



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101965698 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 05

(21) 申请号 200980103344. 2

26-63 段, 附图 1A、3.

(22) 申请日 2009. 03. 27

US 5999289 A, 1999. 12. 07, 全文.

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2010. 07. 28

审查员 肖瑜

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/CN2009/071057 2009. 03. 27

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02010/108334 EN 2010. 09. 30

(73) 专利权人 富士通株式会社  
地址 日本神奈川县

(72) 发明人 张慧剑 陶振宁 小田祥一郎

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 孙海龙

(51) Int. Cl.  
H04B 10/69 (2013. 01)

(56) 对比文件  
US 2008/0152361 A1, 2008. 06. 26, 说明书

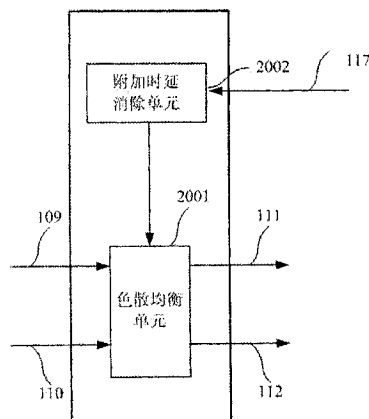
权利要求书3页 说明书10页 附图8页

(54) 发明名称

色散均衡装置和方法以及数字相干光接收机

(57) 摘要

本发明涉及色散均衡装置和方法以及数字相干光接收机。该色散均衡装置包括:色散均衡单元,用于对输入信号的色散进行补偿;附加时延消除单元,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元的色散均衡时延。



1. 一种色散均衡装置,该色散均衡装置包括:

色散均衡单元,用于对输入信号的色散进行补偿;以及

附加时延消除单元,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延;其中:

所述色散均衡单元包括第一时域均衡器和第二时域均衡器;

所述附加时延消除单元包括时域均衡器系数存储单元和时域均衡器系数修正单元,所述时域均衡器系数存储单元存储假定所述频差为0时所述第一时域均衡器和第二时域均衡器使用的时域均衡器系数,所述时域均衡器系数修正单元根据所述频差对所述时域均衡器系数进行修正,并将修正后的时域均衡器系数传送给所述第一时域均衡器和所述第二时域均衡器。

2. 一种色散均衡装置,该色散均衡装置包括:

色散均衡单元,用于对输入信号的色散进行补偿;以及

附加时延消除单元,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延;

其中:

所述色散均衡单元包括第一频域均衡器和第二频域均衡器;

所述附加时延消除单元包括频域均衡器系数存储单元和频域均衡器系数修正单元,所述频域均衡器系数存储单元存储假定所述频差为0时所述第一频域均衡器和所述第二频域均衡器使用的频域均衡器系数,所述频域均衡器系数修正单元根据所述频差对所述频域均衡器系数进行修正,并将修正后的频域均衡器系数传送给所述第一频域均衡器和所述第二频域均衡器。

3. 一种色散均衡装置,该色散均衡装置包括:

色散均衡单元,用于对输入信号的色散进行补偿;以及

附加时延消除单元,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延;

其中:

所述色散均衡单元包括第一时域均衡器和第二时域均衡器;

所述附加时延消除单元包括时域均衡器系数计算单元,所述时域均衡器系数计算单元根据所述频差确定所述第一时域均衡器和所述第二时域均衡器应使用的时域均衡器系数。

4. 一种色散均衡装置,该色散均衡装置包括:

色散均衡单元,用于对输入信号的色散进行补偿;以及

附加时延消除单元,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延;

其中:

所述色散均衡单元包括第一频域均衡器和第二频域均衡器;

所述附加时延消除单元包括频域均衡器系数计算单元,所述频域均衡器系数计算单元根据所述频差确定所述第一频域均衡器和所述第二频域均衡器应使用的频域均衡器系数。

5. 根据权利要求4所述的色散均衡装置,其特征在于,所述频域均衡器系数计算单元包括:

光纤传递函数确定单元,用于确定光纤传递函数;

光纤传递函数逆函数确定单元,用于计算所述光纤传递函数确定单元所确定的光纤传递函数的逆函数;

加窗单元,用于对所述光纤传递函数逆函数确定单元所确定出的所述逆函数进行加窗;以及

频域均衡器系数确定单元,用于根据经加窗的所述逆函数确定所述频域均衡器系数。

6. 一种色散均衡装置,该色散均衡装置包括:

色散均衡单元,用于对输入信号的色散进行补偿;以及

附加时延消除单元,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延;

其中:

所述色散均衡单元包括第一时域均衡器和第二时域均衡器;

所述附加时延消除单元包括附加时延计算器以及第一寄存器和第二寄存器,所述第一时域均衡器与所述第一寄存器相连,所述第二时域均衡器与所述第二寄存器相连,所述附加时延计算器用于根据所述频差计算所述色散均衡单元引入的附加时延,并指示第一寄存器和所述第二寄存器减少所述附加时延。

7. 根据权利要求6所述的色散均衡装置,其特征在于,所述附加时延计算器根据公式

$$\frac{2\pi V_L D \Delta \omega}{\omega_0^2}$$
 计算附加时延,其中, $\omega_0$ 为发射机光载频, $\Delta \omega$ 为信号与本振之间的频差, $V_L$ 为

真空光速,D是传输链路总的色度色散值。

8. 一种色散均衡方法,该色散均衡方法包括:

色散均衡步骤,用于由第一时域均衡器和第二时域均衡器对输入信号的色散进行补偿;

附加时延消除步骤,用于通过根据所述输入信号的频差修正假定所述频差为0时所述第一时域均衡器和所述第二时域均衡器使用的时域均衡器系数并通过将修正后的时域均衡器系数传送给所述第一时域均衡器和所述第二时域均衡器,来根据所述频差消除色散均衡步骤产生的色散均衡时延。

9. 一种色散均衡方法,该色散均衡方法包括:

色散均衡步骤,用于由第一频域均衡器和第二频域均衡器对输入信号的色散进行补偿;

附加时延消除步骤,用于通过根据所述输入信号的频差修正假定所述频差为0时所述第一频域均衡器和所述第二频域均衡器使用的频域均衡器系数并通过将修正后的频域均衡器系数传送给所述第一频域均衡器和所述第二频域均衡器,来根据所述频差消除色散均衡步骤产生的色散均衡时延。

10. 一种色散均衡方法,该色散均衡方法包括:

色散均衡步骤,用于由第一时域均衡器和第二时域均衡器对输入信号的色散进行补偿;

附加时延消除步骤,用于通过根据所述输入信号的频差确定所述第一时域均衡器和所述第二时域均衡器应使用的时域均衡器系数,来根据所述频差消除色散均衡步骤产生的色

散均衡时延。

11. 一种色散均衡方法,该色散均衡方法包括:

色散均衡步骤,用于由第一频域均衡器和第二频域均衡器对输入信号的色散进行补偿;

附加时延消除步骤,用于通过根据所述输入信号的频差确定所述第一频域均衡器和所述第二频域均衡器应使用的频域均衡器系数,来根据所述频差消除色散均衡步骤产生的色散均衡时延。

12. 一种数字相干光接收机,所述数字相干光接收机包括频差监测器,其特征在于,所述数字相干光接收机包括根据权利要求 1 到 7 任一项所述的色散均衡装置,所述附加时延消除单元根据来自所述频差监测器的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延。

