



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113169799 A

(43) 申请公布日 2021.07.23

(21) 申请号 201980077271.8

(22) 申请日 2019.09.24

(30) 优先权数据

18196265.5 2018.09.24 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.05.24

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2019/075606 2019.09.24

(87) PCT国际申请的公布数据

W02020/064672 EN 2020.04.02

(71) 申请人 丹麦科技大学

地址 丹麦灵比

(72) 发明人 关鹏宇

(74) 专利代理机构 隆天知识产权代理有限公司
72003

代理人 石海霞 金鹏

(51) Int.Cl.

H04B 10/2575 (2006.01)

H04B 10/50 (2006.01)

H04J 14/02 (2006.01)

权利要求书2页 说明书15页 附图17页

(54) 发明名称

具有增强灵活性的光线路终端和光纤接入系统

(57) 摘要

本公开涉及一种光线路终端,其可用于基于无源光网络的光纤接入系统。本公开还涉及一种PON系统;特别地,光线路终端可以被配置为使得可以在使用该光线路终端的PON系统中采用无色组件,并且使得可以在PON系统中直接采用无线通信。一个实施例涉及一种用于无源光网络的光线路终端,包括:至少第一发射器,用于生成时分复用(TDM)光载波信号,所述第一发射器包括第一时间透镜光信号处理器,所述第一时间透镜光信号处理器被配置为将所述TDM光载波信号转换为波分复用(WDM)光载波信号以分配给多个用户/ONU;至少第二发射器,用于生成波分复用(WDM)下行光数据信号以分配给所述多个用户/ONU;以及至少一个接收器,用于从所述用户接收和处理上行信号。

1. 一种用于无源光网络的光线路终端,包括:

-至少第一发射器,用于生成时分复用TDM光载波信号,所述第一发射器包括第一时间透镜光信号处理器,所述第一时间透镜光信号处理器被配置为将所述TDM光载波信号转换为波分复用WDM光载波信号以分配给多个用户/光网络单元ONU,

-至少第二发射器,用于生成波分复用WDM下行光数据信号以分配给所述多个用户/光网络单元ONU,以及

-至少一个接收器,用于接收和处理来自所述用户的上行信号。

2. 根据权利要求1所述的光线路终端,其中,所述波分复用WDM光载波信号定义第一波长范围,并且其中,所述下行WDM数据信号定义第二波长范围,并且其中,所述第一波长范围和所述第二波长范围分隔至少50纳米,更优选地至少100纳米,最优选地至少200纳米。

3. 根据权利要求2所述的光线路终端,其中,所述第一波长范围以约1300纳米为中心,并且其中,所述第二波长范围以约1500纳米或1550纳米为中心。

4. 根据权利要求1所述的光线路终端,其中,所述至少第一发射器被配置用于生成所述光数据信号中的至少一个或每个光数据信号的光载波信号,从而生成成对的光载波信号和光数据信号,其中,每对信号之间具有预定的频率差,并且其中,所述频率差对应于用于无线通信的射频RF频率。

5. 根据权利要求4所述的光线路终端,其中,所述WDM光载波信号和所述WDM光数据信号由同一基于时间透镜的光信号处理器生成。

6. 根据权利要求5所述的光线路终端,其中,在所述时间透镜光信号处理器之前,利用每第二个TDM支路载波生成所述TDM数据信号,然后所述时间透镜光信号处理器将生成相同的WDM数据信道和WDM载波信道,使得每个数据信道和每个载波信道之间的频率差是 $\Delta f = \Delta t \cdot K / 2\pi$, 其中, Δt 是数据TDM支路和相邻的TDM支路之间的时间间隔。

7. 根据前述权利要求中任一项所述的光线路终端,其中,所述至少第二发射器被配置为用于生成时分复用TDM光数据信号,所述第二发射器包括第二时间透镜光信号处理器,所述第二时间透镜光信号处理器被配置为将所述TDM光数据信号转换为所述WDM下行光数据信号。

8. 根据前述权利要求中任一项所述的光线路终端,其中,所述接收器包括:第三上行时间透镜光信号处理器,被配置为将从所述用户接收到的上行WDM数据信号转换为上行TDM数据信号;以及至少一个TDM接收器,用于解复用并处理所述上行TDM数据信号。

9. 根据前述权利要求中任一项所述的光线路终端,其中,所述下行WDM信号包括N个信号波长,并且其中,所述至少第二发射器包括多波长时分和波分复用阵列,所述多波长时分和波分复用阵列被配置为生成M个不同波长的时分复用下行光数据信号,并且其中,M小于所述下行WDM信号中的信号波长的数量N。

10. 根据权利要求9所述的光线路终端,其中,所述接收器包括:多波长时分和波分复用阵列,被配置为接收和处理M个不同波长的TDM上行光信号。

11. 一种无源光网络PON系统,包括根据前述权利要求中任一项所述的光线路终端。

12. 根据权利要求11所述的无源光网络PON系统,包括:

-光纤基础结构,用于分配下行信号和上行信号,

-多个光网络单元ONU,优选地,每个终端用户一个光网络单元ONU,

-至少一个远程节点,用于将所述下行WDM光数据信号和所述WDM光载波信号分解成单独的波长信号,使得每个ONU接收第一特定波长的下行信号光数据信号和第二特定波长的光载波信号。

13. 根据权利要求12所述的无源光网络PON系统,其中,每个ONU是无色的/波长无关的。

14. 根据前述权利要求12-13中任一项所述的无源光网络PON系统,其中,每个ONU包括:耦合元件,用于分离所述光载波信号和所述下行光数据信号;接收器,用于接收并处理所述下行光数据信号;以及上行信号生成器,用于接收并调制所述光载波信号,从而生成上行光数据信号。

15. 根据权利要求14所述的无源光网络PON系统,其中,所述上行信号生成器包括:反射半导体光学放大器和/或光学环形器、放大器和调制器,用于接收、放大和调制所述光载波信号。

16. 根据前述权利要求11-15中任一项所述的无源光网络PON系统,包括:

-光纤基础结构,用于分配所述下行信号和所述上行信号,

-多个光网络单元ONU,优选地,每个终端用户一个ONU,

-至少一个远程节点,用于将所述下行WDM光数据信号和所述WDM光载波信号分解成单独的波长信号,使得每个ONU接收第一特定波长的下行光数据信号和第二特定波长的光载波信号,

其中,所述ONU被配置为用于基于所述第一波长和所述第二波长之间的频率差来生成用于无线通信的射频RF数据信号。

17. 根据权利要求16所述的无源光网络PON系统,其中,每个光载波信号的一部分用于生成所述RF数据信号,并且所述光载波信号的另一部分用于生成上行光数据信号。

具有增强灵活性的光线路终端和光纤接入系统

技术领域

[0001] 本公开涉及一种可用于基于无源光网络的光纤接入系统的光线路终端。本公开还涉及一种无源光网络 (PON) 系统;特别地,该光线路终端可以被配置为使得在使用该光线路终端的PON系统中可以采用无色组件,并且使得可以在PON系统中直接采用无线通信。

背景技术

[0002] 固定和移动宽带用户的数据消耗的不断上升驱动了持续的行业创新以满足这一挑战。目前,由许多网络运营商在大众市场规模上部署基于PON的光纤接入系统。PON系统通常被称为互联网服务供应商和个体用户之间的“最后一英里”,即,PON系统通常用于向最终客户提供光纤(通常使用点对多点架构),其中,可以使用无动力光纤分路器使单个光纤能够服务多个终点(end-point)。终点通常是个体用户而不是商业分销商。

[0003] 无源光网络是“无源的”,其通常不使用电力驱动的组件来分离信号。相反,使用分束器来分配信号。每个分束器通常将来自单个光纤的信号分离到16、32或最多256个光纤中,这取决于制造商,并且可以在单个机柜中聚合几个分路器。分束器不能提供任何切换或缓冲功能,并且不使用任何电源。无源光网络相对有源网络既有优点又有缺点。可以避免涉及保持电子设备户外操作的复杂性。PON系统还允许模拟广播,这可以简化模拟电视的传送。但是,因为必须将每个信号推出到分路器所服务的每个人,所以对中心局中的单个下行发射器的要求很高。因此,目前PON系统背后的驱动器是高可靠性的、低成本的和无源功能的。

[0004] PON可以基于实施点对多点架构的时分复用(TDM),其中,单个下行发射器(在此称为光线路终端(OLT))通过共享光纤网络将数据帧传输到所有连接的光网络单元(ONU)。ONU仅通过嵌入信号中的地址标签查看自己的数据。在上行方向上,OLT规划ONU传输以避免ONU之间的碰撞。无源光分路器/合成器使得能够划分光纤以到达多个客户位置,从而保持光分配网络无源,参见图1和图2,其中示出了现有技术的PON系统。

[0005] 因此,无源光网络成为光纤接入系统和光纤入户中的主导技术。尽管光纤具有大的带宽,但由于以下原因,当前的PON技术将在4至5年内耗尽能力:

- 用户增长
- 每个用户连接的装置增长
- 每个装置或应用的带宽需求日益增加。

[0006] 由于较低的色散容限和较低的信噪比(SNR),PON系统的串行比特率难以增加至超过10Gb/s。即使在色散容限增强的双二进制调制的情况[2]下,这也将色散未补偿的25Gb/s PON的C波段中的最大到达范围限制为24千米并且将色散未补偿的40Gb/s PON的C波段中的最大到达范围限制为10千米。最近,ITU-T定义了超过40Gb/s的PON的第二下一代PON(NG-PON2)标准,其中,时分和波分复用(TWDM)PON已经被认为是主要方案。已经证明了基线TWDM-PON在60千米的SMF上具有40Gb/s的总容量(aggregate capacity)[3]。TWDM-PON的主要挑战是以低成本实现其光网络单元(ONU),预计其成本超过标准千兆比特PON(GPON)ONU

的成本的20倍[1]。NG-PON2的另一个竞争候选是基于波长分路器光分配网络的点对点(P2P)WDM-PON,其具有独特的特征,包括:长距离、高带宽、安全性、高服务级别保证、易于网络管理和升级简单[4]。P2P WDM-PON的主要缺点是中心局(CO)处大量端口、发射器和终端,这需要更多CO空间和运营成本。

[0007] 同一发明人的题为“Optical line terminal and optical fiber access system with increased capacity(具有增强容量的光线路终端和光纤接入系统)”的在先未决申请PCT/EP2018/073867公开提出了一种新型的OLT结构和新型的无源光网络架构,其可显著地提高了光接入系统的传输容量并提高了下行PON传输的成本和能效。PCT/EP2018/073867通过引用整体并入本文。然而,对于上行PON传输,性能或多或少与现有技术的WDM PON系统相同,其需要每个ONU处波长可调谐或波长特定组件。这种组件的使用是提高上行WDM-PON传输的成本和能效的关键限制。

[0008] 光接入系统中的另一个问题是光纤和无线通信之间的集成。目前,光载无线通信(ROF)被认为是用于移动前传/回传和无线分配网络的有前景的方案[9]。另外,NG-PON2标准具有选定的波分复用(WDM)作为移动前传和未来5G网络的关键方案[1]。因此,至关重要的是将WDM与常规ROF架构无缝集成。然而,每个WDM-ROF数据信道需要单独的光波用于外差上转换。需要在信号激光器和上转换激光器之间非常精确的波长稳定来保持稳定的无线载波频率。对于大的数据信道计数,该方案的成本和复杂性可能成为集成光接入系统中的光通信和无线通信的限制。

发明内容

[0009] 本公开的目的是解决以上列出的问题。本文呈现的方案是利用和采用时间透镜光信号处理。时间透镜可以扩展和压缩光脉冲,同时基本上保持脉冲的时域剖面线(temporal profile)。时间透镜基于光的时空二元性:时域波形的二次相位调制(PM)类似于薄透镜对空间光束的作用,因此表达为“时间透镜”(又称为“时间-透镜”)。通过组合具有合适的色散介质的时间透镜,可以实现光学傅里叶变换(OFT),如本文所示。基于时间透镜的OFT进一步表明为是用于超速光信号处理非常通用且强大的工具。基于时间透镜的OFT可以应用于将光信号的时域剖面线转换到频域,反之亦然。目前公开的原理通常基于使用基于时间透镜的光信号处理器用于时分复用(TDM)和波分复用(WDM)之间的光信号转换(反之亦然)的思想。

[0010] 先前公开的时间透镜应用主要针对通过与采用目前公开的OLT结构的无源光网络的光线路终端相关来增加网络的下行传输容量。即,OLT结构包括:至少一个发射器,用于生成时分复用(TDM)下行光数据信号;以及第一时间透镜光信号处理器,被配置为将下行TDM信号转换为下行WDM信号以分配给多个用户。通常,用于从所述用户接收和处理上行信号的至少一个接收器也是OLT的一部分。基于时间透镜的光学处理器可以将OL中生成的TDM信号转换为通常具有低波特率的多个WDM信道。这些可以例如由常规的无源AWG直接解复用,并以低固定损耗(通常小于4dB损耗)发送到用户侧的各个光网络单元(ONU)。在单个ONU侧,分离的WDM信道可以由基速接收器接收,从而产生更好的接收器灵敏度,对于32个用户通常大约为10dB。这可以通过比迄今为止已知的功耗更低的功耗来实现。下行容量甚至可以通过使用基于时间透镜的光信号处理器用于M波长TWDM信号和N波长WDM信号之间进行光

