

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H04B 10/18 (2006.01)

G02B 6/293 (2006.01)

G02B 6/34 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02826396.0

[45] 授权公告日 2010年2月24日

[11] 授权公告号 CN 100592666C

[22] 申请日 2002.12.19 [21] 申请号 02826396.0

[30] 优先权

[32] 2001.12.31 [33] US [31] 60/344,965

[32] 2002.12.18 [33] US [31] 10/323,280

[32] 2002.12.18 [33] US [31] 10/323,301

[86] 国际申请 PCT/US2002/041025 2002.12.19

[87] 国际公布 WO2003/058858 英 2003.7.17

[85] 进入国家阶段日期 2004.6.28

[73] 专利权人 3M 创新有限公司

地址 美国明尼苏达州

[72] 发明人 B·J·科克 T·L·史密斯

B·A·迪伯恩

[56] 参考文献

US6271952B1 2001.8.7

EP1087245A2 2001.3.28

审查员 崔宪丽

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

代理人 李玲

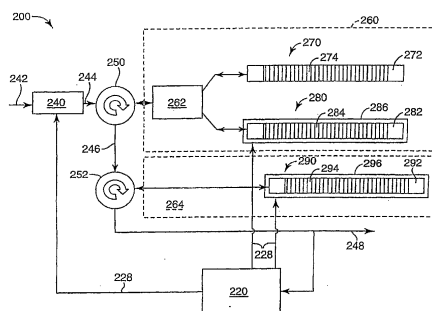
权利要求书 2 页 说明书 15 页 附图 4 页

[54] 发明名称

用于较高阶色散补偿的方法

[57] 摘要

根据本发明一种用于对入射的光通信信号较高阶色散作补偿的方法包括的步骤为对一阶偏振模式色散的信号作补偿；对二阶偏振模式色散的信号作补偿；以及对可变有色色散的信号作补偿。另外，该方法可包括对固有有色色散作补偿和控制入射信号偏振的两步骤。在补偿步骤之后可监控该信号以及可基于这监控来调节补偿度。对一阶偏振模式色散信号作补偿的步骤可包括控制信号的偏振；把信号分离成为第一和第二正交的偏振分量；在固定的线性调谐脉冲光栅中反射第一偏振分量；在已调谐线性调谐脉冲光栅中反射第二偏振分量，以及重新组合第一和第二偏振分量。



1. 一种对入射的光通信信号较高阶色散作补偿的方法，其特征在于，该方法包括如下的步骤：

a) 调节入射的光通信信号的偏振态来准确地使通信信号的偏振基本态对准补偿器系统的偏振基本态；

b) 在分离点，把通信信号分离成偏振的第一和第二垂直的基本态；

c) 把偏振态的第一态传播到具有第一非线性调谐脉冲光栅的第一波导，该第一光栅具有第一参考反射点；

d) 把偏振态的第二态传播到具有第二非线性调谐脉冲光栅的第二波导，该第二光栅具有与第一调谐脉冲光栅基本类似的调谐图形，且具有第二参考反射点；

e) 将调谐脉冲的正确平均值写入第一和第二非线性调谐脉冲光栅以补偿固定有色色散；

f) 通过一致地改变沿着光栅的第一和第二反射点的位置来可调节地补偿第一和第二反射点的可变有色色散和高阶偏振模式色散；

g) 可调节地改变在第二反射点与分离点之间的相对光路长度，从而对在第一和第二偏振垂直态之间的一阶偏振色散作补偿；以及

h) 重新组合第一和第二偏振态成为输出信号。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，该方法还包括的步骤是：在可调节地改变第一反射点和分离点之间的相对光路长度的步骤之前，调谐至少光栅中的一个光栅的光路长度，使得第二反射点基本上象第一反射点一样离分离点有相同的光路长度。

3. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，该方法还包括的步骤是，在可调节地改变离相对于分离点的第二反射点的光路长度的步骤之前，调谐至少光栅中的一个光栅的光路长度，使得第二反射点离分离点的光路长度比第一反射点要短，其中在光路长度中的差要根据在第一和第二垂直的偏振态之间的期望偏振色散延迟来选定。

4. 一种用于对光通信信号较高阶色散作补偿的方法，其特征在于，该方法包

括如下的步骤：

- a) 把通信信号分离成为第一和第二垂直的基本偏振态；
- b) 把第一偏振态传播到具有第一线性调谐脉冲光栅的第一高双折射光波导，第一光波导在第一光路长度处具有第一反射点；
- c) 把第二偏振态传播到具有第二线性调谐脉冲光栅的第二可调高双折射光波导，第二光波导在第二光路长度处具有第二反射点；
- d) 重新组合第一和第二偏振态成为输出信号；
- e) 把输出信号传播到具有带有反射点的非线性调谐脉冲光栅的第三高双折射光波导；
- f) 可调地改变第二线性调谐脉冲光栅的第二光路长度，以对在第一和第二垂直的偏振态之间的一阶偏振色散作补偿；以及
- g) 可调节地改变在第三光栅中的光路，以对在输出信号中的可变有色色散和较高阶偏振色散作补偿。

5. 如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述第二调谐脉冲光栅具有基本上与第一调谐脉冲的相类似的调谐图形，第二光栅具有基本上象第一反射点一样的在分离点的相同光路长度的第二反射点。

6. 如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，该方法还包括如下的步骤：

- a) 对输出信号取样；
- b) 响应输出信号的质量，适应地在第二光栅中相对于分离点调节第二反射点。

7. 如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，该方法还包括如下的步骤：

- a) 对输出信号取样，
响应输出信号的质量执行以下步骤：
- b) 适应地调节入射信号的偏振态；
- c) 适应地调节相对于分离点的第二光栅的第二反射点，以及
- d) 适应地调节第三光栅的第三反射点。

用于较高阶色散补偿的方法

技术领域

本发明涉及用于光信号色散补偿的方法和系统。具体地说，本发明涉及一种用于较高阶色散补偿的方法，该方法采用至少两个高频脉冲的布拉格(Bragg)光栅，以选择地调准已分解的两个偏振信号的反射点，引起与可变较高阶有关的延迟。

当前的长途通信系统需要在很长的距离上传送光信号。在一光通信的信号中，数据是以一系列的光脉冲被送出的。信号脉冲由光的波长和偏振的分布组成，每个脉冲以它自己的特征速率传输。在速度上的这个变化导致脉冲展宽，因而使信号变坏。由于速度与波长有关而引起的变坏称之为有色色散，而由于与偏振有关的引起的变坏则称之为偏振模式色散(PMD)。

在数学上，在波导中的光速 v 由下式给出：

$$v = \frac{c}{n} \quad (1)$$

式中 c 是自由空间中的光束，而 n 是在波导中的有效折射率。

在正常的情况下，光媒质的有效折射率 n ，与光组份的波长有关。因此，具有不同波长的光的组份将以不同的速度传播。

在波导中的有效折射率除了与波长有关之外，还可与光信号的偏振有关。即使在“单模”光纤中保持着两个垂直的偏振光，而且，存在着双折射的情况下，这两个偏振光以不同的速度传播。在光纤中的双折射可能起因于包括制造变化和与时间有关的环境因素这两者在内的许多原因。速度差导致在双折射光纤内的两个不同偏振模式之间的与偏振有关的传播时间，即“差动群延迟”(differential group delay) (DGD)。在实际的光纤系统中，双折射的大小和双折射轴的取向沿光纤处处都不同。这样就在光信号上导致更复杂的效应，它是由“偏振基本态”即 PSP 的概念来表示其特征的。PSP 被定义为受到最大的有关 DGD 的两个偏振态，而它们唯一表征了这系统的瞬时状态。

