 OTS 中光链路成本是相同的,都构成现有技术 OTS 总体成本的 75%。2.5Gb/s OT 的成本构成现有技术 OTS 成本的其余 25%,并且假定 OTS 400 中使用的 10Gb/s OT 比 2.5Gb/s OT 贵三倍。有利地,OTS 400 中每比特的成本比现有技术 OTS 中每比特的成本平均小约 40%。

[0042] 尽管参照示意性实施例描述了本发明,但并不意欲在限制的意义上理解该描述。尽管关于 RS 和 LDPC FEC 码描述了本发明的实施例,但本发明不限于此。本领域技术人员

应当理解,也可以使用其他合适的 FEC 码,例如链接码、卷积码、具有硬判决解码的码以及具有软判决解码的码。对于本发明所属领域的技术人员而言,显而易见的是,所描述的实施例的各种修改以及本发明的其他实施例被认为落在权利要求限定的本发明原理和范围内。

[0043] 除非另有明确记载,每个数值和范围应被解释为近似的,如同词语“大约”或“近似地”置于该值或范围之前一样。

[0044] 还应当理解,在不脱离权利要求限定的本发明范围的前提下,本领域技术人员可以对为了解释本发明特性而已描述或示出的部分进行细节、材料和布置上的各种改变。

[0045] 应当理解,这里提出的示例性方法的步骤不必以所描述的顺序执行,这种方法的步骤的顺序应被理解为仅是示例性的。同样,在这种方法中可以包括附加步骤,并且在与本发明的各个实施例相一致的方法中可以省略或结合特定步骤。

[0046] 这里对“一个实施例”或“实施例”的引用表示可以在本发明的至少一个实施例中包括结合实施例描述的具体特征、结构或特性。在说明书中各个位置出现的短语“在一个实施例中”既不必全部指代相同的实施例,也不是必须互相排除其他实施例的分离或备选的实施例。这些同样适用于术语“实现”。

[0047] 此外,为了该描述的目的,术语“耦合”、“连接”是指本领域已知的或后续开发的任何方式,在该方式下,允许在两个或更多个元件之间转移能量,并且可以想到插入一个或多个附加元件(尽管不需要)。相反,术语“直接耦合”、“直接连接”等含有不存在这种附加元件的意思。

