(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105247806 A
(43)申请公布日 2016.01.13

(21)申请号 201480031310.8
(22)申请日 2014.05.15
(30)优先权数据
61/824,324 2013.05.16 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.11.30
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/038254 2014.05.15
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2014/186610 EN 2014.11.20
(71)申请人 中兴通讯(美国)公司
地址 美国新泽西州
(72)发明人 余建军 李凡
(74)专利代理机构 北京安信方达知识产权代理有限公司 11262
代理人 韩倩倩 郑霞
(51)Int.Cl.
H04J 11/00(2006.01)

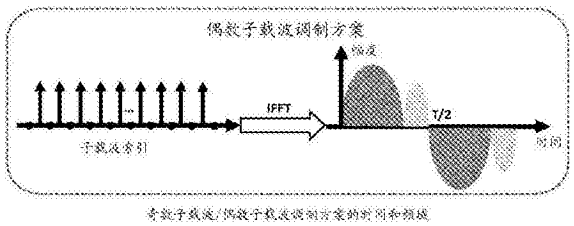
权利要求书2页 说明书8页 附图15页

(54)发明名称

半周期正交频分复用发射和接收

(57)摘要

光发射机传输正交频分复用符号，在光发射机中，仅对一半的可用子载波使用数据进行调制，并且通过不使用数据进行调制来抑制其余子载波。传输具有等于OFDM符号的符号周期的一半的持续时间，从而产生半周期传输。光接收机接收半周期传输的OFDM符号，再生全时域表示并且恢复在一半可用子载波上调制的数据。调制的子载波和抑制的子载波在频域中交替。



CN 105247806 A

1.一种传输光正交频分复用 (OFDM) 信号的方法,其包括 :

将数据调制到 OFDM 符号上 ;

仅在持续时间 T/2 的时间周期期间、在 OFDM 符号的半周期中传输所述数据,其中,T 表示所述 OFDM 符号的符号周期,并且其中,所述 OFDM 符号包括多个子载波,通过禁止使用数据进行调制来抑制所述多个子载波的交替子载波。

2.根据权利要求 1 所述的方法,其中 :

所述半周期包括所述符号周期的第一半。

3.根据权利要求 2 所述的方法,还包括 :

在所述符号周期的第二半中传输另一个 OFDM 符号的半周期。

4.根据权利要求 3 所述的方法,其中,所述第一半相对于所述第二半在时间上较早。

5.根据权利要求 1 所述的方法,其中,被抑制的子载波包括所述 OFDM 符号的偶数子载波。

6.根据权利要求 1 所述的方法,其中,被抑制的子载波包括所述 OFDM 符号的奇数子载波。

7.根据权利要求 1 所述的方法,还包括 :

在传输之前通过低通滤波器过滤所述 OFDM 信号。

8.一种正交频域复用 (OFDM) 发射机装置,其包括 :

符号生成器模块,其生成 OFDM 符号 ;

其中,所述 OFDM 符号的频域表示包括数据被调制在其上的第一组子载波和没有数据被调制在其上的第二组子载波,其中,来自所述第一组的子载波与来自所述第二组的子载波在频域中交替 ;以及

其中,所述 OFDM 符号的时域表示包括在第一时间间隔中的第一半周期,然后是在与所述第一时间间隔具有相同持续时间的第二时间间隔中的第二半周期 ;以及

传输模块,其传输所述 OFDM 符号的所述第一半周期。

9.根据权利要求 8 所述的装置,其中 :

所述第一组子载波包括所述 OFDM 符号的奇数子载波。

10.根据权利要求 8 所述的装置,其中 :

所述第一组子载波包括所述 OFDM 符号的偶数子载波。

11.一种接收光正交频域复用 (OFDM) 信号的方法,其包括 :

在持续时间 T/2 的时间周期期间接收 OFDM 符号的半周期,其中,T 表示所述 OFDM 符号的符号周期,并且其中,所述 OFDM 符号包括多个子载波,通过禁止使用数据进行调制来抑制所述多个子载波的交替子载波 ;以及

从所述 OFDM 符号的所接收的半周期中恢复数据。

12.根据权利要求 11 所述的方法,其中 :

所述半周期包括所述符号周期的第一半。

13.根据权利要求 12 所述的方法,还包括 :