## 色散均衡装置和方法以及数字相干光接收机

### 技术领域

[0001] 本发明一般涉及光通信,更具体地,涉及色散均衡装置和方法以及数字相干光接收机。

### 背景技术

[0002] 数字相干光接收机技术具有灵敏度高、电均衡能力强和频谱效率高等优点,因此被认为是高速率光通信系统的关键技术。

[0003] 在相干光接收机中,信号光与本地激光器产生的本振光进行混频,信号光的幅度和相位信息被搬移到基带电信号上。对该基带电信号进行采样量化和数字信号处理最终可恢复出原始发送信号。由于相干检测保留了光场所有的信息,因此可以采用电均衡技术近乎完全地补偿光信号的线性损伤(如色度色散和偏振模色散等)。数字相干光接收机所能补偿的损伤量(如色度色散量)仅取决于数字电路的规模(如有限长冲击响应(FIR)滤波器的抽头数)。S. J. Savory 等人在其离线实验中验证了无在线色散补偿的相干光通信系统的可行性,他们用具有 512 个抽头的 FIR 滤波器对在标准单模光纤链路中传输 6400km 后的 42.8Gb/s 偏振复用 NRZ-QPSK 信号进行了色散补偿,补偿后的信号的光信噪比(OSNR)代价仅为 1.2dB(S. J. Savory, G. Gavioli, R. I. Killey, P. Bayvel, "Transmission of 42.8 Gbit/s polarization multiplexed NRZ-QPSK over 6400km of standard fiber with no optical dispersion compensation", OFC2007, OTuA1.)。

[0004] 另一方面,目前通常的做法是将均衡功能分解成一个具有固定系数的均衡器和由自适应算法控制短 FIR 滤波器,如图 1(A) 所示。图 1(a) 示意性示出了现有的偏振分集相干光接收机的结构。双偏振光信号 101 和本振激光器 102 产生的连续光 103 在偏振分集相干检测器 104 中进行混频和光电变换,得到承载了双偏振光信号 101 在两个偏振态上的信息的复基带电信号 105 和 106。复基带电信号 105 和 106 分别经过模数转换器 107 和 108 得到复数字信号序列 109 和 110。然后由色散均衡器 200 或 300 进行处理以粗略补偿大的色度色散。然后,经过粗略色散补偿的信号 111 和 112 被送入具有较少抽头数目的自适应蝶形 FIR 滤波器 113 进行精确的色散补偿、偏振模色散补偿以及偏振解复用。自适应蝶形 FIR 滤波器 113 由相应算法控制,其抽头系数是动态调整的,从而可以跟踪信道的变化并实时补偿。自适应蝶形 FIR 滤波器 113 的输出信号 114 和 115 分别被送入频差补偿器 118 和 119,同时频差监测器 116 根据信号 114 和 115 估算出接收光信号 101 的载波频率和本振激光器频率的差值,并将该差值输入给频差补偿器 118 和 119 的频差输入端口。经过频差补偿,频差补偿器 118 的输出信号 120 和频差补偿器 119 的输出信号 121 分别经过相位恢复器 122 和 123 进行相位恢复,得到相位恢复后的信号 124 和 125。最后信号 124 和 125 由判决和解码器 126 和 127 判决和解码,得到数据 128 和 129。

[0005] 图 1(a) 中的色散均衡器 200(或 300) 的用途是粗略补偿色散,使得残余色散落入自适应滤波器 113 的补偿范围。色散均衡器可以在时域对信号进行处理也可以在频域对信号进行处理。

[0006] 时域色散均衡器 200 的结构如图 1(b) 所示。时域色散均衡器 200 的输入信号 109 和 110 分别进入滤波器 203 和 204, 得到均衡后的信号 111 和 112。由于通常需要补偿的色散量较大, 因而滤波器 203 和 204 的抽头数目可以达到数十个甚至数百个, 故被称为长 FIR 滤波器。时域均衡器系数存储单元 201 中存储了多组不同色散补偿量所对应的滤波器抽头系数值 202, 时域均衡器系数存储单元 201 将抽头系数值 202 输入给滤波器 203 和 204。由于光纤链路的色散值在很长的时间内不会有较大的变化, 滤波器 203 和 204 在从时域均衡器系数存储单元 201 读取系数后的很长时间内也不需要系数进行更新。

[0007] 时域色散均衡器 200 实际上是对离散时间信号做离散卷积运算, 故其算法复杂度比较高。利用快速傅立叶算法将时域信号变换到频域进行处理则可以大幅降低计算量, 图 1(c) 给出了基于该思想的频域色散均衡器 300 的结构图。在频域均衡器 300 中, 快速傅立叶变换器 303 和 304 首先分别把输入的时域数字信号序列 109 和 110 变换到频域, 得到频域信号 305 和 306, 然后将频域信号 305 和 306 分别传递给频域均衡器 (例如频域滤波器) 307 和 308。在频域均衡器 307 和 308 中, 频域信号 305 和 306 分别乘以使用频域均衡器系数存储单元 301 中存储的均衡器系数的色散传递函数的逆函数, 分别得到色散补偿后的频域信号 309 和 310。最后通过快速反傅立叶变换器 311 和 312 将信号 309 和 310 变换到时域, 并输出色散补偿后的时域信号 111 和 112。利用快速傅立叶变换计算线性卷积属于现有技术。

[0008] 在实现本发明的过程中, 发明人发现现有技术的光相干接收机的性能不够理想。

[0009] 以下列出了本发明的参考文献, 通过引用将它们并入本文中, 如同在本文中完全阐明了一样。

[0010] 1、标题为“在数字相干光接收机中使用的差频检测装置和方法”的第 200810090227.4 号中国专利申请。

[0011] 2、标题为“滤波器系数调整装置和方法”的中国专利申请第 200810108921.4 号。

## 发明内容

[0012] 本发明鉴于上述情况作出。用于克服现有技术的一个或更多个缺点, 至少提供一种有益的选择。为了实现上述的目的, 本发明提供了以下的方面。

[0013] 方面 1、一种色散均衡装置, 该色散均衡装置包括:

[0014] 色散均衡单元, 用于对输入信号的色散进行补偿;

[0015] 附加时延消除单元, 用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延。

[0016] 方面 2、根据方面 1 所述的色散均衡装置, 其特征在于,

[0017] 所述色散均衡单元包括第一时域均衡器和第二时域均衡器;

[0018] 所述附加时延消除单元包括时域均衡器系数存储单元和时域均衡器系数修正单元, 所述时域均衡器系数存储单元存储假定所述频差为 0 时所述第一时域均衡器和第二时域均衡器使用的时域均衡器系数, 所述时域均衡器系数修正单元根据所述频差对所述时域均衡器系数进行修正, 并将修正后的时域均衡器系数传送给所述第一时域均衡器和第二时域均衡器。

[0019] 方面 3、根据方面 1 所述的色散均衡装置, 其特征在于,

[0020] 所述色散均衡单元包括第一频域均衡器和第二频域均衡器；所述附加时延消除单元包括频域均衡器系数存储单元和均衡器系数修正单元，所述频域均衡器系数存储单元存储假定所述频差为 0 时所述第一频域均衡器和第二频域均衡器使用的频域均衡器系数，所述频域均衡器系数修正单元根据所述频差对所述频域均衡器系数进行修正，并将修正后的均衡器系数传送给所述第一频域均衡器和第二频域均衡器。

[0021] 方面 4、根据方面 1 所述的色散均衡装置，其特征在于，

[0022] 所述色散均衡单元包括第一时域均衡器和第二时域均衡器；

[0023] 所述附加时延消除单元包括时域均衡器系数计算单元，所述时域均衡器系数计算单元根据所述频差确定所述第一时域均衡器和第二时域均衡器应使用的时域均衡器系数。

[0024] 方面 5、根据方面 1 所述的色散均衡装置，其特征在于，

[0025] 所述色散均衡单元包括第一频域均衡器和第二频域均衡器；

[0026] 所述附加时延消除单元包括频域均衡器系数计算单元，所述频域均衡器系数计算单元根据所述频差确定所述第一频域均衡器和第二频域均衡器应使用的频域均衡器系数。

[0027] 方面 6、根据方面 1 所述的色散均衡装置，其特征在于，

[0028] 所述色散均衡单元包括第一时域均衡器和第二时域均衡器；

[0029] 所述附加时延消除单元包括附加时延计算器以及第一寄存器和第二寄存器，所述第一时域均衡器与所述第一寄存器相连，所述第二时域均衡器与所述第二寄存器相连，所述附加时延计算器用于根据所述频差计算所述色散均衡单元引入的附加时延，并指示第一寄存器和所述第二寄存器减少所述附加时延。