信号转换被进一步提高,其中,M通常小于N。与现有技术的方案相比,该时间透镜原理的应用可以在光接入通信网络上实现大约多于10倍的数据率,更大的成本效益和更好的能效。点对多点、少点对多点和多点对多点可以通过将光学时间透镜原理应用于PON系统来实现。

[0011] 本公开提出了时间透镜原理(即,时间透镜光信号处理(OSP))的新型应用,其可以应用于上行PON传输和无线通信。第一实施例涉及一种用于无源光网络的光线路终端,包括:至少第一发射器,用于生成时分复用(TDM)光载波信号,所述第一发射器(即,信号生成器)包括第一时间透镜光信号处理器,该第一时间透镜光信号处理器被配置为将TDM光载波信号转换为波分复用(WDM)光载波信号以分配给多个用户/ONU。该载波信号可用于上行传输,即,载波信号被带到ONU。TDM光载波信号是包括分配给不同特定时隙的光脉冲的光学信号,即,与脉冲串一样,但是没有数据被调制到载波信号(既不是TDM载波信号不是WDM载波信号)中。在这方面,在本文中使用的术语“未调制的光信号”来表征光载波信号是讲得通的,其中,术语“未调制的”是指“无数据调制”。在每个ONU处,载波信号可以被调制并作为上行光数据信号发送回OLT,即,上行原始的“未调制的”载波信号已经通过数据被调制成为上行光数据信号。因此,在ONU中不需要光源。光线路终端还可以包括至少第二发射器,其用于生成波分复用(WDM)下行光数据信号以分配给所述多个用户/ONU。WDM下行光数据信号是数据信号,即,与“未调制的”光载波信号相比,它被调制。还可以设置至少一个接收器,其用于从所述用户/ONU接收和处理上行光数据信号。

[0012] 光载波信号可用于通过调制载波信号并将其发送回(上行)来在ONU中生成上行信号,从而避免在ONU中使用光源。因此,本公开还涉及一种包括本文所述的OLT的无源光网络(PON)系统。可选地,PON系统可以包括光纤基础结构,其用于分配下行信号和上行信号。多个光网络单元(ONU)可以设置在系统中,优选地,为每个终端用户设置一个ONU,该ONU包括至少一个远程节点,其用于将下行WDM光数据信号和WDM光载波信号分离成单独的波长信号,使得每个ONU接收第一特定波长的下行光数据信号和第二特定波长的光载波信号,其中,光载波信号不包含数据。通过用于接收和处理下行光数据信号的接收器和用于接收和调制光载波信号的上行信号生成器,可以在每个ONU中生成可以与其他上行数据信号组合的上行光数据信号,该上行光数据信号通过光纤基础结构被发送回并在OLT中被接收和处理。这种设置的主要成本优势在于,每个ONU可以制成无色的,即,不是在每个ONU中具有波长特定发射器,可以在系统上全部使用相同的ONU,因为每个上行信号的波长由OLT确定和控制。例如,ONU的上行信号生成器可以包括反射半导体光学放大器和/或光学环形器(optical circulator)、放大器和调制器,用于接收、放大和调制光载波信号。

[0013] 但发明人进一步认识到,借助于时间透镜光信号处理,光载波信号可以被巧妙地配置,使得它也可以用于直接生成用于无线通信的RF信号。因此,本公开还涉及一种包括本文所述的OLT的无源光网络(PON)系统。多个光网络单元(ONU)可以设置在系统中,优选地,为每个终端用户设置一个ONU,该ONU包括至少一个远程节点,其用于将下行WDM光数据信号和WDM光载波信号分解成单独的波长信号,使得每个ONU接收第一特定波长的下行光数据信号和第二特定波长的光载波信号。然后,该ONU可以被配置为用于基于第一波长和第二波长之间的频率差来生成用于无线通信的射频(RF)数据信号。并且在OLT中生成的载波信号仍可用于上行传输,因为每个光载波信号的一部分可用于生成用于无线通信的RF数据信号,并且光载波信号的另一部分可用于生成上行光数据信号,如上所述。

[0014] 发明人进一步认识到,也可以利用成对数据和载波信号,以在没有通常的附加局部振荡器的情况下采用商业相干接收器。当WDM数据信道和WDM载波之间的频率差在相干接收器的带宽限制内时,这样的成对数据和载波信号可以通过现成的相干接收器直接接收,并且这可以通过时间透镜光信号处理器的配置而被控制。因此,本公开还涉及如这里所公开的PON系统,其中,至少一个(或每个)ONU包括相干接收器,并且其中,至少部分光载波信号与用于接收下行光数据信号的下行光数据信号在相干接收器中一起使用。

[0015] 目前公开的时间透镜方法还提供在不同的WDM数据信道上使用的不同调制格式。这在图13中示例说明,其中,四种不同的TDM信号分别使用QPSK、BPSK、8-QAM和16-QAM。时间透镜信号处理器可以将所有这些不同的调制格式转换为WDM信道并在转换中保持相应的调制格式。

[0016] 将目前公开的新型时间透镜方法应用于上行PON传输,可以避免使用波长可调谐/特定组件,并且可以大大提高上行传输的成本和能效。通过应用于无线传输,可以提供能够无缝地生成WDM-ROF信道和常规光学WDM信道的任何组合的发射器结构。目前公开的OFT允许同时生成多个WDM信道,并且动态地将上转换色调分配给以远程天线单元为目标的那些信道。在本文公开的实验例中,证明了在100千米SSMF加上0.5米的无线距离上 12×2.5 -Gb/s OOK和 10×4 -Gb/s QPSK混合传输。这是从单个激光器和调制器生成的最高数量的WDM-ROF信道。

[0017] 目前公开的OLT结构允许从单个TDM信号源生成大量WDM信道,实际上本文提出的用于PON的时间透镜OFT方法可以被调整为使得TDM信号中的所有单独的信号可以被转换为WDM信号中的特定波长,并且这可以在宽波长间隔上提供,例如,整个C波段(1530至1565纳米),L波段(1565-1620纳米)或C+L波段或其一部分。所有生成的WDM信道的频率可以彼此频率锁定,并且频率格栅(frequency grid)以及波长分配可以通过OFT调整,而无需像常规的WDM PON中单独控制所有激光频率,即,与常规的WDM PON相比,相当简单。

[0018] 目前公开的OLT结构和PON架构在波长分配方面是高度灵活的,因为它允许通过在时域内编码(重新映射)TDM信号来以亚纳秒调谐信号波长,而无需调谐光源的实际波长。并且TDM信号中的每个单独信号可以映射到WDM信号中的特定波长。因此,目前要求保护的发明不仅可以提高PON系统的容量,而且还具有TDM-PON的灵活性以及WDM-PON的传输性能。

附图说明

[0019] 附图中使用以下符号:

[0020] OLT(光线路终端):PON头端,通常位于中心局。

[0021] ONU(光网络单元):用户侧PON设备。

[0022] ODN(光分配网络):将OLT连接到ONU的光纤基础结构。

[0023] SNI(服务节点接口):城域网/核心网络的接口。

[0024] UNI(用户网络接口):用户网络的接口。

[0025] CR(时钟恢复):用于同步光信号处理器2。

[0026] 图1A-D示出了现有技术的光接入系统的四个示例。

[0027] 图2A示出了现有技术TDM-PON系统的架构的示例。

[0028] 图2B示出了现有技术WDM-PON系统的架构的示例。

- [0029] 图3A示出了使用时间透镜原理和无色组件的用于上行传输的WDM-PON架构的示例。
- [0030] 图3B示出了仅使用基于反射半导体光学放大器的无色组件的ONU结构。
- [0031] 图3C示出了仅基于环形器的无色组件的ONU结构。
- [0032] 图4示出了提出的柔性混合光子-毫米波发射器的原理。
- [0033] 图5示出了使用用于无线通信的时间透镜的WDM-PON架构的示例。
- [0034] 图6示出了使用用于仅具有一个时间透镜处理器的无线通信的时间透镜的WDM-PON架构的示例。
- [0035] 图7示例说明了本公开的从脉冲串到WDM载波的转换的原理。
- [0036] 图8A示例说明了本公开的从多波长脉冲串到符号率增强的WDM载波之间的转换的原理。
- [0037] 图8B示出了可以在从多波长TDM信号到符号率增强的WDM数据信道和WDM载波的转换中应用的转换的原理。
- [0038] 图9示出了本公开的在D-k配置中使用简化的时间透镜光信号处理器进行转换的原理的一个示例。
- [0039] 图10示出了在100千米SSMF加0.5米无线距离上的 $12 \times 2.5\text{Gb/s}$ 和 $10 \times 4\text{Gb/s}$ QPSK传输的设置。
- [0040] 图11A示出了 $12 \times 2.5\text{Gb/s}$ TDM OOK信号的波形。
- [0041] 图11B示出了OFT输出的频谱。
- [0042] 图11C示出了通过光学色调(通过T标记)获得的WDM信道。
- [0043] 图12A示出了 $12 \times 2.5\text{Gb/s}$ OOK混合传输的所有信道BER性能。
- [0044] 图12B示出了 $10 \times 4\text{Gb/s}$ QPSK混合传输的所有信道BER性能。
- [0045] 图13示出了时间透镜信号处理允许在不同的WDM信道上使用不同的调制格式,并且还允许用于不同要求的动态调整。

具体实施方式

[0046] 时间透镜信号处理单元通常包括色散介质和相位调制级,例如,具有中间色散介质的两个相位调制级(所谓的K-D-K配置)。另一个示例是色散介质和单个相位调制级(所谓的D-K或K-D配置)。时间透镜信号处理级是光学傅里叶变换(OFT)的示例。例如,在WO 2015/131908中公开了K-D-K配置。然而,当在本文描述的PON系统中采用时间透镜时,不能直接应用K-D-K配置。相反,当在PON系统中使用时间透镜时,通常必须引入特定的操作参数和条件。

■时间透镜原理

[0047] 正如空间光学成像系统可以产生比光学对象更大或更小的图像,时间透镜可以用于压缩或扩展光脉冲。如前所述,时间透镜可以扩展和压缩光脉冲,同时基本上保持脉冲的时域剖面线。在US5,453,871中公开了时间透镜,其中,提出了脉冲压缩器,其以类似于光学成像系统的操作的方式对时域脉冲操作。

[0048] 目前公开的OFT(时间透镜)模块中的相位调制可以通过各种方式实现,例如,通过使用啁啾泵脉冲的四波混合(FWM)。可以在非线性光学元件中获得四波混合(FWM),其

中,非线性光学元件通过啁啾泵脉冲光学泵浦。例如,非线性光学元件可以是高非线性光纤(HNLF)。相位调制也可以通过使用抛物线强度剖面(parabolic intensity profile)泵脉冲的交叉相位调制(XPM)或使用电驱动信号的电光相位调制来获得。FWM和XPM效应通常源于非线性光克尔效应,该非线性光克尔效应通常用于非线性光信号处理。OFT单元中的色散介质可以通过标准光纤(例如,标准单模光纤(SSMF)或色散补偿光纤(DCF),或高非线性纤维)或任何其他色散结构(例如,绝缘体上硅-波导平台)实现。后者的一个示例是绝缘体上AlGaAs波导,例如,驻留在半导体衬底上的低折射率绝缘层顶部的薄 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层。可以使用晶片绑定和衬底去除实现该结构。铝组分(X)可以是例如17%,这使得材料带隙为1.63eV和折射率为3.33。由于这种布局的大折射率对比度($\sim 55\%$),光可以被限制在亚微米波导芯中。由于非线性参数(γ)高度依赖于波导有效模式面积(A_{eff}) (如 $\gamma = 2\pi n_2/\lambda A_{\text{eff}}$ 所表示的),因此,对于使用320纳米 \times 630纳米的横截面尺寸的绝缘体上AlGaAs波导,可以获得约为 $660\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ 的超高有效非线性,其数量级高于典型的 Si_3N_4 波导的数量级[6,7]。