在所述符号周期的第二半中接收另一个 OFDM 符号的半周期。

14.根据权利要求 13 所述的方法,其中,所述第一半相对于所述第二半在时间上较早。

15.根据权利要求 11 所述的方法,其中,被抑制的子载波包括所述 OFDM 符号的偶数子

载波。

16.根据权利要求 11 所述的方法，其中，被抑制的子载波包括所述 OFDM 符号的奇数子载波。

17.一种正交频域复用 (OFDM) 接收装置，其包括 ：

光模块，其在具有持续时间 T/2 的第一时间间隔内接收 OFDM 传输，其中，T 表示所述 OFDM 传输的符号持续时间 ；

全周期生成模块，其生成表示 OFDM 符号的信号 ；

快速傅立叶变换模块，其对 OFDM 符号进行转换 ；

符号生成器模块，其生成 OFDM 符号，

其中，所述 OFDM 符号的频域表示包括数据被调制在其上的第一组子载波和没有数据被调制在其上的第二组子载波，其中，来自所述第一组的子载波与来自所述第二组的子载波在频域中交替 ；以及

其中，所述 OFDM 符号的时域表示包括在第一时间间隔中的第一半周期，然后是在与所述第一时间间隔具有相同持续时间的第二时间间隔中的第二半周期 ；以及

传输模块，其传输所述 OFDM 符号的所述第一半周期。

18.根据权利要求 17 所述的装置，其中 ：

所述第一组子载波包括所述 OFDM 符号的奇数子载波。

19.根据权利要求 17 所述的装置，其中 ：

所述第一组子载波包括所述 OFDM 符号的偶数子载波。

20.一种光通信系统，其包括 ：

发射机，其被配置成传输调制的正交频分复用 (OFDM) 符号的半切型式 ；以及

接收机，其被配置成接收所述半切型式，再生所述 OFDM 符号的完整型式，并且恢复在所述 OFDM 符号中调制的数据。

半周期正交频分复用发射和接收

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 该专利文献要求于 2013 年 5 月 16 日提交的美国临时专利申请第 61/824,324 的优先权的利益。将上述专利申请的全部内容通过引用并入本文。

[0003] 背景

[0004] 本专利文献涉及数字通信，并且在一方面，涉及在光通信中的正交频分复用。

[0005] 在诸如无线通信、光纤通信等的应用领域中具有对数据通信的日益增长的需求。对于核心网络的需求尤其更高，不仅是因为由于多媒体应用而使用越来越多的带宽的诸如智能手机和计算机的用户设备，还因为通过核心网络为其传送数据的设备总数正在增加。

[0006] 概述

[0007] 在一些公开的实施例中，首次成功展示了半周期的 DDO-OFDM 发射和接收以抵抗 SSMI 而不降低频谱效率。接收机灵敏度在使用 40-km SSMF-28 传输的 OPSK 和 16QAM OFDM 中分别提高 2dB 和 1.5dB。

[0008] 在一个公开的方面，用于光传输的方法、装置和计算机程序产品包括在持续时间 T/2 的时间周期期间传输 OFDM 符号的半周期，其中，T 表示 OFDM 符号的符号周期，并且其中，OFDM 符号包括多个子载波，通过禁止使用数据进行调制来抑制多个子载波的交替子载波。

[0009] 在另一方面，公开了方法、装置和用于储存代码的计算机程序产品，其用于在持续时间 T/2 的时间周期期间接收 OFDM 符号的半周期，并且从接收的半周期 OFDM 符号中恢复数据，其中，T 表示 OFDM 符号的符号周期，并且其中，OFDM 符号包括多个子载波，通过禁止使用数据进行调制来抑制多个子载波的交替子载波。

[0010] 在另一方面，公开了光通信系统，其包括发射机和接收机，发射机被配置成发射调制的 OFDM 符号的半切型式，接收机被配置成接收该半切型式，再生 OFDM 符号的完整型式，并且恢复在 OFDM 符号中调制的数据。