[0030] 方面 7、根据方面 5 所述的色散均衡装置，其特征在于，所述频域均衡器系数计算单元包括：

[0031] 光纤传递函数确定单元，用于确定光纤传递函数；

[0032] 光纤传递函数逆函数确定单元，用于计算所述光纤传递函数确定单元所确定的光纤传递函数的逆函数；

[0033] 加窗单元，用于对所述光纤传递函数逆函数确定单元所确定出的所述逆函数进行加窗；以及

[0034] 频域均衡器系数确定单元，用于根据经加窗的所述逆函数确定频域均衡器系数。

[0035] 方面 8、根据方面 1 所述的色散均衡装置，其特征在于，

[0036] 所述色散均衡单元包括串联连接的第一 FFT 单元、第一频域均衡器和第一 IFFT 单元以及串联连接的第二 FFT 单元、第二频域均衡器和第二 IFFT 单元；

[0037] 所述附加时延消除单元包括附加时延计算器以及第一寄存器和第二寄存器，所述第一寄存器与所述第一 FFT 单元或第一 IFFT 单元相连，所述第二寄存器与所述第二 FFT 单元或第二 IFFT 单元相连，所述附加时延计算器用于根据所述频差计算所述色散均衡单元引入的附加时延，并指示第一寄存器和所述第二寄存器减少所述附加时延。

[0038] 方面 9、根据方面 6 或 8 所述的色散均衡装置，其特征在于，所述附加时延计算器根据公式

$$\frac{2\pi V_L D \Delta \omega}{\omega_0^2}$$
 计算附加时延，其中， $\omega_0$  为发射机光载频， $\Delta \omega$  为信号与本振的频差， $V_L$

为真空光速，D 是传输链路总的色度色散值。

[0039] 方面 10、根据方面 4 所述的色散均衡装置，其特征在于，所述时域均衡器系数计算

单元包括：

[0040] 光纤传递函数确定单元,用于确定光纤传递函数；

[0041] 光纤传递函数逆函数确定单元,用于计算所述光纤传递函数确定单元所确定的光纤传递函数的逆函数；

[0042] 加窗单元,用于对所述光纤传递函数逆函数确定单元所确定出的所述逆函数进行加窗；以及

[0043] 时域均衡器系数确定单元,用于根据经加窗的所述逆函数确定所述时域均衡器系数。

[0044] 方面 11、一种色散均衡方法,该色散均衡方法包括：

[0045] 色散均衡步骤,用于对输入信号的色散进行补偿；

[0046] 附加时延消除步骤,用于根据所述输入信号的频差消除色散均衡步骤产生的色散均衡时延。

[0047] 方面 12、一种数字相干光接收机,包括频差监测器,其特征在于,所述数字相干光接收机包括根据方面 1 到 9 任一项所述的色散均衡装置,所述附加时延消除单元根据来自所述频差监测器的频差消除色散均衡单元产生的色散均衡时延。

[0048] 参照后文的说明和附图,本发明的这些和进一步的方面和特征将变得更加清楚。在所述的说明和附图中,详细公开了本发明的特定实施方式,指明了本发明的原理可以被采用的方式。应该理解,本发明在范围上并不因而受到限制。在所附权利要求的精神和条款的范围内,本发明包括许多改变、修改和等同。

[0049] 针对一种实施方式描述和 / 或示出的特征可以以相同或类似的方式在一个或多个其它实施方式中使用,与其它实施方式中的特征相组合,或替代其它实施方式中的特征。

[0050] 应该强调,术语“包括 / 包含”在本文使用时指特征、要件、步骤或组件的存在,但并不排除一个或多个其它特征、要件、步骤或组件的存在或附加。

#### 附图说明

[0051] 参照附图,从下面对优选实施方式的详细说明中,本发明的各种目的、特征、方面和优点将变得更加明显。在附图中,相同的附图标记指示相同的部件。

[0052] 图 1(a) 示意性示出了现有的偏振分集相干光接收机的结构；

[0053] 图 1(b) 示意性示出了图 1(a) 中的偏振分集相干光接收机可采用的时域色散均衡器的结构；

[0054] 图 1(c) 示意性示出了图 1(a) 中的偏振分集相干光接收机可采用的频域色散均衡器的结构；

[0055] 图 2 是示意性示出了依据本发明一种实施方式的色散均衡装置的结构示意图；

[0056] 图 3 示出了依据本发明的一种实施方式的时域色散均衡装置的结构；

[0057] 图 4 示意性示出了依据本发明一种实施方式的频域色散均衡装置的结构框图；

[0058] 图 5 示意性示出了依据本发明又一实施例的时域色散均衡器的结构示意图；

[0059] 图 6 示意性示出了依据本发明又一实施例的频域色散均衡器的结构示意图；

[0060] 图 7 示意性示出了依据本发明的一种实施方式的频域均衡器系数计算单元的处



理流程图；

[0061] 图 8 示意性示出了根据本发明另一实施方式的时域色散均衡装置的结构示意图；

[0062] 图 9 示意性示出了根据本发明另一实施方式的频域色散均衡装置的结构示意图；  
以及

[0063] 图 10 示意性示出了采用本发明的色散均衡器的数字相干光接收机。

### 具体实施方式

[0064] 本本发明的发明人对现有技术的数字相干光接收机性能不够良好的原因进行了研究。研究发现,在图 1(a) 所示的数字相干光接收机中,色散均衡器 200 或 300 的滤波器系数是按照信号光和本振光之间没有频差的情况进行计算得到的。一旦进入色散均衡器 200 或 300 的信号 109 和 110 中包含频差,则色散补偿和信号频差的相互作用会导致输出信号 111 和 112 产生时延(色散均衡时延,或称附加时延)。时延值由粗色散补偿量和频差值共同确定,当时延值较大时可能会超出后面的自适应均衡器 113 的补偿范围从而影响系统的性能。

[0065] 下面推导色散补偿和频差之间相互作用对信号的影响,为了表示的方便,将信号表示为连续时间信号,并只考虑光纤的色度色散损伤。记发射光信号为  $s(t)\exp(j\omega_0 t)$ ,本振光为  $\exp[j(\omega_0 - \Delta\omega)t]$ ,光纤色度色散的频域传递函数为  $\exp[j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \omega_0)^2]$ ,其中  $s(t)$  为基带复信号,  $\omega_0$  为发射机光载频,  $\Delta\omega$  为信号与本振的频差,  $V_L$  为真空光速,  $D$  是传输链路总的色度色散值,其单位通常是 ps/nm。进入色散均衡器的电信号 109 或 110 在频域可以表示为

$$[0066] \quad \tilde{S}(\omega - \Delta\omega)\exp[j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \Delta\omega)^2] \quad (1)$$

[0067] 其中  $\tilde{S}(\omega)$  是  $s(t)$  的傅立叶变换。如果色散均衡器能够补偿的色散量为  $D - \Delta D$ ,则其传递函数为  $\exp[-j\frac{\pi V_L (D - \Delta D)}{\omega_0^2}\omega^2]$ 。色散均衡器的输出信号 111 或 112 在频域可以表示为

$$[0068] \quad \tilde{S}(\omega - \Delta\omega)\exp[j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \Delta\omega)^2 - j\frac{\pi V_L (D - \Delta D)}{\omega_0^2}\omega^2] \quad (2)$$

$$[0069] \quad = \tilde{S}(\omega - \Delta\omega)\exp[j\frac{\pi V_L}{\omega_0^2}(\Delta D\omega^2 - 2D\Delta\omega \cdot \omega + D\Delta\omega^2)]$$