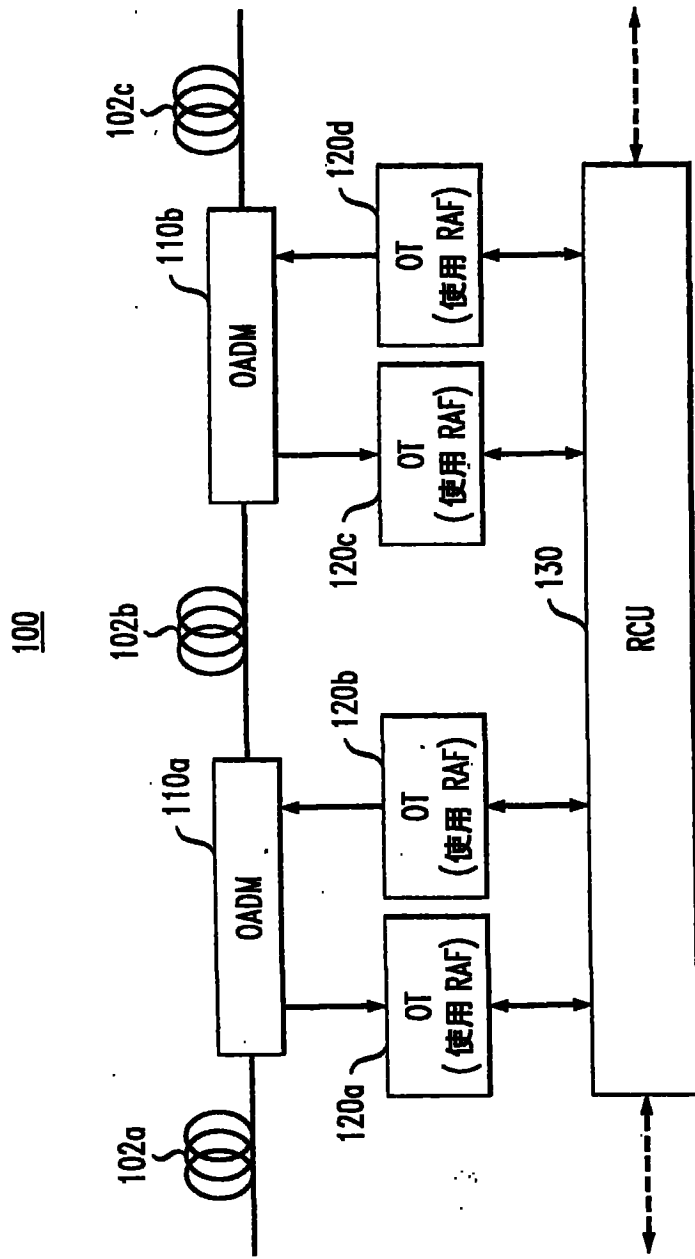


图 1

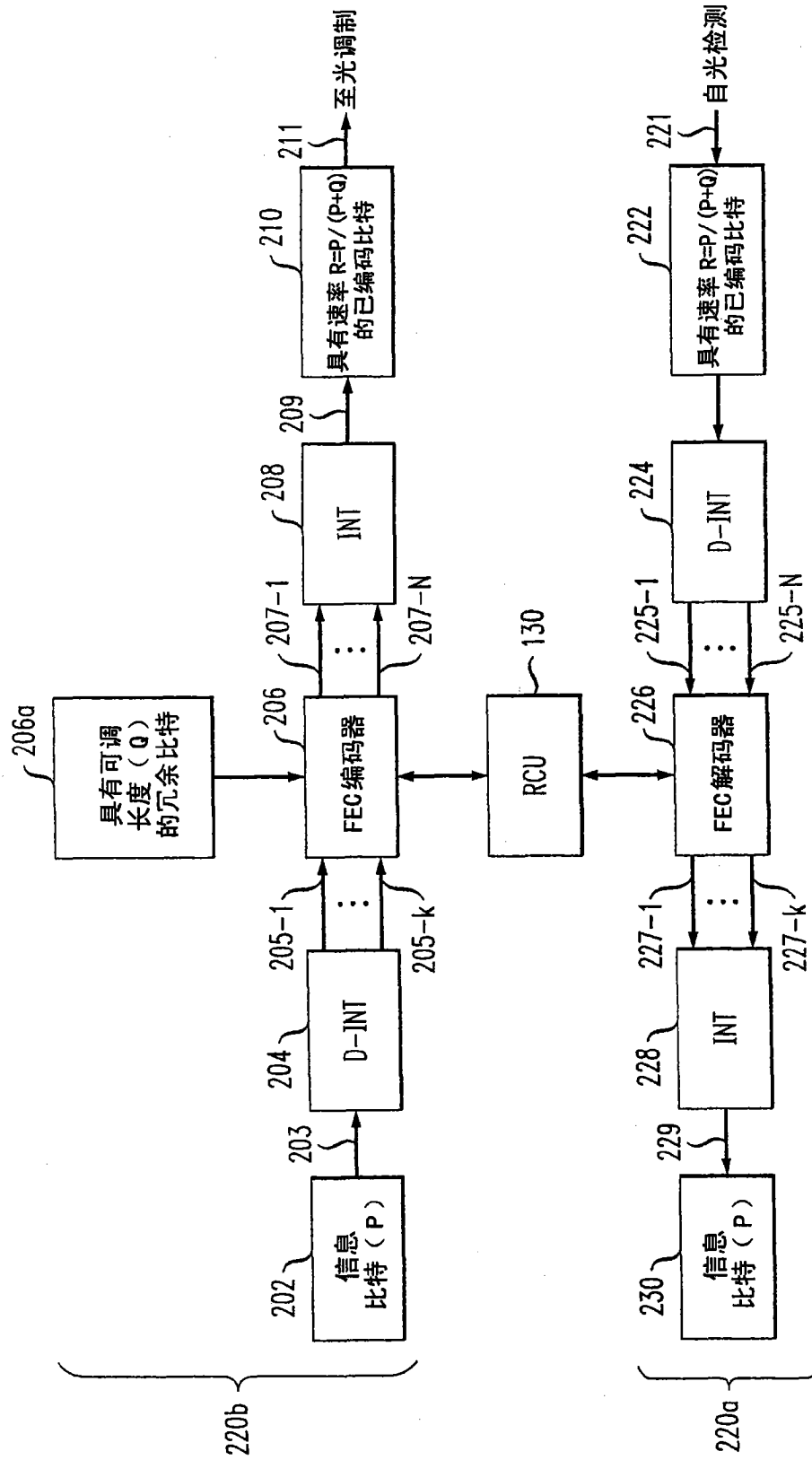


图 2