[0011] 附图简述

[0012] 图 1A 描绘直接检测的光正交频分复用 (DDO-OFDM) 信号的三种不同变体。

[0013] 图 1B 描绘半周期 DDO-OFDM 的实施的方框图。

[0014] 图 1C 表示在其中使用数据调制 OFDM 符号的奇数子载波的实施例。

[0015] 图 1D 表示在其中使用数据调制 OFDM 符号的偶数子载波的实施例。

[0016] 图 1E 表示奇数子载波调制的 OFDM 信号的频谱。

[0017] 图 1F 描绘在 IFFT 之后的奇数子载波调制的 OFDM 信号的实数部分。

[0018] 图 1G 描绘在 IFFT 之后的奇数子载波调制的 OFDM 信号的虚数部分。

[0019] 图 1H 表示偶数子载波调制的 OFDM 信号的频谱。

[0020] 图 1I 描绘在 IFFT 之后的偶数子载波调制的 OFDM 信号的实数部分。

[0021] 图 1J 描绘在 IFFT 之后的偶数子载波调制的 OFDM 信号的虚数部分。

[0022] 图 2 描绘半周期 DDO-OFDM 的实验布置。

[0023] 图 3A-3B 描绘接收到的 OFDM 信号的电子频谱，其中 (A) 在半周期传输

(half-cycled) 之前，(B) 在半周期传输之后。

[0024] 图 4A-4B 描绘 4-QAM OFDM 的比特误码率 (BER) 相对于用于 (A)OBTB，(B) 在 40-km SSMF-28 之后的接收到的光功率。

[0025] 图 5A-5B 描绘 16-QAM OFDM 的 BER 相对于 (A)OBTB，(B) 在 40-km SSMF-28 之后接收到的光功率。

[0026] 图 6A-6B 描绘在 16QAM-OFDM 传输中相对于负荷索引的误码率，其中 (A) 为传统传输，(B) 为半周期传输。

[0027] 图 7 描绘光通信系统。

[0028] 图 8 描绘数字通信处理的实例。

[0029] 图 9 为用于数字通信的传输装置实例的方框图表示。

[0030] 图 10 描绘数字通信处理的实例。

[0031] 图 11 为用于数字通信的传输装置的实例的方框图表示。

[0032] 详细说明

[0033] 图 7 描绘光通信系统 100，在其中可实践目前公开的技术。可将一个或多个光发射机 102 与一个或多个光接收机 106 经由光网络 104 通信地耦合。光发射机 102 和光接收机 106 可以例如是光网络的光链路终端 (OLT) 和光网络单元 (ONU) 或无源光转发器设备等。光网络 104 可包括光纤，光纤在长度上从几百英尺（例如，最后一公里传输线）延伸到几千米（远程输送网络）。传输的光信号可通过诸如放大器、转发器、交换机等的中间的光设备，为清楚起见，未将其在图 7 中示出。

[0034] 增加容量以增大通过光网络 104 传送的数据量通常需要铺设新的光纤。但由于铺设光纤和在光纤的发射端与接收端增加新设备两者所需的资本支出，该选项是昂贵的。可选地，光网络操作者和供应商正在不断地寻求新的技术，以能够更密集地（例如，每个波长效率或频谱效率更大的比特）传送数据。

[0035] 为此，由于其通过数字信号处理 (DSP) 实现的高频谱效率 (SE) 和对于传输损伤的稳健性，光正交频分复用 (OFDM) 已经引起关注。基于光接收机的配置，光 OFDM 系统的实施具有两类：直接检测的光 OFDM(DDO-OFDM) 和相干光 OFDM(CO-OFDM)。在 CO-OFDM 系统中，由于复杂的接收机结构和在发射机与接收机中的复杂的信号处理，实施的成本通常高。这大大限制了其在低成本接入网络中的应用。利用简单并且有成本效益的配置，DDO-OFDM 系统适合用于短距离接入网络。

[0036] 在典型的 DDO-OFDM 系统中，在经由接收机中的光电二极管 (PD) 的平方律检测之后，由子载波 - 子载波混合干涉 (SSMI) 将 OFDM 信号劣化。在一些实施例中，提出了频率保护带以避免来自 OFDM 信号的 SSMI。在 DDO-OFDM 中应用被称为交织 OFDM 的另一种方案，从而通过仅在偶数子载波中插入数据来消除 SSMI 的影响。这两种方案均可有效缓解由 SSMI 引起的失真，但系统 SE 将降低 2 倍。为保持高 SE，可使用比特交织器和涡轮码技术来遏制在使用 100-km 传输的 64 元正交调幅 (64QAM)DD-OFDM 系统中的 SSMI。这些技术可有效地缓解 SSMI，但由于利用涡轮码，SE 仍被劣化。此外，由于前向纠错 (FEC) 解码造成的复杂性可限制其应用。本文公开了半周期 DDO-OFDM 发射和接收技术，在一方面，该技术可用于抵抗 SSMI 而无 SE 降低。在一些实施例中，接收机灵敏度在使用 40-km SSMF-28 传输的 QPSK 和 16QAM OFDM 中分别提高了 2dB 和 1.5dB。