[0070] 从上式不难看出,  $e$  指数中的第一项对应残余色散,第二项对应时延,第三项对应相移。如果色散均衡器恰好完全补偿色散,即残余色散  $\Delta D = 0$ ,则输出信号的时域表达式为

$$[0071] \quad s(t - \frac{2\pi V_L D\Delta\omega}{\omega_0^2})\exp[j\Delta\omega(t - \frac{2\pi V_L D\Delta\omega}{\omega_0^2})]\exp(j\frac{\pi V_L D\Delta\omega^2}{\omega_0^2}) \quad (3)$$

[0072] 即信号仅经历了时延和相位旋转,时延值和相位旋转角度分别为  $\frac{2\pi V_L D\Delta\omega}{\omega_0^2}$  和

$\frac{\pi V_L D\Delta\omega^2}{\omega_0^2}$ 。以 112Gb/s 的 DP-QPSK 系统为例,信号载频  $f_0 = 193\text{THz}$ ,色散值  $D = 17,000\text{ps/nm}$ (1000km 标准单模光纤的色散值),频差  $\Delta f = 1\text{GHz}$ ,则时延值可到达 137ps(约为 4 个符

号周期)。通常频差是时变的,如果频差在  $\pm 1\text{GHz}$  的范围内变化,那么时延值则在  $\pm 4$  个符号周期内变化。这往往超出了自适应滤波器 113 的动态跟踪和补偿信道变化的能力,从而导致系统性能下降。

[0073] 在这种情况下,容易想到的是增加自适应滤波器 113 的抽头个数。但是这样抽头个数会变多,如果考虑残余色散的补偿,则需要更多的抽头个数。很多的抽头数目会降低自适应滤波器的动态跟踪和补偿信道变化的能力,因此目前不是优选方案。

[0074] 图 2 给出了依据本发明一种实施方式的色散均衡装置的结构示意图。如图 2 所示,依据本发明一种实施方式的色散均衡装置包括色散均衡单元 2001 和附加时延消除单元 2002。色散均衡单元 2001 用于对色散进行补偿,附加时延消除单元 2002 根据来自数字相干光接收机的频差值 117,消除色散均衡单元 2001 的色散均衡时延。在本发明的实施方式中,根据上下文“消除”可以表示使色散均衡单元不产生的时延,或对色散均衡单元产生的时延进行补偿或使其稳定这两种含义中的一种或两种。

[0075] 下面对依据本发明实施方式的色散均衡装置的结构实施方式进行更清楚的说明。

[0076] 图 3 示出了依据本发明的一种实施方式的时域色散均衡装置的结构。与图 1(b) 所示的现有技术相比,图 3 示出的时域色散均衡装置在时域均衡器系数存储单元 201 和时域均衡器(如长 FIR 滤波器)203、204 之间加入了时域均衡器系数修正单元 401。在本实施方式中,时域均衡器系数存储单元 201 和时域均衡器系数修正单元 401 对应于附加时延消除单元 2002,而时域均衡器 203、204 对应于色散均衡单元 2001。时域均衡器 203、204 对输入信号 109 和 110 进行滤波,从而对色散进行补偿。时域均衡器系数存储单元 201 存储在假定信号光与本振光之间无频差时为时域均衡器 203 和 204 设定的时域均衡器系数。(即存储色散补偿量及与色散补偿量相对应的、假定信号光与本振光之间无频差时的时域均衡器系数(例如长 FIR 滤波器系数))。

[0077] 时域均衡器系数修正单元 401 包括第一输入端和第二输入端,第一输入端接收来自时域均衡器系数存储单元 201 的时域均衡器系数,第二输入端接收来自频差监测器 116 所监测到的频差值 117。时域均衡器系数修正单元 401 根据频差值 117 对滤波器系数 202 进行修正并将修正后的系数 402 输送至时域均衡器 203 和 204,从而避免了色散补偿和频差的相互作用。具体工作原理描述如下。

[0078] 由于时域均衡器 203 和 204 的工作过程完全一致,下面仅以时域均衡器 203 为例来进行说明。

[0079] 设时域均衡器 203 的抽头系数为  $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ ,  $C_i$  为复数,  $N$  为该时域均衡器抽头个数。时域均衡器 203 的输入信号 109 为复序列  $\{x(1), x(2), x(3)\dots\}$ , 其输出信号 111 为

$$[0080] \quad y(k) = \sum_{i=1}^N C_i x(k+1-i) \quad (4)$$

[0081] 若从时域均衡器系数存储单元 201 读取出的系数为  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$ , 则显然在图 1(b) 所示的方案中  $C_i = \alpha_i$ 。如果时域均衡器根据该系数工作,则在存在频差的情况下会产生附加时延,即色散均衡时延。在本实施方式中,时域均衡器系数修正单元 401 中做如下处理得到  $C_i$

$$[0082] \quad C_i = \alpha_i \exp[j(\varphi_0 + i \cdot \Delta\omega \cdot \Delta t)] \quad (5)$$

[0083] 在式 (5) 中,  $\Delta \omega$  是监测到的频差值 117 (也称输入信号的频差), 其理想值是信号光载频  $\omega_0$  与本振光频率  $\omega_{L0}$  的差值  $\omega_0 - \omega_{L0}$ ,  $\Delta t$  是均衡器输入序列 109 的采样时间间隔,  $\varphi_0$  是任意实常数, 通常取  $\varphi_0 = -(N+1) \times \Delta \omega \times \Delta t / 2$ 。式 (5) 的物理意义: 频差会使滤波器 203 的输入序列 109 中产生额外的线性相位变化, 从而导致式 (4) 输出的信号的附加时延, 式 (5) 在时域均衡器系数上叠加了与频差所引入的相对相位变化相反的相位, 这样相当于消除了信号 109 中由频差引入的额外的相位变化。

[0084] 时域均衡器系数修正单元 401 将计算得到的新的滤波器抽头系数 402  $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$  输送至滤波器 203 和 204。

[0085] 图 4 示意性示出了依据本发明一种实施方式的频域色散均衡装置的结构框图。图 4 所述的色散均衡装置与图 1(c) 所示的现有技术的色散均衡装置相比, 在频域均衡器系数存储单元 301 和频域均衡器 307、308 之间加入了频域均衡器系数修正单元 501。在本实施方式中, 频域均衡器系数存储单元 301 和频域均衡器系数修正单元 501 对应于附加时延消除单元。频域均衡器系数存储单元 301 存储假定频差为 0 时频域均衡器 307 和 308 对色散进行补偿应使用的频域均衡器系数。频域均衡器系数修正单元 501 有两个输入端, 第一输入端接收来自频域均衡器系数存储单元 301 的频域均衡器系数, 第二输入端接收来自频差监测器 116 的频差值 117。频域均衡器系数修正单元 501 根据频差值 117 对频域均衡器系数 302 进行修正并将修正后的系数 502 输送至频域均衡器 307 和 308, 从而避免了色散补偿和频差的相互作用。具体工作原理描述如下。

[0086] 由于频域均衡器 307 和 308 的工作过程完全一致, 下面仅以频域均衡器 307 为例来进行说明。

[0087] 设频域均衡器 307 的系数为  $\{F_1, F_2, \dots, F_M\}$ ,  $F_i$  为复数, 其中  $M$  为 FFT 303 的长度且  $M = 2^P$ ,  $P$  为正整数。频域均衡器系数存储单元 301 输出的系数按频率从低到高排列为  $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M\}$ , 显然在图 1(c) 所示的方案中  $F_i = \beta_i$ , 并且如果频域均衡器 307 根据这些均衡器系数进行工作, 则在存在频差时会产生色散均衡时延。