当信号通过光通信系统的不同部段传播时，在由两个偏振分量不同群速度的统计和引起的失真时测量偏振模式色散(PMD)。PMD 包括一阶 PMD 和较高阶

PMD，且是非决定性的。在一给定的波长上，一阶 PMD 是差动偏振群延迟。长光纤的瞬时值可在长时间的间隔和短时间的间隔这两者上发生变化，前者是由于诸如温度漂移的慢变化引起的，而后者是由于诸如力学振动感生的偏振起伏而引起的。描述一阶 PMD 平均值的系数可从对性能比较差的 PMD 光纤的大于 $2\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 变到对性能比较好的 PMD 光纤的小于 $0.1\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 。

二阶 PMD 主要由两个原因引起：(i) 随波长而变的一阶 PMD；(ii) 系统 PSP(偏振基本态)的取向随波长的改变，它导致 PMD 随波长的变化。二阶 PMD 导致与波长有关的群延迟，实际上，对可变有色色散是等价的，且可以有或是负的或是正的符号。起伏的速度与一阶 PMD 的起伏速度是在同一量级上。

有两类有色色散：决定性的和可变的。决定性色散是具有固定折射率波导单位长度上的固定色散。对一组给定的环境条件，决定性色散是比较固定的(例如，对标准单模光纤 $\sim 17\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$)。例如， $17\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$ 指的是 10 千米的(10km)系统，用带宽为 0.1 纳米(nm)来携带数据时，将经常到约 17 微微秒(ps)的色散。

可变的有色色散是通过由于例如添加或除去信道引起的光纤连接长度的改变和通过张应力和/或温度起伏造成的。对有色色散将改变的量的预测，合理的值是在 $-500\text{ps}/\text{nm}$ 到 $+500\text{ps}/\text{nm}$ 的范围内。

除了 PMD 和有色色散单独的效应之外，还有由于有色色散和 PMD 这两者同时存在而引起的较高阶色散交叉项。所有有色色散和二阶 PMD 之间的这个交叉项具有为零的平均值，但可有非零的均方根(RMS)贡献。类似于二阶 PMD 项，该 RMS 值可有正或负的贡献。类似于二阶 PMD 项，该 RMS 值可有正或负的贡献。RMS 的贡献大小，根据光纤的 PMD 系数可从小于 1%的有色色散到与有色色散相同的量级。

色散对传输带宽施加了严格的限制，特别是在横越诸如越洋线路这样的长距离上。在较高比特速率时，色散问题变得更加重要，此处光脉冲间的间距是较小的，而此处较短的脉冲导致较宽的信号频谱带宽，加重有色的和较高阶 PMD 的效应。在比特速率大于或等于 $40\text{Gb}/\text{s}$ 时，即使对“好”的光纤 ($\leq 0.1\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ PMD 系数)，长的长度连接被认为需要较高阶的动态补偿。由于附加的光—电—光信号转换的位置需要，以允许电信号的再生，或者限制总系统长度或者提高系统成本，色散可能受成为一抑制的因素。

在过去的色散补偿器件中未曾合适的认识，测量和解释过较高阶色散。在

提供较高阶色散补偿的解决方案中，对较高阶色散中的原因和因素的了解是重要的。

对“好的”光纤(PMD系数为 $0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$)的示范性计算表明：

有色色散项	17 ps/nm·km
一阶 PMD 系数	$0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$
二阶 PMD 系数	0.006ps/nm·km
交叉项 RMS 的大小	0.37 ps/nm·km

对“差的”光纤($1 \text{ ps/km}^{1/2}$)的示范性计算表明：

有色色散项	17 ps/nm·km
一阶 PMD 系数	$1 \text{ ps/km}^{1/2}$
二阶 PMD 系数	0.6ps/nm·km
交叉项 RMS 的大小	3.7 ps/nm·km

PMD 的二阶系数可根据“二阶偏振模式色散：在模拟和数字传输上的影响”一文(IEEE. of Lightwave Tech, JLT-16, NO 5 pp 757-771, May 1998)中所描述的理论来计算，该文通过引用结合在此。

$$\text{二阶 PMD 系数} = (\text{一阶 PMD 系数})^2 / 1.73 \quad (2)$$

方程 2 仅计及最后的有色色散的均方根(RMS)。计算交叉项为：

$$\text{交叉项} = 17^{1/2} \times (\text{一阶 PMD 系数})^{1/2} \times 1.16 \quad (3)$$

所以，可理解：为对具有高 PMD 系数的光纤，在由于通过二阶 PMD 项和交叉项积累的有色色散而仅采用固定的有色色散补偿时，PMD 可能造成一个问题。这样，当光纤的 PMD 系数变得较大或当比特速率达到较高时，就会导致有高值的未补偿的色散。

从这个分析，可以计算到即使采用当今生产的最佳光纤(假设 $\sim 0.025 \text{ ps/km}^{1/2}$)，在没有实行动态的有色色散补偿来消除二阶 PMD 和交叉项的效应的情况下，对 10Gb/s 传输，传播距离多半是限于 $\leq 3000\text{km}$ (色散 $< 0.3 \times 100\text{ps}$)，而对 40Gb/s 则是 $\leq 200\text{km}$ (色散 $< 0.3 \times 25\text{ps}$)。

许多文献论文试图解释较高阶色散补偿的问题。一个方法是采用多部段

PMD 补偿器。这样一种方法多半是昂贵的，且也将受限于可达到的可变有色色散的数量。另一方法是选择地添加专用的线性调谐脉冲到脉冲的各个部分，并通过具有校正标记的高色散元件传送该脉冲来压缩该脉冲。这样一种方法可计及所有类型的色散。但是，这样一种方法由于需要时钟恢复和相位调制，所以多半是昂贵的，而且也仅能在接收器终端才可使用。而且，如果剩余色散是低的，它才能工作。

对色散补偿系统留下的需要，不仅要对 PMD，而且还对有色色散和较高阶色散作动态的调节。已提高的长途通信系统的需要，诸如对温度起伏补偿和在不久的将未展望的由于光的添加/除去系统引起的可变路程长度的可能性的需要，要求一个动态的且在成本上是现实的补偿系统。

发明内容

本发明涉及一种较高阶色散补偿器，用于调谐一具有第一偏振模式色散组份，二阶偏振模式色散组份，和可变有色色散组份的信号。

该补偿器包括调节偏振控制信号的一阶偏振模式色散组份的第一调谐元件和调节二阶偏振模式色散组份以及偏振控制信号的可变有色色散组份的第二调谐元件。该补偿器还可包括把任意偏振的入射光转变为具有所需偏振态的偏振控制信号的偏振控制器。