[0037] 图 1A 示出可在 DDO-OFDM 中使用的三种不同类型的 OFDM 信号。第一种 (110) 为传统的 OFDM 信号，在 PD 之后，SSMI 将在整个 OFDM 信号带扩散 (112)，并且信号的比特误码率 (BER) 性能将严重恶化。第二种 (114) 为保护带使能 OFDM 信号，其中 SSMI 仅位于保护带中，并且 BER 性能可使用劣化的 SE 得到改善 (116)。第三种 (118) 为交织的 OFDM 信号，其中数据仅被调制到偶数子载波上。在这种情况下，无数据被调制在交替的（奇数）子载波（即，当在符号内列举时具有奇数索引的子载波）上。在 PD 之后，SSMI 将仅分布在奇数子载波中 (120)，并且仅在偶数子载波上调制的数据不受 SSMI 的影响。在使用交织 OFDM 信号的 SSMI 消除方案中，当数据仅调制到偶数 / 奇数子载波上时，OFDM 符号将展示时域对称性。

[0038] 基于这些发现，在本文中公开了半周期 DDO-OFDM 技术。由 N（整数）表示在 OFDM 调制期间的 IFFT 大小，而由时间 T 表示一个 OFDM 符号的时间长度，在 IFFT 之后，OFDM 信号可表示成：

[0039] $$s(t)=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\exp(j2\pi f_k t)\left(1\le t\le T\right) \qquad (1)$$

[0040] 其中，k 表示子载波索引，f_k表示第 k 个子载波的频率且可由下式给出：

[0041] $f_k = k\Delta f = k/T$ (2)

[0042] 在时域中，一个 OFDM 符号的第一半和第二半可表示成：

[0043] $$s(t_1)=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\exp(j2\pi f_k t_1)\left(1\le t_1\le T/2\right) \qquad (3)$$

[0044] $$s(t_2)=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\exp(j2\pi f_k t_2)\left(T/2+1\le t_2\le T\right) \qquad (4)$$

[0045] 当 $t_2 = t_1+T/2$，第二半可表示成：

[0046]
$$\begin{aligned}s(t_1+T/2)&=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\exp\left(j2\pi f_k(t_1+T/2)\right)\\&=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\exp(j2\pi f_k t_1+jk\pi)\\&=\sum_{k=0}^{N-1}c_k(\cos k\pi+j\sin k\pi)\exp(j2\pi f_k t_1)\\&=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\cos k\pi\exp(j2\pi f_k t_1)\quad\left(1\le t_1\le T/2\right)\end{aligned} \qquad (5)$$

[0047] 为进一步简化该公式，子载波的索引为从 0 到 N-1，偶数子载波和奇数子载波的索引可分别表示成 m 和 n。一个 OFDM 符号的第一半和第二半可表示成：

[0048] $$s(t_1)=\sum_{n=1}^{N-1}c_n\exp(j2\pi f_n t_1)+\sum_{m=0}^{N-2}c_m\exp(j2\pi f_m t_1)\left(1\le t_1\le T/2\right) \qquad (6)$$

[0049]
$$s(t_2)=s\left(t_1+T/2\right)$$
$$=\sum_{k=0}^{N-1}c_k\cos k\pi\exp\left(j2\pi f_k t_1\right)$$
$$=\sum_{n=1}^{N-1}c_n\cos n\pi\exp\left(j2\pi f_n t_1\right)+\sum_{m=0}^{N-2}c_m\cos m\pi\exp\left(j2\pi f_m t_1\right)$$
$$=\sum_{n=1}^{N-1}-c_n\exp\left(j2\pi f_n t_1\right)+\sum_{m=0}^{N}c_m\exp\left(j2\pi f_m t_1\right)\left(1\le t_1\le T/2\right) \qquad (7)$$

[0050] 在交织 OFDM 方案中，具有偶数索引的子载波以无数据映射应地保存以抵抗 SSMI，这意为 c_m 被设定为“0”，一个 OFDM 符号的第一半和第二半可简化成：

