



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112272060 A

(43) 申请公布日 2021.01.26

(21) 申请号 202011103822.4

(22) 申请日 2020.10.15

(30) 优先权数据

16/675,375 2019.11.06 US

(71) 申请人 谷歌有限责任公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 周翔 刘红

(74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
责任公司 11219

代理人 周亚荣 邓聪惠

(51) Int.Cl.

H04B 10/61 (2013.01)

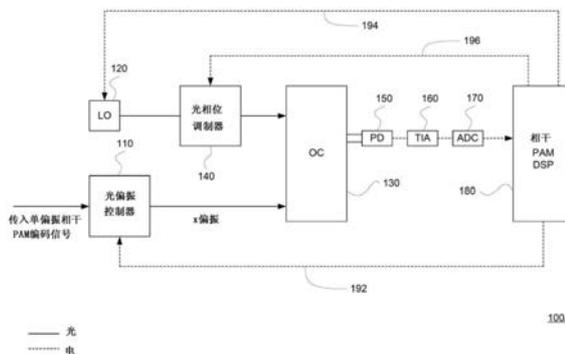
权利要求书2页 说明书18页 附图15页

(54) 发明名称

使用混合信号处理的相干接收器

(57) 摘要

本公开涉及使用混合信号处理的相干接收器。提供一种接收器系统,所述接收器系统用于接收相干脉冲幅度调制(PAM)编码信号。所述接收器系统可以包括被配置成调制所接收到的相干PAM编码信号的偏振的光偏振部件。所述接收器系统还可以包括数字信号处理器(DSP),所述DSP被配置成使用第一控制回路在所接收到的相干PAM编码信号与所述LO信号之间执行偏振恢复,并且使用第二控制回路在所接收到的相干PAM编码信号与所述LO信号之间执行相位恢复。



1. 一种接收器系统,包括:
光偏振部件,所述光偏振部件被配置成调制接收到的相干脉冲幅度调制 (PAM) 编码信号的偏振;以及
数字信号处理器 (DSP),所述DSP被配置成:
使用第一控制回路在所述接收到的相干PAM编码信号与来自本地振荡器 (LO) 的LO信号之间执行偏振恢复;以及
使用第二控制回路在所述接收到的相干PAM编码信号与所述LO信号之间执行相位恢复。
2. 根据权利要求1所述的接收器系统,其中,所述DSP被配置成在电域中确定对所述接收到的相干PAM编码信号的偏振调整,并且所述光偏振部件被配置成在光域中将所述偏振调整应用于所述接收到的相干PAM编码信号。
3. 根据权利要求2所述的接收器系统,其中,所述DSP被配置成通过使所述LO信号与具有编码数据的所述接收到的相干PAM编码信号的偏振部分之间的差拍信号功率最大化来确定所述偏振调整。
4. 根据权利要求2所述的接收器系统,还包括:
低速电路,所述低速电路被配置成检测所述接收到的相干PAM编码信号的偏振部分的平均功率,其中,所述DSP被配置成通过使所述偏振部分的所述平均功率最小化来确定所述偏振调整。
5. 根据权利要求1所述的接收器系统,其中,所述光偏振部件是用于接收单偏振或双偏振相干PAM编码信号的光偏振控制器或用于接收双偏振相干PAM编码信号的光解复用器。
6. 根据权利要求1所述的接收器系统,还包括:
一个或多个光相位调制器,其中,所述DSP被配置成在电域中确定对所述LO信号的相位调整,并且所述一个或多个光相位调制器被配置成在光域中将所述相位调整应用于所述LO信号。
7. 根据权利要求6所述的接收器系统,其中,所述DSP被配置成基于插入在所述接收到的相干PAM编码信号中的已知导频数据符号来确定所述相位调整。
8. 根据权利要求6所述的接收器系统,其中,所述DSP被配置成在电域中确定对所述LO信号的频率调整,并且所述一个或多个光相位调制器被配置成在光域中将所述频率调整应用于所述LO信号。
9. 根据权利要求1所述的接收器系统,其中,所述DSP被配置成在电域中确定对所述LO信号的频率调整,并且所述本地振荡器被配置成在光域中将所述频率调整应用于所述LO信号。
10. 根据权利要求1所述的接收器系统,还包括:
波长解复用器,所述波长解复用器被配置成接收包括多个波长的相干PAM编码信号。
11. 根据权利要求1所述的接收器系统,其中,所述第一控制回路是偏振反馈控制回路,并且所述第二控制回路是相位反馈控制回路。
12. 根据权利要求1所述的接收器系统,其中,所述第一控制回路和所述第二控制回路是用于联合偏振和相位恢复的同一控制回路的部分。
13. 根据权利要求12所述的接收器系统,其中,所述用于联合偏振和相位恢复的控制回

路被配置成在所述接收到的相干PAM编码信号与所述本地振荡器之间引入 45° 偏振角。

14. 根据权利要求12所述的接收器系统,还包括:

联合的偏振分集和相位分集相干检测电路,其中,所述偏振分集相干检测电路与所述相位分集相干检测电路共用一个或多个公共电路元件。

15. 根据权利要求1所述的接收器系统,还包括:

双模式开关,其中,当所述双模式开关被设置成处于第一模式时,所述双模式开关被配置为用于接收相干PAM编码信号的光耦合器(OC),并且当所述双模式开关被设置成第二模式时,所述双模式开关被配置为用于接收强度调制直接检测(IM-DD)PAM编码信号的开关。

16. 一种接收器系统,包括:

偏振分束器,所述偏振分束器被配置成将接收到的相干脉冲幅度调制(PAM)编码信号分成两个偏振PAM编码信号;

两个混合器,所述两个混合器被配置成将所述两个偏振PAM编码信号中的每一个与本地振荡器(L0)信号组合;

模拟均衡器,所述模拟均衡器被配置成:

在所述接收到的相干PAM编码信号与所述L0信号之间执行偏振恢复;

在所述接收到的相干PAM编码信号与所述L0信号之间执行相位恢复;以及

数字信号处理器(DSP),所述DSP被配置成将均衡器系数提供给所述模拟均衡器以用于偏振和相位恢复。

17. 根据权利要求16所述的接收器系统,其中,所述模拟均衡器是 4×2 多输入多输出均衡器。

18. 一种方法,包括:

由接收器系统接收相干脉冲幅度调制(PAM)编码信号;

由所述接收器系统接收本地振荡器(L0)信号;

由所述接收器系统使用混合信号处理,使用第一控制回路在所接收到的相干PAM编码信号与所述L0信号之间执行偏振恢复;以及

由所述接收器系统使用混合信号处理,使用第二控制回路在所接收到的相干PAM编码信号与所述L0信号之间执行相位恢复。

19. 根据权利要求18所述的方法,其中,所述混合信号处理包括在光域中的处理和电域中的处理。

20. 根据权利要求18所述的方法,其中,所述混合信号处理包括在模拟域中的处理和数字域中的处理。

使用混合信号处理的相干接收器

技术领域

[0001] 本公开涉及使用混合信号处理的相干接收器。

背景技术

[0002] 在光网络中,发送器系统可以调制光信号以编码数据,并且接收器系统可以检测和解码调制后的光信号以恢复数据。强度调制/直接检测(IM-DD)脉冲幅度调制(PAM)系统调制载波信号的强度以编码数据。相反,相干PAM系统调制载波信号的光场的幅度以编码数据。相干正交幅度调制(QAM)系统调制两个载波信号的光场以编码数据,诸如两个载波信号的幅度和/或相位中的任一个或两个。

[0003] 在长程和城域网中,广泛使用了QAM系统。然而,对于低功率数据中心范围的光互连,QAM技术面临若干挑战。首先,QAM收发器可能与IM-DD PAM收发器不兼容,但是在数据中心中通常需要互操作性,因为数据中心网络通常是逐块升级的。其次,由于QAM收发器可能需要更高的偏置电压以用于调制,因此QAM系统可能比PAM系统使用更多的功率,并且偏振和相位恢复可能需要附加部件,诸如附加数字信号处理(DSP)功能块。第三,为了执行相位调制,QAM系统可能对所使用的激光器和调制器有更严格的要求,诸如速度、带宽、消光比等。

[0004] 现有的偏振分集和相位分集接收器系统可以接收和解码相干编码信号,诸如相干QAM或相干PAM编码信号。由于信号的性质可以在传输期间改变,因此一旦接收到信号,接收器系统就需要执行这些性质的恢复。例如,可以由偏振分束器(PBS)将接收到的相干PAM编码信号分成具有正交偏振的两个射束,诸如横电(TE)模式偏振光束和横磁(TM)模式偏振光束。可以将 90° 偏振旋转器内置到PBS中,以将TM模式偏振光束转换为TE模式偏振,使得PBS的两个输出均为TE模式偏振光束。为了方便起见,通过此文档,PBS的主偏振轴表示为x轴和y轴。此外,将原始TE模式偏振信号表示为“x偏振射束”,而将从原始TM模式信号转换的TE模式偏振信号表示为“y偏振射束”。

[0005] 然后,通过参考来自具有已知性质的本地振荡器(LO)的信号,对偏振射束中的每一个执行偏振和相位信息的恢复。在这一点上,光耦合器(OC)将LO信号分成两个射束,并且然后可能由两个相应的混合器在每个偏振相干PAM编码射束与两个LO射束中的一个之间执行干涉。例如,x偏振的 90° 混合器可以在x偏振射束与第一LO射束之间执行干涉,而y偏振的 90° 混合器可以在y偏振射束与第二LO射束之间执行干涉。由于LO的性质是已知的,因此可以分析来自每个干涉的所得波以确定每个偏振相干PAM编码射束的性质。

[0006] 由于干涉,两个混合器可能输出四个信号——针对两个偏振中的每一个的两个相位。然后,这四个信号分别通过将光信号转换成电信号的四个光电检测器(PD)和放大电信号的四个跨阻放大器(TIA)。在一些示例中,四个PD中的每一个可以是配置成消除共模噪声的平衡PD对。然后,放大后的电信号分别通过四个模数转换器(ADC)并转换成数字信号。一旦由PD/TIA将四个分开的信号从光的转换为电的,并且由ADC将其数字化,数字信号处理器(DSP)就可以在电域中提取幅度和相位信息以解码和恢复数据。

[0007] 尽管相干PAM系统可能使用传统的偏振和相位分集数字相干接收器系统,但是这种复杂的接收器系统对于恢复相干PAM编码信号可能效率不高。此外,传统的偏振分集和相位分集接收器系统与IM-DD PAM发送器系统不兼容。

发明内容

[0008] 本公开提供了一种接收器系统,其包括光偏振部件和数字信号处理器(DSP)。光偏振部件可以配置成调制接收到的相干脉冲幅度调制(PAM)编码信号的偏振。DSP可以配置成使用第一控制回路在接收到的相干PAM编码信号与本地振荡器(L0)信号之间执行偏振恢复;以及使用第二控制回路在接收到的相干PAM编码信号与L0信号之间执行相位恢复。

[0009] DSP可以配置成在电域中确定对接收到的相干PAM编码信号的偏振调整,并且光偏振部件可以配置成在光域中将偏振调整应用于接收到的相干PAM编码信号。DSP可以配置成通过使L0信号与具有编码数据的接收到的相干PAM编码信号的偏振部分之间的差拍信号功率最大化来确定偏振调整。接收器系统还可以包括低速电路,该低速电路配置成检测接收到的相干PAM编码信号的偏振部分的平均功率,其中,DSP可以配置成通过使偏振部分的平均功率最小化来确定偏振调整。

[0010] 光偏振部件可以是用于接收单偏振或双偏振相干PAM编码信号的光偏振控制器或用于接收双偏振相干PAM编码信号的光解复用器。

[0011] 接收器系统还可以包括一个或多个光相位调制器,其中,DSP可以配置成在电域中确定对L0的相位调整,并且所述一个或多个光相位调制器可以配置成在光域中将相位调整应用于L0信号。DSP可以配置成基于插入在接收到的相干PAM编码信号中的已知导频数据符号来确定相位调整。DSP可以配置成在电域中确定对L0信号的频率调整,并且所述一个或多个光相位调制器可以配置成在光域中将频率调整应用于L0信号。

[0012] DSP可以配置成在电域中确定对L0的频率调整,并且L0可以配置成在光域中将频率调整应用于L0信号。

[0013] 接收器系统还可以包括波长解复用器,该波长解复用器配置成接收包括多个波长的相干PAM编码信号。

[0014] 第一控制回路可以是偏振反馈控制回路,并且第二控制回路可以是相位反馈控制回路。

[0015] 第一控制回路和第二控制回路可以是用于联合偏振和相位恢复的同一控制回路的部分。用于联合偏振和相位恢复的控制回路可以配置成在接收到的信号与L0之间引入 45° 偏振角。接收器系统还可以包括联合的偏振分集和相位分集相干检测电路,其中,偏振分集相干检测电路与相位分集相干检测电路可以共用一个或多个公共电路元件。

[0016] 接收器系统还可以包括双模式开关,其中,当将双模式开关设置成处于第一模式时,双模式开关可以配置为用于接收相干PAM编码信号的光耦合器(OC),并且当双模式开关设置成处于第二模式时,双模式开关可以配置为用于接收强度调制直接检测(IM-DD)PAM编码信号的开关。

[0017] 本公开进一步提供了一种接收器系统,该接收器系统包括偏振分束器、两个混合器、模拟均衡器和DSP。偏振分束器可以配置成将接收到的相干PAM编码信号分成两个偏振PAM编码信号。两个混合器可以配置成将两个偏振PAM编码信号中的每一个与L0信号组合。

模拟均衡器可以配置成在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行偏振恢复,并且在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行相位恢复。DSP可以配置成将均衡器系数提供给模拟均衡器以用于偏振和相位恢复。模拟均衡器可以是4x2多输入多输出均衡器。

[0018] 本公开还进一步提供了:由接收器系统接收相干PAM编码信号;由接收器系统接收LO信号;由接收器系统使用混合信号处理,使用第一控制回路在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行偏振恢复;以及由接收器系统使用混合信号处理,使用第二控制回路在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行相位恢复。

[0019] 混合信号处理可以包括在光域中的处理和电域中的处理。混合信号处理可以包括在模拟域中的处理和数字域中的处理。

附图说明

[0020] 图1A和1B示出了根据本公开的各方面的针对单偏振信号的使用混合电和光信号处理的示例接收器系统。

[0021] 图2A和2B示出了根据本公开的各方面的针对双偏振信号的使用混合电和光信号处理的示例接收器系统。

[0022] 图3A和3B示出了根据本公开的各方面的针对具有多个波长的信号的使用混合电和光信号处理的示例接收器系统。

[0023] 图4A和4B示出了根据本公开的各方面的使用利用联合偏振分集和相位分集相干检测的混合电和光信号处理的示例接收器系统。

[0024] 图5A、5B和5C示出了根据本公开的各方面的可用于实现联合偏振分集和相位分集相干检测的示例1x2光偏振控制器。

[0025] 图6示出了根据本公开的各方面的使用混合模拟和数字信号处理的示例接收器系统。

[0026] 图7A和7B示出了根据本公开的各方面的使用混合信号处理的示例传输系统。

[0027] 图8是示出根据本公开的各方面的示例接收器系统的框图。

[0028] 图9是图示根据本公开的各方面的示例方法的流程图。

具体实施方式

[0029] 概述

[0030] 技术通常涉及使用混合信号处理的相干接收器系统。PAM系统可以用于数据中心范围的光互连。就互操作性而言,相干PAM发送器和IM-DD PAM发送器均可以使用相同类型的调制器,诸如马赫-曾德调制器(MZM)。为接收器系统提供混合信号处理。例如,接收器系统可以包括配置成调制接收到的相干PAM编码信号的偏振的光偏振部件。接收器系统还可以包括数字信号处理器(DSP),该数字信号处理器(DSP)配置成使用第一控制电路或回路在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行偏振恢复,并且使用第二控制电路或回路在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行相位恢复。

[0031] 关于偏振恢复,可以由DSP在电域中确定要进行的偏振调整,并且光偏振控制器可以在光域中对接收到的相干PAM编码信号进行这些偏振调整。例如,DSP可以通过使LO与具有编码数据的相干PAM编码信号的偏振部分之间的差拍信号功率最大化来确定反馈控制回

路中的偏振调整。可替代地，DSP可以通过使没有编码数据的偏振部分的功率最小化来确定反馈控制回路中的偏振调整。

[0032] 关于相位恢复，可以由DSP在电域中确定要进行的相位调整，并且一个或多个光相位调制器可以在光域中对LO信号进行这些相位调整。例如，DSP可以基于插入相干PAM编码信号中的已知导频数据符号来确定反馈控制回路中的相位调整。