在一实施例中，第一调谐元件可包括差动较高阶延迟线，该线包括耦合到接收偏振控制的信号的偏振光束分离器/组合器，此处该偏振光束分离器把偏振控制的信号分离成为第一偏振分量和第二垂直的偏振分量。具有调谐到反射这第一偏振分量的第一光栅和第一参考反射点的第一波导被光耦合到接收这第一偏振信号。具有调谐到反射这第二偏振分量的第二光栅，并有第二参考反射点的第二波导被光耦合到接收这第二偏振信号。第一波导具有调谐到在第一参考反射点反射这第一偏振信号的第一调谐脉冲光栅。第二波导被光耦合到并被对准到分离器的第二输出口。第二波导具有调谐到反射这第二偏振信号的第二调谐脉冲光栅，并有第二参考反射点。根据本发明的该实施例，光栅的调谐脉冲可以是线性的、非线性的、或可具有较复杂的空间关系。对某些应用，光栅的长度可以是等于或大于 1 米。

在这第一示范性实施例中，两个光栅都是用线性调谐脉冲来完成一阶 PWD 补偿和固定有色色板补偿的布拉格光栅。第一调谐装置诸如通过在力学上使光

栅处于受力状态来调谐光栅中的一个光栅。

在其它的实施例中，两光栅都可用非线性调谐脉冲来完成除了固定和可变有色色散的这两个补偿之外，还要完成一阶和二阶 PMD 的补偿。另外，可选择更为复杂的调谐脉冲图形来完成更为专门的即较高阶(三、四等阶)的补偿。

第一光栅和第二光栅这两者都可具有基本上相同的反射外形和基本上相同的调谐脉冲率；以及第一和第二反射点可在基本上相同的光路长度处。或者，在通过调谐装置调节之前，光栅的反射点中的一点可能在比第二反射点离分离点较短的光路长度处。

第二调谐元件可包括具有第三非线性调谐脉冲的布拉格光栅和调谐该第三光栅的第二调谐装置的第三波导。在这第三非线性调谐脉冲布拉格光栅中的调谐脉冲值的范围可决定可变有色色散补偿的相应范围。

该系统还可能包括静态有色色散元件，它包括对应于待补偿固定有色色散量的第一和第二光栅平均调谐脉冲的速率。

可采用环行器来规定光信号的路线。一实施例包括四通的环行器，该环行器具有光耦合到接收偏振控制信号的输入口，光耦合到把控制器输出信号传输到差动偏延迟线和接收该延迟线输出的第一再环行口，和光耦合到把延迟线输出信号传输到第二调谐元件和到第二调谐元件输出信号的第二再环行口，以及充耦合到传输最后输出信号的输出口。

在另一示范性实施例中，第一调谐元件和第二调谐元件包括耦合到接收受偏振控制的信号的偏振光束分离器，在这里，该分离器把受偏振控制的信号分离成第一偏振分量和第二垂直的偏振分量。第一波导被光耦合到接收第一偏振信号，该第一波导具有调谐到反射这第一偏振信号并具有第一参考反射点的第一非线性调谐脉冲光栅。第二波导被光耦合到接收第二偏振信号，该第二波导具有调谐到反射这第二偏振信号并具有第二参考反射点的第二非线性调谐脉冲光栅。第一调谐装置同时调谐第一和第二光栅这两者，而第二调谐装置则与第一光栅无关地来调谐第二光栅。补偿器可具有静态有色色散补偿元件，其中第一和第二光栅的平均调谐脉冲的速率对应于待补偿的固定有色色散的量。

在这个实施例中，一阶偏振模式色散补偿元件包括第二调谐装置和第二光栅，而一阶偏振模式色散通过和第一光栅分开地调谐第二非线性调谐脉冲光栅而取得的、二阶偏振模式色散补偿和可变有色色散补偿元件包括第一和第二光栅以及第一调谐装置，而可变有色色散补偿和较高阶偏振模式色散补偿则通过

一致地调谐第一和第二光栅而取得的。

在还有另一实施例中，较高阶色散补偿器包括耦合到接收输入信号的有色色散补偿器；光耦合到该有色色散补偿器的相位调制器，其中该相位调制器有选择地发出部分的调谐脉冲；以及耦合到接收该相位调制器信号的动态色散元件。该可调动态色散元件包括具有调谐到反射这受偏振控制的信号的第一非线性调谐脉冲光栅，并具有第一参考反射器的第一波导；以及调谐该第一光栅的第一调谐装置。

该补偿器可包括光耦合到判断由光栅反射的信号并相应地提供控制信号到调谐装置的信号分析器。该信号分析器还可提供控制信号到相位调制器。

这波导是示范性的光纤。在具体的实施例中，该波导可以是光单模维持偏振(PM)的光纤，起偏振的(PZ)光纤，和/或做成某种形状的光纤。

该补偿器要以是适应的补偿器，它还包括把控制信号提供到至少调谐装置中之一的信号分析器。

该色散补偿器可至少部分集成到诸如铌酸锂的集成光学芯片中。该波导可以是信道波导。另一调谐装置可用声学的，热学的，电-光学的，或力学的方法来调谐光栅。

根据本发明一种用于对入射光通信信号的较高阶色散的补偿方法对一阶偏振模式色散信号作补偿；对二阶偏振模式色散信号作补偿；以及可可变有色色散信号作补偿的步骤。另外，该方法可包括对固有色色散作补偿及控制入射信号的偏振的步骤。在补偿步骤之后，可监控这信号，且根据监控来调节补偿的程度。

对一阶偏振模式色散信号作补偿的步骤可包括控制该信号的偏振；将该信号分离成第一和第二垂直偏振分量；在固定的线性调谐脉冲光栅中，反射这第一偏振分量；在已调谐的线性调谐脉冲光栅中，反射这第二偏振分量；以及重新组合这第一和第二偏振分量的步骤。

对二阶偏振模式色散的信号作补偿的步骤可包括在已调谐的非线性调谐脉冲光栅中反射该信号的步骤。

在本发明的一特定的实施例中，该方法包括如下步骤：

对二阶偏振模式色散的信号作补偿的步骤可包括在已调谐的非线性调谐脉冲光栅中反射该信号的步骤。

在本发明的一特定的实施例中，该方法包括如下步骤：

• 调节入射的光通信信号的偏振态来准确地使通信信号的偏振基本态对准到补偿器系统的偏振基本态；

• 在分离点把通信信号分离成第一和第二垂直的偏振基本态；

• 把偏振态的第一态传输到具有第一非线性调谐脉冲光栅的第一波导，该光栅具有第一参考反射点；

• 把偏振态的第二态传输到具有第二非线性调谐脉冲光栅的第二波导，该光栅具有基本类似于第一调谐脉冲光栅的调谐脉冲的图形，并具有第二参考反射点；

• 通过改变沿着光栅的第一和第二反射点的位置，可调节地改变第一和第二反射的有色色散；

• 可调节地改变在第一与第二反射点和分离点之间的相应光路长度来补偿在偏振的第一和第二垂直态之间的偏振色散；以及

• 把第一和第二偏振态重新组合成输出信号。

本方法还包括对输出信号质量取样的步骤。采用这质量读数，本发明可包括如下步骤：

• 适应地调节入射信号的偏振态和相对于分离点的第二反射点的光路长度，响应输出信号的质量而对一阶偏振模式色散作补偿，和/或

• 适应地调节相对于分离点的第一和第二反射点中的一个或两个，以便对在信号中的色散作补偿。

在可调节地改变离第二反射点的光路长度的步骤之前，至少光栅中的一个可这样来调节，使得第二反射点是在一所希望的点上，例如，象第一反射点一样，在离分离点基本上相同的光路长度或不同的光路长度。其差可根据在第一和第二垂直偏振态之间一期望的偏振色散来选择。