[0051]
$$s(t_1)=\sum_{n=1}^{N-1}c_n\exp\left(j2\pi f_n t_1\right)\left(1\le t_1\le T/2\right) \qquad (8)$$

[0052]
$$s(t_2)=\sum_{n=1}^{N-1}-c_n\exp\left(j2\pi f_n t_1\right)$$
$$=-s(t_1) \qquad \left(t_2=T/2+t_1\right) \qquad (9)$$

[0053] 从方程式 (8) 和 (9) 可以看出，一个 OFDM 符号中的第一半和第二半在时域中展示具有 180° 相移的相同幅度。为使用这个冗余，在一些实施例中，在传输期间简单消除传输的第二半。通过这个方式，在该处理之后，用于传达数据传输的时间长度可缩短到 T/2，而 SE 可保持与传统 OFDM 信号相同。

[0054] 图 1B 示出半周期 DDO-OFDM 实施例的端对端发射和接收系统的结构。首先，与在交织 OFDM 信号中相同，在频域中仅将数据调制到偶数子载波上（曲线图 122）。接下来，应用快速傅立叶逆变换 (IFFT) 以实现 OFDM 调制。在 IFFT 之后，一个 OFDM 符号的周期为 T，同时第一半 (124) 和第二半 (126) 在时域中展示具有 180 度相移的相同幅度（表示为“A”和“-A”）。在传输期间，将第二半 126（第二半周期）截除。换言之，仅传输被表示为信号 128 的第一半 124 的型式。理想地，该型式与第一半 124 相同。因此，在该处理之后，用于传达数据传输的时间长度缩短到 T/2，而 SE 将保持与传统 OFDM 信号相同。在电光 (E/O) 转换和光电 (O/E) 转换（未在附图中示出）之后，由于光纤链路 104 可被看作近似非时变系统，所以将传输的信号 128 恢复成 [0, T/2] 信号 130（表示成“A”）。可由半周期的第一半 OFDM 符号 (134，理想地其与 130 相同）恢复第二半 OFDM 符号 (132)。接下来，应用 FFT 以实现 OFDM 解调，并且在解调之后，SSMI 将分布在奇数子载波中 (136)。如从图 1B 可见，在半周期的 DDO-OFDM 中，可实施 SSMI 的消除而不降低 SE。

[0055] 图 1C 示出实例半周期调制方案，其中奇数子载波用于调制，其中通过不调制任何数据到偶数子载波上来抑制偶数子载波。如可以看出的，在 IFFT 之后所产生的频谱在第一半周期和第二半周期中对称。

[0056] 图 1D 示出实例半周期调制方案，其中偶数子载波用于调制，其中通过不调制任何数据到奇数子载波上来抑制奇数子载波。如可以看出的，IFFT 之后在第二半周期中所产生的频谱为在该周期的第一半中频谱的偏移负像。