■ 光线路终端

[0049] 如上所述,本公开的第一方面涉及一种用于无源光网络的光线路终端。光线路终端通常包括至少一个发射器,其例如用于生成时分复用(TDM)下行光数据信号。然后,可以设置时间透镜光信号处理器(即,OFT元件),并且时间透镜光信号处理器被配置为将下行TDM信号转换为下行WDM信号,通常用以分配给多个用户。可以设置至少一个接收器用于接收和处理来自所述用户的上行信号。在这种情况下,可以存在至少两个发射器,其中,至少一个发射器用于生成数据信号,至少一个发射器用于生成载波信号。例如,用于无源光网络的光线路终端包括:至少第一发射器,用于生成时分复用(TDM)光载波信号,所述第一发射器(即,信号生成器)包括第一时间透镜光信号处理器,第一时间透镜光信号处理器被配置为将TDM光载波信号转换为波分复用(WDM)光载波信号以分配给多个用户/ONU;至少第二发射器,用于生成波分复用(WDM)下行光数据信号,以分配给所述多个用户/ONU;以及至少一个接收器,用于接收和处理来自所述用户的上行信号。

[0050] 可以设置耦合元件,以用于将WDM光载波信号和下行WDM光数据信号耦合到单个光纤中。此外,还可以设置一个或多个光学放大器,以用于放大WDM光载波信号和/或下行WDM光数据信号。

[0051] 在另一个实施例中,可以设置第三上行时间透镜光信号处理器,并且其被配置为将从所述用户接收到的上行WDM信号转换为上行TDM信号。然后,可以设置至少一个TDM接收器,以用于解复用并处理该上行TDM信号。或者,可以设置至少一个WDM接收器,以用于解复用从所述用户接收到的上行WDM信号。

[0052] 可以设置光分路器(例如,WDM耦合器),以将来自所述用户/ONU的上行信号与下行WDM信号分离。可以设置至少一个放大器(例如,诸如EDFA等光学放大器),以放大下行WDM数据信号、WDM载波信号和/或上行WDM信号。下行放大器可以看作是提升放大器,其在WDM下行信号进入传输链路之前对其进行放大。同样地,上行信号在传输链路之后并且在将WDM信号转换为TDM信号的上行时间透镜模块之前,可以被提升。

[0053] 波分复用(WDM)光载波信号可以定义第一光波长范围,下行WDM数据信号可以定义第二波长范围。第一波长范围和第二波长范围可以隔开至少50纳米,更优选地至少100纳米,最优选地至少200纳米。例如,第一波长范围可以以约1300纳米为中心,第二波长范围可

以以约1550纳米为中心。数据信号和载波信号之间的大波长间隔使得在PON系统的ONU侧容易将它们分开。

[0054] OLT的第一发射器可以被配置为用于为至少一个或每个光数据信号生成光载波信号,从而生成成对的光载波信号和光数据信号,即,每对信号包括数据信号和对应的载波信号。时间透镜处理可以被控制和配置为使得每对信号在该对信号之间具有预定的频率差。可以选择该频率差以对应于用于无线通信的RF频率。因此,借助于例如ONU中的光检测器,每对的该频率差可用于直接生成用于无线传输的特定无线信号。并且记住,每对的光数据信号包括要被无线传输的数据信息,并且与载波信号的频率差确定RF频率。借助于时间透镜信号处理,对于所有ONU,所有这一切都可以在OLT中被控制。

[0055] 如在未决申请PCT/EP2018/073867中描述的,OLT中生成的WDM光数据信号也可以借助于时间透镜原理生成。因此,OLT中的至少一个第二发射器可以被配置为用于生成时分复用(TDM)光数据信号,第二发射器包括第二时间透镜光信号处理器,第二时间透镜光信号处理器被配置为将TDM光数据信号转换为所述WDM下行光数据信号。

[0056] 如上所述,OLT可以包括接收器,并且该接收器可以包括:第三上行时间透镜光信号处理器,其被配置为将从所述用户接收到的上行WDM数据信号转换为上行TDM数据信号;以及至少一个TDM接收器,用于解复用并处理上行TDM数据信号。

[0057] 请注意,WDM光载波信号和WDM光数据信号可以由同一基于时间透镜的光学处理器生成,如图6中针对无线情况示例说明的。即,第一发射器和第二发射器可以是同一单元,和/或第一时间透镜光信号处理器和第二时间透镜光信号处理器可以是同一单元。在这种仅具有一个时间透镜信号处理器的情况下,通常必须在时间透镜光信号处理器之前利用每第二个TDM支路载波生成TDM数据信号,然后该时间透镜光信号处理器将生成相同的WDM数据信道和WDM载波对。每个数据信道和载波信道之间的频率差是 $\Delta f = \Delta t \cdot K/2\pi$,其中, Δt 是数据TDM支路和相邻的TDM支路之间的时间间隔。

[0058] 在本公开的一个实施例中,时间透镜光信号处理器包括为K-D-K配置的由色散介质分隔的两个相位调制级(优选地为二次相位调制级)。优选地,在具有线性啁啾率 K_1 的第一相位调制级中 $\delta\phi = K_1 t^2/2$,在具有线性啁啾率 K_2 的第二相位调制级中 $\delta\phi = K_2 t^2/2$,并且在色散介质中 $D = \beta_2 L$,其中, β_2 是二阶色散,L是长度,使得 $K_1 = K_2 = 1/D$ 。优选地,啁啾率K根据 $\Delta t = 2\pi \Delta f/K$ 确定时域和频域之间的缩放因子。

[0059] 在本公开的另一个实施例中,第一时间透镜光信号处理器和/或第二时间透镜光信号处理器包括具有色散 $D = \beta_2 L$ 的色散介质,在该色散介质之后具有啁啾率为 $K = 1/D$ 的相位调制元件(优选地为二次相位调制元件)。于是,第三上行时间透镜光信号处理器有利地包括具有啁啾率 $K = 1/D$ 的相位调制元件(优选地为二次相位调制元件),在相位调制元件之后具有色散为 $D = \beta_2 L$ 的色散介质。即,D-K配置用于TDM到WDM的转换,以及优选地,K-D配置用于WDM到TDM的转换。例如与K-D-K配置相比,这种配置可以简化时间透镜模块。不利之处可能是对系统容量造成小损失。

[0060] 如在PCT/EP2018/073867中的图9A中示例说明的,针对TDM到WDM的下行转换,时间透镜光信号处理器可以从K-D-K配置简化为D-K配置。在D-K下行配置的情况下,可能需要在时域中添加足够量的保护间隔(GI)。根据以下等式,保护间隔的量与信号带宽 $\Delta\lambda$ 、色散D和PM窗口之间的间隙 T_g 有关:

$$GI \geq \frac{2\pi c}{\lambda^2} D\Delta\lambda + T_g$$

其中, c 是光速, λ 是信号波长。在从约1530纳米到约1565纳米的C波段中, 该公式可以写为:

$$GI \geq 0.78D \Delta\lambda + T_g$$

即, 当按照二次相位调制的重复频率 f_{PM} 周期性地向信号提供足够的保护间隔时, 可以省略第一二次相位调制级。但是, 添加保护间隔自然会降低系统的数据容量。即, 它变为成本和数据容量之间的平衡。

[0061] 针对WDM到TDM的上行转换, K-D-K配置也可以被简化, 在这种情况下, 简化为K-D配置, 如在PCT/EP2018/073867中的图9B中示例说明的。与用于下行D-K配置的保护间隔相反, 对上行K-D配置没有限制, 并且可以再次省略 K_1 。

[0062] 色散介质可以是一段光纤, 例如传输光纤、例如标准单模光纤 (SSMF)、例如色散补偿光纤 (DCF)、例如高非线性光纤。相位调制级可以包括一段高非线性光纤。例如, 通常相位调制可以是基于例如使用啁啾泵脉冲的四波混合 (FWM)、例如使用抛物线强度剖面泵脉冲的交叉相位调制 (XPM) 或例如使用电驱动信号的电光相位调制。

[0063] 可以设置时钟恢复单元, 并且其被配置为使第三上行时间透镜信号处理器同步到上行WDM信号。此外, 有利地, 上行WDM信号的单个信道可以在第二时间透镜光信号处理器的输入处以符号方式被同步。可以设置至少一个控制单元, 并将其连接到发射器和/或接收器, 并且, 至少一个控制单元被配置为控制信号的波长和时序。

■ 对称少点对多点

[0064] 点对多点架构的容量可以通过所谓的对称少点对多点架构来进一步增加。与上述对称点对多点时间透镜PON架构的主要区别在于, OLT中的单波长TDM发射器和接收器被具有多个 (M) 波长的多波长TWDM发射器阵列和接收器阵列代替。但是, 波长数 M 通常比ONU数 N 少得多。通过简单地在OLT中添加不同波长的TDM TRX, 这种少点对多点架构可以将总的时间透镜PON容量增加 M 倍。在ONU侧, 单个ONU在原始波长处获得增加的比特率, 而无需WDM TRX阵列。

[0065] 因此, 在少点对多点架构中, 下行WDM信号可以包括 N 个信号波长, 于是发射器可以包括多波长时分和波分复用 (TWDM) 阵列, 其被配置为生成 M 个不同的波长的时分复用下行光信号, 并且其中, M (远远) 小于下行WDM信号中的信号波长的数量 N 。相应地, 接收器可以包括多波长时分和波分复用 (TWDM) 阵列, 其被配置为接收和处理 M 个不同波长的时分复用上行光信号。

■ 非对称点对多点以及少点对多点

[0066] 一些接入网对于下行传输比上行传输需要更大的容量。在那种情况下, 总上行数据率小于下行数据率的非对称PON架构可能是合适的。该实施例结合了时间透镜PON和常规的TDM PON, 其中, 时间透镜PON架构用于下行传输的高容量需求, 而常规的TDM PON用于需求较少的上行传输。下行部分可以类似于如上所述的对称点对多点和少点对多点。

[0067] 有利地, 在非对称 (少) 点对多点架构中, 接收器可以被简化并被配置为接收并处理单个波长的时分复用上行光信号。

■ 无源光网络系统

[0068] 本公开的另一方面涉及一种包括本文所述的光线路终端的无源光网络 (PON) 系统。PON系统通常包括用于分配下行信号和上行信号的光纤基础结构。通常还包括至少一个远程节点 (通常为无源远程节点, 即没有电源, 例如无源AWG), 其用于将下行WDM信号分解成单独的波长信号。之后, 至少一个远程节点可以被配置为用于将上行的单独的波长信号组合成上行WDM信号。远程节点可以包括至少一个阵列波导光栅 (AWG), 其用于将下行WDM信号分解成单独的波长信号和/或将上行信号组合成单个WDM或TDM上行信号。

[0069] 在对称点对多点或少点对多点架构中, 目前公开的PON系统还可以包括位于各用户处的单独的ONU发射器, 其被配置为生成可以组合到单个 (或少数) 上行WDM信号的单独波长的上行信号。

[0070] 在非对称点对多点或少点对多点架构中, 目前公开的PON系统还可以包括位于各用户处的单独的ONU发射器, 其被配置为生成可以组合到单个 (或少数) 上行TDM信号的、一个预定波长的上行信号。在这种情况下, 远程节点和单独的ONU之间的每个网络线可以包括分路器 (例如, WDM耦合器), 其用于将所述预定波长的上行信号与各下行波长的信号分开。

[0071] 如前所述, 一个实施例涉及一种无源光网络 (PON) 系统, 其包括当前公开的OLT, 可选地包括用于分配下行和上行信号的光纤基础结构、多个光网络单元 (ONU) (优选地, 每个终端用户一个光网络单元)、用于将下行WDM光数据信号和WDM光载波信号分解成单独波长的信号的至少一个远程节点, 使得每个ONU接收第一特定波长的下行信号光数据信号和第二特定波长的光载波信号。每个ONU可以是无色的。

[0072] 每个ONU可以包括: 耦合元件, 用于分离光载波信号和下行光数据信号; 接收器, 用于接收并处理下行光数据信号; 以及上行信号生成器, 用于接收并调制光载波信号, 从而生成上行光数据信号。上行信号生成器可以包括反射半导体光学放大器和/或光学环形器、放大器和调制器, 用于接收、放大和调制光载波信号。

[0073] 另一个实施例涉及一种无源光网络 (PON) 系统, 其包括当前公开的OLT, 可选地包括用于分配信号下行和上行信号的光纤基础结构、多个光网络单元 (ONU) (优选地, 每个终端用户一个光网络单元)、用于将下行WDM光数据信号和WDM光载波信号分解成单独波长的信号的至少一个远程节点, 使得每个ONU接收第一特定波长的下行光数据信号和第二特定波长的光载波信号, 其中, 所述ONU被配置为用于基于第一波长和第二波长之间的频率差来生成用于无线通信的射频 (RF) 数据信号。每个光载波信号的一部分可以用于生成所述RF数据信号, 并且所述光载波信号的另一部分用于生成上行光数据信号。