在根据本发明用于对光通信信号的较高阶色散作补偿的方法的另一实施例中，该方法包括下列步骤：

• 把通信信号分离成第一和第二垂直基本偏振态，

• 把第一偏振态传输到具有第一线性调谐脉冲光栅的第一高双折射光波导，该第一光波导在第一光路长度处具有第一反射点；

• 把第二偏振态传输到具有第二线性调谐脉冲光栅的第二可调高双折射光波导，该第二光波导在第二光路长度处具有第二反射点；

• 把这第一和第二偏振态重新组合成输出信号；

- 把这输出信号传输到具有非线性调谐脉冲光栅的第三高双折射光波导，其中该光栅具有一反射点；
- 可调节地改变第二线性调谐脉冲光栅的第二光路长度，以对在第一和第二垂直偏振态之间的偏振色散作补偿；以及
- 可调节地改变在第三光栅中的光路以对在输出信号中的较高阶色散作补偿。

第二调谐脉冲光栅可具有基本上类似于第一调谐脉冲光栅的调谐脉冲图形，该第二光栅具有与第一反射点一样的基本上在分离点相同的光路长度上的第二反射点。再一次，可对输出信号取样，入射信号的偏振态和第二反射点的光路长度可响应输出信号的质量作调节。

附图简述

图 1 是对根据本发明动态的，较高阶色散补偿方法的组成部分流程示意图；

图 2 是根据本发明动态的，较高阶色散补偿系统的第一实施例的代表示意图；

图 3 是根据本发明动态的，较高阶色散补偿器的第二实施例的代表示意图；

以及

图 4 是根据本发明动态的，较高阶色散补偿器的第三实施例的代表示意图。

具体实施方法

本发明的目的在于用于较高阶色散补偿(HDC)的一种方法和一种系统，它可对由有色色散，偏振模式色散，较高阶偏振模式色散，和可变有色色散组成的较高阶色散效应同时作出补偿，而又把光损耗和在面上的设备减到最小。较高阶色散补偿被规定为包括有色的，偏振模式，二阶偏振模式，和可变有色色散补偿。

本发明的一示范性实施例涉及一种适应的较高阶色散补偿器系统。该系统包括偏振控制器，差动偏振延迟单元，动态有色色散补偿元件，和固定有色色散元件。在本发明的各种形式中，这些工作是由两个，三个，或四个元件来完成的。例如，在一实施例中，所有这四个工作可由分离的元件来完成，而在另一实施例中，除了偏振控制之外的所有工作是由一个补偿元件来完成的。

象布拉格光栅(FBG)这样的调谐脉冲反射型光栅被用于在垂直的偏振之间

产生时间延迟。在本发明的一示范性实施例中，在垂直的偏振之间，至少用两个调谐脉冲布拉格光栅来产生时间延迟，同时包括根据光栅的调谐脉冲和光栅的调谐水准的有色色散的校正量。一种信号分析法指出特定的色散组份的水准，或所有色散组份的水准，而一控制方案将采用这信号分析结果去优化该系统。

待补偿的信号可包括第一偏振模式色散组份，二阶(和/或较高阶的)偏振模式色散组份，可变(即动态)有色色散组份，和/或静止(即固定)有色色散组份，和/或静态(即固定)有色色散组份。图 1 是根据本发明用于对信号提供较高阶色散补偿的示范性实施例中诸步骤的流程图。入射信号 142 穿过偏振控制器 140，它把任意入射的偏振光转换到具有所需偏振态的受到控制的输出信号 144。该受控的输出信号经过把总的脉冲失真减到最小的固定有色色散补偿器 112 出去。所引入的负有色色散量与逐步通向补偿器的期望连接长度有关。对所讨论的多个实施例，由于调谐脉冲光纤布拉格光栅的使用，这个功能将随下面的步骤同时完成。

信号的输出是通过一阶 PMD 补偿器 114 发送的。然后，最后的信号通过可变有色色散补偿器 116 发送，它除了对任意剩余二阶 PMD 作补偿外，还对任何动态有色色散作补偿。最后，该已补偿的最后输出信号 148 通过光信号抽头 118 受到信号分析模块 120 监控，该模块把控制信号 128 输出到诸如偏振控制器 140 和合适的色散补偿元件 110 的控制元件。

对真空波长为 λ 的光信号作出最强反射的光栅周期 Λ 由下式给出：

$$\Lambda = \lambda / 2n \quad (4)$$

此外 n 是波导的有效折射率。因此，通过控制 $\Lambda(x)$ ，就可控制在光栅中信号脉冲的反射点，从而可控制传播时间。而且，传递给从周期为 $\Lambda(x)$ 的调谐脉冲光栅被反射信号的有色色散，(该周期沿着该光栅具有相应的周期梯度 $d\Lambda/dx$ 或“调谐脉冲”由下式给出

$$D = \left(C \times \frac{d\Lambda}{dx} \right)^{-1} \quad (5)$$

通过正常的设计和调谐这光栅的周期 $\Lambda(x)$ ，人们可控制在光栅中由脉冲经受到的有色色散和总的延迟这两者。

色散测量技术所用的类型和数目可根据情况而变化。图 1 示出采用了三种技术：DOP 测量法 122，次谐波滤波 124，和/或频率调制 126。对同时采用两

种或更诸如偏振监控程度和电的次谐波频率滤波的测量技术可能会有优点的。不过，这样可能会增加补偿器的成本，因而希望仅采用一种技术。所示出的其它测量技术或这些技术的变型技术可能是有优点的。某些例子是：横向滤波；带有扫描滤波器的 DOP 测量法；或使用比特误差率测试器的直接目测分析或数字通信分析器。前馈和后馈测量技术这两者都可被合适地用来分析信号。

从图 1 中所示实施例的某些补偿元件可与各种前馈方法与相位调制补偿方法结合起来以得到额外的功能度。

图 2 是根据本发明较高阶补偿系统 200 的第一实施例的示意图，此处二阶色散和一阶色散是通过分离的补偿元件作补偿的。通信信号 242 通过偏振控制器 240 进入该系统，其中入射信号 242 的偏振态是被修正过的。

然后，最终的控制信号 244 通过第一环行器 250 出去。环行器 250 具有耦合到接收控制信号 244 的输入口，光耦合到把控制信号传输到包括，(在本示例中)，差动延迟线 260 的一阶 PMD 和固定有色色散补偿元件的再环行口(并为该反射信号提供返回路径)，以及耦合到把反射信号 246 传输到另一环行器 252 的输出口。