[0033] 在一些情况下，代替独立的偏振和相位恢复控制回路或电路，可以使用单个控制回路或电路通过联合偏振分集和相位分集相干检测方法来执行偏振和相位恢复。在这一点上，可以使用1x2光偏振控制器来实施光偏振部件。1x2光偏振控制器可以配置成将偏振调整应用于相干PAM编码信号以在调整后的PAM编码信号与LO之间引入45°的偏振角。可以在调整后的相干PAM编码信号与两个相位分集LO信号之间执行干涉。然后，DSP可以分析所得射束和已知导频数据符号，以确定对偏振和相位恢复的调整。

[0034] 接收器系统可以配置有附加和/或替代的特征，以用于接收不同类型的PAM编码信号。例如，为了接收双偏振相干PAM编码信号，可以使用光偏振解复用器作为光偏振部件来使两个编码偏振分开。作为另一示例，为了接收具有多个波长的PAM编码信号，可以提供波长解复用器以将多个波长分开成不同的射束以供单独的分析。

[0035] 此外，接收器系统可以配置成接收强度调制直接检测(IM-DD) PAM编码信号以及相干PAM编码信号。在这一点上，可以提供双模式开关，使得当双模式开关设置成处于第一模式时，双模式开关配置为用于接收相干PAM编码信号的光耦合器(OC)。相反，当双模式开关设置成处于第二模式时，双模式开关配置为用于接收IM-DD PAM编码信号的开关。

[0036] 附加地或可替代地，相干接收器系统可以配置有混合模拟和数字处理。例如，接收器系统可以包括：偏振分束器(PBS)，该偏振分束器(PBS)配置成将PAM编码信号分成两个偏振PAM编码信号；以及两个混合器，这两个混合器配置成将两个偏振PAM编码信号中的每一个与本地振荡器(LO)信号组合。接收器系统还可以包括配置成在接收到的相干PAM编码信号与LO信号之间执行偏振和相位恢复的模拟均衡器和DSP。

[0037] 在另一方面，可以为PAM传输系统提供相干PAM传输与IM-DD PAM传输之间的互操作性。在这一点上，PAM传输可以包括发送器系统和接收器系统。当设置成处于第一模式时，发送器系统可以配置成发送相干PAM编码数据，并且接收器系统可以配置成接收相干PAM编码数据。当设置成处于第二模式时，发送器系统可以配置成发送IM-DD PAM编码数据，并且接收器系统可以配置成接收IM-DD PAM编码数据。在这一点上，可以在发送器系统和接收器系统两者中提供双模式开关，以允许在相干PAM模式与IM-DD PAM模式之间进行改变。

[0038] 技术在数据中心中提供了功率高效的接收器系统。技术提供了与相干PAM和IM-DD PAM传输系统都兼容的接收器系统，从而增加了数据中心的设计灵活性。此外，通过使用混合光 and 电处理和/或混合电和数字处理，可以减少具有高功耗的部件。附加地，通过使用不执行相位调制的PAM系统，可以放宽对诸如激光器的光装备的要求，这可以进一步提高功率效率和设计灵活性。

[0039] 示例系统

[0040] 可以为高效的相干PAM接收器系统提供混合信号处理能力。如上文所提及，为了接收和解码诸如相干PAM编码信号的一维信号，偏振分集和相位分集接收器系统可能效率不高。首先，相干PAM编码信号仅使用一个载波信号并且不包括相位调制，因此没有必要使多

个相位分开。此外,在相干PAM编码信号仅包括单个偏振的情况下,也没有必要使多个偏振分开。因此,图1A至4示出了使用混合光信号和电信号处理的示例接收器系统。图6示出了使用混合模拟和数字处理的示例接收器系统。图1A至3B示出了使用两个独立的控制电路或回路执行偏振和相位恢复的接收器系统,而图4A和4B示出了使用单个控制电路或回路通过联合偏振分集和相位分集相干检测方法执行偏振和相位恢复的接收器系统。这些接收器系统中的每一个可以包括一个或多个频率控制电路或回路,以供粗略和/或精细调整。图5A、5B和5C示出了可用于联合偏振分集和相位分集相干检测方法的光偏振部件的示例实施方式。

[0041] 参照图1A,示出了用于接收单偏振相干PAM编码信号的示例相干PAM接收器系统100A。接收器系统100A可以从发送器系统(未示出)接收传入信号。例如,发送器系统可能已经生成了相干载波信号,并使用数据调制器对具有数据的载波信号进行编码。对于PAM编码,数据调制器可以是高速光调制器,诸如马赫-曾德调制器(MZM)。数据调制器可以通过将高速电数据信号转换为高速光数据信号来编码数据,并且将其添加到载波信号。在该示例中,仅以一个偏振对数据进行编码,因此得到单偏振相干PAM编码信号。尽管在图1A中将表示为x偏振的横电(TE)模式偏振光束示出为具有编码数据的偏振,但是在其它示例中,数据可以以任何其它偏振进行编码。然后,相干PAM编码信号可以由发送器系统诸如通过一个或多个光纤向接收器系统100A发送。在传输中时,相干PAM编码信号的诸如偏振、相位和/或频率的各种性质可能会随机改变。

[0042] 为了恢复在传输期间可能已经改变的接收到的单偏振相干PAM编码信号的性质,接收器系统100A还可以从本地振荡器(LO)120接收信号作为参考。光耦合器(OC)130将接收到的相干PAM编码信号和LO信号混合。例如,诸如光偏振控制器110的光偏振部件可以初始地选择相干PAM编码信号的x偏振分量以通过OC 130,并且光相位调制器140可以初始地允许LO信号通过OC 130而不修改相位或频率。在恢复过程期间,光偏振控制器110和光相位调制器140可以经由反馈控制回路使用一个或多个诸如相干PAM数字信号处理器(DSP)180的处理器来改变信号的偏振、频率和/或相位,如下文进一步描述。

[0043] 为了由在电域中的DSP 180进行分析,将混合的LO信号和接收到的单偏振相干PAM编码信号转换为电域和/或数字域。例如,如所示出,混合的LO和相干PAM编码信号通过光电检测器(PD)150,以供从光域转换为电域。在一些情况下,PD 150可以是配置成消除共模噪声的平衡PD对。例如,混合信号可以用作两个PD中每一个的输入(示出为2个实线),并且两个PD的输出可以组合成消去共模噪声的一个电信号(示出为1个虚线)。电信号可以由跨阻放大器(TIA)160放大。然后,可以通过模数转换器(ADC)170将放大后的电信号数字化。可以向相干PAM数字信号处理器(DSP)180传递数字化的信号以供分析。如此,与传统的偏振分集和相位分集接收器系统相比,接收器系统100A的配置将所需的PD、TIA和ADC的数量减少了四倍。

[0044] 可以在DSP 180与光偏振控制器110、LO 120和/或光相位调制器140之间使用一个或多个反馈控制回路,以便匹配LO信号和接收到的单偏振相干PAM编码信号的性质。DSP 180可以是多个类型中的任何一个的一个或多个处理器,诸如图8的处理器820。DSP 180可以在电域中确定要进行的调整,而光偏振控制器110、LO 120和/或光相位调制器140可以在光域中进行这些调整。通过分析调整的效果,DSP 180可以确定要进行的其它调整,直到DSP 180确定LO信号的性质充分匹配相干PAM编码信号的性质为止。因此,这些反馈控制回路由

混合光和电部件实施。反馈控制回路可以用于执行偏振、相位和/或频率恢复。

[0045] 关于偏振恢复,可以使用在DSP 180与光偏振控制器110之间的偏振反馈控制回路192。可以由DSP 180在电域中确定要进行的偏振调整,并且光偏振控制器110可以在光域中对接收到的相干PAM编码信号进行这些偏振调整。光偏振控制器110可以是配置成改变相干PAM编码信号的偏振的光信号处理器。作为示例,可以使用具有可变移相器的干涉仪来实施光偏振控制器110。图1A中所示出的光偏振控制器110是1x1光偏振控制器(1个输入、1个输出)。DSP 180可以通过分析LO信号与接收到的单偏振相干PAM编码信号之间的差拍信号功率来确定要进行的偏振调整。由于当两个信号具有相同偏振时可以实现两个信号之间的最大可实现的差拍信号功率,因此DSP 180可以通过使LO信号与x偏振的相干PAM编码信号之间的差拍信号功率最大化来确定要进行的偏振调整。例如,初始地,DSP 180可以接收LO信号和x偏振相干PAM编码信号,并确定初始差拍信号功率。DSP 180可以将偏振控制系数——例如所需的移相器控制电压——增加预定量,并经由偏振反馈控制回路192指令光偏振控制器110将相干PAM编码信号的偏振调整预定量。由于在开始阶段,接收器系统可能不知道最大差拍信号功率,因此通常需要多个来回调整,直到在任一方向上的调整将会减小功率为止。在调整之后,DSP 180可以继续接收LO信号和x偏振相干PAM编码信号,并确定差拍信号功率。如果DSP 180确定在调整之后,由于增加的偏振控制系数,LO信号与x偏振相干PAM编码信号之间的差拍信号功率增加,DSP 180可以进一步增加偏振控制系数,并且光偏振控制器110可以应用该调整。相反地,如果DSP 180确定由于增加的偏振控制系数,LO信号与x偏振相干PAM编码信号之间的差拍信号功率减小,DSP 180可以减小偏振控制系数,并且光偏振控制器110可以应用该调整。可以确定并应用其它调整,直到差拍信号功率最大化,例如最大化到预定阈值。

[0046] 关于载波频率和/或相位恢复,可以在DSP 180与LO 120和/或光相位调制器140之间使用一个或多个频率和/或相位反馈控制回路。要进行的相位和/或频率调整可以由DSP 180在电域中确定,并由LO 120和/或光相位调制器140在光域中实施。与在发送器系统中对数据进行编码的诸如MZM的高速数据调制器相比,接收器系统100A中的光相位调制器140可以是低速光调制器。由于载波信号的激光相位改变比高速相干PAM编码信号慢得多,因此光相位调制器140所需的带宽也可能大大低于发送器系统中数据调制器所需的带宽。通过使用低速、低带宽调制器作为光相位调制器140,接收器系统100A可以因此降低功耗。

[0047] DSP 180可以使用快速傅立叶变换(FFT)确定要进行的频率调整。FFT也可以是低速操作,这是由于与相干PAM编码信号的数据速率相比,载波信号的激光频率通常改变得非常缓慢。如此,与涉及接收器系统100的混合器的高速操作相比,DSP 180可以通过执行低速操作来降低功耗。基于FFT,可以估计LO信号与相干PAM编码信号之间的频率偏移。然后,可以基于频率偏移确定频率调整,并经由反馈控制回路194和/或196应用这些频率调整。

[0048] 例如,初始地,DSP 180可以接收LO信号和相干PAM编码信号,并使用FFT确定LO信号与相干PAM编码信号之间的初始频率偏移。DSP 180可以将频率控制系数——例如LO的所需的温度控制电压或激光器驱动电流——增加预定量,并经由频率反馈控制回路194指令LO 120基于预定量来调整频率。附加地或可替代地,DSP 180可以经由频率/相位反馈控制回路196指令光相位调制器140基于预定量来调整频率。例如,可以经由频率反馈控制回路194进行粗略的频率调整,而可以经由反馈控制回路196进行精细的频率调整。在调整之后,

DSP 180可以继续接收LO信号和相干PAM编码信号,并使用FFT确定功率偏移。如果DSP 180确定在调整之后,由于增加的频率控制系数,LO信号与单偏振相干PAM编码信号之间的频率偏移减小,DSP 180可以进一步增加频率控制系数,并且LO 120和/或光相位调制器140可以应用该调整。相反地,如果DSP 180确定由于增加的频率控制系数,LO信号与单偏振相干PAM编码信号之间的频率偏移增大,DSP 180可以减小频率控制系数,并且LO 120和/或光相位调制器140可以应用该调整。可以确定并应用其它调整,直到功率偏移最小化,例如最小化到预定阈值。

[0049] DSP 180可以使用导频数据符号确定要进行的相位调整。导频符号是接收器系统已知的特殊数据符号。可以通过时分复用由发送器系统将导频符号插入诸如相干PAM编码信号的光信号的常规数据符号中。例如,可以将导频符号插入固定的时隙中。例如,初始地,可以测量和校准最大可实现的导频符号信号电平,该最大可实现的导频符号信号电平表示LO 120与接收到的相干PAM编码信号之间的最接近的相位匹配。这种情况可以通过光相位调制器140使用具有随机LO相位改变的训练数据来执行。一旦校准了最大可实现的导频符号信号电平,已知的导频数据符号就可以由发送器系统经由相干PAM编码信号周期性地发送给接收器系统100A。基于这些已知导频数据符号的导频符号信号电平,可以估计LO信号与相干PAM编码信号之间的相位偏移,基于此,可以确定调整并在相位反馈控制回路196中应用所述调整。

[0050] 例如,初始地,DSP 180可以接收LO信号和相干PAM编码信号中编码的导频符号,并且基于导频符号信号电平来确定LO信号与相干PAM编码信号之间的初始相位偏移。然后,DSP 180可以将相位控制系数——例如光相位调制器140所需的驱动电压——增加预定量,并经由相位反馈控制回路196指令光相位调制器140将相位调整预定量。在调整之后,DSP 180可以继续接收LO信号和相干PAM编码信号中的导频符号,并基于导频符号信号电平确定相位偏移。如果DSP 180确定在调整之后,由于增加的相位控制系数,LO信号与单偏振相干PAM编码信号之间的相位偏移减小,DSP可以进一步增加频率控制系数,并且LO 120和/或光相位调制器240可以应用该调整。相反地,如果DSP 180确定由于增加的相位控制系数,LO信号与相干PAM编码信号之间的相位偏移增大,DSP可以减小相位控制系数,并且LO 120和/或光相位调制器140可以应用该调整。可以确定并应用其它调整,直到相位偏移最小化,例如最小化到预定阈值。

[0051] 接收器系统100A以多种方式提供编码数据的高效恢复。例如,如所示出,使用一个OC 130代替在传统的偏振分集和相位分集接收器中的两个混合器。与传统的偏振分集和相位分集接收器相比,PD、TIA和ADC的数量也减少了四倍。此外,代替可能需要高速操作的在电域中处理所有的偏振和相位信息,由可以执行低速操作的诸如光偏振控制器110、光相位调制器140的光部件和LO 120在光域中进行调整。诸如光偏振控制器110和光相位调制器140的光部件也可以在不增加DSP 180的处理功率的情况下增加接收器系统的灵敏度。附加地,反馈控制回路192、194、196可以同时执行多个性质的恢复。

[0052] 可替代地或附加地,可以通过在与信号偏振态正交的偏振态下监测平均光功率来执行偏振恢复。例如,图1B示出了用于接收单偏振相干PAM编码信号的另一示例相干PAM接收器系统100B。接收器系统100B配置有与图1A的接收器系统100A类似的部件,并如此进行标记。然而,在接收器系统100B中提供了附加电路元件,以在与编码信号的偏振正交的偏振

中测量光功率。例如,如所示出,光偏振控制器110可以选择:表示为x偏振射束的具有编码数据的TE模式偏振信号作为输出通过OC 130;以及表示为y偏振射束的从横磁(TM)模式信号转换的TE模式偏振信号作为输出通过包括PD 152、TIA 162和ADC 172的集合的电路且然后到达DSP 180。图1B中所示出的光偏振控制器110是1x2光偏振控制器(1个输入、2个输出)。

[0053] 为了执行偏振恢复,DSP 180可以通过在偏振反馈控制回路198中使y偏振输出中的平均光功率最小化来使x偏振输出中的平均光功率最大化。例如,初始地,DSP 180可以测量来自光偏振控制器110的y偏振输出的平均光功率。然后,DSP 180可以将偏振控制系数增加预定量,并经由偏振反馈控制回路198指令光偏振控制器110将相干PAM编码信号的偏振调整预定量。在调整之后,DSP 180可以继续从光偏振控制器110接收y偏振输出,并测量其平均光功率。如果DSP 180确定在调整之后,由于增加的偏振控制系数,y偏振输出的平均光功率减小,DSP 180可以进一步减小偏振控制系数,并且光偏振控制器110可以应用调整。相反地,如果DSP 180确定由于增加的偏振控制系数,y偏振输出的平均光功率减小,DSP 180可以减小偏振控制系数,并且光偏振控制器110可以应用调整。可以确定并应用其它调整,直到y偏振中的平均光功率最小化,例如最小化到预定阈值。