■ 包括上行数据载波的光线路终端的示例

[0074] 参考图3, 在下行数据传输中, 数据信号从OLT (101) 传输到N个ONU (102, 103, 104)。1550纳米的WDM发射器 (105) 生成N信道WDM信号 ($\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$)。所生成的WDM信号在光学放大器 (106) 中被放大, 然后被发送到WDM耦合器 (107) 中, 该WDM耦合器 (107) 用于分离OLT中的下行信号和上行信号。单芯光纤 (108) 用于将来自OLT的WDM信号传输到远程节点 (RN) 位置, 该位置靠近ONU。在RN位置处, 使用波长信道间隔等于 $\Delta \nu$ 的无源周期阵列波导光栅 (AWG) (109) 将成对的WDM信号和WDM载波分路到每个ONU。

[0075] 对于上行传输, 为了避免在每个ONU处使用波长可调谐/特定激光器, 使用时间透镜信号处理器在OLT中生成1300纳米的相同信道间隔 $\Delta \nu$ 的N个WDM载波, 随后其作为数据载波被发送到各个ONU。脉冲发生器PG (111) 生成重复率为 f_s 的1300纳米的光脉冲串 (201)。使

用基于时间透镜的光学处理器(112)将该脉冲串转换为波长间隔为 Δv 的N个WDM载波(202)。转换后的WDM载波在光学放大器(113)中被放大,并发送到其后为WDM耦合器的环形器,该WDM耦合器用于分离OLT中的下行信号和上行信号。使用单个标准光纤(108)将1550纳米的WDM信号和所生成的1300纳米的WDM载波从OLT传输到远程节点(RN)位置,该位置靠近ONU。在RN位置处,使用波长信道间隔等于 Δv 的无源周期阵列波导光栅(AWG)(110)将WDM信号和WDM载波分路到每个ONU。每个ONU接收约1550纳米的WDM信号信道和约1300纳米的WDM载波信道。控制单元Ctrl(115)用于控制脉冲发生器的波长和时序。

[0076] 图7示出了光脉冲串(201)到N个WDM载波(202)的转换,该转换使用了时间透镜信号处理器(203)。这里, ΔT 是脉冲时间间隔, Δv 是转换后的WDM载波的波长间隔。时间透镜光信号处理器包括两个二次相位调制(PM)($\delta\phi = Kt^2/2$)级(204,205),这两个相位调制级具有线性啁啾率K,被 $D = \beta_2 L$ (其中, β_2 是二阶色散,L是长度)的色散介质(206)隔开,且满足条件 $K_1 = K_2 = 1/D$ (K-D-K配置)。啁啾率K根据 $\Delta t = 2\pi \Delta f/K$ 确定时域和频域之间的缩放因子。在处理器之后,脉冲串被转换为N个WDM载波,该N个WDM载波的信道间隔 Δv 取决于K的选择。二次相位调制的重复频率 f_{PM} 被设置为等于 f_s/N 。相位调制窗口由 $T_{PM} = 1/f_{PM}$ 给出。

[0077] 在上行数据传输中,由于WDM载波在OLT处生成,因而不需要在ONU侧使用波长可调谐/特定的组件,又称为ONU是无色的。图3B和图3C示出了两个典型的无色ONU结构。在这两个ONU结构中,以 λ_{dn} (约1550纳米)传输的WDM信号和以 λ_{un} (约1300纳米)的传输的WDM载波被WDM耦合器分离。WDM信号由光学接收器(301,303)接收。为了进行上行传输,在图3B中使用反射半导体光学放大器(RSOA)来放大和调制WDM载波。这也可以通过光学环形器(304)、光学放大器(305)和调制器(306)的组合来实现,如图3C所示。各个WDM信道在AWG处被合并为N倍波长的WDM信号,并通过不同波长区域(1300纳米)处的相同光纤传输回OLT。在OLT中,上行WDM信号由WDM耦合器切换到上行WDM接收器。

■ 用于生成WDM-ROF/WDM信道的示例光线路终端

[0078] 本文提出了使用时间透镜进行无线通信的相干WDM PON架构。基本思想是在WDM数据信道旁边生成同样数量的WDM载波,并通过WDM PON传输它们。在每个ONU处,通过将WDM数据信道与WDM载波一起传输到光电探测器,WDM数据信道被转换为射频(RF)。通常必须在与WDM数据信道相同的波长范围内生成WDM载波。如图5所示,1550纳米的WDM发射器(405)生成具有间隔 Δv 的N信道WDM信号($\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$)。脉冲发生器(411)生成相同波长的光脉冲串。使用基于时间透镜的光学处理器(412)将该脉冲串转换为具有波长间隔 Δv 的N个WDM载波。转换后的WDM载波在光学放大器(113)中被放大,并发送到其后为环形器的耦合器,该环形器用于分离OLT中的下行信号和上行信号。WDM数据信道 f_{dn} 与WDM载波 f_{un} 之间的频率差被设置为 Δf ,例如, $f_{dn} - f_{un} = \Delta f$ 。在光纤传输之后,使用波长信道间隔等于 Δv 的AWG(410)将成对的WDM信号和WDM载波分路到每个ONU(402,403,404)。

[0079] 在每个ONU中,在放大后,成对的WDM信号和WDM载波的一半被发送到光电探测器,用于RF信号转换,然后将其发送到天线以进行无线传输。另一半中的WDM载波由光学带通滤波器提取并由调制器对数据进行调制。调制后的WDM信道通过环形器和AWG发送回OLT。RF数据信号的载波频率可以通过改变WDM数据信道和WDM载波之间的频率差 Δf 来修改,这可以通过OLT中的时间透镜光信号处理器和脉冲发生器来控制。

[0080] 此外,如前所述,成对的数据信道和载波信道也可以由商业相干接收器直接接收,

而通常不需要额外的本地振荡器。这通常要求WDM数据信道和WDM载波之间的频率差在相干接收器的带宽限制内。

[0081] 可以通过添加更多的不同波长的脉冲发生器来提高所生成的WDM载波的符号率，如图8A所示。

[0082] 类似地，当仅使用一个基于时间透镜的光学处理器来生成WDM数据信道和WDM载波两者时，也可以通过添加更多的不同波长的TDM生成器来提高所生成的WDM数据信道和WDM载波的符号率，如图8B所示，即，非对称的少点对多点方案。

[0083] 如图9所示，通过在时域中添加足够量的保护间隔 (GI)，可以将用于脉冲串到WDM载波转换的时间透镜光信号处理器简化为D-K配置。根据以下等式，GI的量与信号带宽 $\Delta\lambda$ 、色散D和PM窗口之间的间隙 T_g 有关：

$$GI \geq \frac{2\pi c}{\lambda^2} D\Delta\lambda + T_g$$

其中，c是光速， λ 是信号波长。在C波段中，该等式可以写为：

$$GI \geq 0.78D \Delta\lambda + T_g$$

[0084] 当将足够的GI插入周期性地跟随二次相位调制的重复频率 f_{PM} 的信号时，可以省略第一二次相位调制级，如图9所示。

■时间透镜PON的优点

[0085] 图1示出了现有技术的光接入系统的四个示例a) -d)，其中，c) 和d) 示出了PON系统。图1的 (a) 是需要大量光纤和发射器的点对点系统。图1的 (b) 示出了需要大量发射器的有源光网络。图1的 (c) 是TDM-PON系统的示例，该系统是具有成本效益的方案，因为中心局 (CO) 中只需要单个发射器。TDM-PON原理在图2A中进一步详细示出。图1的 (d) 中所示的WDM-PON系统是具有许多技术优势的点对点系统，但这不是具有成本效益的方案。WDM-PON原理在图2B中进一步详细示出。与这些现有技术的方案相比，时间透镜PON具有许多优点：

[0086] 中心局 (CO) 中具有单个 (或少量) 发射器：成本和能耗较少，即，时间透镜PON中保持了现有的TDM PON的优点之一。

[0087] 分解损耗小，并且与用户数量无关：在常规PON系统中，取决于用户数量N，无源光分路器/合成器的使用引入了 $\sim 10\log N$ [dB] 的分解损耗，这严重限制了用户数量。与此相反，在时间透镜PON中，光分路器可以被例如常规的无源AWG替换，不管用户数量如何，AWG均具有低得多的固定损耗 (<4dB)。这允许有效地扩大用户数量。

[0088] 附加的灵活性：时间透镜PON允许通过简单地改变电TDM信号的结构来动态分配连接给无线用户的不同RAU，以及分配连接给有线用户的不同WDM光网络单元，而无需调谐光源的发射波长。此外，它还允许在不同的WDM信道上使用不同的调制格式，并针对不同的需求进行动态调整，如图13所示。

[0089] 不具有与用户数量N相关的SNR损失 (SNR penalty)：在常规的PON系统中，OLT将TDM信号广播到所有ONU。因此，每个ONU处的实际信号功率仅为总接收功率的 $1/N$ 。较大的累积噪声带宽也带来了噪声。这导致与 $N^2 \sim N^3$ 成比例的SNR损失。与此相反，在时间透镜PON中，每个ONU仅在基带宽处接收自己的信号。因此，在时间透镜PON中不具有与用户数量相关的SNR损失，从而产生更好的接收器灵敏度，例如，比具有32个用户的现有技术的TDM-PON更好的灵敏度 ~ 10 dB。

[0090] 更好的功率预算:与现有技术PON相比,降低的分解损耗和更好的接收器灵敏度导致时间透镜PON的更大的功率预算。此外,该增强的功率预算与用户数量无关。增强的功率预算可用于扩大总容量、用户数量和传输有效达到范围。

[0091] 对ONU侧的组件没有额外的带宽要求:在常规的PON系统中,ONU侧的收发器需要为实际使用的数据率的数十倍的带宽。这种系统的升级需要针对所有ONU具有大量更高带宽的光电装置-这是昂贵的并且导致能耗更高。在目前公开的时间透镜PON中,没有额外的带宽要求,允许将ONU侧的现有装置重复使用以具有数十倍的数据容量,这与其他现有技术的高容量PON方案相比具有更高的成本和能量效率。

[0092] 没有安全问题:现有技术的PON系统需要数据加密,因为每个ONU可以访问发送给PON上任何其他用户的所有数据。在目前公开的时间透镜PON中,RN处的波长解复用器(例如,AWG)将不同的波长指向每个用户。因此,由于时间透镜PON上的用户无法访问任何其他下行波长,因此没有安全问题。因此,通过物理网络的架构保证了安全性。

[0093] 色散容限:常规的PON系统在光纤链路中传输高速TDM信号,其具有差的色散容限-当TDM信号的速度增加时,色散容限将变得越来越差。目前公开的时间透镜PON在光纤链路中传输低速WDM信号,其具有比现有技术的PON系统更好的色散容限。

[0094] 没有与共享PON相关的服务质量(QoS)问题:当现有技术的PON系统中的带宽需求变高时,可能导致QoS问题,例如,如何公平地向多个高需求用户分配容量。这可能导致对于等待发送数据用户需要更大的缓冲存储器的要求,并且导致关于时间延迟和数据包丢失的问题。在目前公开的时间透镜PON中,没有关于QoS或隐私的问题,因为没有与连接到时间透镜PON的任何其他人共享光信号。即使在互联网高峰时段,也可以保证用户体验。

[0095] 上面列出的优点可以概括如下:

特征	现有技术的 PON	时间透镜 PON
CO 中的 TRX 数量	1	1 (或少数)
分解损耗	$10\log N$ [dB]	< 5 dB
SNR 损失	$N^2 \sim N^3$	基准
对于 32 个用户的接收器灵敏度	~ -10 dB	基准
安全性	否	是
ONU 处的带宽	$N \times$ 用户数据率	用户数据率
功率预算	小	大
色散容限	差	好
QoS	优先级管理	没有问题

■ 示例

[0096] 在该示例中,基于时间透镜的光信号处理器实现了灵活的混合光子-毫米波发射器。已经证明了100千米SSMF和0.5米无线距离上 $12 \times 2.5\text{-Gb/sOOK}$ 和 $10 \times 4\text{-Gb/s QPSK}$ 混合传输。已经实现了从单个激光器和调制器生成的最大数量的WDM-ROF信道的记录,表明未来有线/无线集成接入网络的巨大潜力。

[0097] 所提出的灵活的混合光子-毫米波发射器的原理在图4中示出。在中心局中,单载波TDM发射器生成高速TDM信号,其中,每个TDM数据支路稍后将被转换为单独的波长。对于ROF信道,相邻的支路未经调制。执行OFT以在相关的TDM支路的速率下将该TDM信号转换为多个WDM信道;支路用作上转换色调。在光纤传输之后,使用访问网关处的阵列波导光栅(AWG)提取成对的WDM数据信道 λ_D 和光学色调 λ_T 到特定的远程天线单元(RAU)。在每个RAU中,在快速光电二极管(PD)中执行外差上转换。然后RF信号被馈送到天线以进行无线传输。所提出的方案允许单个TDM时间透镜源同时为有线和无线接入网络生成多个WDM数据信道。

[0098] 在信道切换和波长分配方面,OFT提供了额外的灵活性。它允许动态分配给无线用户的不同RAU的连接,以及到有线用户的不同WDM光网络单元的连接,而无需调谐光源的发射波长,而是通过简单地改变电TDM信号的结构。这是唯一的单调制器发射器结构,在没有光学调谐的情况下可以实现这种极端的灵活性。