差动延迟线 260 包括偏振光束分离器/组合器 262，第一固定延迟元件 270，以及第二可调延迟元件 280。偏振光束分离器 262 把控制信号分离成两个垂直的偏振分量。一个偏振分量向下传输到第一固定延迟元件，它示范性地包括具有第一线性调谐脉冲布拉格光栅 274 的第一对准的波导 272。第二偏振组份向下传输到第二延迟元件 280，它示范性地包括具有第二线性调谐脉冲布拉格光栅 284 的第二波导 282。可选择更为复杂的调谐脉冲图形来完成更具体的即较高阶(三阶，四阶等)的补偿。波导可以是双折射的，从而抑制在两个偏振模式各个之间的耦合。差动延迟元件包括第一波导和第二波导。这波导和分离器输出口是光耦合的并通过匹配它们的纤芯和偏振轴来对准。

信号在相应于信号波长的光栅 274 和 284 内部的反射点处被反射。这个点在第二波导 282 中可用调谐装置 286 调谐光栅 284 来改变。

调谐装置 286 可以通过改变光栅元件的有效周期以改变信号的参考反射点来可变地调节相对于分离点的一个或两个参考点的光路长度。用于调谐光栅周期的装置可包括：施加轴向力学张力以伸张或压缩光栅，施加电场用电-光来控制光栅的折射率，施加热量用热-光来控制光栅的折射率，或采用其它在本领域中所熟知的调谐装置诸如用声学和/或力学的方法(例如，通过伸张或压缩

光栅)。

波导 272 和 282 是示范性的光纤。在具体的实施例中, 波导 272 和 282 可以是光单模的维持偏振(PM)光纤, 起偏振的(PZ)光纤, 和/或做成某种形状的光纤, 诸如在一般拥有的, 待审批中的美国申请第 09/515,187 号, 和美国专利第 6,459,838 号中所描述的, 对这两文通过引用都结合在此。

在反射之后, 当信号回到环行器 250 时, 此时在这两个光栅反射点之间的光路长度差将对一阶 PMD 作补偿, 而因为这两个光栅具有对应于待补偿的固定有色色散量的预先确定的调谐脉冲率, 所以对固定的有色色散作补偿。因此, 第一光栅 274 和第二光栅 284 的平均调谐脉冲率决定固定有色色散补偿的量。

在本示范性实施例中, 第一光栅和第二光栅这两者都有基本上相同的反射分布和基本上相同的调谐脉冲率; 以及第一和第二参考反射点基本上是在相同的光路长度处。

或者, 在通过第一调谐装置调节之前, 第一光栅的第一反射点可在比第二反射点离光束分离器的分离点较短的或较长的光路长度上。相对于分离点的第一和第二参考反射点的初始位置(即, 该区段的光路长度), 可对特定的应用作修整。在不超过调谐装置范围的期望 DGD 的应用中, 该第一第二参考反射点可在相对于分离点基本上相同的光路长度处。或者, 某一参考反射点可被偏离(即可具有不同的光路长度)以对所有的或部分的一阶 PMD 作出补偿。

本发明不同的部件, 可被集成为诸如铌酸锂(LiNbO₃)芯片上的一包含双折射波导的集成光器件。在一实施例中, 把偏振控制器和差动延迟集成到单个 LiNbO₃ 的芯片上。在另一实施例中, 可把在波分复用(WDM)系统中来自相邻信道的偏振色散补偿器集成到单一 LiNbO₃ 的芯片上。显然, 也可采用基于其它材料系统的集成光器件。

于是, 信号 246 通过第二环行器 252 出来, 它对来自可变有色, 较高阶 PMD 色散补偿器 264 反射之后的信号提供回归的路径。补偿器 264 包括第三延迟元件 290, 它包括含有已调谐的第三光栅 294 的波导 292。在这例子中, 光栅 294 是被非线性地调谐的。

示范性地, 波导 272、282 和 292 是单模的光纤。在一示范性实施例中, 这些光纤是维持偏振的光纤。通过合适地使用调谐装置 296 调谐光栅 294, (诸如通过施加张力或温度梯度)将对可变有色和较高阶偏振模式色散这两者都作动态补偿。必须要考虑在后面的区段中由非线性调谐脉冲光栅 294 所感生的平

均有有色色散来调节在线性调谐脉冲光栅 274 和 284 的调谐脉冲量。于是，在非线形调谐脉冲波导光栅中调谐脉冲值的范围将决定可变有色色散补偿的相关范围。

由于在写入不同的调谐脉冲和带宽的光栅中的灵活性，所示三个光栅结构可使 PMD，有色，和可变有色散补偿的量有一个很灵活的范围，而又不改变配置。

回到参考图 2，可把光轴头耦合器耦合到环形器的输出口以把输出信号的采样提供到分析器 220。分析器 220 对延迟线输出信号的质量作评估，并把控制信号提供给编振控制器和差动偏振延迟单元。来自对输出信号 248 采样的信号分析模块 220 的控制信号 228 传到偏振控制器 240，用于线性调谐脉冲波导光栅 284 的调谐装置，和已调谐的非线性调谐波导光栅 294。正如前面提到的，较佳的探测方法可根据情况而定。

在图 2 中的色散补偿元件的配置是示范性的。例如，人们可把可变有色/较高阶 PMD 补偿器 264 放在一阶 PMD/固定有色色散补偿器 260 之前。如果这已调谐的非线性调谐脉冲波导光栅是已写入维持偏振光纤 (PMF) 的光纤布拉格光栅 (FBG)，由于已添加的一阶 PMD 补偿，人们还可在可变有色/较高阶 PMD 补偿器 264 之前使用第二偏振控制器 (未示出) 以达到更高的功能度。还有，可用单个四端口的环行器来代替两个三端口的环行器 250 和 252，可省去一个元件。

在图 3 中示出另一补偿器 300，它能完成动态较高阶色散补偿。在补偿器 300 中，信号首先通过固定色散补偿器 312，使得只有一阶 PMD 和较高阶色散组份 (二阶 PMD 和可变有色色散) 保留着。于是，它经过包含相位调制器 380 的一阶和二阶 PMD 与动态有色色散补偿器和包含非线性调谐脉冲布拉格光栅 394 的波导 392 出去。相位调制器 380 准时把调谐脉冲 [ps/nm] 有选择地加到部分信号去。相位校正模块 382 为相位调制器提供控制信号 327。相位校正模块 382 的目的在于把由该模块提供的调谐脉冲的相位和周期与入射信号合适的相位和周期对准，例如一 NRZ 编码的信号。于是，该调谐脉冲信号经过环行器 350 出去，并进入包含非线性调谐脉冲布拉格光栅 394 的波导 392。非线性调谐脉冲布拉格光栅 392 由调谐装置 396 来调谐，使其具有正常的色散 [ps/nm] 水准。施加到部分信号的调谐脉冲和由已调谐光栅 394 给予的色散的组合将准时具有压缩脉冲边缘的效果，从而对任何剩余的和/或较高阶色散组份作补偿。

在从布拉格光栅 394 返回之后，信号 348 通过一输出再环行口离开环行器

350, 并被信号分析模块 320 取样。信号分析模块 320 把合适的控制信号供给到调谐装置 396 以适应地调谐非线性调谐脉冲光栅 394。由于相位调制器和色散的元件(非线性调谐脉冲 FBG)的组合对所有类型的色散作出补偿, 所以对信号分析的示范性选择物是次谐波滤波器。同样, 对这种补偿法的示范性位置是在连接物的接收端, 从这里对出现的电表示信号抽头。在这场合下, 在环行器 350 之后将会是一接收器, 使得信号 348 将是电信号而不是光信号。