[0054] 接收器系统100B以多种方式提供编码数据的高效恢复。例如,PD 152、TIA 162和ADC 172中的一个或多个可以是低速部件,这是因为仅分析了平均光功率,而未分析编码数据。通过使用具有不同偏振的部件执行偏振恢复,可以使接收器系统100B的偏振恢复与频率和相位恢复分离。如此,接收器系统100B可以在频率和/或相位恢复之前、期间和/或之后执行偏振恢复,这提供了附加的灵活性。

[0055] 在一些情况下,为了增加数据容量,可以将PAM编码数据添加到两个偏振,这会得到双偏振相干PAM编码信号。在这一点上,图2A示出了用于接收双偏振相干PAM编码信号的示例相干PAM接收器系统200A。如所示出,传入信号可以由接收器系统200A接收,该传入信号可以由发送器系统在具有PAM编码数据的x和y偏振两者中进行调制。尽管在图2A中将x和y偏振示出为具有编码数据的偏振,但是在其它示例中,数据可以在任何其它偏振中进行编码。接收器系统200A配置有与图1A的接收器系统100A类似的部件,并如此进行标记。例如,在接收器系统200A中也使用类似的部件,诸如OC、PD、TIA、ADC、LO、DSP、光相位调制器。然而,由于双偏振相干PAM编码信号包括编码成携带两个独立数据信号的两个不同偏振的数据,因此接收器系统200A包括与接收器系统100A的一些差异。

[0056] 例如,可以提供光偏振部件,诸如1x2光偏振控制器,以将接收到的双偏振相干PAM编码信号分开成两个偏振射束。在图2A中所示出的示例中,使用了光偏振解复用器210,其是1x2光控制器,其中,两个输出与两个偏振复用的正交信号对准。光偏振解复用器210可以初始地将接收到的双偏振相干PAM编码信号分开成x偏振射束和y偏振射束,并使用如下文所描述的反馈控制回路执行恢复。可以参考来自LO 220的信号分别分析这两个偏振射束。如此,OC 234也可以将LO信号分开成两个LO射束。然后,OC 230混合x偏振射束和第一LO射束,并且OC 232混合y偏振射束和第二LO射束。然后,两个混合射束分别由相应的PD 250、252从光域转换为电域,由相应的TIA 260、262放大并由相应的ADC 270、272数字化。可以在DSP 280、光偏振解复用器210、LO 220、光相位调制器240、242之间使用一个或多个反馈控制回路,以执行偏振、频率和/或相位恢复。

[0057] 关于偏振恢复,可以使用低频RF抖动信号。低频RF抖动信号可以由发送器系统(未示出)添加到要发送的x偏振编码数据信号或y偏振编码数据信号。由于仅将RF抖动信号添加到两个偏振中的一个,因此,通过使一个偏振射束中的抖动信号的RF导频音最大化和/或使另一偏振射束中的抖动信号的RF导频音最小化,接收器系统200A可以使两个编码数据信号分开。例如,在由发送器系统将抖动信号添加到x偏振信号的情况下,然后,接收器系统200A可以通过使x偏振射束中的抖动信号的RF导频音最大化来执行偏振恢复;在由发送器系统将抖动信号添加到y偏振信号时,然后,接收器系统200A可以通过使y偏振射束中的抖动信号的RF导频音最大化来执行偏振恢复。

[0058] 可以基于分析RF抖动信号的导频音来确定偏振调整并将其应用于偏振反馈控制回路292中。例如,DSP 280可以初始地确定x偏振射束中的抖动信号的RF导频音。然后,DSP 280可以将偏振控制系数增加预定量,并经由偏振反馈控制回路292指令光偏振解复用器210将双偏振相干PAM编码信号的偏振调整预定量。在调整之后,DSP 280可以继续接收双偏振相干PAM编码信号。如果DSP 280确定在调整之后,由于增加的偏振控制系数,x偏振信号中的抖动信号的RF导频音增加,DSP 280可以进一步增加偏振控制系数,并且光偏振解复用器210可以应用该调整。相反地,如果DSP 280确定由于增加的偏振控制系数,x偏振信号中的抖动信号的RF导频音减小,DSP 280可以减小偏振控制系数,并且光偏振解复用器210可以应用该调整。最终,可以使x偏振信号中的抖动信号的RF导频音最大化,例如最大化到预定阈值。附加地或可替代地,DSP 280可以确定调整以在偏振反馈控制回路292中使y偏振信号中的抖动信号的RF导频音最小化,该调整也可以由光偏振解复用器210来应用。

[0059] 关于载波频率和/或相位恢复,可以在DSP 280与LO 220和/或光相位调制器240、242之间使用一个或多个频率和/或相位反馈控制回路。要进行的相位和/或频率调整可以由DSP 280在电域中确定,并由LO 220和/或光相位调制器240、242在光域中应用。例如,频率反馈控制回路294可以类似于图1A的频率反馈控制回路194配置。同样,频率和/或相位反馈控制回路296可以类似于图1A的频率和/或相位反馈控制回路196配置,除了对两个LO射束的调整分别由光相位调制器240和光相位调制器242应用之外。

[0060] 接收器系统200A提供双偏振编码数据的高效恢复。为了接收编码成两个偏振的数据,与偏振分集和相位分集接收器系统相比,接收器系统200A中的PD、TIA和ADC的数量减少了两倍。此外,代替可能需要高速操作的在电域中处理所有偏振和相位信息,由可以执行低速操作的光部件在光域中进行调整。诸如光偏振解复用器210和光相位调制器240、242的光部件也可以在不增加DSP 280的处理功率的情况下增加接收器系统的灵敏度。附加地,反馈控制回路292、294、296可以同时执行多个性质的恢复。

[0061] 在一些情况下,可以由独立的低速电路监测上文所描述的用于偏振的RF抖动信号的导频音。例如,图2B示出了用于接收双偏振相干PAM编码信号的另一示例相干PAM接收器系统200B。接收器系统200B配置有与图2A的接收器系统200A类似的部件,并如此进行标记。然而,可以添加光抽头212以使x偏振射束中的一些转移到PD 254、TIA 264和ADC 274的附加集合。转移后的x偏振射束可以用于分析插入到x偏振射束中的RF抖动信号的导频音,基于该导频音可以如上文所描述来调整偏振。例如,PD 254、TIA 264和ADC 274的集合可以是低速部件,这是因为仅分析了平均光功率,而未分析编码信号。

[0062] 根据一些示例,来自不同频率的多个激光器的光可以被PAM编码,从而得到具有多

个波长的相干PAM编码信号,每个波长携带独立的数据信号。这种情况可能产生增加的数据容量。图3A示出了用于接收具有多个波长的相干PAM编码信号的示例相干PAM接收器系统300A。如所示出,传入信号可以由接收器系统300A接收,该传入信号可以包括多个波长,每个波长由发送器系统以PAM编码数据进行调制。尽管在图3A中示出了四个波长,这在使用粗波分复用(CWDM)收发器时是典型的,但是在其它示例中,数据可以以任意数量的波长编码。接收器系统300A配置有与图1A的接收器系统100A类似的部件,并如此进行标记。例如,在接收器系统300A中也使用类似的部件,诸如OC、PD、TIA、ADC、LO、DSP、光相位调制器。然而,由于由接收器系统300A接收的相干PAM编码信号包括携带多个独立数据信号的多个波长,因此接收器系统300A包括与接收器系统100A的一些差异。

[0063] 例如,如所示出,多个波长可以由解复用器分开成不同的射束,诸如粗波分复用(CWDM)解复用器(DEMUX)312。进一步如所示出,光偏振控制器310可以放置在接收器系统300A中的CWDM DEMUX 312之前。如此,单个光偏振解复用器310可以在将不同的波长分开成不同的射束之前改变光的偏振。这还允许使用单偏振反馈控制回路392。可以在DSP 380、LO 320和/或光相位调制器340之间使用一个或多个频率和/或相位反馈控制回路,诸如频率反馈控制回路394和频率和/或相位反馈控制回路396,以类似于如针对接收器系统100A所描述执行频率和/或相位恢复。为了便于说明,仅针对波长中的一个示出了OC 330、光相位调制器340、PD 350、TIA 360和ADC 370。然而,在实际系统中,接收到的PAM编码信号的每个波长可能需要单独的OC、光相位调制器、PD、TIA和ADC的集合。

[0064] 接收器系统300A是比偏振分集和相位分集接收器系统更高效的多波长接收器。尽管接收器系统300A需要4个OC、光相位调制器、PD、TIA和ADC的集合来接收附加波长、接收相同数量的波长,但是传统的偏振分集和相位分集接收器系统将需要16个PD、TIA和ADC的集合以及8个混合器。此外,代替可以是高速操作的在电域中处理所有偏振和相位信息,由接收器系统300A由光部件在光域中进行调整,这可以是低速操作。诸如光偏振控制器310和光相位调制器340的光部件也可以在不增加DSP 380的处理功率的情况下增加接收器系统的灵敏度。附加地,反馈控制回路392、394、396可以同时执行多个性质的恢复。

[0065] 此外,还可以通过分析来自单独偏振的信号来执行针对具有多个波长的PAM编码数据的偏振恢复。例如,图3B示出了用于接收具有多个波长的相干PAM编码信号的另一示例相干PAM接收器系统300B。接收器系统300B配置有与图3A的接收器系统300A类似的部件,并如此进行标记。然而,参照图3B,可以提供包括PD 352、TIA 362和ADC 372的可选电路,以在与数据信号的偏振正交的偏振中测量光功率。如此,接收器系统300B可以执行如针对接收器系统100B所描述的偏振恢复。例如,如所示出,DSP 380可以配置成通过经由反馈控制回路398指令光偏振控制器310来使y偏振光的光功率最小化。

[0066] 尽管所示出的接收器系统300A和300B配置成接收单偏振相干PAM编码信号,但是接收器系统300A和300B也可以扩展成接收双偏振PAM编码信号。例如,光偏振控制器310可以被用于使两个偏振分开的光偏振解复用器替代。可以为两个偏振提供附加的光相位调制器、OC、PD、TIA和ADC。还可以使用用于两个偏振的附加反馈控制回路来执行相位和/或频率的恢复。

[0067] 图4A示出了使用通过联合偏振分集和相位分集检测进行的混合光和电信号处理的另一示例接收器系统400A。参照图4A,接收器系统400A配置有与图2A的接收器系统200A

类似的部件,并如此进行标记。例如,接收器系统400A还包括LO、DSP、3个OC以及2个PD、TIA、ADC的集合。然而,代替如图2A中所示出的用于偏振恢复的光偏振解复用器和用于频率和/或相位恢复的两个光相位调制器,接收器系统400A包括配置成在偏振调整之后的接收信号与LO之间引入45°偏振角的1x2光偏振控制器410,然后是联合的偏振分集和相位分集检测电路。因此,仅需要单个控制回路来控制1x2偏振控制器,以实现联合偏振分集和相位分集相干检测。最终的偏振和相位恢复可以在电域中实现。

[0068] 例如,如所示出,传入的双偏振相干PAM编码信号可以由矢量 A_{in} 和 B_{in} 表示,其中, A_{in} 和 B_{in} 是携带独立数据的两个正交偏振光信号。1x2光偏振控制器410可以改变传入的双偏振相干PAM编码信号 A_{in} 和 B_{in} 的偏振,以输出 A_{out} 和 B_{out} 。在这一点上,1x2光偏振控制器410可以调整 A_{in} 和 B_{in} 的偏振,使得所得 A_{out} 和 B_{out} 仍然彼此正交,但是所得 A_{out} 与参考轴成45°并且与LO偏振对准。在这一点上,参考轴可以是标记为x和y轴的PBS的两个主轴中的一个。例如, A_{out} 可以在一个方向上与y轴成45°,而 B_{out} 可以在相反方向上与y轴成45°,从而使 A_{out} 与 B_{out} 成90°。如此,1x2光偏振控制器410可以生成两个输出

$X_{out} = A_{out_x} + B_{out_x} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{in} - \frac{\sqrt{2}}{2} B_{in}$ 和 $Y_{out} = A_{out_y} + B_{out_y} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_{in} + \frac{\sqrt{2}}{2} B_{in}$,其中, A_{out_x} 是 A_{out} 的x分量, A_{out_y} 是 A_{out} 的y分量, B_{out_x} 是 B_{out} 的x分量,并且 B_{out_y} 是 B_{out} 的y分量。

[0069] 进一步如所示出,来自LO 420的LO信号可以由OC 434分成两个信号L01和L02。OC 434可以在L01与L02之间引入 $\pi/2$ 相位差。例如,使用交叉路径和平行路径使射束分开的3dB OC可以在两个路径之间具有 $\pi/2$ 相位差。然后,OC 430可以将 X_{out} 与L01混合,并生成两个输出 $C_{x+} = \frac{1}{2} A_{in} - \frac{1}{2} B_{in} + j\frac{1}{2} E_L$ 和 $C_{x-} = \frac{1}{2} j A_{in} - \frac{1}{2} j B_{in} + \frac{1}{2} E_L$,其中, E_L 表示L01的复杂光场,并且 jE_L 表示L02的复杂光场。同样,OC 432可以将 Y_{out} 与L02混合,并生成两个输出 $C_{y+} = \frac{1}{2} A_{in} + \frac{1}{2} B_{in} - \frac{1}{2} E_L$ 和 $C_{y-} = \frac{1}{2} j A_{in} + \frac{1}{2} j B_{in} + \frac{1}{2} j E_L$ 。

[0070] 然后,来自OC 430和OC 432的输出分别通过用于光到电转换的PD 450、452、用于放大的TIA 460、462以及用于电到数字转换的ADC470、472,从而得到两个数字化的电信号。两个数字化的电信号可以用 $D_x = A_{in} E_L \sin(\varphi_x) - B_{in} E_L \sin(\varphi_y)$ 和

$D_y = A_{in} E_L \cos(\varphi_x) + B_{in} E_L \cos(\varphi_y)$ 表示,其中, φ_x 是接收到的信号 A_{out} 与LO之间的相对载波相位差,而 φ_y 是接收到的信号 B_{out} 与LO之间的相对载波相位差。

[0071] DSP 480可以使用基于导频数据符号的载波相位估计算法来确定载波相位差。例如,可以在不同的时隙处将诸如d1和d2的两个已知的PAM导频数据符号插入到两个正交偏振的传入相干PAM编码信号中。例如,d1可以在时隙n处被插入一个偏振通道(例如用于 A_{in} 的通道)中,而d2可以在时隙n+1处被插入另一偏振通道(例如用于 B_{in} 的通道)中。然后,d1的接收到的数字化导频数据符号可以由 $D_{1(n)x} = A_{in} E_L \sin(\varphi_x)$ 和 $D_{1(n)y} = A_{in} E_L \cos(\varphi_x)$ 给出。然后,DSP 480可以求解两个方程以提取 φ_x 。d2的数字化导频数据符号可以由 $D_{2(n+1)x} = -B_{in} E_L \sin(\varphi_y)$ 和 $D_{2(n+1)y} = B_{in} E_L \cos(\varphi_y)$ 给出。然后,DSP 480可以求解两个方程以提取 φ_y 。

[0072] 此外,DSP 480还可以使用导频数据符号来确定传入信号的偏振信息。例如,一旦获得了 φ_x 和 φ_y 的值,就可以由DSP 480基于上文关系 $D_x = A_{in} E_L \sin(\varphi_x) - B_{in} E_L \sin(\varphi_y)$

和 $D_y = A_{in} E_L \cos(\varphi_x) + B_{in} E_L \cos(\varphi_y)$ 确定 A_{in} 和 B_{in} 。然后, DSP 480 可以基于 A_{in} 和 B_{in} 以及上文针对数字化导频数据符号 $D_{1(n)x}$ 、 $D_{1(n)y}$ 、 $D_{2(n+1)x}$ 、 $D_{2(n+1)y}$ 的关系来确定 A_{out} 和 B_{out} 的偏振状态。此外, 由于由 1×2 光偏振控制器 410 应用于 A_{in} 和 B_{in} 的当前偏振调整也是已知的, 因此可以从 A_{out} 和 B_{out} 的偏振推导出 A_{in} 和 B_{in} 的偏振状态。由于传入信号的偏振可以随机改变, 因此可能需要应用动态调整以保持 A_{out} 与参考轴之间的 45° 差。