[0088] 在本实施例中, 在频域均衡器系数修正单元 501 中进行如下处理得到  $F_i$

$$[0089] \quad F_i = \begin{cases} \beta_{i-L} & 1 \leq i-L \leq M \text{ 时} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (6)$$

$$[0090] \quad L = \text{round}\left(\frac{M\Delta\omega\Delta t}{2\pi}\right)$$

[0091] 式中  $\Delta \omega$  是监测到的频差值 117,  $\Delta t$  是均衡器输入序列 109 的采样时间间隔。

[0092] 根据色散值 (色散值可通过监测得到或人为设定) 从频域均衡器系数存储单元 301 中得到的频域均衡器系数  $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M\}$ , 并未考虑频差 (即认为频差等于零), 这样  $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M\}$  关于频率 0 对称。实际情况是接收到的信号包含频差  $\Delta \omega$ , 其频谱以  $\Delta \omega$  为中心, 故需要将频域均衡器系数的对称中心搬移至  $\Delta \omega$ , 根据式 (6) 进行操作, 可以实现这种搬移。

[0093] 频域均衡器系数修正单元 501 将计算得到的新的频域均衡器系数 502  $\{F_1, F_2, \dots, F_N\}$  输送至频域均衡器 307 和 308。

[0094] 前面所述的时域色散均衡器 200' 和频域色散均衡器 300' 分别包含有存储单元 201 或 301, 其中所存储的系数都是事先根据待补偿的色散值计算得到的。但根据本发明的

另一方面,色散均衡器中也可以用系数计算器来代替系数存储单元。

[0095] 图 5 示意性示出了依据本发明又一实施方式的时域色散均衡器 200'' 的结构示意图。如图 5 所示,本实施方式的时域色散均衡器包括时域均衡器系数计算单元 601、时域均衡器 203 和 204。时域均衡器系数计算单元 601 根据频差 117 计算时域均衡器 203 和 204 应使用的时域均衡器系数。下面对时域均衡器系数计算单元 601 的处理进行详细说明。

[0096] 首先根据频差 117 确定频域传递函数。具体地,设光纤的色散值为  $D$ ,则光纤色散的频域传递函数为

$$[0097] \quad \exp\left[j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \omega_0)^2\right] \quad (7)$$

[0098] 其中  $\omega_0$  为发射机光载频,  $V_L$  为真空光速。通过相干检测,光信号被搬移到基带,等效的光纤色散的频域传递函数变为

$$[0099] \quad \exp\left[j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \Delta\omega)^2\right] \quad (8)$$

[0100] 其中  $\Delta\omega$  为信号与本振之间的频差。也就是说,所确定的频域传递函数体现了  $\Delta\omega$  的影响。

[0101] 为了补偿色散,希望均衡器具有与式 (8) 互逆的传递函数。因而,随后确定光纤色散的频域传递函数的逆函数,如公式 9 所示。

$$[0102] \quad H_{EQ}(\omega) = \exp\left[-j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \Delta\omega)^2\right]G(\omega - \Delta\omega) \quad (9)$$

[0103] 式中  $G(\omega - \Delta\omega)$  为中心在  $\Delta\omega$  处的窗函数,比如高斯窗函数  $G(\omega) = 2^{-\frac{(\omega - \Delta\omega)^2}{2\pi B_{3dB}}}$ ,  $B_{3dB}$  是该高斯窗的 3dB 带宽,通常根据信号的符号率来选取。加窗(即乘以  $G(\omega - \Delta\omega)$ )的目的是加速均衡器系数的衰减以减少均衡器的抽头数目。

[0104] 最后,对加窗的逆传递函数进行傅立叶逆变换,就得到了时域均衡器系数,即,长 FIR 滤波器 203 和 204 的抽头系数,见公式 10。

$$[0105] \quad C_k = \frac{\Delta t}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} H_{EQ}(\omega) \exp\{j\omega[k - (N+1)/2]\Delta t\} d\omega \quad (10)$$

$$[0106] \quad = \frac{\Delta t}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta t}^{\pi/\Delta t} \exp\left[-j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \Delta\omega)^2\right]G(\omega - \Delta\omega) \exp\{j\omega[k - (N+1)/2]\Delta t\} d\omega$$

[0107] 式中  $\Delta t$  是输入信号的采样间隔,  $N$  为均衡器的抽头个数。

[0108] 在本实施例中,时域均衡器系数计算单元 601 对应于附加时延消除单元,时域均衡器 203 和 204 对应于色散均衡单元。

[0109] 图 6 示出了依据本发明另一实施方式的色散均衡器 300'' 的结构示意图。如图 6 所示,本实施方式的色散均衡器包括频域均衡器系数计算单元 701、FFT 303 和 304、频域均衡器 307 和 308、以及 IFFT 311 和 312。频域均衡器系数计算单元 701 根据频差计算频域均衡器 307 和 308 应使用的频域均衡器系数,并将所述系数传递给频域均衡器 307 和 308。

[0110] 频域均衡器系数计算单元 701 可以包括光纤传递函数确定单元、光纤传递函数逆函数确定单元、加窗单元和均衡器系数确定单元。应该注意的是,可以预先进行光纤传递函数确定单元、光纤传递函数逆函数确定单元以及加窗单元的处理,从而将最终确定的结果

存入存储单元,由频域均衡器系数确定单元直接调用。

[0111] 下面结合图 7 对频域均衡器系数计算单元 701 的计算处理进行说明。

[0112] 图 7 示意性示出了依据本发明的一种实施方式的频域均衡器系数计算单元的处理流程图。如图 7 所示,在步骤 7001,根据目标色散值和监测到的频差给出修正的光纤传递

函数(式(8))。然后,在步骤 7002,给出该光纤传递函数的逆函数  $\exp[-j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}(\omega - \Delta\omega)^2]$ 。

随后,在步骤 7003,对逆函数加窗(见式(9))。然后,在步骤 7004,根据公式 11 将均衡器系数所对应的频率值代入加窗的逆传递函数,得到频域均衡器系数,即频域均衡器 307 和 308 应使用的均衡器系数。

$$[0113] \quad F_k = H_{EQ}\left(\frac{2\pi(-M/2+k-1)}{M\Delta t}\right) \quad (11)$$

$$[0114] \quad = \exp\left\{-j\frac{\pi V_L D}{\omega_0^2}\left[\frac{2\pi(-M/2+k-1)}{M\Delta t} - \Delta\omega\right]^2\right\} G\left[\frac{2\pi(-M/2+k-1)}{M\Delta t} - \Delta\omega\right]$$

[0115] 式中,频域均衡器系数  $\{F_1, F_2, \dots, F_M\}$  对应的频率值为  $\{-1/(2\Delta t), -(M-2)/(2M\Delta t), \dots, (M-2)/(2M\Delta t)\}$ ,即  $F_k$  对应的频率值为  $(-M/2+k-1)/(M\Delta t)$ ,其中  $M$  为频域均衡器系数个数(也为 FFT 的长度)且  $M = 2^P$ ,  $P$  为正整数。

[0116] 在本实施方式中,频域均衡器系数计算单元对应于附加时延消除单元。

[0117] 此外,应该注意,上面图 7 的处理流程也适用于时域均衡器的情况。

[0118] 图 8 给出了根据本发明另一实施方式的时域色散均衡装置 200'' 的结构示意图。与图 1(b) 所示的色散均衡装置相比,如图 8 所示的本实施例的色散均衡装置增加了附加时延计算器 801、寄存器 803 和 804。附加时延计算器 801 根据输入的频差 117 和目

标色散值按公式  $\frac{2\pi V_L D \Delta\omega}{\omega_0^2}$  进行计算,得到附加时延值,并输出相应的控制信号 802 给寄存

器 803 和 804。寄存器 803 和 804 将自身的时延值减少  $\frac{2\pi V_L D \Delta\omega}{\omega_0^2}$ ,从而补偿附加时延变

化。在频差为零时,寄存器有固定的初始时延  $\tau_0$  和最大可调时延  $\tau_{\max}$ ,这个初始时延值和最大可调时延需要取得合适,使得其调节范围要大于等于色散和频差引入附加时延值,即

$$[0119] \quad -\tau_0 \leq \frac{2\pi V_L D \Delta\omega}{\omega_0^2} \leq \tau_{\max}$$