[0099] 图10中示出实验设置。从OOK传输开始,1577纳米的CW激光器的输出为在马赫增德尔调制器(MZM)中调制的NRZ开关键控(OOK)。用于OOK调制的数据模式从50Gbps比特模式生成器生成,由 $12 \times 2.5\text{-Gb/sOOK}$ TDM支路和6个未经调制的支路组成,形成每第三个数据支路。在每18个TDM支路之间插入40-ps的保护间隔(GI),以用于OFT操作。第二MZM用于将NRZ信号划分成RZ脉冲。所获得的TDM信号波形如图11A所示,并且使用OFT将其直接转换为单独的80-GHz间隔的WDM信道。在OFT处,所获得的TDM信号最初分散在具有-100ps/nm/km的色散的300m的色散补偿纤维(DCF)中。随后的二次相位调制级基于使用线性啁啾矩形泵脉冲的高度非线性光纤(HNLF)中的四波混合(FWM)过程。在该实验室演示中,泵脉冲通过以1542纳米将10GHz锁模激光下采样至2.5GHz并在400米HNLF中扩展其光谱来生成。波长选择开关(WSS)用于提取所需的光谱以形成通过650米DCF传播的OFT泵,以实现80GHz频率格栅的20ps间隔的TDM支路转换的正确啁啾率。OFT泵源的实际实现可能依赖于电光调制和可变色散元件。在图11B中示出所得到的光谱。生成的闲频信号是从TDM信号转换的具有80GHz间隔的12个WDM数据信道和6个脉冲光学色调。使用铒掺杂光纤放大器(EDFA)将获得的WDM信号提升至17dBm,并发射到100千米未放大的SMF光纤链路中。考虑到光纤的非线性,对发射功率进行了优化。波长分路器由WSS实现,其提取WDM数据信道和色调到两个输出端口。光学延迟线用于在时间上对准WDM信道和光学色调。在该演示中,2个WDM数据信道共享它们之间的常见光学色调,从而增加吞吐量。组合的光信号在100GHz带宽光电二极管中进行外差处理,从而生成以80GHz为中心的W波段无线信号,该无线信号被馈送到具有24dBi增益的喇叭天线。在0.5米无线传输之后,信号由另一个喇叭天线检测,最终由基于包络检波器的接收器接收。

[0100] 为了研究可扩展性和与相位编码信号的兼容性,还演示了QPSK传输。 $10 \times 4\text{-Gb/s QPSK}$ TDM支路和5个未经调制的TDM支路从驱动IQ调制器的32GHz任意波形生成器生成。OFT泵色散适合于1千米DCF,以将31ps时间间隔转换为80GHz频率格栅。所生成的WDM信道也在图

11中示出。在接收器处,通过由74-GHz本地振荡器(LO)信号驱动的W波段平衡混频器来实现下转换。

■实验结果

[0101] 图12A示出了 12×2.5 -Gb/s OOK混合传输BER性能与通过PD之前的预放大器输入处的光衰减器变化的接收功率。还示出了没有光纤传输的包络检波器接收到的所有ROF-WDM信道的BER性能以供参考。所有生成的ROF-WDM信道都实现了 $BER < 10^{-9}$ 。100千米传输后的BER通过蓝色的开放符号示出。传输后的最大接收功率约为-26dBm。在图12A的插图中示出了包络检测之后的OOK眼图。所有转换后的WDM信道都实现了 $BER < 4 \times 10^{-6}$,确认了对于 $BER = 3.8 \times 10^{-3}$ 的硬决策前向纠错(HD-FEC)阈值的显著裕度(significant margin)。传输后 $BER = 10^{-5}$ 处的平均功率损失为8.4dB,这是由于光纤传输期间的光纤非线性和色散。图12B示出了 10×4 -Gb/s QPSK混合传输的BER性能。黑色曲线示出了没有光纤传输的性能,其中,对于所有生成的QPSK ROF-WDM信道,都实现了从 1.2×10^5 个接收到数据位开始计数的 $BER = 8.4 \times 10^{-5}$ (10误差阈值)。经过100千米的光纤和0.5米无线传输后,所有转换的WDM信道都实现了 $BER < 3 \times 10^{-4}$ 的性能,低于FEC阈值。传输后, $BER = 10^{-3}$ 处的平均功率损失是1.5dB。QPSK的功率损失远低于OOK信号的功率损失。与OOK直接检测相比,通过使用用于QPSK传输的简单数字信号处理来获得更好的接收器灵敏度。DSP由频率下转换、均衡、相位恢复和BER计数组成。

■参考文献

- [1] D. Nessim, "PON roadmap[invited]," IEEE J. Opt. Commun. 9(1), A71, (2017).
- [2] V. Houtsma et al., "A Study of Options for High-Speed TDM-PON Beyond 10G," JLT, 35(4), 1059, (2017).
- [3] Y. Luo et al., "Time-and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2)." JLT, 31(4), 587, (2013).
- [4] E. Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies." JLT., 30(4), 597, (2012).
- [5] P. Guan et al., "Time lens based optical Fourier transformation for all-optical signal processing of spectrally-efficient data," JLT, 35(4), 799, (2017).
- [6] M. Pu et al., Optica 3, 823 (2016).
- [7] L. Ottaviano et al., Opt. Letters 41, 3996 (2016).
- [8] 5G PPP. 5G Vision. Whitepaper. Feb. 2015.
- [9] M. Xiao et al., "Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks". IEEE JSAC. 35(9) 1909 (2017).
- [10] P. Guan et al., "Highly Flexible WDM PON System with a Single TDM Time Lens Source Enabling Record 150km Downstream Reach". OFC2018. Th2A.54, (2018).
- [11] P. Guan et al., "128x2 Gb/s WDM PON System with a Single TDM Time Lens Source using an AlGaAs-On-Insulator Waveguide". CLEO2018. SM2C.3, (2018)

[12]M.Nakazawa et al.,“Ideal distortion-free transmission using opticalFourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses,” PTL.16,1059, (2004) .