[0073] 如此, 确定了传入信号 A_{in} 和 B_{in} 的当前偏振状态, DSP 480 可以确定要由 1×2 光偏振控制器 410 经由偏振控制回路 492 进行的适当调整。例如, DSP 480 可以确定 A_{in} (和/或 B_{in}) 与 LO 信号之间的偏振偏移, 并确定要对 A_{in} (和/或 B_{in}) 进行的调整, 以确保通常会与 LO 的偏振对准的 A_{out} 与参考 y 轴具有 45° 偏移。在 A_{out} (和/或 B_{out}) 与 LO 之间具有 45° 偏振角的目的是确保 A_{out} 和 B_{out} 的信号分量可以相等地分布在 1×2 偏振控制器的两个输出端口 X_{out} 和 Y_{out} 上。如此, X_{out} (或 Y_{out}) 的一半来自 A_{out} , 而另一半来自 B_{out} 。如上文公式所示出, 这种两端口相等信号分量分布可以实现联合偏振分集和相位分集相干检测, 其中, 偏振分集检测电路和相位分集检测电路组合成单个电路, 其包括 1×2 光偏振控制器 410、两个光耦合器 430、432、两个 PD 450、452、TIA 460、462 和 ADC 470、472 的集合以及 DSP 480。相反, 在传统的偏振分集和相位分集相干检测的情况下, 除了 DSP 之外, 还需要两个混合器加四个 PD、TIA 和 ADC 的集合。

[0074] 由于如使用上文关系所分析, 可以从导频数据符号中提取相对准确的传入信号偏振和相位信息, 因此传入信号偏振通过控制回路 492 的每个改变可能仅需要由 1×2 光偏振控制器 410 进行的一个偏振调整。与在其中每个偏振改变通常需要多个偏振调整的传统基于试错的反馈控制算法相比, 这可以改善偏振控制器的响应时间。注意, 此处偏振控制回路不像在图 1A-3B 中所示出的接收器系统中一样被用于在光域中使接收到的信号偏振与 LO 对准。替代地, 偏振控制回路 492 用于实现联合偏振分集和相位分集相干检测。对于此方法, 由 DSP 480 使用上文所描述的关系在电域中实现最终的偏振和相位恢复。此外, 在基于前馈的偏振和相位恢复算法中, 可以在没有反馈延迟的情况下估计偏振和相位误差并将偏振和相位误差从当前数据符号中去除, 这可以提高总体偏振和相位跟踪速度。特别地, 使用基于快速前馈的相位恢复算法可以提高激光相位噪声容限。

[0075] 接收器系统 400A 是比偏振分集和相位分集接收器系统更高效的多波长接收器。例如, 与传统的偏振分集和相位分集接收器系统所需的 4 个集合相比, 接收器系统 400A 需要 2 个 PD、TIA 和 ADC 的集合。接收器系统 400A 还仅使用一个光偏振控制器, 代替传统的偏振分集和相位分集接收器系统中的两个混合器或接收器系统 200A 中的两个光相位调制器。此外, 代替可以是高速操作的在电域中处理所有偏振和相位信息, 由接收器系统 400A 由光部件在光域中进行调整, 这可以是低速操作。诸如 1×2 光偏振控制器 410 的光部件也可以在不增加 DSP 480 的处理功率的情况下增加接收器系统的灵敏度。附加地, 单个控制电路或回路允许可以同时执行的多个性质的恢复。

[0076] 此外, 还可以通过分析来自单独偏振的信号来执行利用联合偏振和相位分集检测的示例系统的偏振恢复。例如, 图 4B 示出了利用联合偏振和相位分集检测的另一示例相干 PAM 接收器系统 400B。接收器系统 400B 配置有与图 4A 的接收器系统 400A 类似的部件, 并如此进行标记。然而, 参照图 4B, 可以提供包括 PD 454、TIA 464 和 ADC 474 的可选电路, 以测量传入信号中的抖动信号的导频音。如此, 接收器系统 400B 可以执行类似于针对接收器系统 200B 所描述的偏振恢复。例如, 如所示出, 可以通过将两个低速抖动信号插入到 A_{in} 和 B_{in} 的

两个正交偏振通道中来监测偏振偏移,并且然后,可以由DSP 480使用包括光抽头412、PD 454、TIA 464、ADC 474的低速部件来监测导频音。该附加的低速偏振控制回路的引入实现1x2偏振控制器410的独立偏振调整而无需执行载波相位恢复和定时同步,这可以简化接收器控制回路设计。

[0077] 尽管图4A和4B示出了示例接收器系统400A和400B,其配置用于接收具有单个波长的双偏振相干PAM编码信号,但是可以扩展接收器系统的特征,以用于接收单偏振信号和具有多个波长的信号。例如,为了接收单偏振相干PAM编码信号,接收器系统400A可以执行相同的操作,但是假定 A_{in} 或 B_{in} 为零。为了接收具有多个波长的相干PAM编码信号,可以类似于图3A中所示出添加波长解复用器,诸如CWDM解复用器。

[0078] 图5A、5B和5C示出了用于1x2光偏振控制器的示例实施方式。参照图5A,1x2光偏振控制器500A包括PBS 510,该PBS将包括 A_{in} 和 B_{in} 的传入双偏振相干PAM编码信号分成两个射束 X_{in} 和 Y_{in} 。然后,移相器520对分离射束中的一个进行相位调整。例如,如所示出,由移相器520基于由DSP 480确定的调整来改变射束 X_{in} 的相位。然后,调整后的射束 X_{out} 和未调整的射束 Y_{in} 可以通过OC 530以供进一步处理。此处,接收到的信号偏振通过改变其X分量与Y分量之间的相对相位来调整。相对相位调整可以通过仅针对X分量调整相位或通过针对X分量和Y分量两者调整相位来进行。如果对X分量和Y分量两者进行了相位调整,则需要向移相器施加较少的电压。

[0079] 参照图5B,1x2光偏振控制器500B包括与1x2光偏振控制器500A类似的部件,并如此进行标记。然而,1x2光偏振控制器500B还包括第二移相器540。第二移相器540可以基于由DSP 480确定的调整来改变射束 Y_{in} 的相位。然后,调整后的射束 X_{out} 和 Y_{out} 可以通过OC 530以供进一步处理。例如,如所示出,可以使用具有移相器的第二级2x2MZI 550。第二级2x2MZI 550可以用于进一步减小每个移相器所需的控制电压。该第二级2x2MZI也可以用于实现IM-DD PAM和相干PAM双模式操作,如下文所描述,其中, A_{in} (或 B_{in})的所有信号分量都引导到1x2偏振控制器的两个输出端口中的一个。

[0080] 参照图5C,1x2光偏振控制器500C包括与1x2光偏振控制器500B类似的部件,并如此进行标记。然而,1x2光偏振控制器500C进一步配置成接收具有多个波长的相干PAM编码信号。在这一点上,提供了一个或多个波长解复用器,诸如CWDM DEMUX 560和CWDM DEMUX 562。如所示出,CWDM DEMUX 560将射束 X_{in} 中的各种波长分成单独的射束,而CWDM DEMUX 562将射束 Y_{in} 中的各种波长分成单独的射束。多个波长可以共用相同的PBS 510和CWDM DEMUX 560和562,但是可能不共用相同的移相器、OC和具有相移器的第二级2x2MZI。因此,尽管未示出,但接收到的每个波长可能需要单独的移相器、OC和具有移相器的第二级2x2MZI的集合。

[0081] 代替混合光和电处理或除此之外,可以为相干PAM接收器提供混合模拟和数字处理。例如,图6示出了示例相干PAM接收器,该示例相干PAM接收器使用混合模拟和数字处理以供接收双偏振相干PAM编码信号。如所示出,接收器系统600包括一些与偏振分集和相位分集类似的部件,诸如PBS 610、LO 620、OC 630、两个混合器640、642、四个PD 650、652、654、656和TIA 660、662、664、666的集合和DSP 680。然而,为了执行混合模拟和数字处理,接收器系统600包括与偏振分集和相位分集接收器系统的一些差异。

[0082] 例如,接收器系统600还包括用于执行偏振和载波相位恢复的模拟均衡器690。作

为示例,模拟均衡器690可以是4x2模拟多输入多输出(MIMO)均衡器。为了执行偏振和载波相位恢复,模拟均衡器690可以从四个相应的PD/TIA接收四个输入,其可以包括在x偏振中检测到的同相分量(I_x)、在x偏振中检测到的正交分量(Q_x)、在y偏振中检测到的同相分量(I_y)和在y偏振中的正交分量(Q_y)。注意,尽管PAM信号不具有正交分量,但是载波具有正交分量。除非如图1A-3B中所示出在相干混合之前去除载波相位并且使信号和L0偏振对准,否则需要偏振分集和相位分集相干检测电路。基于这些输入,模拟均衡器590可以生成对DSP 680的模拟输出。例如,模拟均衡器590可以生成两个偏振和相位恢复的实值信号 I_x_output 和 I_y_output ,其中, I_x_output 表示在X偏振通道上携带的PAM信号,而 I_y_output 表示在Y偏振通道上携带的PAM信号。例如,可以基于关系 $I_x_output = C_1 I_x + C_2 Q_x + C_3 I_y + C_4 Q_y$ 和 $I_y_output = D_1 I_x + D_2 Q_x + D_3 I_y + D_4 Q_y$ 来生成 I_x_output 和 I_y_output ,其中, C_n 和 D_m 是均衡器系数。输出可以在向DSP 680传递之前由ADC 670和672转换成数字输出。

[0083] 可以由DSP 680使用一个或多个诸如反馈控制回路692的控制回路确定要由模拟均衡器690使用的系数。在这一点上,DSP 680可以在数字域中进行各种确定,而模拟均衡器690可以在模拟域中进行各种确定。例如,初始地,模拟均衡器690可以检测 I_x 、 Q_x 、 I_y 和 Q_y ,并使用预定系数来计算 I_x_output 和 I_y_output 。然后,模拟均衡器690可以向DSP 680发送 I_x_output 和 I_y_output 。基于 I_x_output 和 I_y_output ,DSP 680可以确定要由模拟均衡器690使用的新系数,并经由反馈控制回路692指令模拟均衡器690。模拟均衡器系数可以由DSP 680通过使用诸如众所周知的最小均方(LMS)算法的经典的基于梯度下降的算法将模拟均衡器690的两个输出与预期的PAM信号电平分布进行比较来获得。然后,模拟均衡器690可以继续检测 I_x 、 Q_x 、 I_y 和 Q_y ,并且使用新系数来计算另一个 I_x_output 和 I_y_output 的集合,将所述另一个 I_x_output 和 I_y_output 的集合再次发送给DSP 680。其它系数可以由DSP680确定,并由模拟均衡器690使用,直到通过LMS算法计算出的均方误差低于预定阈值或达到其最小值为止。因此,反馈控制回路692实现偏振和相位恢复,所述偏振和相位恢复也可以是同时的。

[0084] 接收器系统600使用混合模拟和数字处理来提供对编码数据的高效恢复。例如,通过使用4x2模拟MIMO均衡器,所需的ADC数量与接收器系统100相比减少了两倍,从而节省了功率。使用混合模拟和数字信号处理的接收器系统600也可以扩展成接收具有多个波长的相干PAM编码信号。例如,用于4个波长的混合模拟和数字处理接收器可能需要8个混合器以及16个PD和TIA的集合,但是仅需要8个ADC,这与需要16个ADC以供接收4个波长的偏振分集和相位分集接收器系统不一样。因此,接收器系统600也是更高效的多波长接收器。

[0085] 尽管上文所描述的示例接收器系统包括混合的光/电信号处理或混合模拟/数字信号处理,但是可以使用其它组合。例如,接收器系统可以包括混合光 and 模拟信号处理,其中,使用模拟电路来实施DSP的功能,这可以进一步降低功耗。作为另一示例,接收器系统可以包括混合光/模拟/数字信号处理,其中,DSP的一些功能移至模拟电路,而其它功能则以数字方式执行,这也可以降低DSP的功耗。

[0086] 尽管示出上文所描述的示例接收器系统以处理相干PAM编码信号,但是示例接收器系统中的每一个可以进一步配置成与IM-DD PAM编码信号兼容。在这一点上,上文所描述的接收器系统可以设置有两种模式——用于接收相干PAM编码信号的第一模式和用于接收IM-DD PAM编码信号的第二模式。例如,如果从相干PAM发送器系统接收到信号,则接收器系

统可以配置成处于第一模式;如果从IM-DD PAM发送器系统接收到信号,则接收器系统可以配置成处于第二模式。图7A和7B示出了示例传输系统,其中,接收器系统执行混合信号处理。在图7A中,传输系统700A配置成使用相干PAM编码信号进行通信。在图7B中,传输系统700B配置成使用IM-DD PAM编码信号进行通信。

[0087] 参照图7A,相干PAM传输系统700A包括相干PAM发送器系统710和相干PAM接收器系统720。尽管在图7A中示出了具有四个波长的四个激光器,但是在其它示例中,数据可以以任何数量的波长来编码。为了便于说明,示出了仅涉及一个波长的操作(如线和箭头所示出),但是应理解,可以针对波长中的每一个执行模拟操作。此外,仅针对波长中的一个示出了部件,诸如2模式开关740和770、MZM 750、光相位调制器340、CWDM DEMUX 312、CWDM MUX 760、PD 350、TIA 360和ADC 370。然而,接收到的PAM编码信号的每个波长可能需要单独的2模式开关、MZM、光相位调制器、CWDM MUX和DEMUX、PD、TIA以及ADC的集合。仍此外,还省略了用于偏振、相位和/或频率的恢复的控制回路。

[0088] 相干PAM发送器系统710可以在相干载波光上编码数据以供传输。例如,相干PAM发送器系统710可以包括一个或多个激光器,诸如所示出的激光器732、734、736、738,其可以发射不同的四个波长的光。来自每个激光器的发射光可以通过开关,诸如2模式开关740。在这一点上,可以将2模式开关740设置成用于发送相干PAM信号的第一模式。在该第一模式中,2模式开关实质上充当OC,其允许发射光的一部分由诸如MZM 750的数据调制器进行PAM编码,同时还将发射光的一部分转移到接收器系统720以用作LO信号。可以使用基于硅光子的马赫-曾德干涉仪来实施2模式开关。例如,2模式开关740可以是2x2马赫-曾德干涉仪(MZI),其中,可以通过调整MZI的两条路径之间的相对相位来切换操作模式。进一步如所示出,然后,来自不同激光器的编码光可以由诸如CWDM MUX 760的波长复用器组合。然后,可以例如经由一个或多个光纤向相干PAM接收器系统720传输具有多个波长的相干PAM编码信号。

[0089] 然后,相干PAM接收器系统720可以从发送器系统710接收具有多个波长的相干PAM编码信号。在该示例中,相干PAM接收器系统720配置有与图3A的接收器系统300A类似的部件,并如此进行标记。然而,为了提供向后的互操作性,相干PAM接收器系统720包括与接收器系统300A的一些差异。例如,接收器系统300A的OC 330被2模式开关770替代。为了接收相干PAM编码信号,可以将2模式开关770设置成处于第一模式,该2模式开关实质上充当接收器系统300A的OC 330。如同2模式开关740,也可以使用诸如2x2 MZI的基于硅光子的马赫-曾德干涉仪来实施2模式开关770。因此,在第一模式中,以与图3A的接收器系统300A相同的方式配置接收器系统720。

[0090] 可以将相干PAM传输系统700A重新配置成IM-DD PAM传输系统。例如,参照图7B,IM-DD PAM传输系统700B包括IM-DD PAM发送器系统712和IM-DD PAM接收器系统722。如所示出,IM-DD PAM发送器系统712配置有与图7A的相干PAM发送器系统710类似的部件,并且IM-DD PAM接收器系统722配置有与图7A的相干PAM接收器系统720类似的部件。此外,为了确保兼容性,IM-DD PAM传输系统700B中的激光器数量保持与相干PAM传输系统700A相同。然而,为了执行IM-DD PAM传输,IM-DD PAM传输系统700B包括与相干PAM传输系统700A的一些差异。

[0091] 例如,在IM-DD PAM发送器系统712中,2模式开关740设置成第二模式。由于仅针对

IM-DD PAM调制强度,因此不需要LO信号作为参考。如此,在第二模式中,2模式开关740可以将来自激光器的所有激光功率引导到IM-DD PAM接收器系统722的信号路径。因此,如所示出,来自激光器732的所有激光功率由2模式开关740引导,以由数据调制器调制,该数据调制器也可以是MZM 750。因此,为了从相干PAM传输改变为IM-DD PAM传输,所需要做的全部是改变2模式开关740的模式和MZM 750执行的调制。

[0092] 同样,在IM-DD PAM接收器系统722中,2模式开关770设置成第二模式。由于仅针对IM-DD PAM通过强度对数据进行编码,因此不需要使用LO信号执行偏振、频率和/或相位恢复。如此,在第二模式中,2模式开关770可以充当接收每个波长的所有激光功率的开关。例如,然后,一个波长的接收到的激光功率可以由PD 350从光域转换为电域,由TIA 360放大,由ADC 370数字化,并且然后由DSP 380分析和解码。此外,由于仅测量总强度,因此不需要消除共模噪声。因此,在使用平衡PD对的情况下,在第二模式中,2模式开关770可以将每个波长的所有接收到的光功率引导到PD中的一个。