[0119] 在本技术方案中,虽然寄存器本身会引起寄存时延,但通过适当控制寄存时延,使其变化与色散均衡器和频差相互作用引起的附加时延相反,这样总的时延趋于一个固定值,因而不会对蝶形滤波器的工作产生影响。

[0120] 寄存器 803 和 804 也可以放在 203 和 204 之前,如图 8 虚线框所示。

[0121] 本实施方式中,附加时延计算器 801、寄存器 803 和 804 对应于附加时延消除单元。滤波器系数存储单元 201 和滤波器 203 和 204 对应于色散均衡单元。

[0122] 图 9 给出了根据本发明另一实施方式的频域色散均衡装置的结构示意图。其中,与图 1(c) 所示的色散均衡装置相比,如图 9 所示的本实施方式的频域色散均衡装置增加了附加时延计算器 901、寄存器 903 和 904。附加时延计算器 901、寄存器 903 和 904 的操作分别与附加时延计算器 801、寄存器 803 和 804 的工作相对应,因而本文不再赘述。

[0123] 同样地,如图 9 中虚线框所示,寄存器 903、904 也可以在频域均衡器 307 和 308 之前。

[0124] 图 10 给出了采用本发明的色散均衡器 200' ,200" ,200" ' 或 300' ,300" 或 300" ' 的数字相干光接收机。

[0125] 与图 1(a) 所示的数字相干光接收机相比,在图 10 所示的数字相干光接收机中,频差监测器 116 所得到的频差 117 要提供给色散均衡器,其他的结构可以与现有技术的相同。另外,图中的频差监测器 116 与滤波器 113、频差补偿器 118、119 等的连接关系可以改变,这些改变对本领域技术人员来说都是可以预见的,都在本发明的范围内。

[0126] 本发明实施方式的方法和装置在数字域实现且不需要提高 DSP 模块的工作频率,因此成本较低。

[0127] 本发明以上的装置和方法可以由硬件实现,也可以由硬件结合软件实现。本发明涉及这样的计算机可读程序,当该程序被逻辑部件所执行时,能够使该逻辑部件实现上文所述的装置或构成部件,或使该逻辑部件实现上文所述的各种方法或步骤。本发明还涉及用于存储以上程序的存储介质,如硬盘、磁盘、光盘、DVD、flash 等。

[0128] 以上结合具体的实施方式对本发明进行了描述,但本领域技术人员应该清楚,这些描述都是示例性的,并不是对本发明保护范围的限制。受益于本发明的本领域技术人员可以对本发明作出各种变型和修改,这些变型和修改也在本发明的范围内,本发明仅受权利要求的限制。

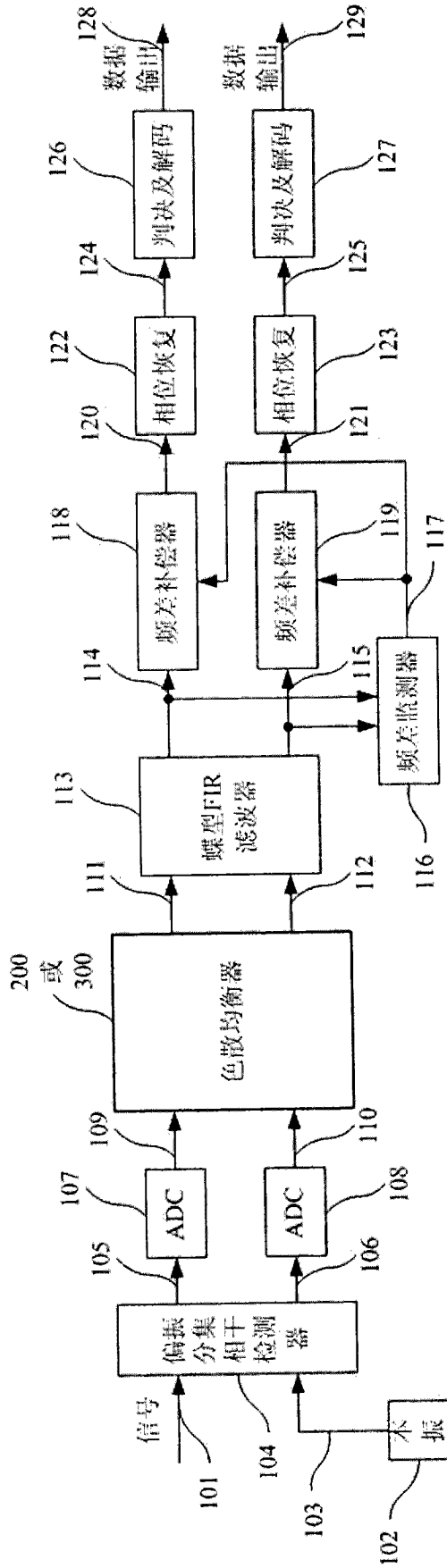


图 1(a)

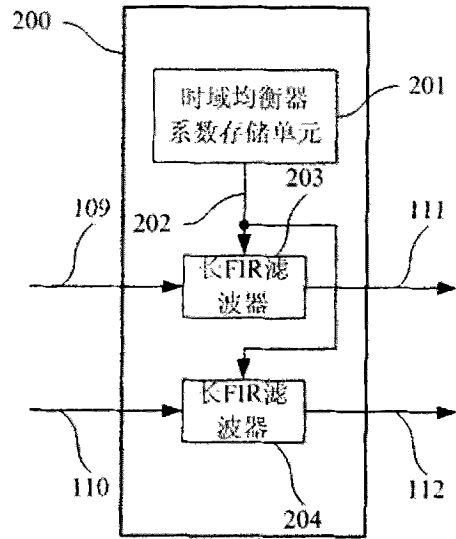


图 1(b)

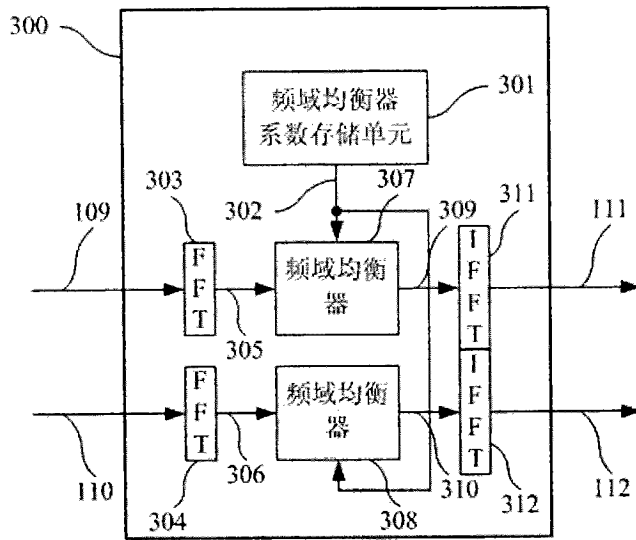


图 1(c)