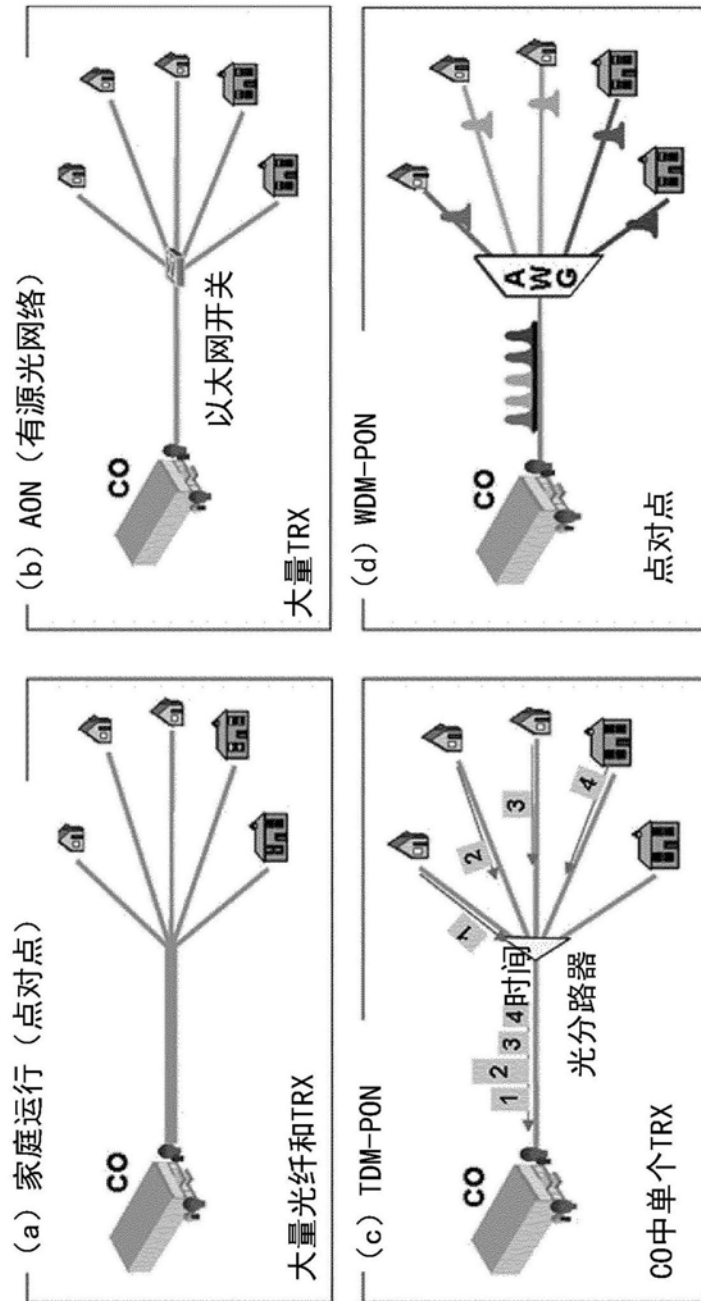


图1-现有技术

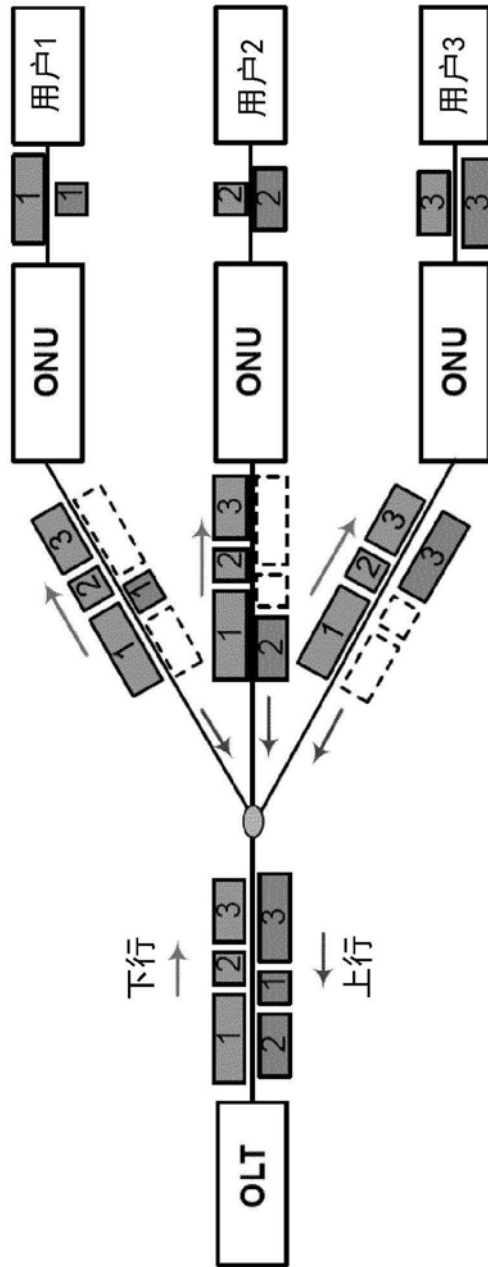


图2A-现有技术

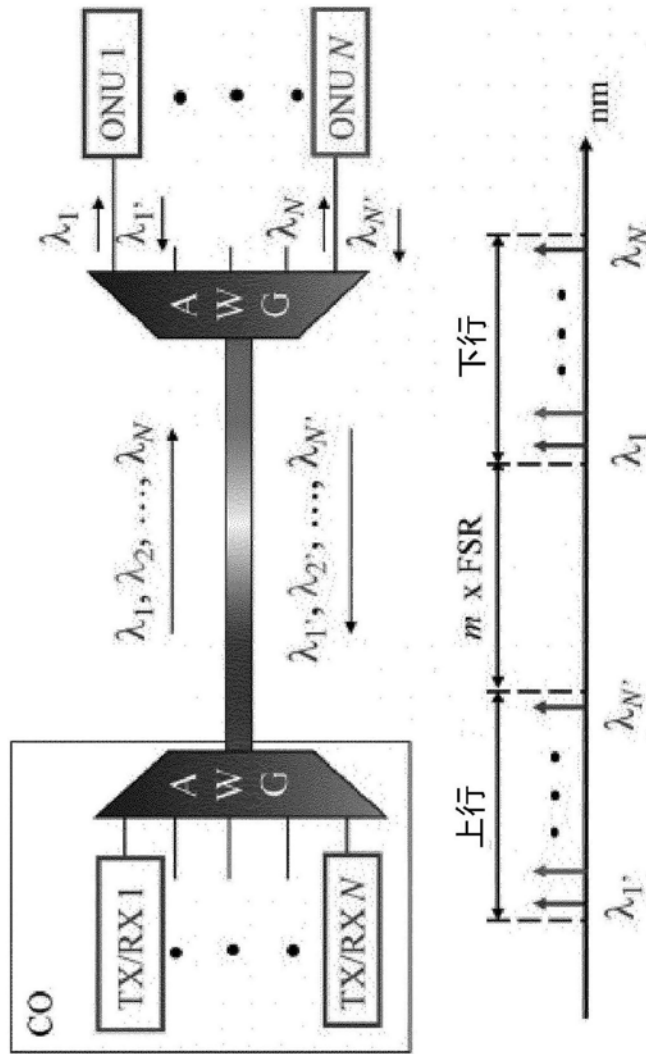


图2B-现有技术

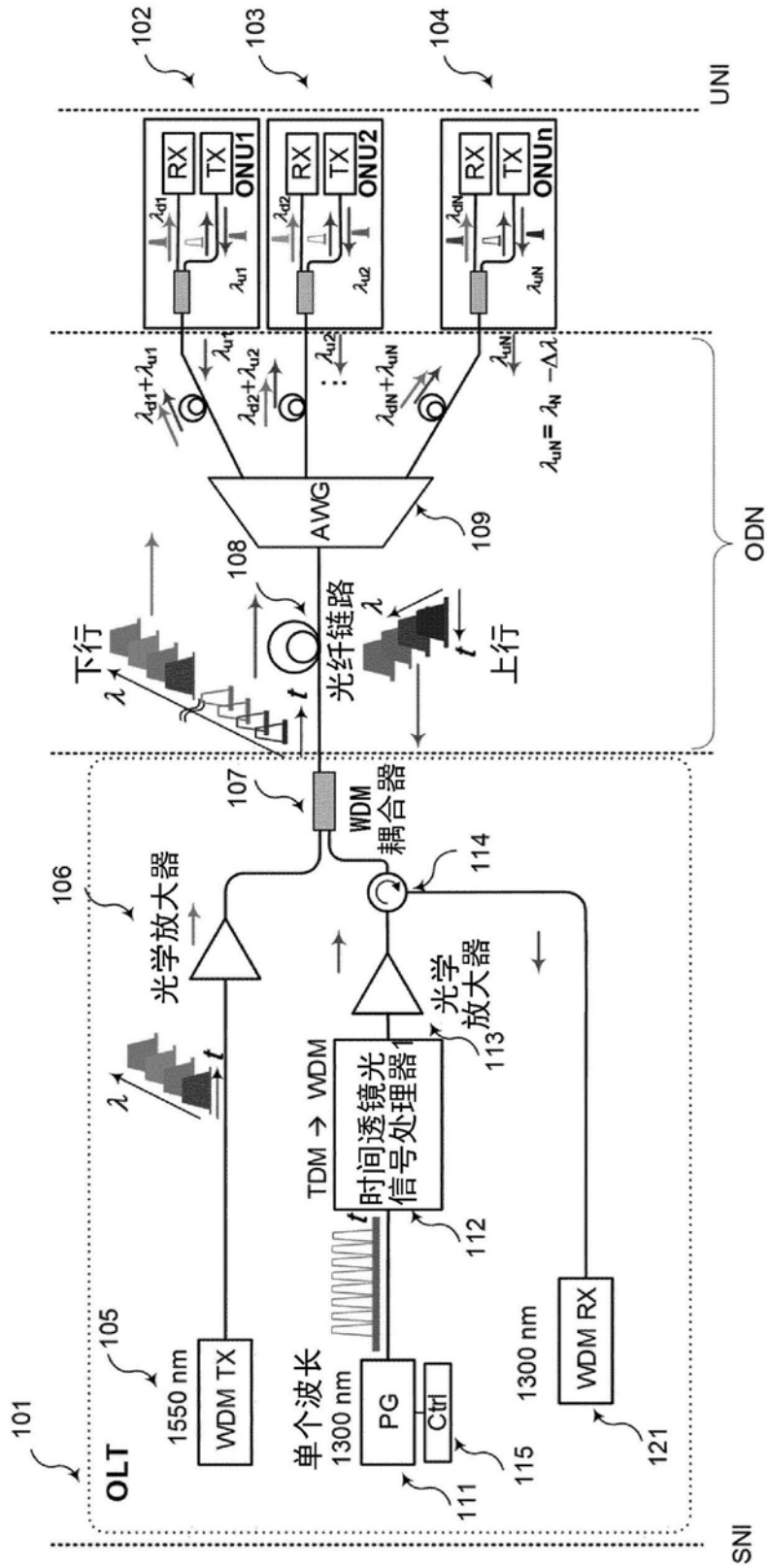


图3A

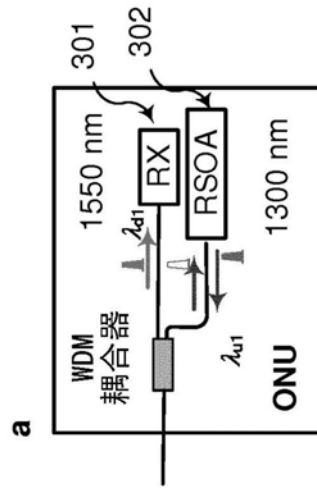


图3B

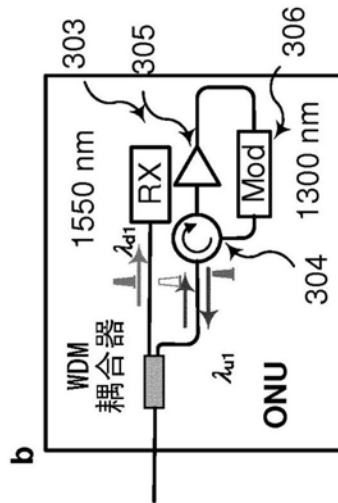