[0093] 尽管示出了具有类似于接收器系统300A配置的接收器系统720和722的传输系统700A和700B,但是接收器系统可以可替代地配置为图1A-4B和6中所描述的接收器系统中的任一个。例如,为了接收双偏振相干PAM编码信号,光偏振控制器310可以如在接收器系统200A或200B中一样被光偏振解复用器替代,或如在接收器系统400A或400B中一样被2x1光偏振控制器替代。可以为两个偏振提供附加的光相位调制器、OC、PD、TIA和ADC。作为另一示例,传输系统700A和700B中的接收器系统可以配置有混合模拟和数字处理,诸如图6中所示出。

[0094] 图8图示了诸如接收器系统100A、100B、200A、200B、300A、300B、400A、400B或600的接收器系统中的一些部件的示例框图。不应将其视为限制本公开的范围或本文中所描述的特征的有用性。在该示例中,示出了具有一个或多个计算装置810的接收器系统。计算装置810包含一个或多个处理器820、存储器830和通常存在于通用计算装置中的其它部件。计算装置810的存储器830可以存储可由一个或多个处理器820访问的信息,包括可以由一个或多个处理器820执行的指令834。

[0095] 存储器830还可以包括可以由处理器检索、操纵或存储的数据832。存储器可以属于能够存储可由处理器访问的信息的任何非暂时性类型,诸如硬盘驱动器、存储卡、ROM、RAM、DVD、CD-ROM、能够写入的存储器和只读存储器。例如,数据832可以包括参数、阈值和用于执行偏振、频率和/或相位恢复的其它值。

[0096] 数据832可以由一个或多个处理器820根据指令834来检索、存储或修改。例如,尽管本文中所描述的主题不受任何特定数据结构限制,但是数据可以作为具有许多不同字段和记录的表或XML文档存储在计算机寄存器中、关系数据库中。数据还可以以任何计算装置可读格式来格式化,诸如但不限于二进制值、ASCII或Unicode。此外,数据可以包括足以标识相关信息的任何信息,诸如数字、描述性文本、专有代码、指针、对存储在诸如在其它网络位置处的其它存储器中的数据的引用或由函数使用以计算相关数据的信息。

[0097] 指令834可以是将由一个或多个处理器直接执行的诸如机器代码的任何指令集合或间接执行的诸如脚本的任何指令集合。在这一点上,术语“指令”、“应用”、“步骤”和“程序”在本文中可以互换使用。指令可以以目标代码格式存储以供处理器直接处理或以包括按需解译或预先编译的脚本或独立源代码模块的合集的任何其它计算装置语言存储。例

如,指令834可以包括用于执行偏振、频率和/或相位恢复的函数或方法。

[0098] 一个或多个处理器820可以是任何传统处理器,诸如可商购获得的CPU。可替代地,处理器可以是专用部件,诸如专用集成电路(“ASIC”)或其它基于硬件的处理器。例如,DSP 180、280、380、480和680可以配置为一个或多个处理器820,并且可以访问存储器,诸如数据和指令。尽管不是必需的,但是计算装置810中的一个或多个可以包括用以执行特定计算过程的专用硬件部件。

[0099] 尽管图8在功能上将计算装置810的处理器、存储器和其它元件图示为在同一块内,但是处理器、计算机、计算装置或存储器实际上可以包括可以或不存储在同一物理外壳内的多个处理器、计算机、计算装置或存储器。例如,存储器可以是位于与计算装置810的外壳不同的外壳中的硬盘驱动器或其它存储介质。因此,对处理器、计算机、计算装置或存储器的引用应理解为包括对可以并行或不并行操作的处理器、计算机、计算装置或存储器的合集的引用。例如,计算装置810可以包括作为负载平衡服务器场、分布式系统等操作的服务器计算装置。又此外,尽管下文所描述的一些功能指示为发生在具有单个处理器的单个计算装置上,但是本文中所述的主题的各个方面可以由多个计算装置来实施,例如通过网络进行通信。

[0100] 计算装置810可能能够通过网络与其它发送器系统和/或接收器系统直接和间接通信。可以使用各种协议和系统将网络中的诸如计算装置810的计算装置互连,使得网络中的计算装置可以是因特网、万维网、特定内联网、广域网或局域网。网络中的计算装置可以利用标准通信协议,诸如以太网、WiFi和HTTP、一个或多个公司专有的协议以及前述的各种组合。尽管如上所述在发送或接收信息时获得了某些优点,但是本文中所述的主题的其它方面不限于信息的任何特定传输方式。

[0101] 示例方法

[0102] 除了上述示例系统之外,现在描述示例方法。可以使用上文所描述的系统、其修改或具有不同配置的多种系统中的任一种来执行这种方法。应当理解,以下方法中涉及的操作不需要以所描述的精确顺序执行。相反,可以以不同的顺序或同时地处置各种操作,并且可以添加或省略操作。

[0103] 图9示出了用于接收相干PAM编码信号的示例流程图800。流程图900可以由诸如图1A-4和6中所示出的接收器系统中的任一个的接收器系统执行。接收器系统中的诸如图8的处理器820的处理器可以接收数据并进行各种确定,如流程图900中所示出。

[0104] 参照图9,在框910处,可以接收相干脉冲幅度调制(PAM)编码信号。例如,相干PAM编码信号可以是单偏振信号,诸如图1A、1B、3A和3B中所示出。作为另一示例,相干PAM编码信号可以是双偏振信号,诸如图2A、2B、4和6中所示出。作为又一示例,相干PAM编码信号可以包括多个波长,诸如图3A和3B中所示出。

[0105] 在框920处,接收到本地振荡器(L0)信号。例如,对于如图1A和1B中所示出的具有单个波长的单偏振PAM编码信号,可以接收L0信号并将其与一个PAM信号混合。相反,对于诸如图2A、2B、4、6中所示出的双偏振PAM编码信号或对于诸如图3A和3B中所示出的具有多个波长的PAM编码信号,接收到的L0信号可以在与不同偏振和/或波长的相应PAM编码射束组合之前分成多个射束。

[0106] 在框930处,使用混合信号处理使用第一控制回路来执行接收到的相干PAM编码信

号与L0信号之间的偏振恢复。例如,如关于图1A和3A所描述,偏振反馈控制回路可以通过分析L0与具有编码数据的接收到的相干PAM编码信号的偏振部分之间的差拍信号来执行。可替代地,如关于图1B和3B所描述,偏振反馈控制回路可以通过使不具有编码数据的接收到的相干PAM编码信号的偏振部分的光功率最小化来执行。在关于图2A和2B描述的另一示例中,偏振反馈控制回路可以通过使抖动信号的导频音最小化来执行。作为图4A和4B中所示出的另一替代例,偏振控制回路可以包括1x2偏振控制器,然后是联合的偏振分集和相位分集相干检测电路。1x2偏振控制器可以配置成在偏振调整之后的接收到的信号与L0之间引入 45° 偏振角,并且最终的偏振恢复可以在电域中实现。这与图1A-3B中描述的偏振恢复方法不同,在图1A-3B中,引入了偏振控制器/解复用器以将接收到的信号偏振与L0对准,使得可以在光域中实现偏振恢复,而电处理仅用于确定如何调整偏振控制器/解复用器。

[0107] 作为关于图6所描述的再一示例,可以经由模拟均衡器690与DSP 680之间的反馈控制回路使用混合模拟和数字信号处理来执行偏振恢复。

[0108] 在框940处,使用混合信号处理使用第二控制回路执行接收到的相干PAM编码信号与L0信号之间的相位恢复。例如,如关于图1A、1B、2A、2B、3A、3B所描述,相位反馈控制回路可以通过分析导频数据符号来执行。作为替代例,如图4A和4B中所示出,前馈控制回路可以用于执行相位恢复。进一步如关于图6所描述,可以经由模拟均衡器690与DSP 680之间的反馈控制回路使用混合模拟和数字信号处理来执行相位恢复。附加地,例如,如关于图1A、1B、2A、2B、3A和3B所描述,频率反馈控制回路可以通过分析L0信号与相干PAM编码信号之间的FFT来执行。

[0109] 技术在数据中心中提供了功率高效的接收器系统。技术提供了与相干PAM和IM-DD PAM传输系统都兼容的接收器系统,从而增加了数据中心的设计灵活性。此外,通过使用混合光 and 电处理和/或混合电和数字处理,可以减少具有高功耗的部件。附加地,通过使用不执行相位调制的PAM系统,可以放宽对诸如激光器的光装备的要求,这可以进一步提高功率效率和设计灵活性。

[0110] 除非另有说明,否则前述替代示例不是互相排斥的,而是可以以各种组合实施以实现独特的优点。由于可以在不脱离权利要求书所限定的主题的情况下利用上文所讨论的特征的这些和其它变型以及组合,因此实施例的前述描述应通过说明而非通过限制由权利要求书所限定的主题来进行。另外,对本文中所描述的示例以及措辞为“诸如”、“包括”等子句的提供不应该解译为权利要求书的主题限制为具体示例;相反,示例仅旨在说明许多可能实施例中的一个。此外,不同附图中的相同附图标记可以标识相同或类似的元件。