这方法可结合其它元件来使用。例如, 可把一阶 PMD 补偿器与补偿器 300 连在一起使用以减少待补偿的偏振色散。这在与高的 PMD 连在一起以减少动态较高阶色散补偿器的必须补偿范围时应是非常有利的。

图 3 另一可替换的实施例, 将有信号分析模块 320 来控制已调谐的光栅 392 和相位校正模块 380 这两者来优化通过调谐器加到信号的调谐脉冲上的和在光栅中经受到的色散的组合性能。

另一示范性实施例将没有固定有色色散补偿元件 312 或采用一个基本上对固定有色色散补偿元件 312 的固定补偿的或多或少的合宜之值。如果是这样, 可把可调谐色散元件 394 的有关范围调节到正常的水平以对所有的色散项作补偿。就是说, 可把可调谐色散元件 394 调节到对固定的和可变的有色色散作补偿, 且可把相位调制器 380 调到能使已添加的相位和色散元件 394 的组合可对余下的色散作补偿。这可能在补偿程序中给予全部补偿系统以更加多的灵活性和范围。

另一示范性实施例将有已写入到例如维持偏振的光纤的高双折射波导中的非线性调谐光栅 394, 且还包括偏振控制器以控制进入非线性调谐脉冲光栅 394 的信号的偏振。这实施例可能被实现前面描述的两种方法中的一种一用或者不用固定有色色散补偿元件 312。在偏振控制和非线性调谐脉冲希拉格光栅组合的场合下出现的固定有色色散补偿元件 312, 可被用于对所有的或部分一阶偏振模式色散作补偿。固定有色色散元件 312 将对在入射信号中出现的固定有色色散作补偿。于是, 相位调制器和色散的瞬时值的组合可被优化来对余下的色散组份作补偿。在固定有色色散补偿元件 312 不出现的场合下, 对通过相位调制和色散元件组合的待补偿的余下项也将包括固定有色色散项。

图 4 示出根据本发明补偿系统 400 的另一实施例。系统 400 便于使较高阶色散补偿概念以较少的级集成。输入信号 442 通过偏振控制器 440 进入系统 400, 该控制器把入射的信号偏振态转换成具有所需偏振态的信号 444。在信号

444 通过环行器 450 的再环行口出去之后，它被光耦合到延迟组件 460 的偏振光束分离器/组合器 462。该延迟组件还包括第一延迟元件 470 和第二延迟元件 480。信号 444 被分离成它的垂直的分量，每个分量被传输到分离器/组合器 462 的输出口。这两个信号同时横越过第一延迟元件 470 和第二延迟元件 480，第一延迟元件包括包含第一非线性调谐脉冲光栅 474 的第一波导 472 和包含第二非线性调谐脉冲光栅 484 的第二波导 482，而第二延迟单元 480 则包括包含第二非线性调谐脉冲光栅 484 的第二波导 482。

第一光栅 474 和第二光栅 484 具有同时控制这两个光栅的调谐装置 490。第二光栅 484 具有独立调谐光栅 484 的附加调谐装置 492。固定有色色散补偿是通过把调谐脉冲的正确平均值写入非线性调谐脉冲波导光栅 474 和 484 来完成的。可变有色色散补偿和较高阶 PMD 补偿是通过一致地调谐 474 和 484，例如，改变它们两者的一相同量的温度来取得的。一阶 PMD 补偿是通过分开地调谐第二非线性调谐脉冲光栅 484，例如通过使它处于受力状态来取得的。可以采用调谐的类型并不限于温度或受力调谐，且每一个都可用于一波调谐或分开调谐。

从光栅反射之后，已补偿的信号 446 由偏振分离器组合器 462 马上重新组合，并通过环行器 450 继续返回到该环行器的输出口。本发明的一示范性实施例它包括光抽头耦合器 452，且在环行器 450 后面的信号分析模块 420。根据所选的检测方法和是否采用前馈或后馈的算法，抽头耦合器 452 可放在系统不同的地方。信号分析模块 420 把控制信号 428 提供到调谐装置 490 和 492，以及到偏振控制器 440。

上述的方法和系统可能导致在信号的两偏振分量之间感生的少量剩余固定有色色散。对于少量的一阶 PMD 来说，这多半是能接受的，正如基于光纤布拉格光栅的一示范性系统中在下面的计算中所示的。

固定有色色散量:	700 ps/nm
可变有色色散量:	-500 ps/nm 到 +500ps/nm
实际的光栅调谐脉冲范围:	200 ps/nm 到 1200 ps/nm(或 50 pm/mm 到 8.33 pm/mm 周期调谐脉冲)
光栅长度(实例):	1 米
单位长度调谐脉冲速度改变:	10 ps/nm 每 cm
DGD 范围(实例):	100 ps(或 1 cm 反射点变化)

光栅调谐脉冲速度改变 每 DGD 最大范围	10 ps/nm
--------------------------	----------

在一示范性系统中，如果入射一阶(PMD(DGD))是最大期望值为 100ps，则上述设计的光栅可优先地在信号的两垂直偏振分量之间添加 10 ps/nm 的剩余有色色散。由于 PMD 具有随时间的麦克斯威分布，使得如果最大期望值为 100ps，大多数时间所看到的实际量分更加少些，所以这个量通常应是更加低些。而且，增加光栅长度或改变设计，要不然可进一步减少这数量。上面的结构将导致用于对任何类型色散或在紧密方式的因素中色散类型的任何组合作补偿的一种极为灵活、低损耗的方法。

在图 4 的示范性实施例中，波导 472 和 482 是由维持偏振的光纤制成的。在一可替换的实施例中，可把该波导集成在诸如铌酸锂芯片的集成光学芯片上。另外，把诸如偏振分离器/组合器 462 和偏振控制器 440 等更多的补偿系统器/组合器 462 和偏振控制器 440 等更多的补偿系统部件结合到集成光学芯片中，可能是有好处的。对图 4 的一可替换的配置可把偏振控制器 440 放在环行器 450 和偏振分离器/组合器 462 之间的位置上。这将方便某个或所有这些部件一起集成在一起光学芯片上。例如，一示范性实施例可把偏振控制器 440，偏振分离器/组合器 462，和波导 472 与 482 集成在一块基底。

在本领域中的技术人员将理解本发明可用在需要较高阶补偿的种种光学应用中。尽管本发明已用对较佳诸实施例的参考来描述，但本发明可在不背离本发明范围的情况下，以其它的具体形式来实现。因此，应该知道在这里所描述和图示说明的诸实施例仅是示范性的，不能把认为是对本发明范围的限制。根据本发明范围可作出其它的变化和修改。