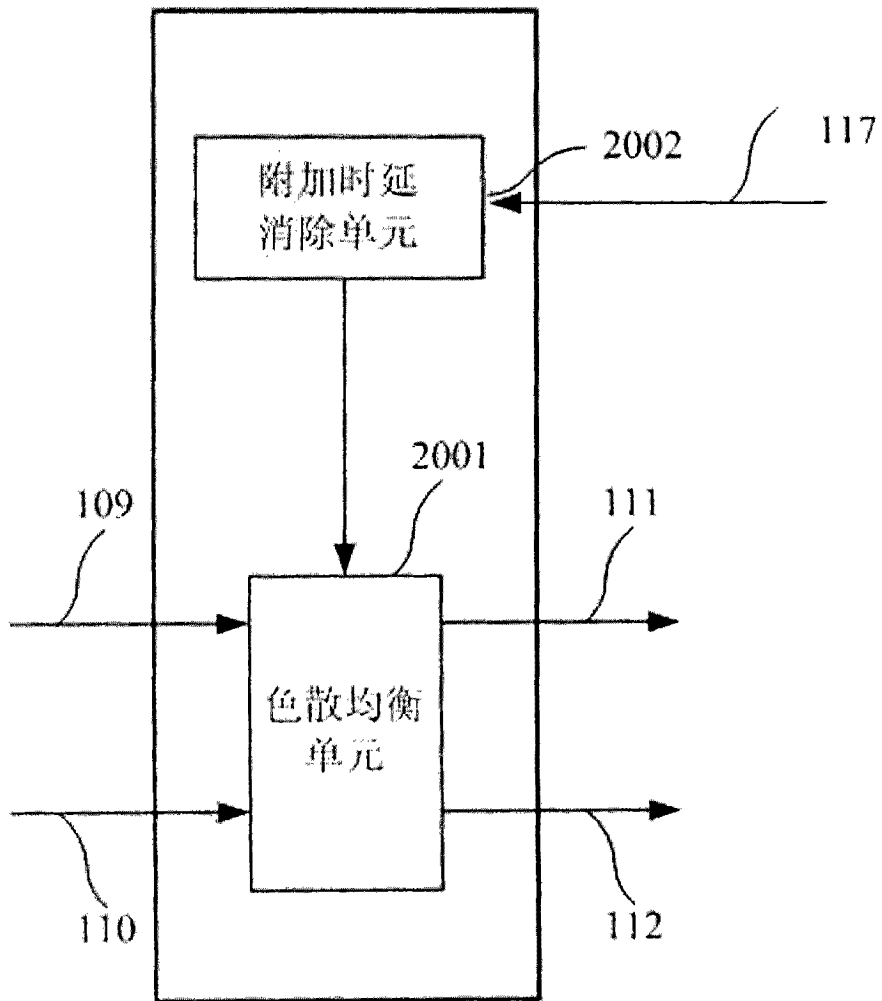


图 2



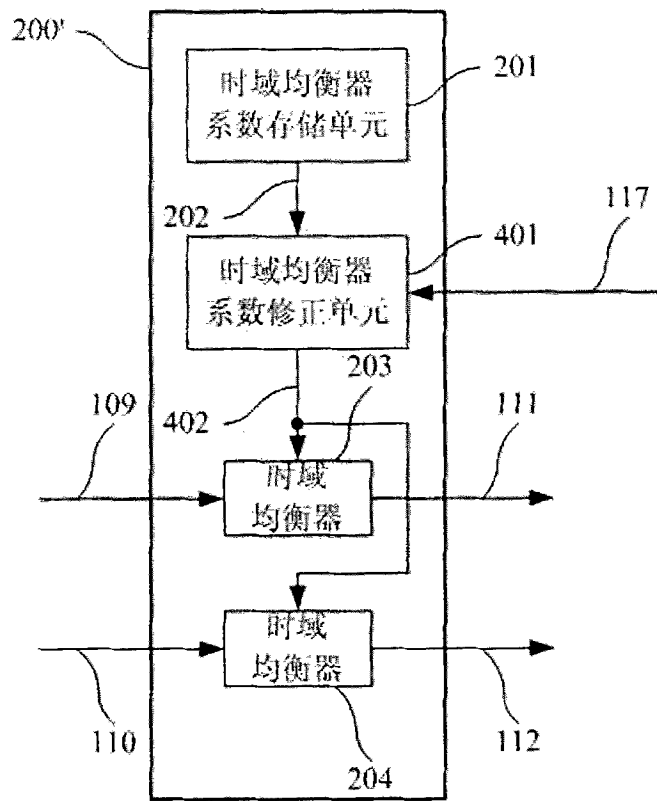


图 3

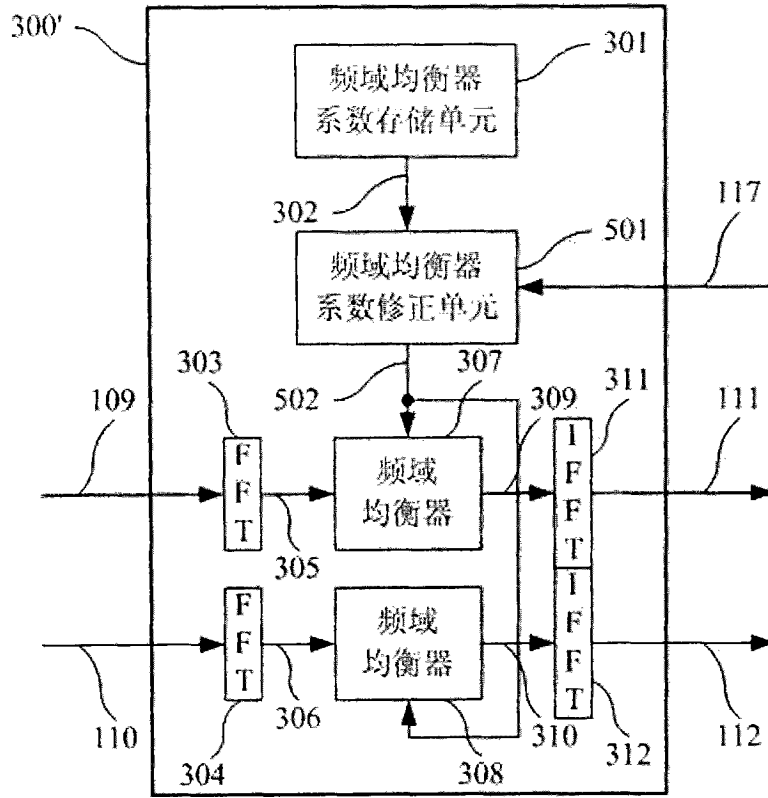


图 4

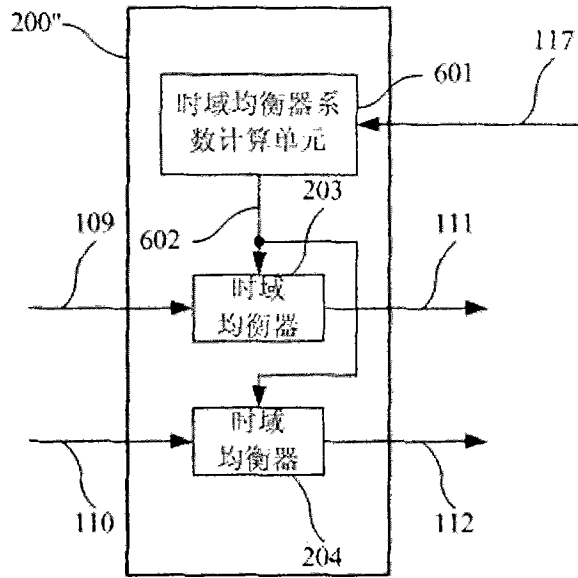


图 5

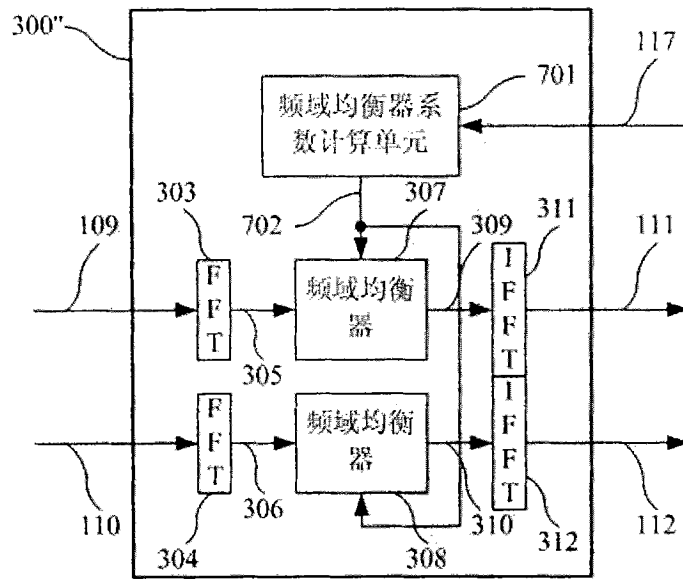