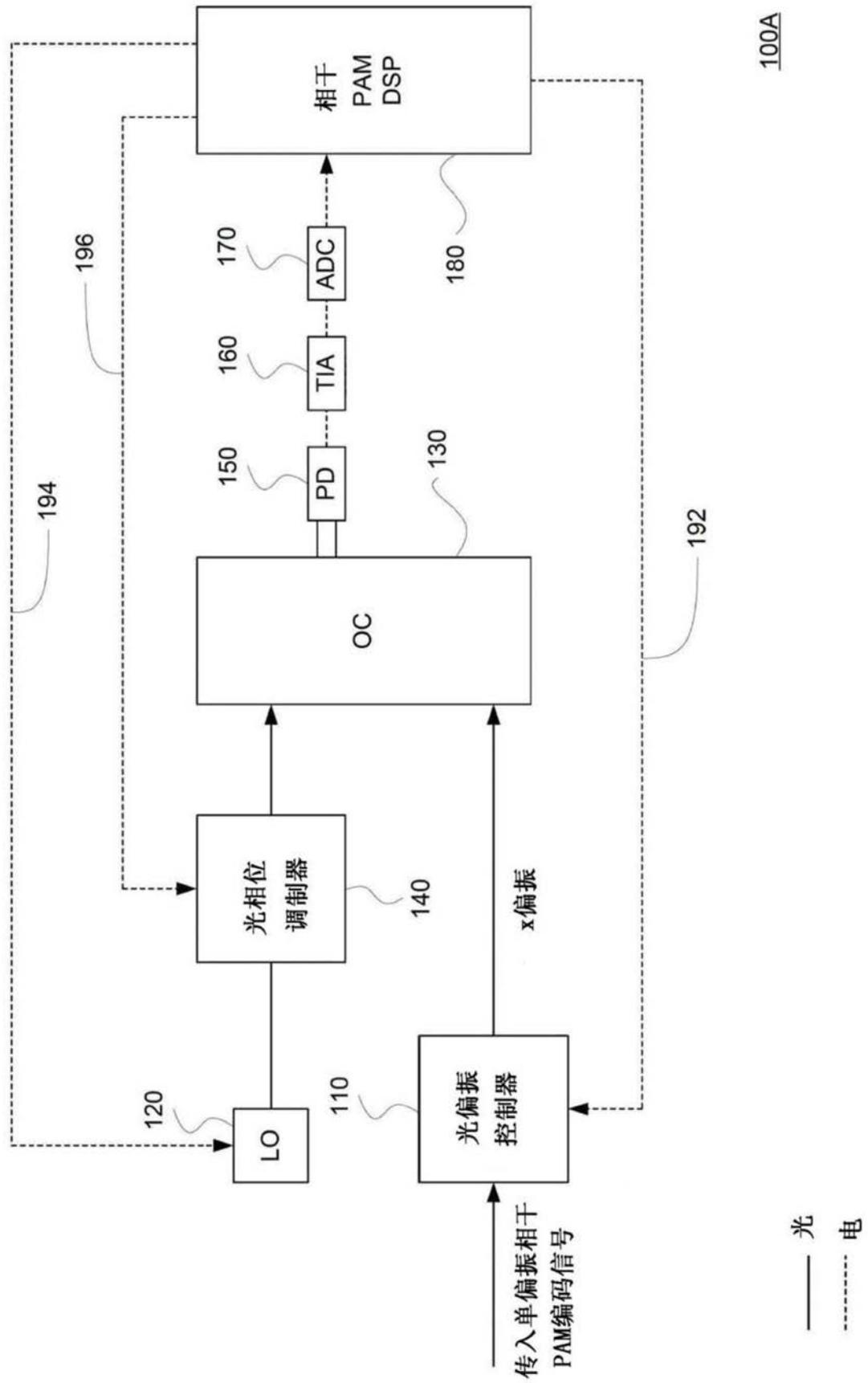


图1A

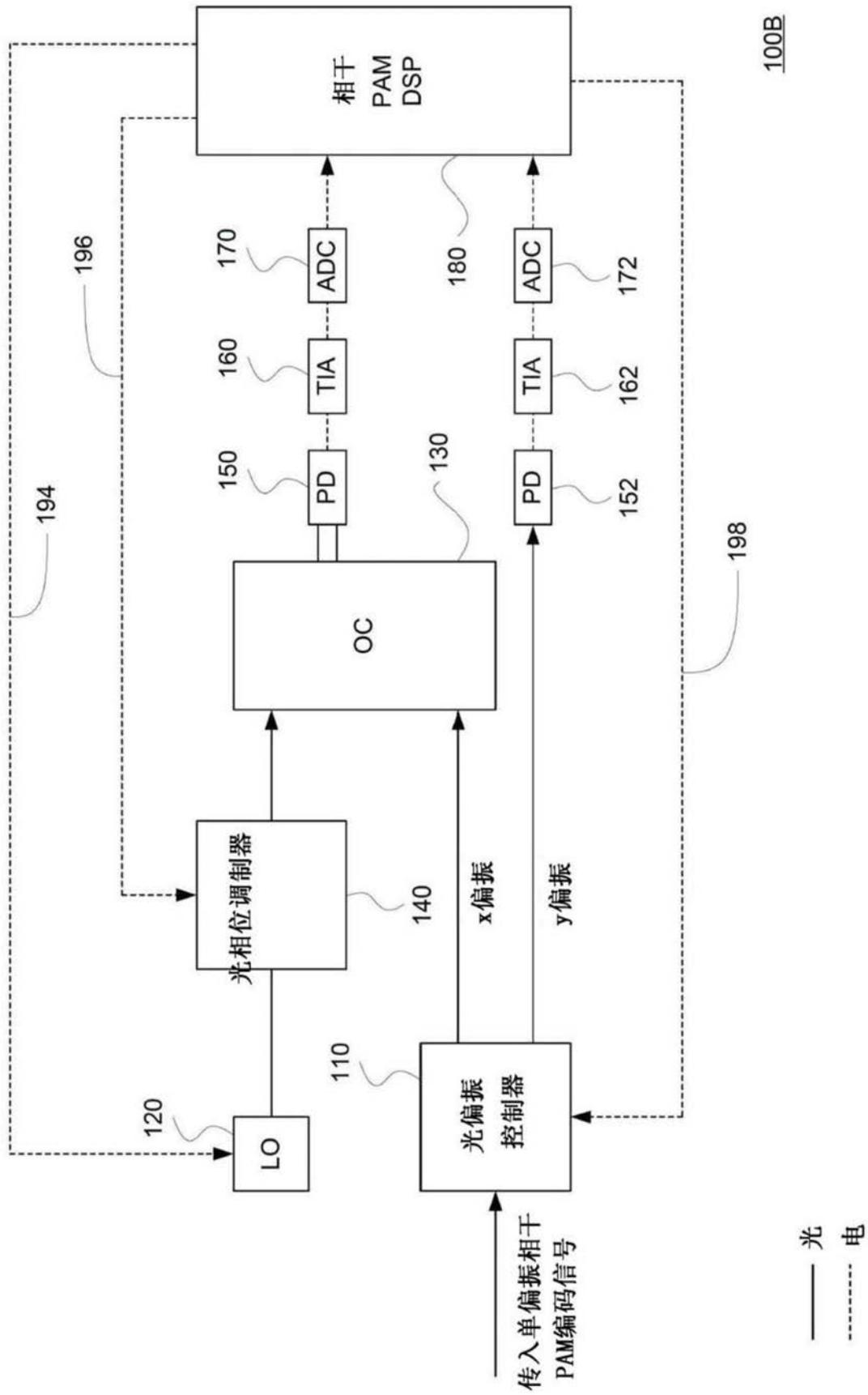
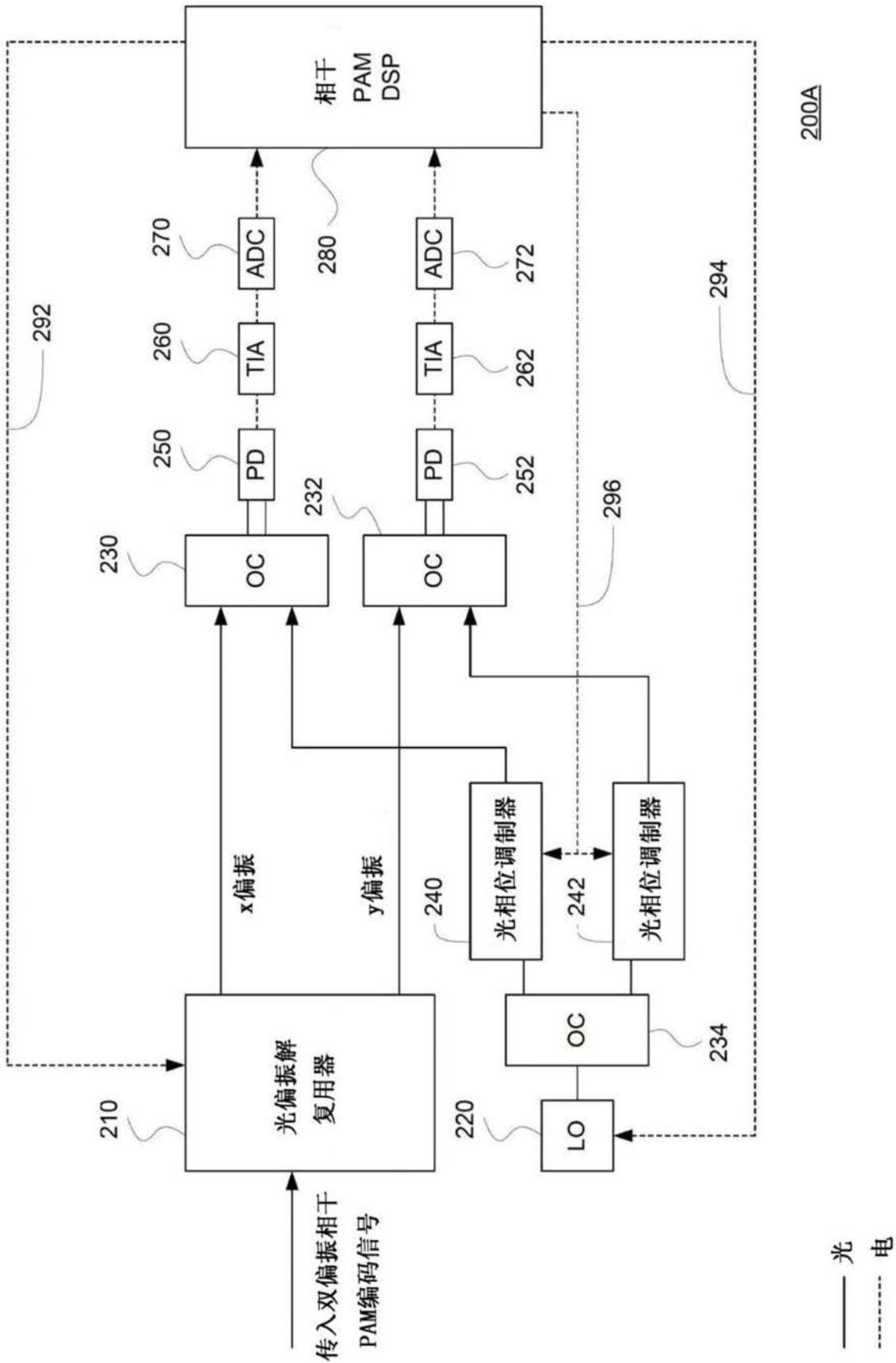
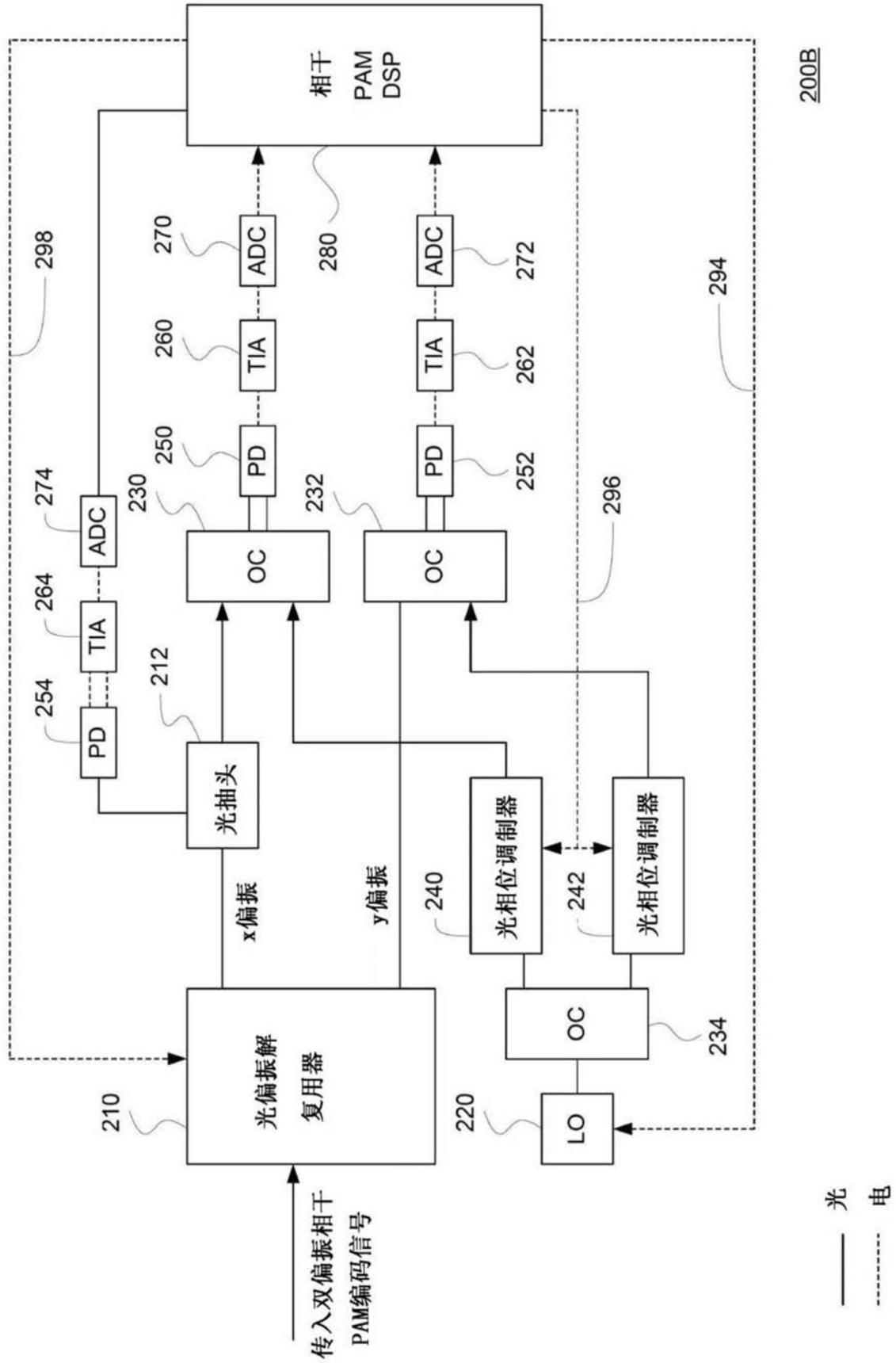