[0057] 参考图 1E 至图 1J，它们描绘了用于 32- 子载波 OFDM 情况的实例。

[0058] 图 1E 为示出针对图 1C 所述情况的子载波调制的曲线图。

[0059] 图 1F 示出在图 1C 所述调制的 IFFT 变换之后的频谱的实数部分。

[0060] 图 1G 示出在图 1C 所述调制的 IFFT 变换之后的频谱的虚数部分。

[0061] 图 1H 为示出针对图 1D 所述情况的子载波调制的曲线图。

[0062] 图 1I 示出在图 1D 所述调制的 IFFT 变换之后的频谱的实数部分。

[0063] 图 1J 示出在图 1D 所述调制的 IFFT 变换之后的频谱的虚数部分。

[0064] 图 2 示出半周期 DDO-OFDM 的实验性设置。在发射机处，通过由电子基带 OFDM 信号驱动的强度 Mach-Zehnder 调制器 (MZM) 对 1557.04nm 处的外腔激光器 (ECL) 进行调制，外腔激光器具有小于 100-kHz 的线宽和 14.5dBm 的最大输出功率。由任意波形发生器 (AWG) 以 12-GSa/s 的抽样率生成 OFDM 信号。在此，用于 OFDM 生成的 FFT 大小为 256，其中采用具有正频率段中的 100 个传送数据的 200 个子载波，第一子载波设定为零用于 DC 偏置，在边缘的其他 55 个空闲子载波留作用于过取样。在所有 100 个携带信息的子载波上进行 4/16-QAM。将 8 个样本循环前缀 (CP) 增加到 256 个样本中，从而给出每个 OFDM 符号 264 个样本。在传统 OFDM 信号传输方案中，一个 OFDM 符号中传输 264 个样本，而在半周期 OFDM 方案中仅传输 132 个样本。将一个训练序列 (TS) 插入每 160 个 OFDM 数据符号之间以实现同步并获得信道响应。对于 4-QAM 和 16-QAM 传输，系统中的原始总比特率分别为 9.1/18.2Gb/s。一个具有 5-GHz 带宽的低通滤波器 (LPF) 用于在数模转换器 (DAC) 之后的混叠产物注入 MZM 之前将其过滤。对于光 OFDM 调制，开关电压为 3.4V，且将 MZM 在其线性区域偏置在 1.9V 处。将生成的信号注入掺铒光纤放大器 (EDFA)，以将进入光纤的发射功率调整到 8dBm。在 40-km 标准单模光纤 -28(SSMF-28) 传输之后，OOFDM 信号被 0.33-nm 带宽的可调谐光滤波器 (TOF) 过滤，以阻挡来自 EDFA 的带外放大自发辐射 (ASE) 噪声。为了灵敏度测量，应用光衰减器 (ATT) 来调整接收的光功率，并且然后经由具有 10GHz 的 3-dB 带宽的光接收机实施 O/E 转换。转换的电信号被实时示波器捕获并且然后以 40GSa/s 的抽样率离线地进行处理。分别在发射机和接收机处使用的 AWG 中的 DAC 和实时示波器中的 ADC 的分辨率均为 8 比特。然后使用离线 DSP 进一步处理捕获的信号。离线 DSP 程序包括同步、时域中的半周期传输、CP 移除、FFT、使用符号内频域平均 (ISFA) 进行的信道估计、单抽头均衡、4-QAM 或 16-QAM 解映射和 BER 计算。通过 320000 比特的直接误差计数获得 BER。图 3A 和图 3B 分别示出半周期传输之前和之后的接收 OFDM 信号的电子频谱。

[0065] 在实验中，在系统中测试了包括传统 OFDM 信号、交织 OFDM 和半周期 OFDM 的三种 OFDM 信号。传统 OFDM 和交织 OFDM 的长度在时域中相同，而半周期 OFDM 的长度减少到一半。为验证通过半周期的 SSMI 消除的有效性，4-QAM 和 16-QAM OFDM 信号在本文中均被展示。在交织 OFDM 信号的接收机中，将一个 OFDM 符号的第二半也从第一半复制，以将性能与半周期 OFDM 信号相比。

[0066] 在 4-QAM OFDM 传输中，测量相对于接收的光功率的 BER。图 4A 和图 4B 中分别示出光背靠背 (OBTB) 和 40-km SSMF-28 传输之后的曲线。BER 性能展示出，与传统 OFDM 信号相比，在使用半周期 OFDM 进行 SSMI 消除之后，接收机灵敏度在 OBTB 处和 40-km SSMF-28 传输之后均被提高 2dB。在半周期 OFDM 与交织 OFDM 之间的差异可被忽略，这证明半周期 OFDM 真正实用。分别在图 3A 和图 3B 中插入当在 OBTB 处的接收的光功率为 -12dBm 并且当 40-km SSMF-28 之后接收的光功率为 -11dBm 时的三种 OFDM 信号的星座图。

[0067] 在 16-QAM OFDM 传输中，也测量了相对于接收的光功率的 BER。图 5A 和图 5B 分别示出 OBTB 和在 40-km SSMF-28 传输之后的曲线。与传统 OFDM 信号相比，在使用半周期 OFDM 进行 SSMI 消除之后，接收机灵敏度在 OBTB 处和 40-km SSMF-28 传输之后均被提高 1.5dB。分别在图 4A 和图 4B 中插入当在 OBTB 处接收的光功率为 -8dBm 和当 40-km SSMF-28 之后接收的光功率为 -6dBm 时的三种 OFDM 信号的星座图。图 6A 和图 6B 分别示出当接收的光功率为 -7dBm 时，相对于 40-km SSMF-28 之后的传统 16-QAM OFDM 和半周期 16-QAM OFDM 的负荷索引的误码率。在使用半周期传输技术进行 SSMI 消除之后，误码率显著下降。