图 6

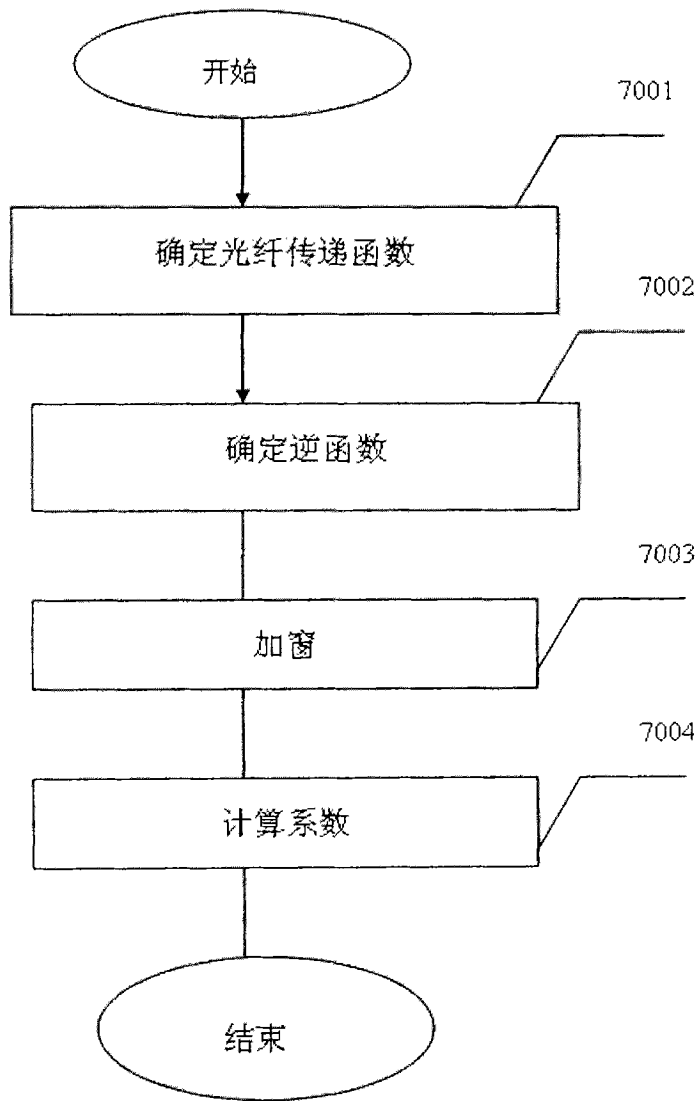


图 7

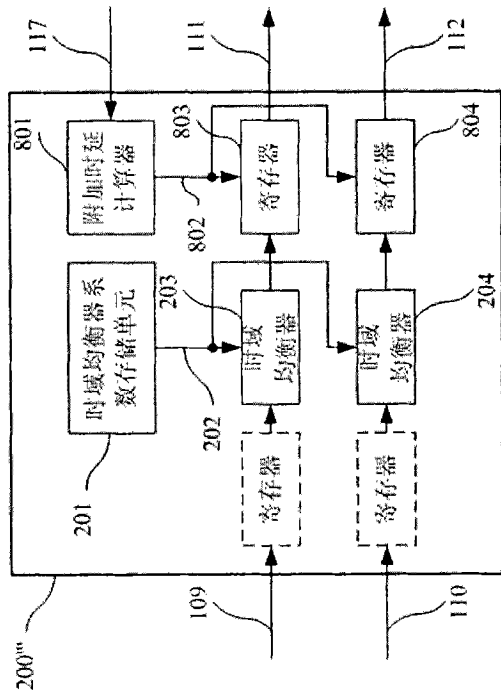


图 8

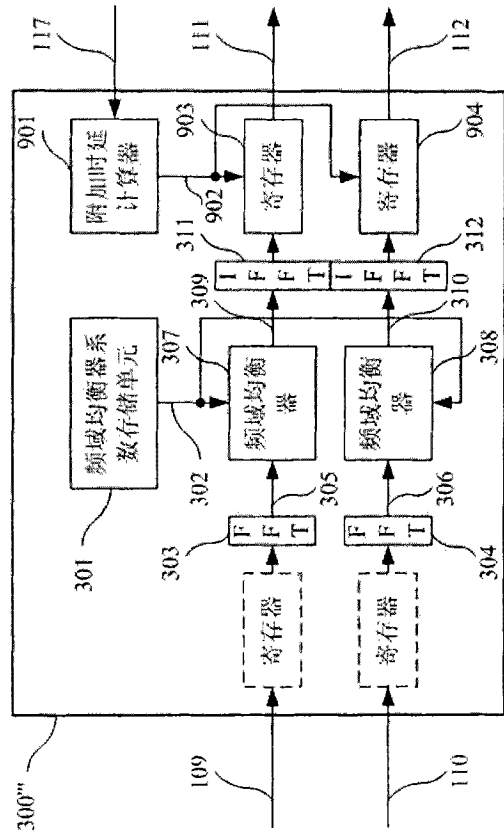


图 9

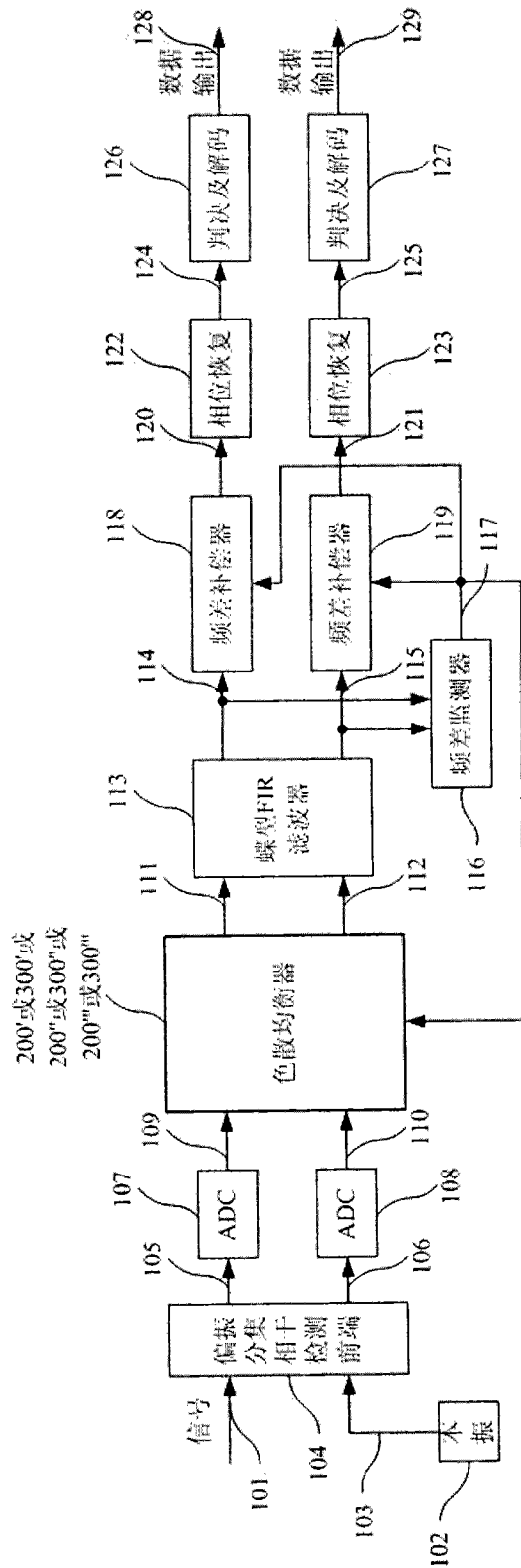


图 10