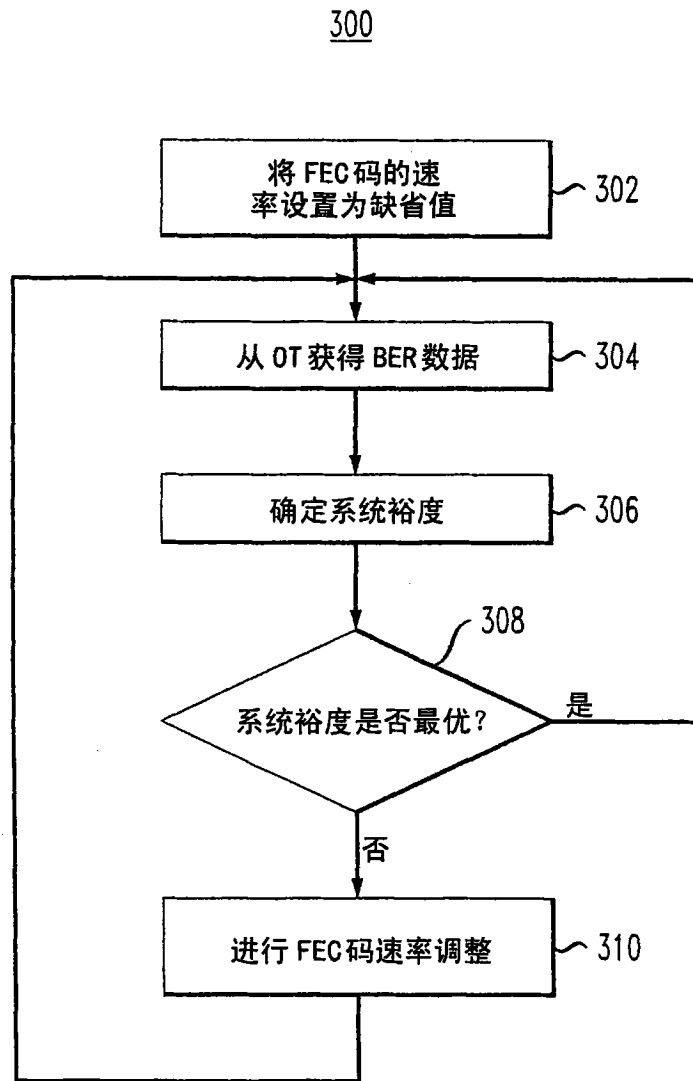


图 3

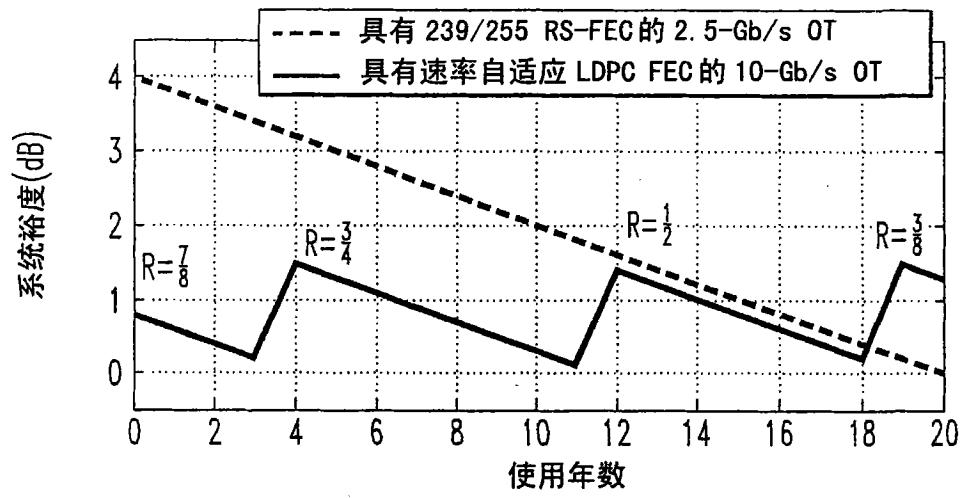


图 4A