[0068] 在 16-QAM OFDM 传输中，也测量相对于接收的光功率的 BER。OBTB 和 40-km SSMF-28 传输之后的曲线为成功展示出克服 SSMI 而无 SE 降低的半周期传输技术。在使用 40-km SSMF-28 传输的 QPSK 和 16QAM OFDM 中，接收机灵敏度分别提高 2dB 和 1.5dB。

[0069] 图 8 为数字通信的方法 800 的实例的流程图表示。方法 800 包括将数据调制 (802) 到 OFDM 符号上，并且传输 (804) 光正交频分复用 (OFDM) 信号包括在持续时间 T/2 的时间周期期间传输半周期的 OFDM 符号。在此，T 表示 OFDM 符号的符号周期。OFDM 符号包括多个子载波（例如，32 个或 128 个或 256 个子载波），通过禁止使用数据进行调制来抑制多个子载波的交替子载波制。在一些实施例中，半周期包括符号周期的第一半（例如，从 0 到 T/2 的时间）。例如，在关于图 1H、图 1I 和图 1J 的先前所述实施例中，OFDM 符号包括 32 个子载波。子载波可从 1 索引到 32。如图 1H、图 1I 和图 1J 所描绘，只对 OFDM 符号的每隔一个形成的偶数子载波或交替子载波（具有子载波索引 2、4、6、…、32）使用数据进行调制。奇数子载波（索引 1、3、5、…、31）不具有任何调制在其上的数据，并且被抑制（例如，不传达信息信号）。当然，在实际实施中，由于噪声和诸如载波泄露的实施限制，可在奇数子载波处观察到一些辐射能。

[0070] 在一些实施例中，可传输符号周期的任意半部分（连续或非连续）。例如，在一些实施例中，可传输符号周期的第二半。如前所述，抑制的子载波可以为 OFDM 符号的奇数子载波。可选地，调制的子载波可以为 OFDM 符号的偶数子载波。

[0071] 图 9 描绘 OFDM 发射机装置 900 的实例，发射机装置 900 包括模块 902 和模块 904，模块 902 用于将数据调制到 OFDM 符号上，模块 904 用于通过使用数据调制 OFDM 符号的第一组子载波和无数据调制 OFDM 符号的第二组负载波来生成 OFDM 符号。第一组子载波和第二组子载波在符号的频域表示中彼此交替，例如，第一组子载波包括所有奇数子载波，而第二组负载波包括所有偶数子载波，或反之亦然。

[0072] 关于图 10 和图 11，在一些实施例中，在接收调制信号的过程 1000 中，通过在持续时间 T/2 的时间间隔中接收 (1002) 具有符号周期 T 的 OFDM 符号的半周期，在接收机 1100 处接收（例如，由模块 1002) 光 OFDM 信号。使用先前讨论的半周期调制技术对 OFDM 符号进行调制。然后，接收机 1100（例如，模块 1104) 从接收的半周期 (1004) 中恢复数据。数据的恢复可包括处理接收到的半周期以再生接收到的信号的第二半周期。可使用在方程式 (1) 至方程式 (9) 中讨论的数学特性来执行再生，例如，通过简单复制接收到的信号或通过复制接收到的信号的负（符号或相位翻转）版来执行。

[0073] 在全周期信号上执行 FFT 操作，全周期信号包括接收到的第一半周期和再生的第二半周期。然后，FFT 操作的输出提供接收到的传输 OFDM 符号的副本。然后，可使用众所周知的 OFDM 解调技术来恢复调制的数据。

[0074] 在一些实施例中，接收机可在T/2至T的时间周期中接收下一个调制OFDM符号的半周期型式。接收机可解调在初始的半个时间周期中接收的第一符号的半周期型式和在后面的半个时间周期中接收的第二符号的半周期型式，在接收机处彼此平行地接收这两个半周期型式。

[0075] 应认识到，本文提供仅当偶数子载波应用于数据调制时用于缓解子载波到子载波混合干涉而不降低信号的频谱效率的技术。在一些公开的实施例中，通过调制所有可用子载波的一半（偶数子载波）并且传输相应时域信号的一半来实现缓解干扰。

[0076] 应进一步认识到，尽管所公开的技术参考用于光通信的特定实施例进行讨论，但这些技术同样可应用到其他OFDM通信系统，诸如无线（长期演进，4G，5G，802.11等）和有线（同轴电缆、家庭电话线、家庭电力线等）发射机和接收机。