图3C

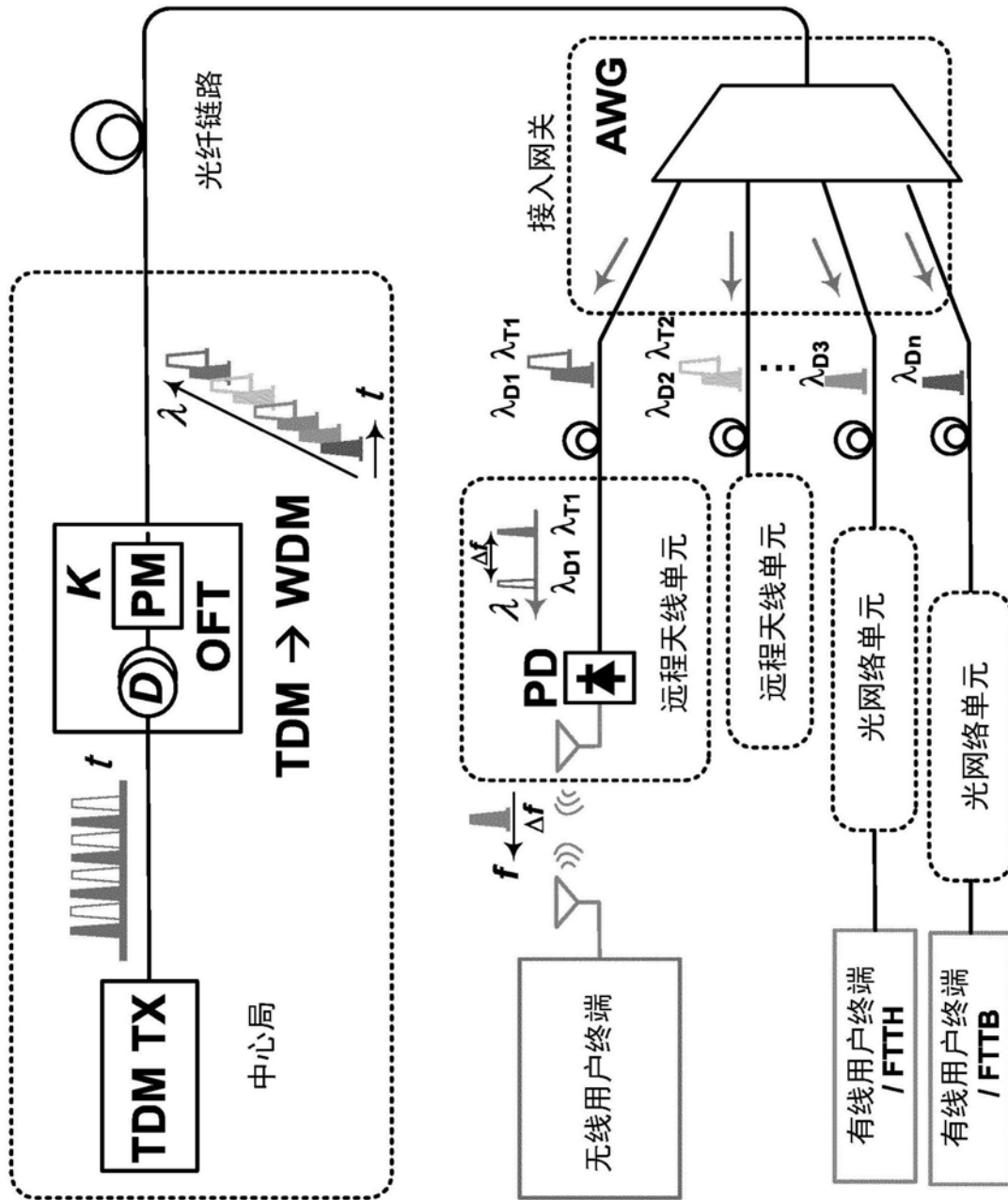


图4

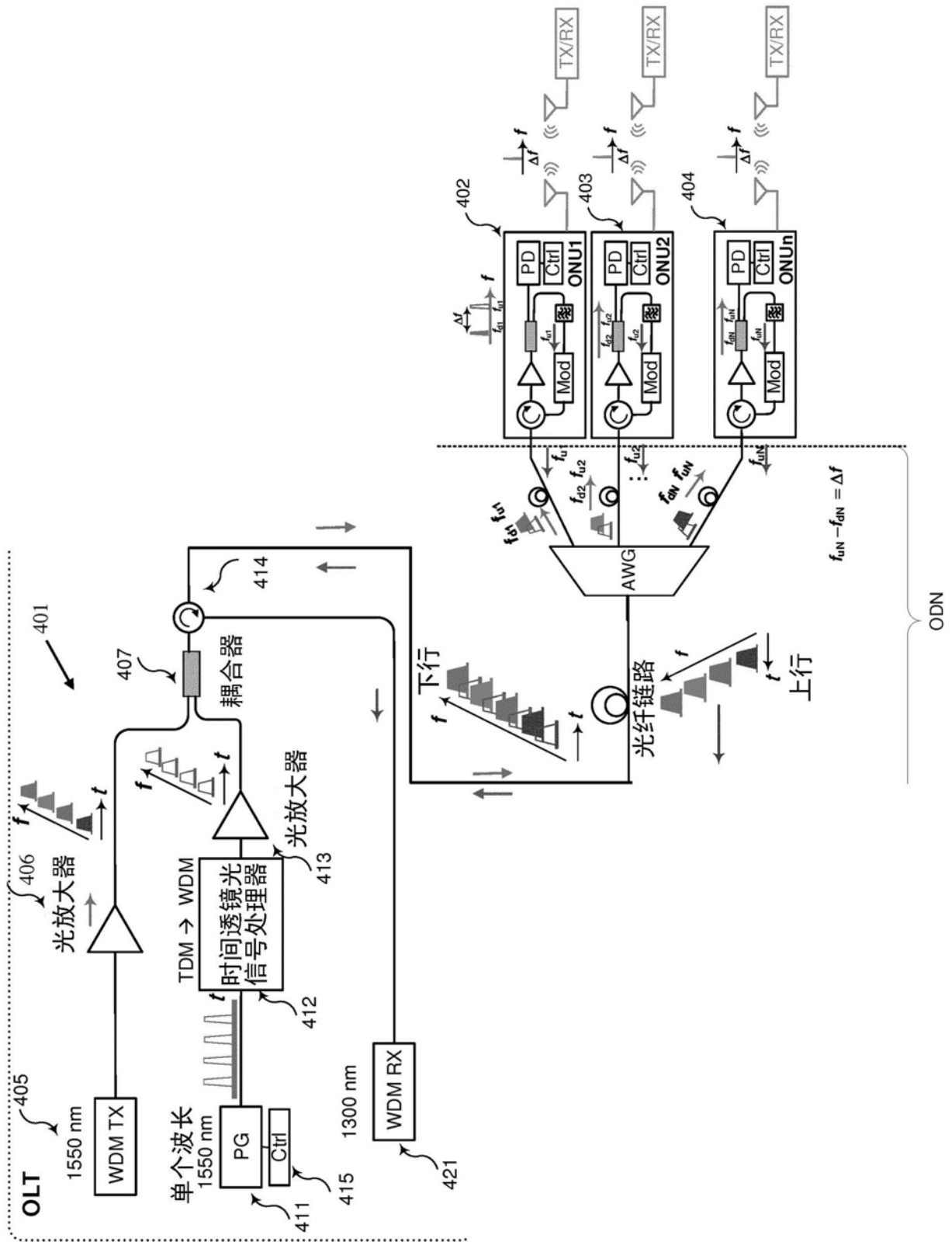


图5

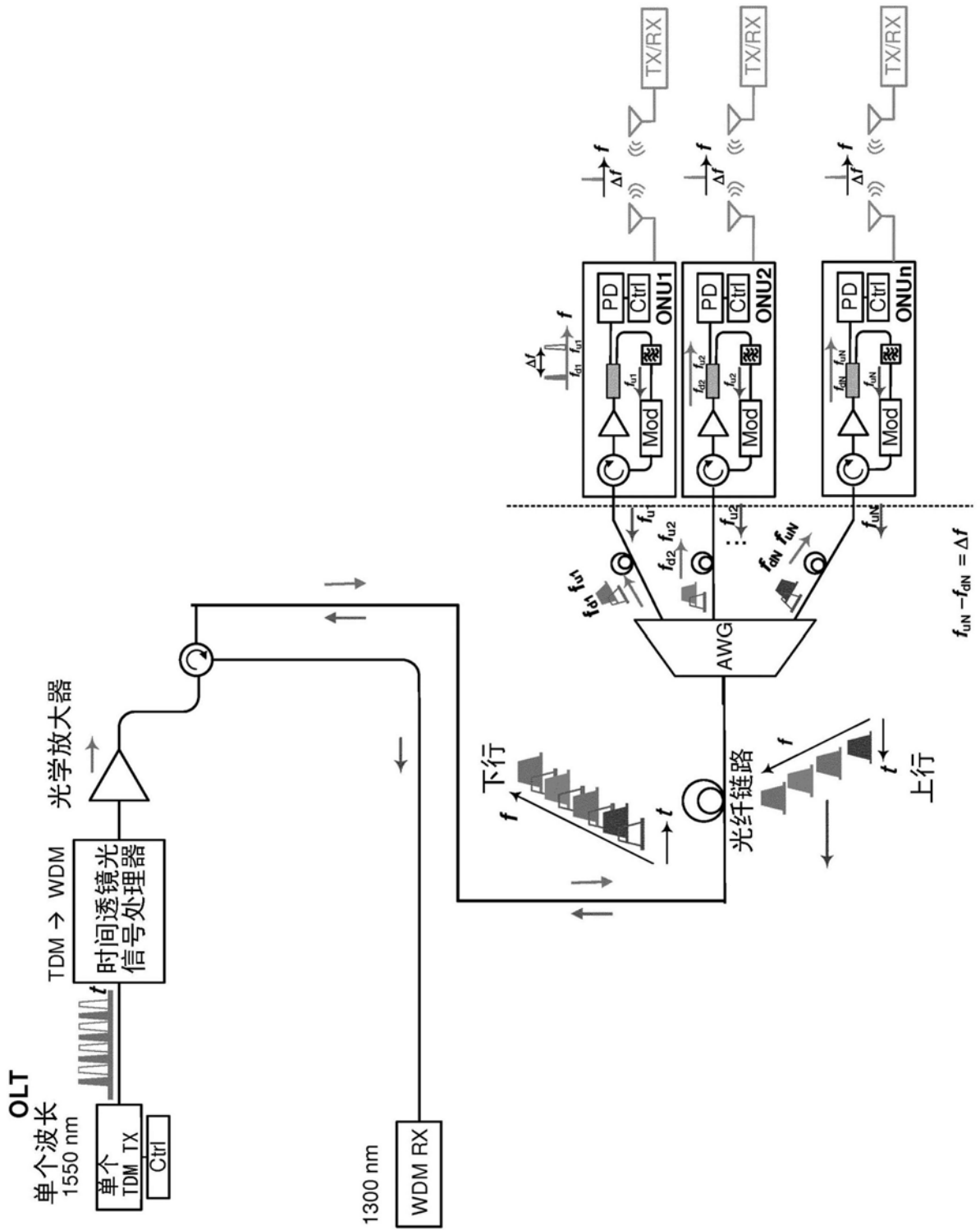


图6

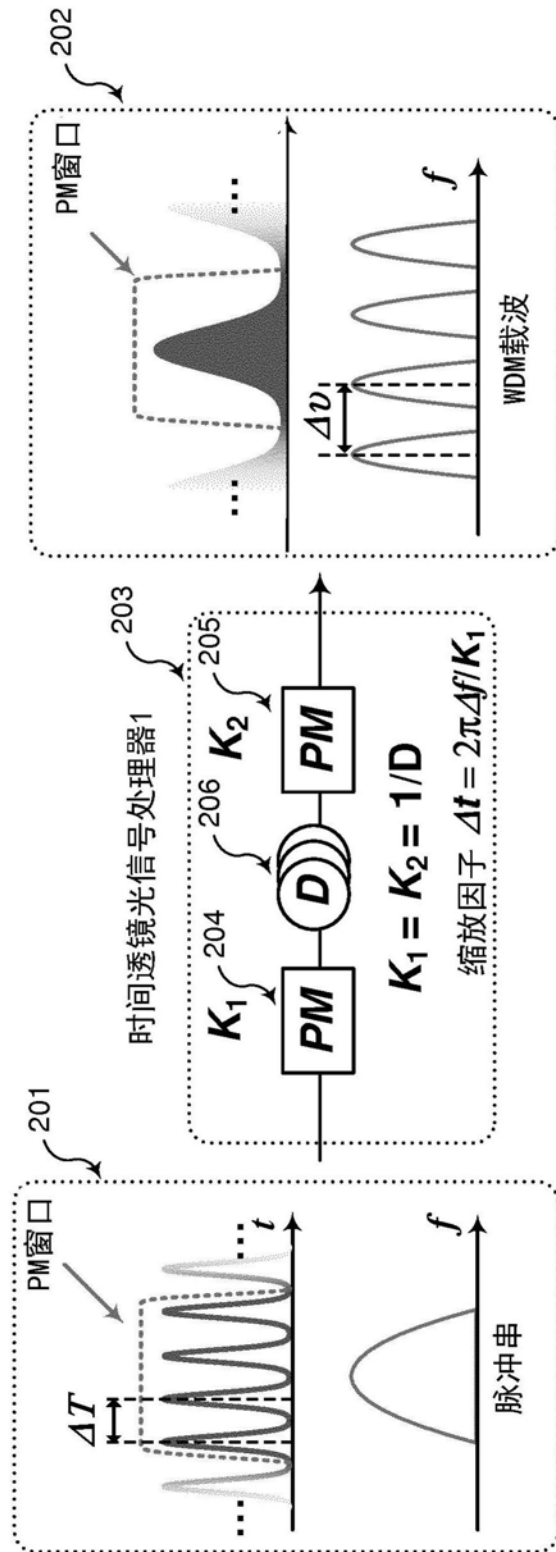


图7

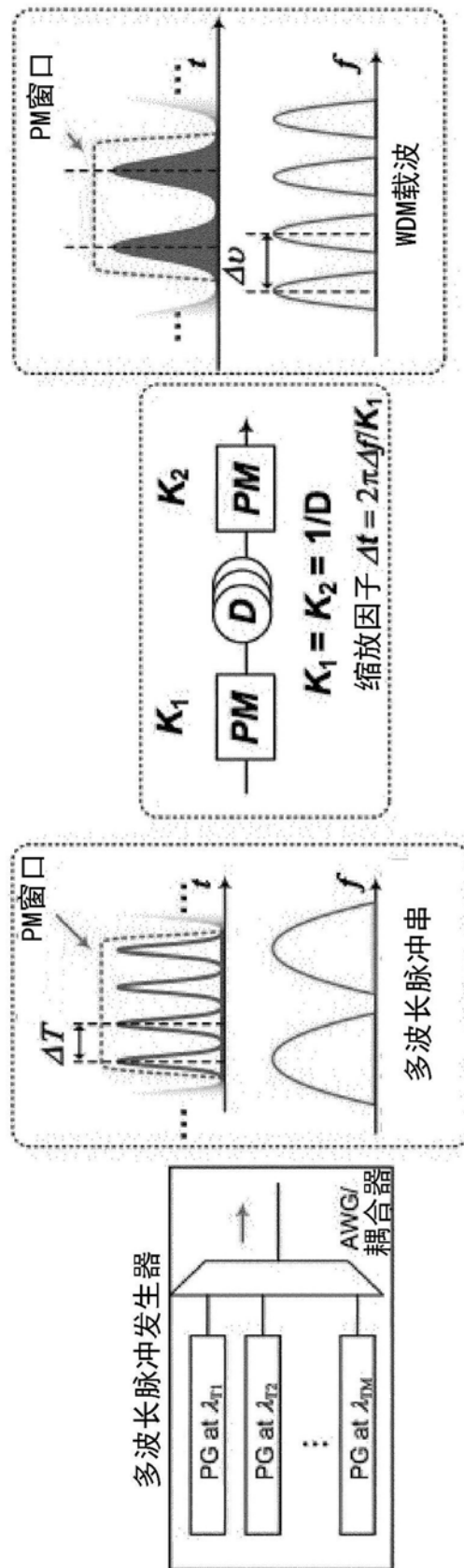


图8A

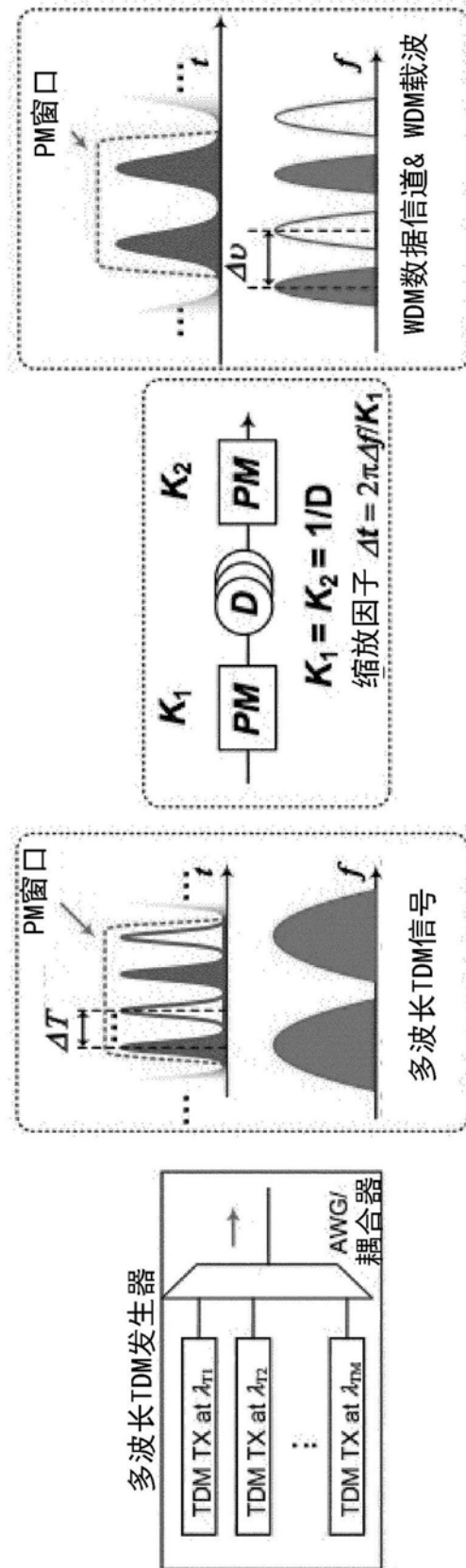