图1B



200A

图2A



200B

图2B

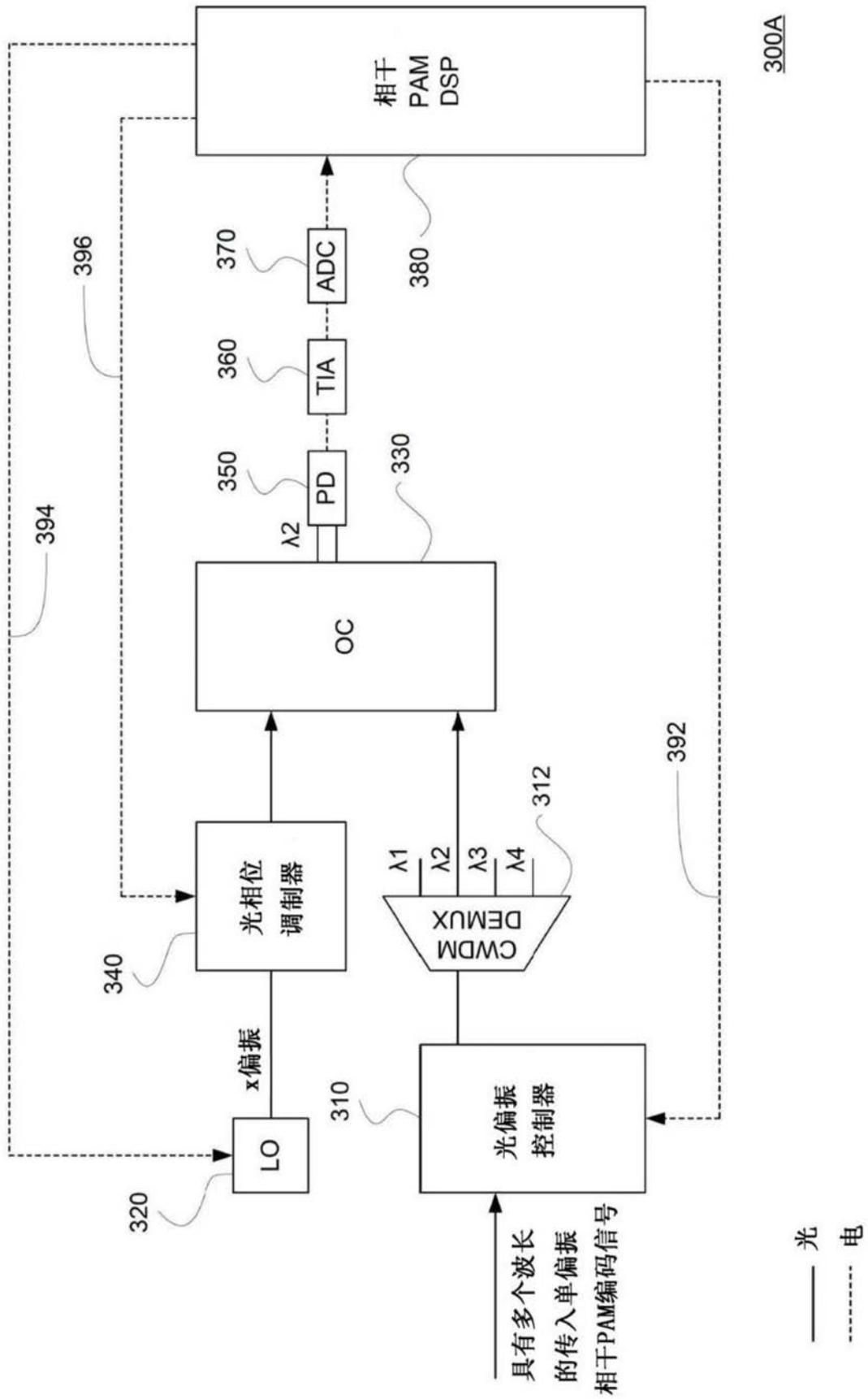


图3A

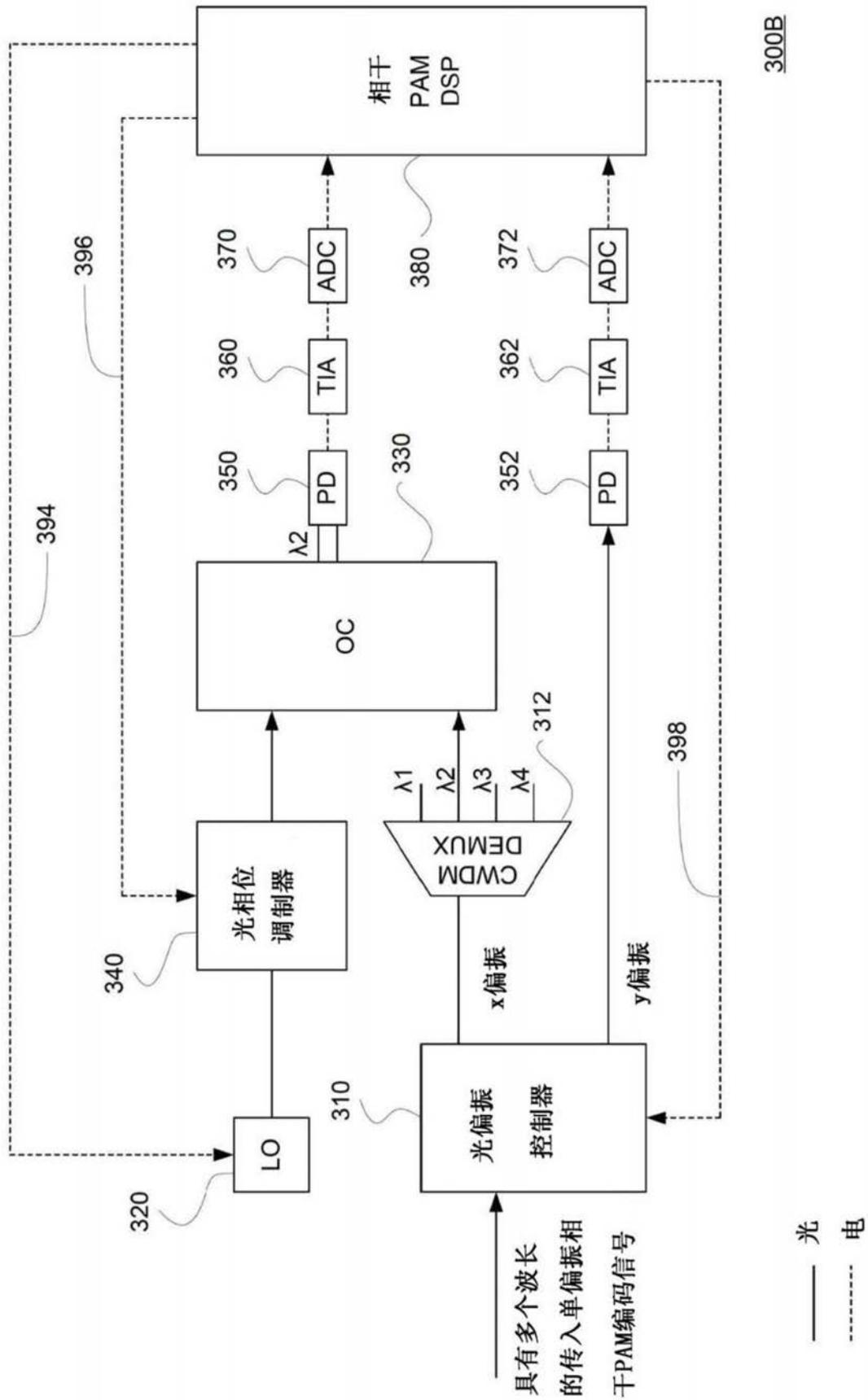


图3B

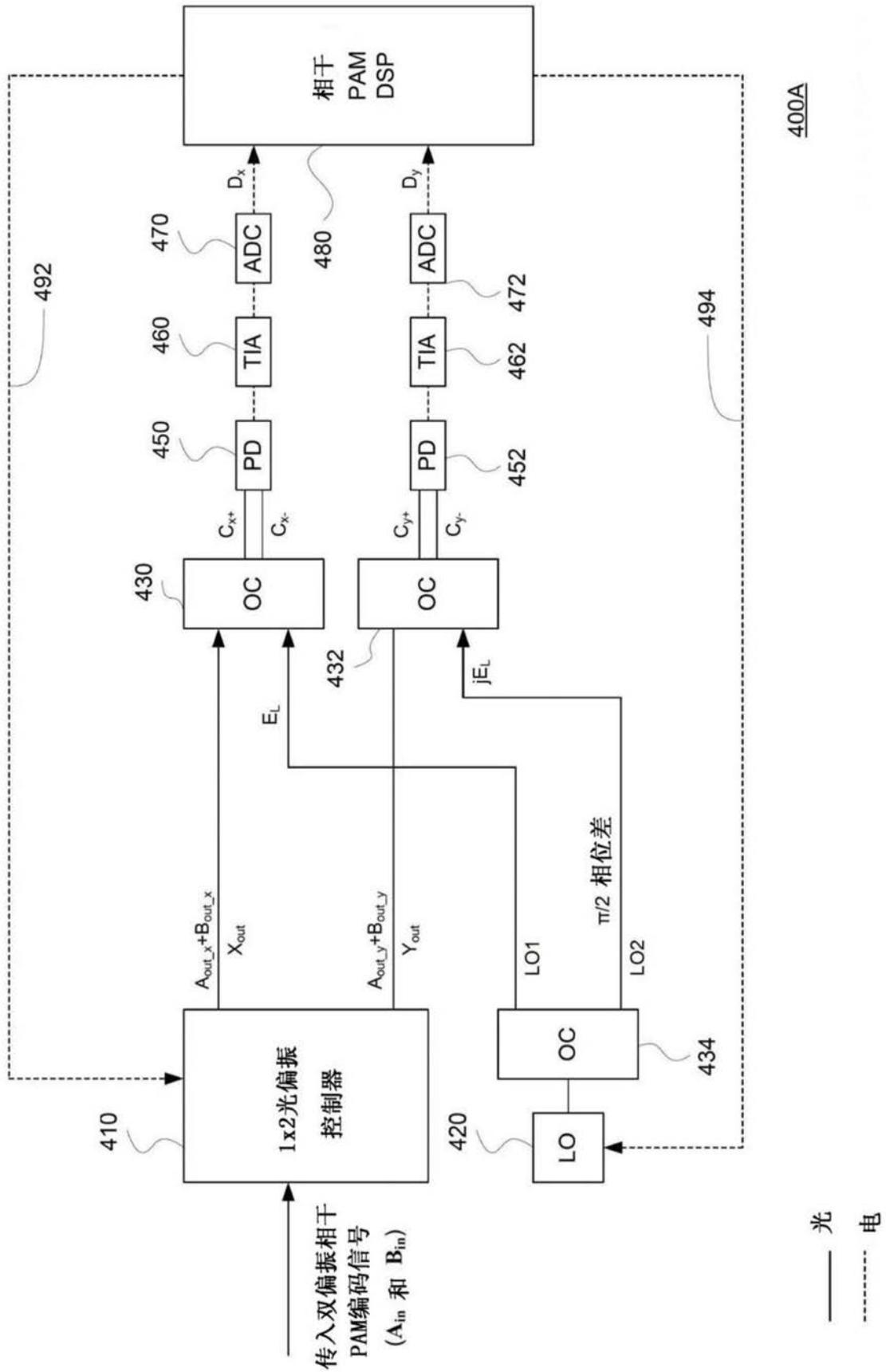


图4A

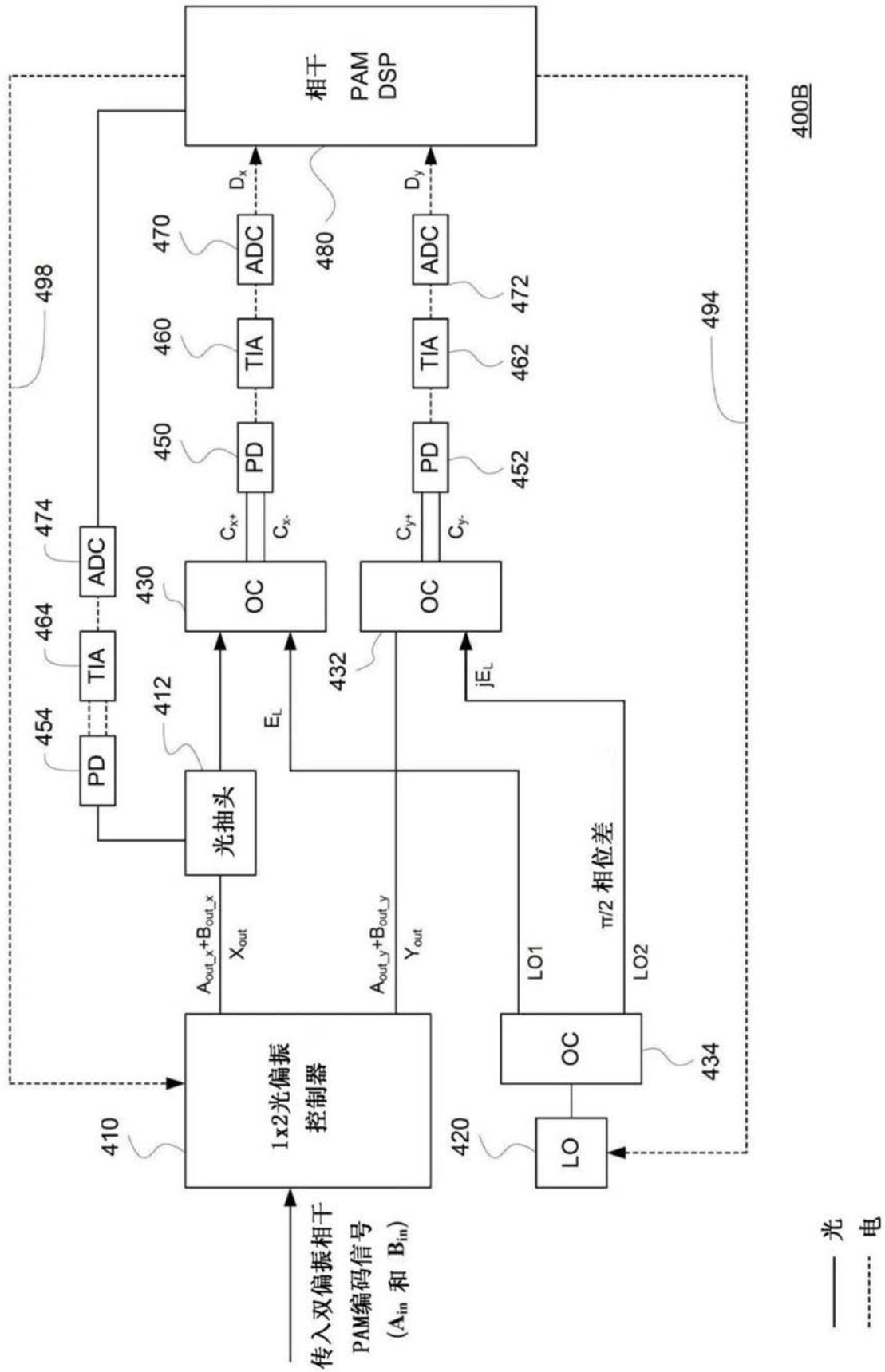


图4B

由DSP 480确定的偏振控制参数

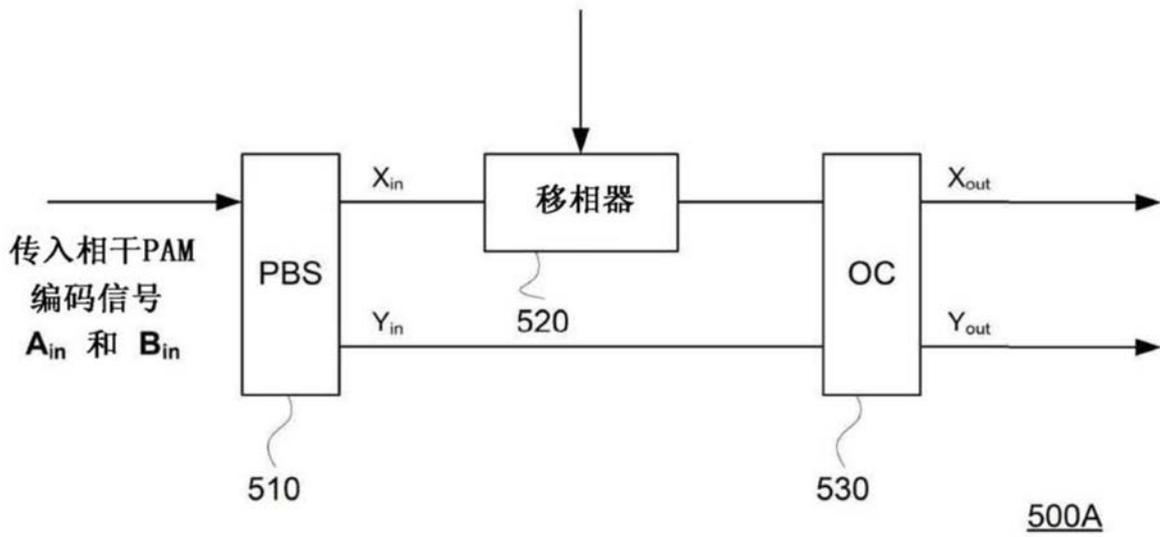


图5A

由DSP 480确定的偏振控制参数

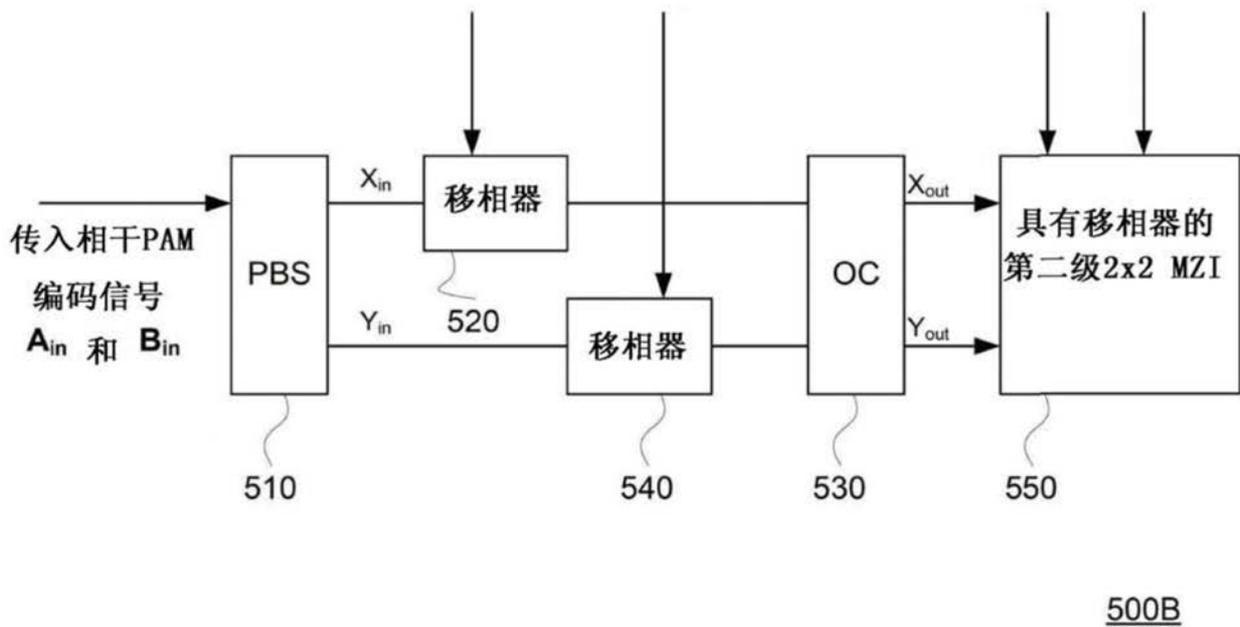
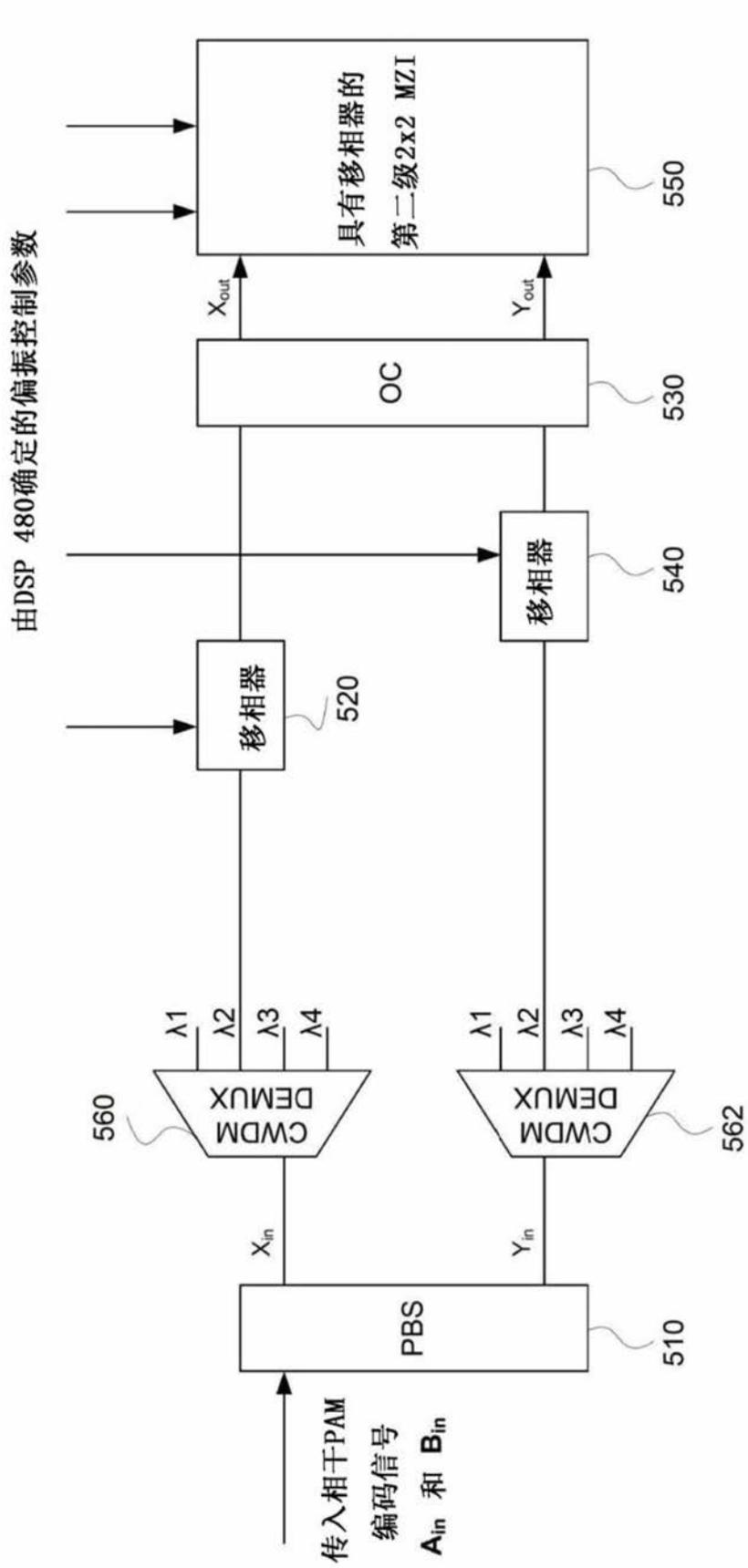