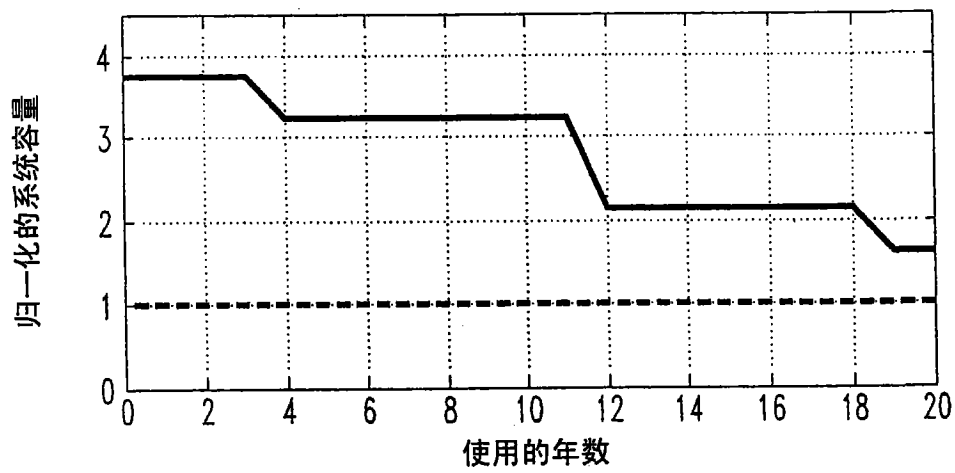


图 4B

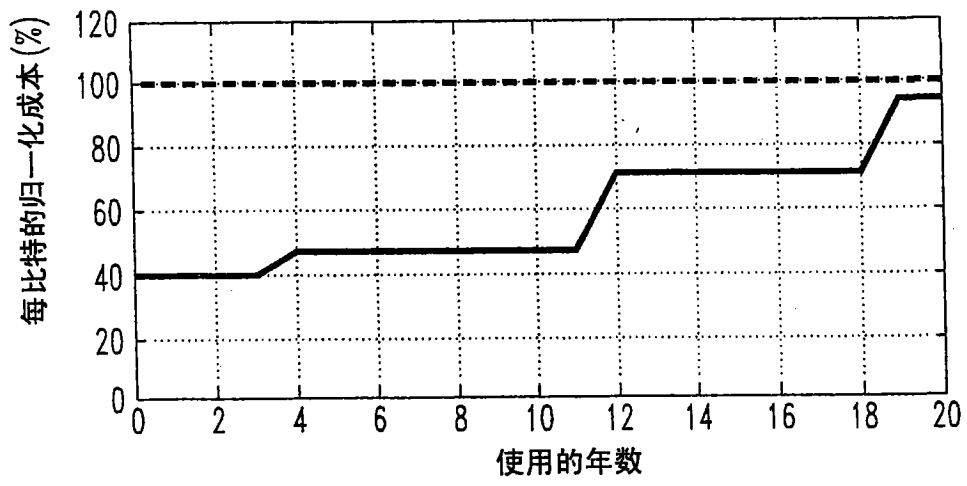


图 4C