图8B

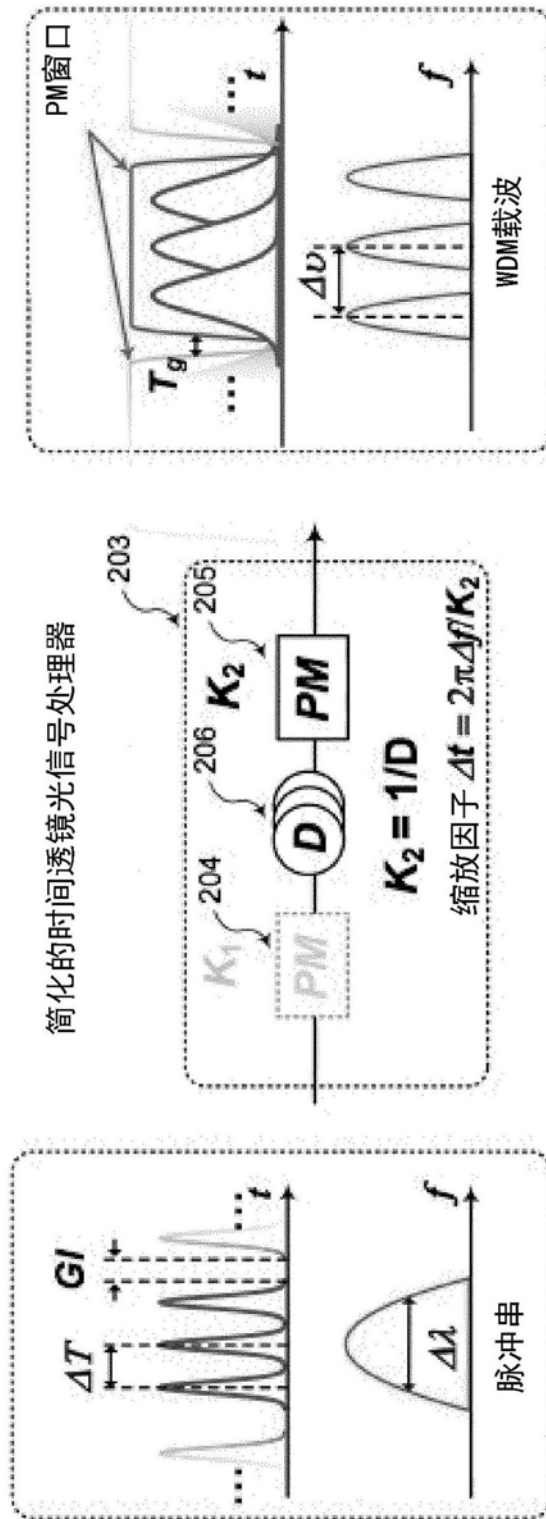


图9

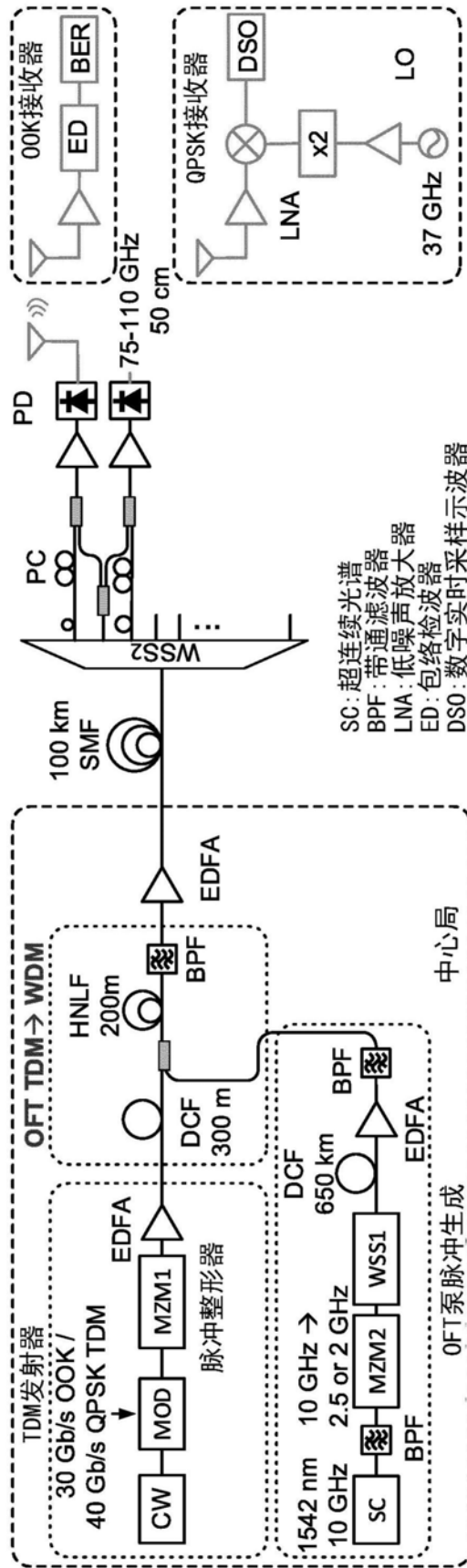


图10

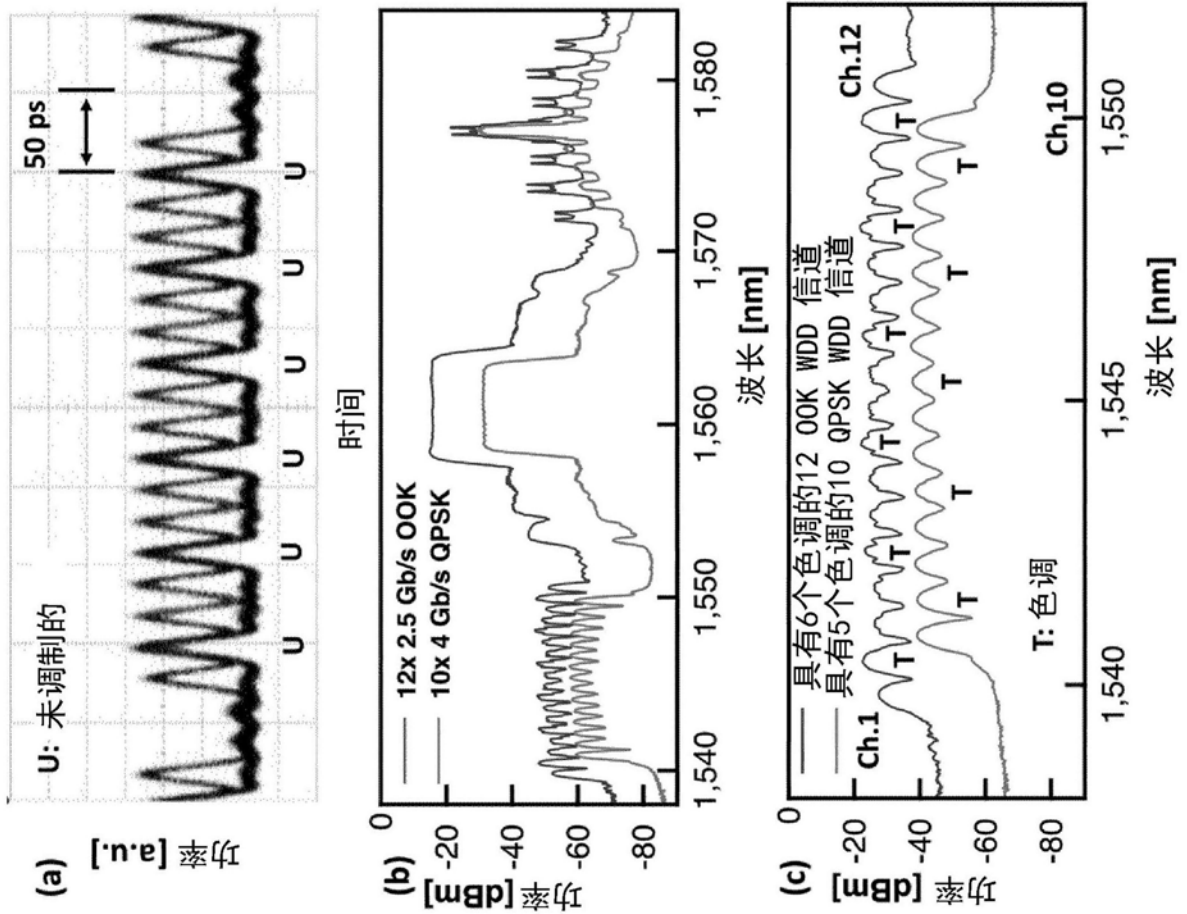


图11

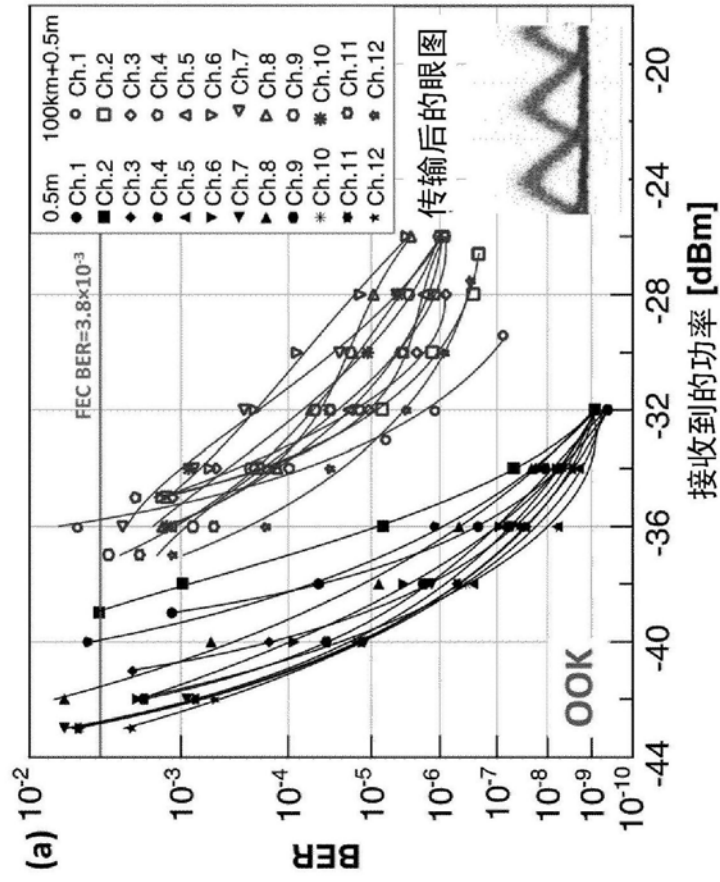


图12A

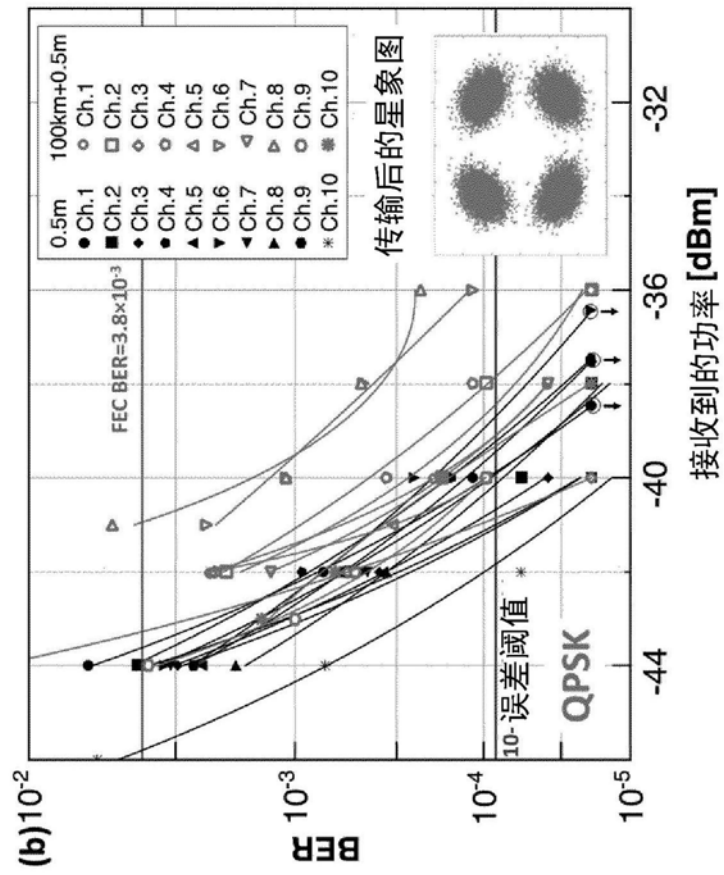


图12B

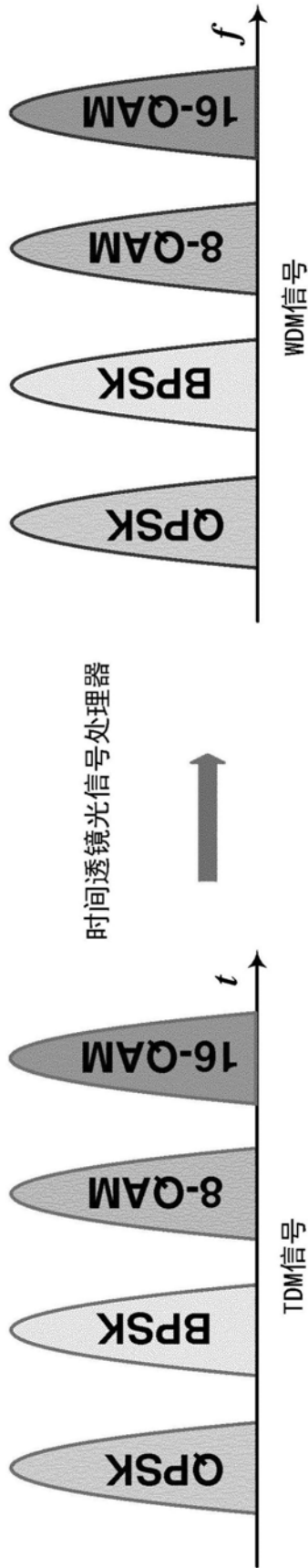


图13