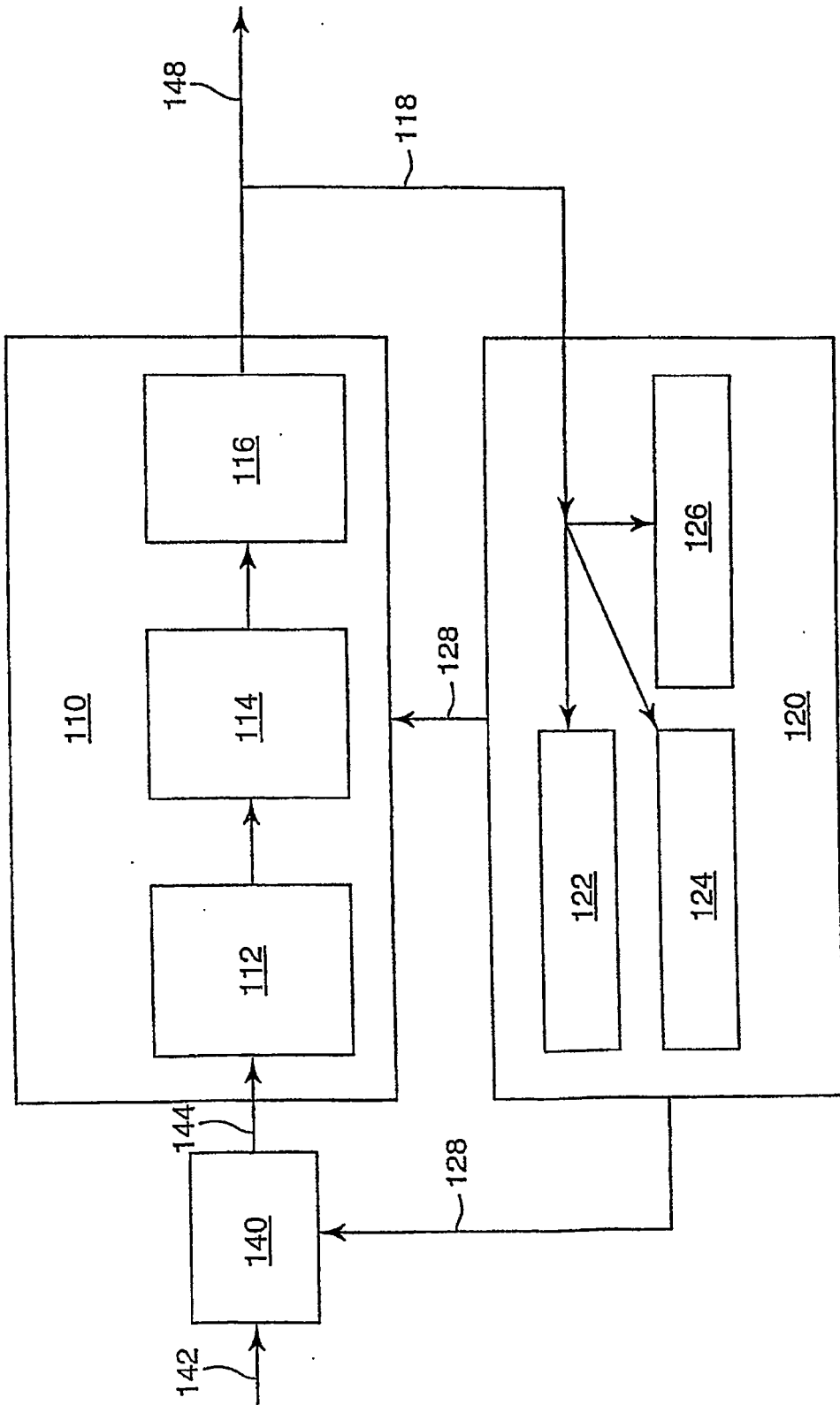


图 1

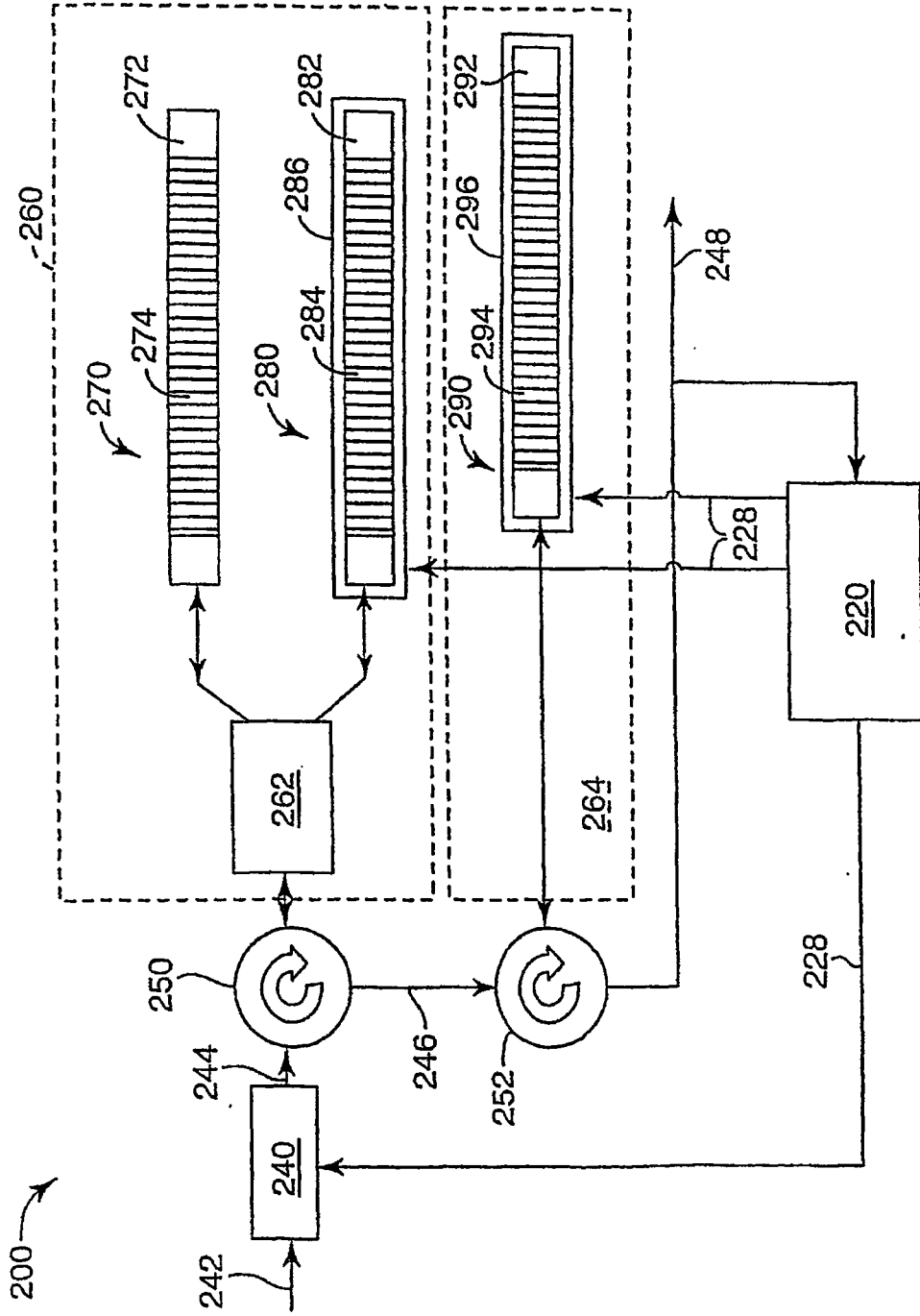


图 2