图5B



500C

图5C

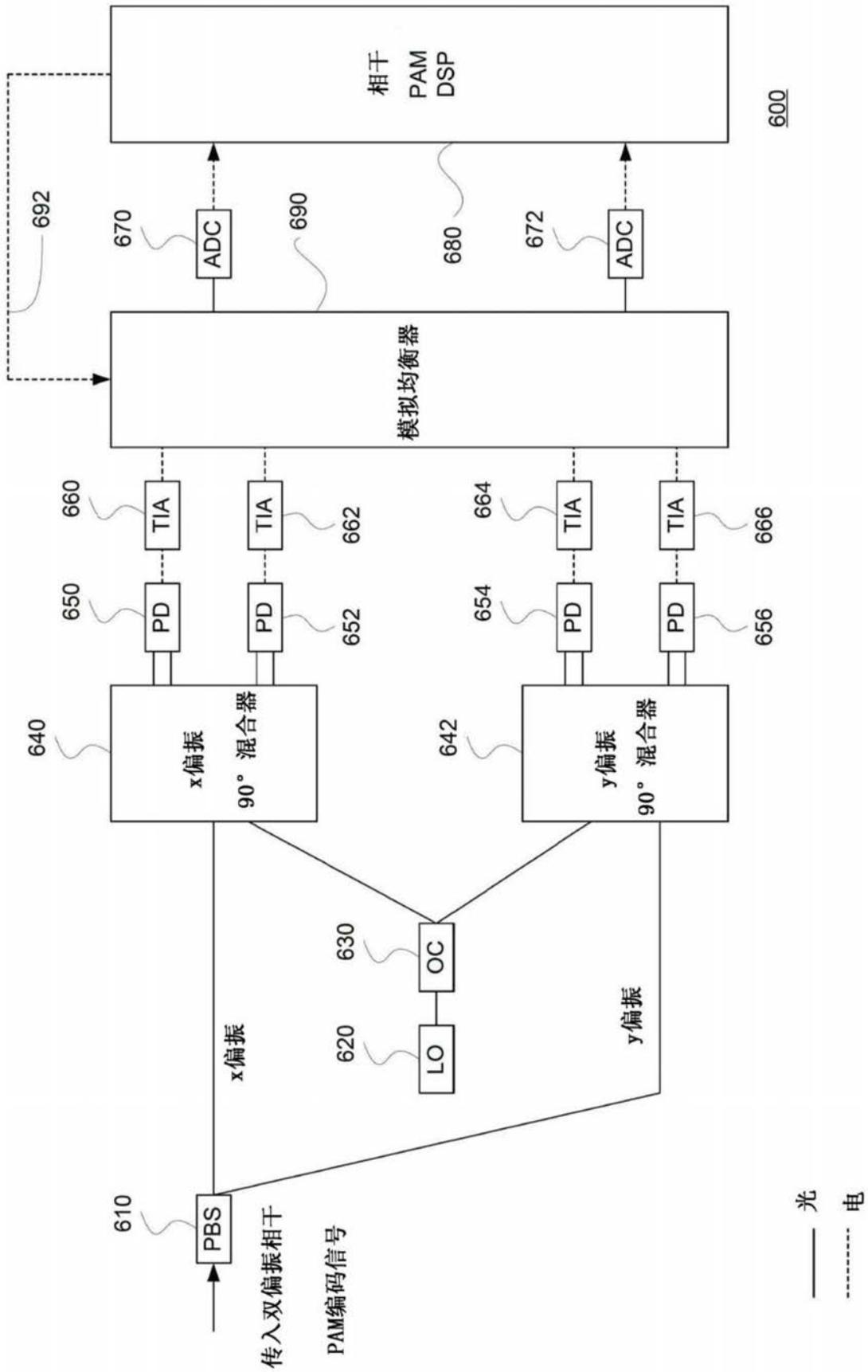


图6

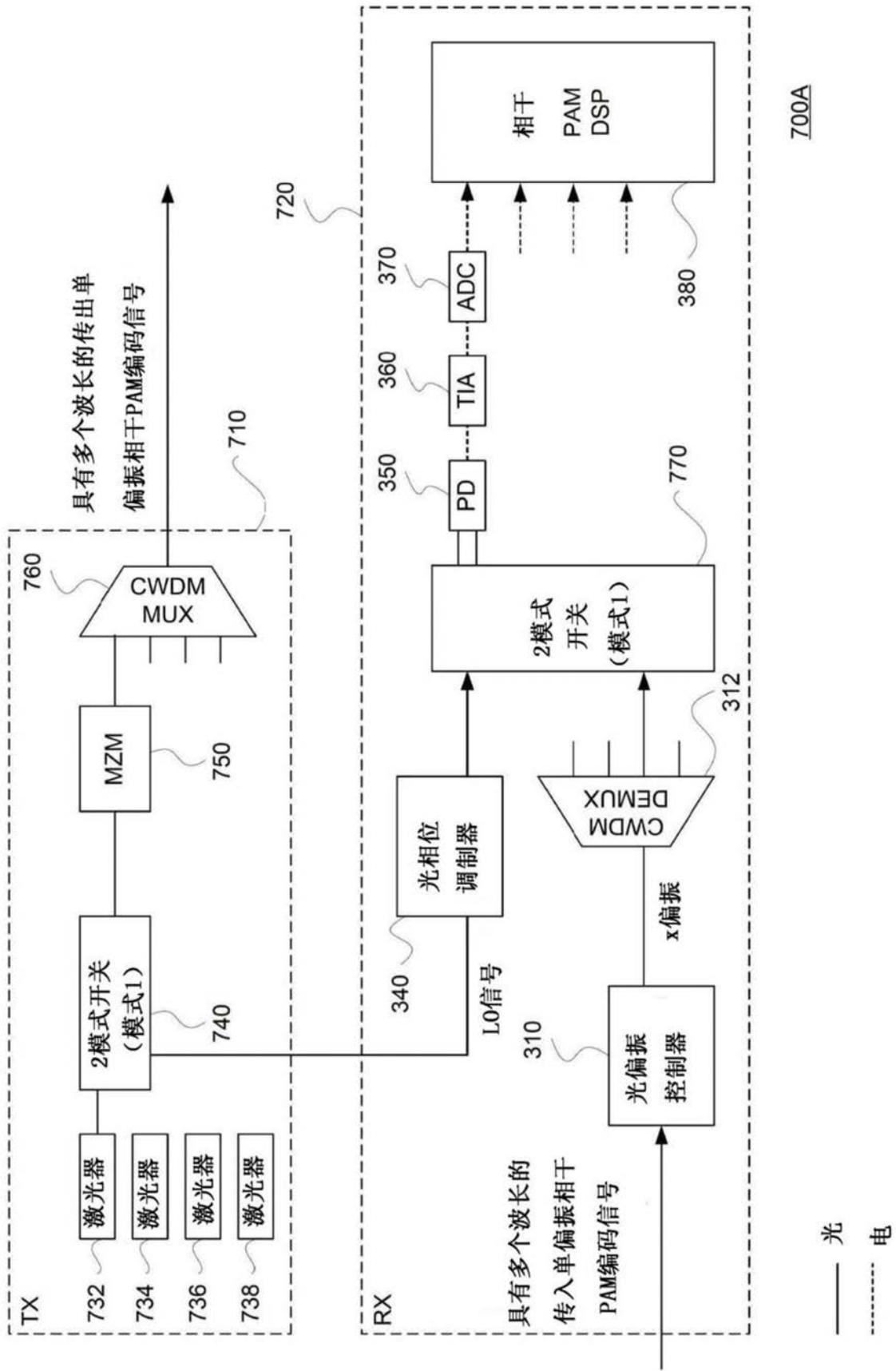


图7A

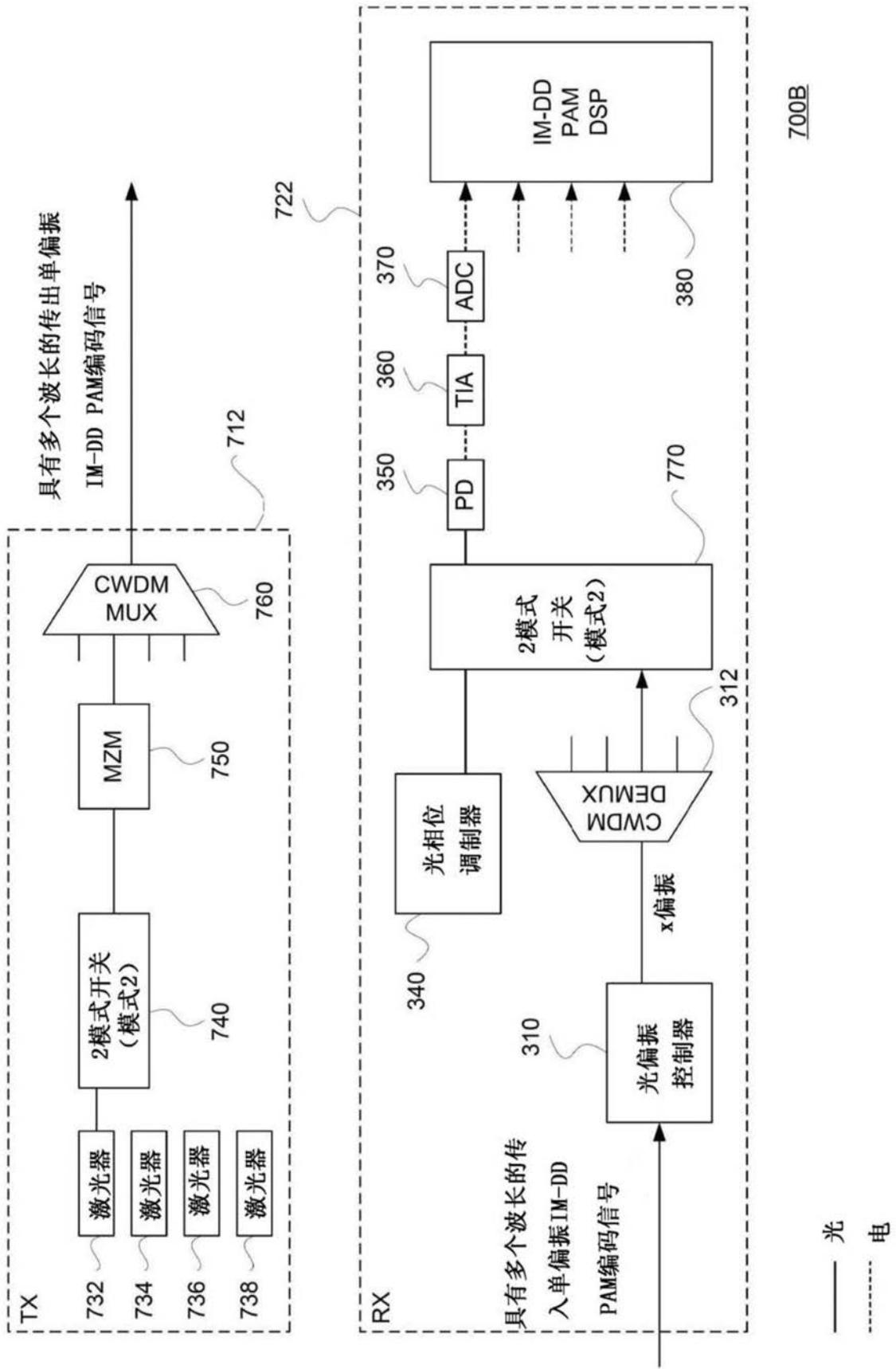
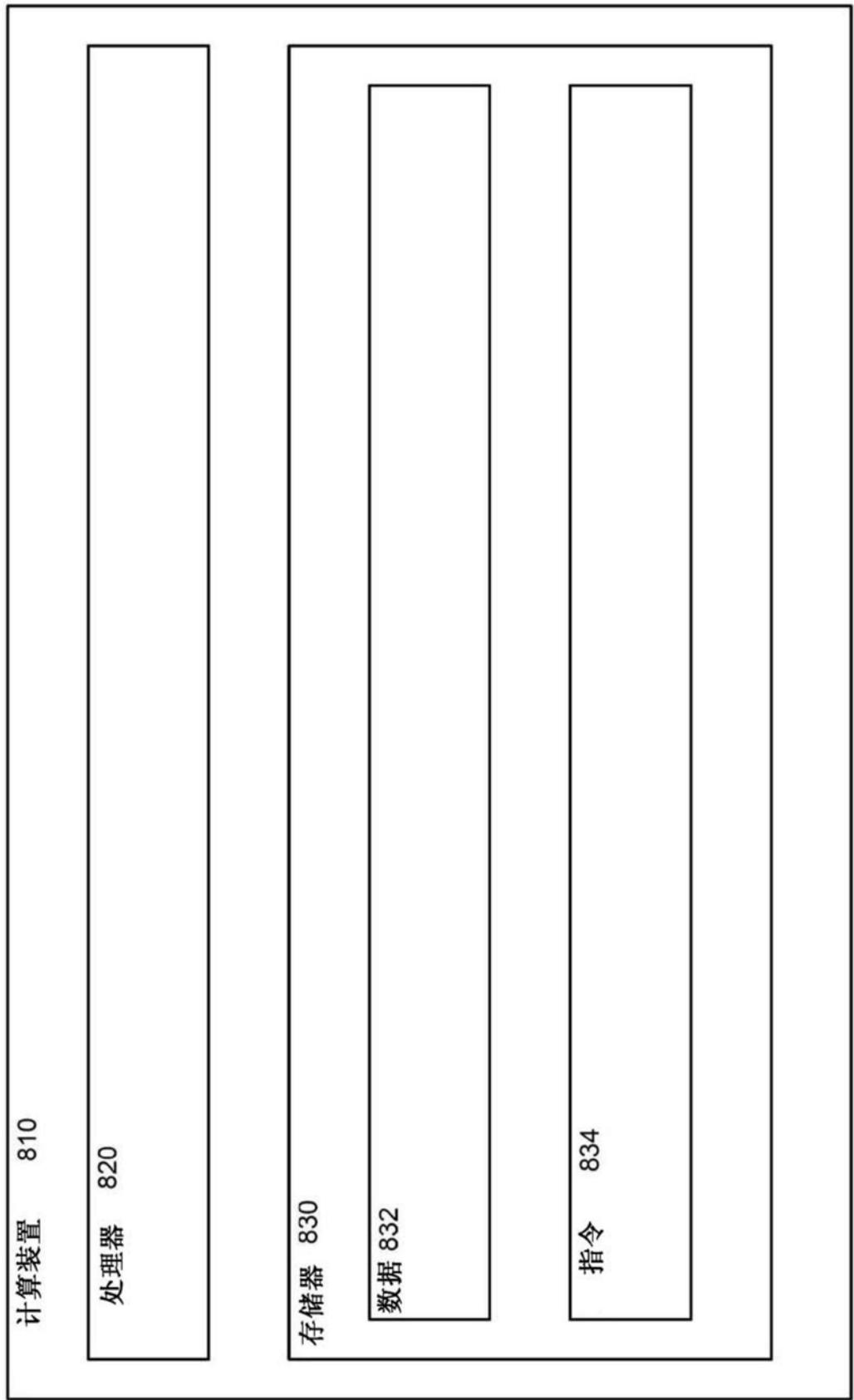
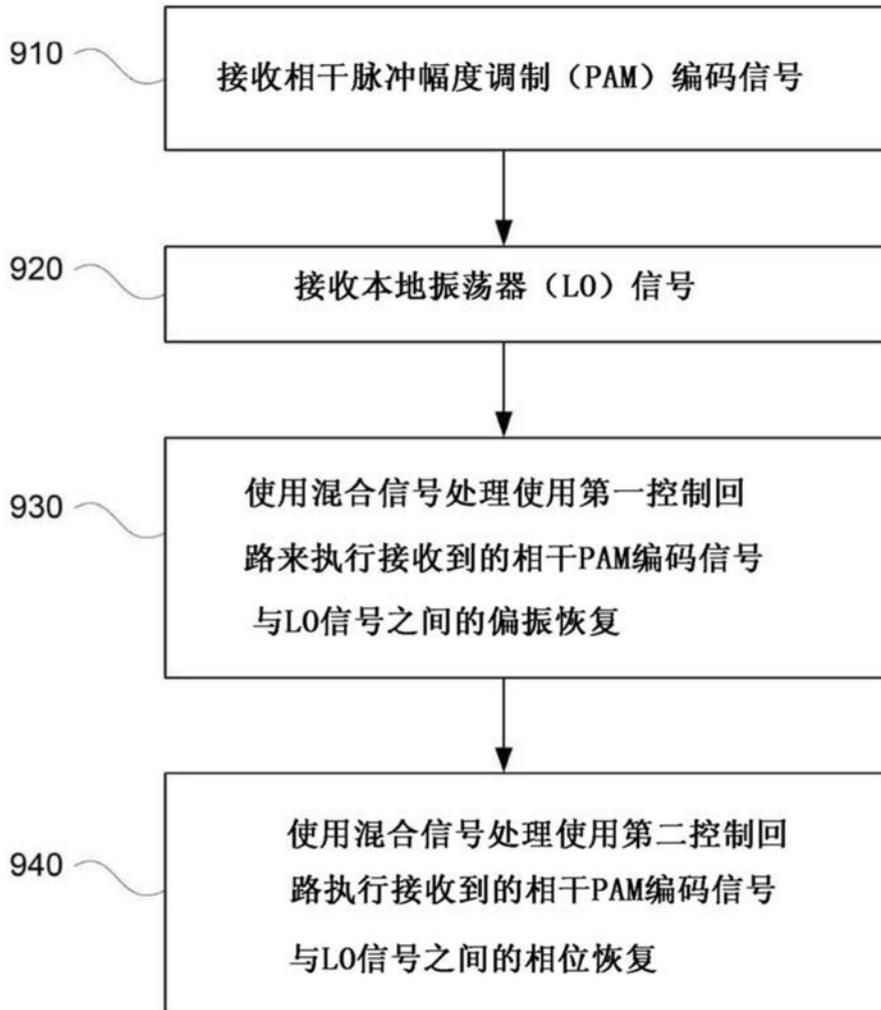


图7B



800

图8



900

图9