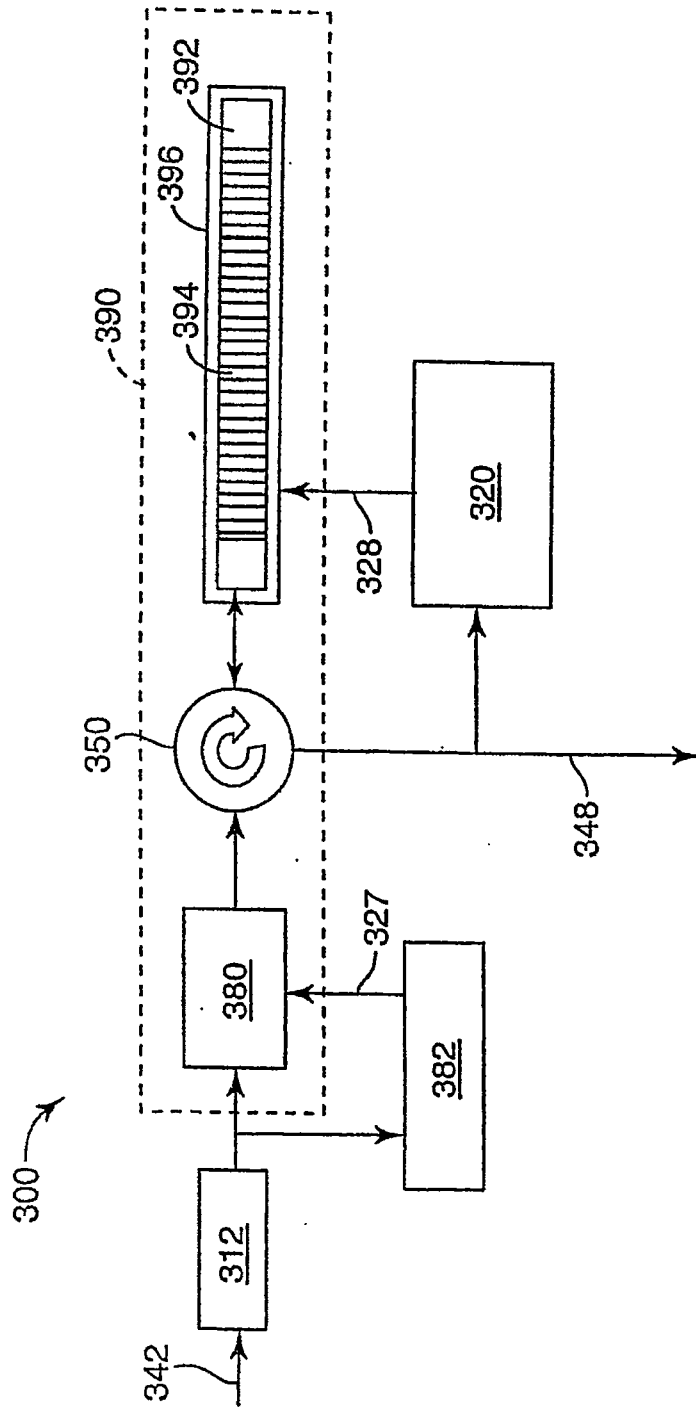


图 3

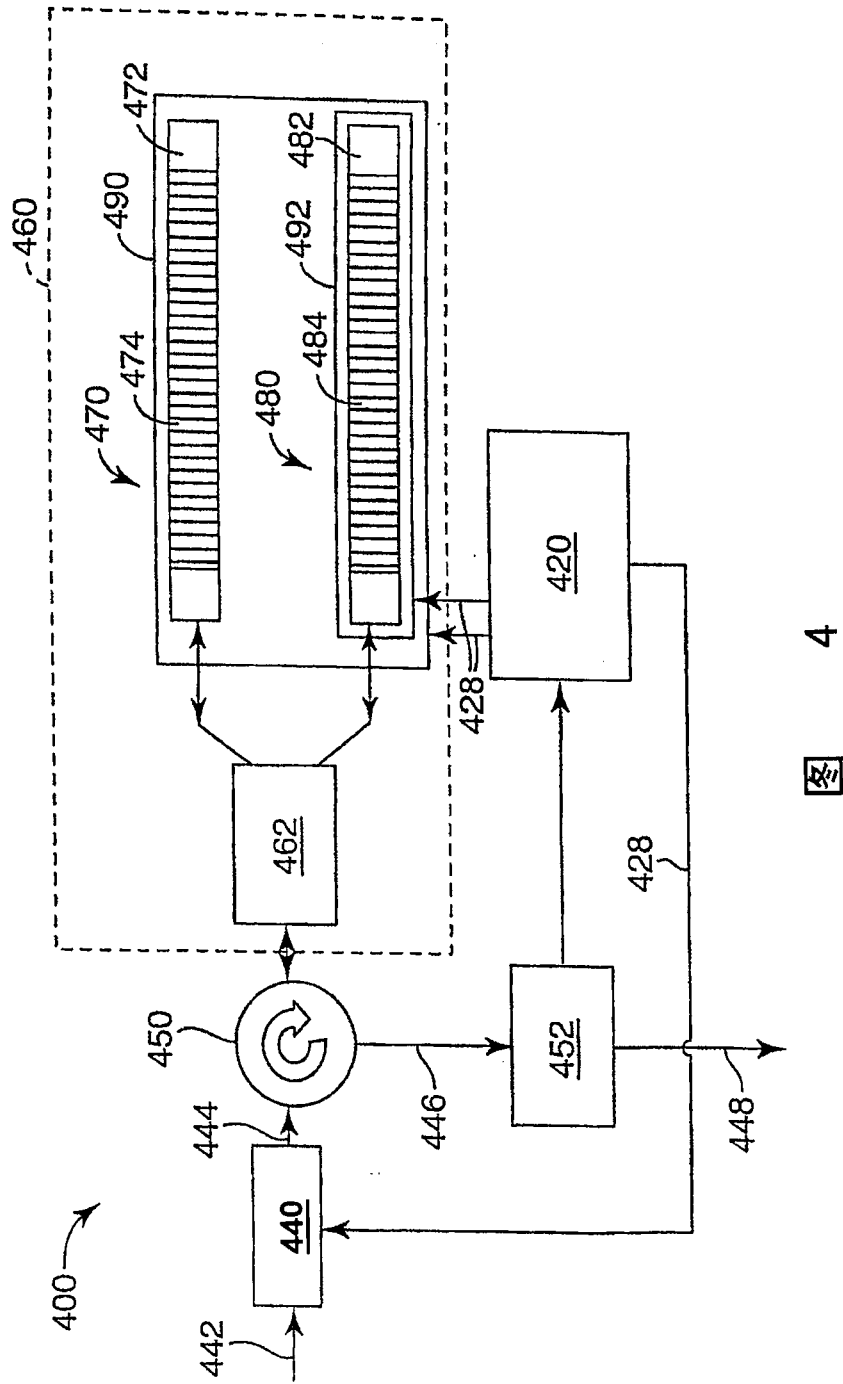


图 4