[0077] 所公开的实施例和其他实施例、在本文中描述的模块和功能性操作可在数字电子电路中，或在计算机软件、固件或硬件（包括在本文中公开的结构及其结构等价物）中实施，或在它们中的一个或多个的组合中实施。所公开的实施例和其他实施例可实施为一个或多个计算机程序产品，即，在计算机可读介质上编码的计算机程序指令的一个或多个模块，用于通过数据处理装置执行或控制数据处理装置的操作。计算机可读介质可以为机器可读存储设备、机器可读存储基质、存储器设备、影响机器可读传播信号的物质的合成物或者它们中的一个或多个的组合。术语“数据处理装置”包含所有用于处理数据的装置、设备和机器，例如包括可编程处理器、计算机或多个处理器或多个计算机。除硬件以外，所述装置还可包括为正在讨论的计算机程序创建执行环境的代码，例如，组成处理器固件、协议栈、数据库管理系统、操作系统或它们中的一个或多个的组合的代码。传播的信号为人工生成的信号，例如机器生成的电信号、光信号或电磁信号，生成这些信号是用来为传输到合适的接收装置而对信息进行编码。

[0078] 能以任何形式的编程语言编写计算机程序（也称为程序、软件、软件应用、脚本或代码），包括编译语言或解释语言，并且能以任何形式部署计算机程序，包括部署为独立程序或模块、组件、子例程、或者适于在计算环境中使用的其他单元。计算机程序不必对应于文件系统中的文件。程序可储存在保存其他程序或数据（例如，储存在标记语言文档中的一个或多个脚本）的文件的一部分中、专用于正在讨论的程序的单个文件中、或者多个协同文件（例如，储存一个或多个模块、子程序或代码部分的文件）中。计算机程序可被部署成在一台计算机上或者在位于一个地点或者分布在多个地点并通过通信网络互连的多台计算机上执行。

[0079] 可通过一个或多个可编程处理器执行在本文中描述的处理和逻辑流程，一个或多个可编程处理器执行一个或多个计算机程序，以通过对输入数据进行操作并生成输出来执行功能。这些处理和逻辑流程还可由专用逻辑电路例如FPG（现场可编程门阵列）或ASIC（专用集成电路）来执行，并且装置也可被实施成专用逻辑电路，例如FPGA（现场可编程门阵列）或ASIC（专用集成电路）。

[0080] 适于执行计算机程序的处理器包括例如通用和专用微处理器以及任何类型的数字计算机中的任何一个或多个处理器。通常，处理器将从只读存储器或随机存取存储器或这两者接收指令和数据。计算机的基本元件为用于执行指令的处理器和用于储存指令与数据的一个或多个存储器设备。通常，计算机还包括或可操作地耦合到用于储存数据的一个

或多个诸如磁盘、磁光盘或光盘的大容量存储设备，以从大容量存储设备接收数据或向大容量存储设备发送数据或这两者。然而，计算机无需具有此类设备。适于储存计算机程序指令和数据的计算机可读介质包括所有形式的非易失性存储器、介质和存储器设备，例如包括：诸如 EPROM、EEPROM 和闪存设备的半导体存储装置；诸如内部硬盘或可移动硬盘的磁盘；磁光盘；以及 CD-ROM 和 DVD-ROM 盘。处理器和存储器可被专用逻辑电路加以补充或被并入专用逻辑电路中。

[0081] 尽管该专利文献包括许多细节，但这些细节不应当解释为对所要求的本发明范围的限制或对权利要求范围的限制，而应当认为是针对特定实施例的特征的描述。在本文的不同实施例的环境中描述的特定特征也可在单个实施例中组合实施。相反地，在单个实施例的环境中描述的不同特征也可在多个实施例中分开实施或以任何合适的子组合实施。此外，虽然特征在上文中可被描述为在某些组合中起作用，甚至最初要求这样，但在一些情况下来自所要求组合的一个或多个特征可从组合中删去并且所要求的组合可指向子组合或者子组合的变体。类似地，尽管在附图中按照特定次序对操作进行描述，但这不应被理解成为了实现期望的结果，要求此类操作按照示出的特定次序执行或者按顺序次序执行，或者要求所有示出的操作均被执行。

[0082] 本发明仅公开了一些实例和实施。可基于所公开的内容对所述的实例和实施以及其他实施做出变化、修改和增强。

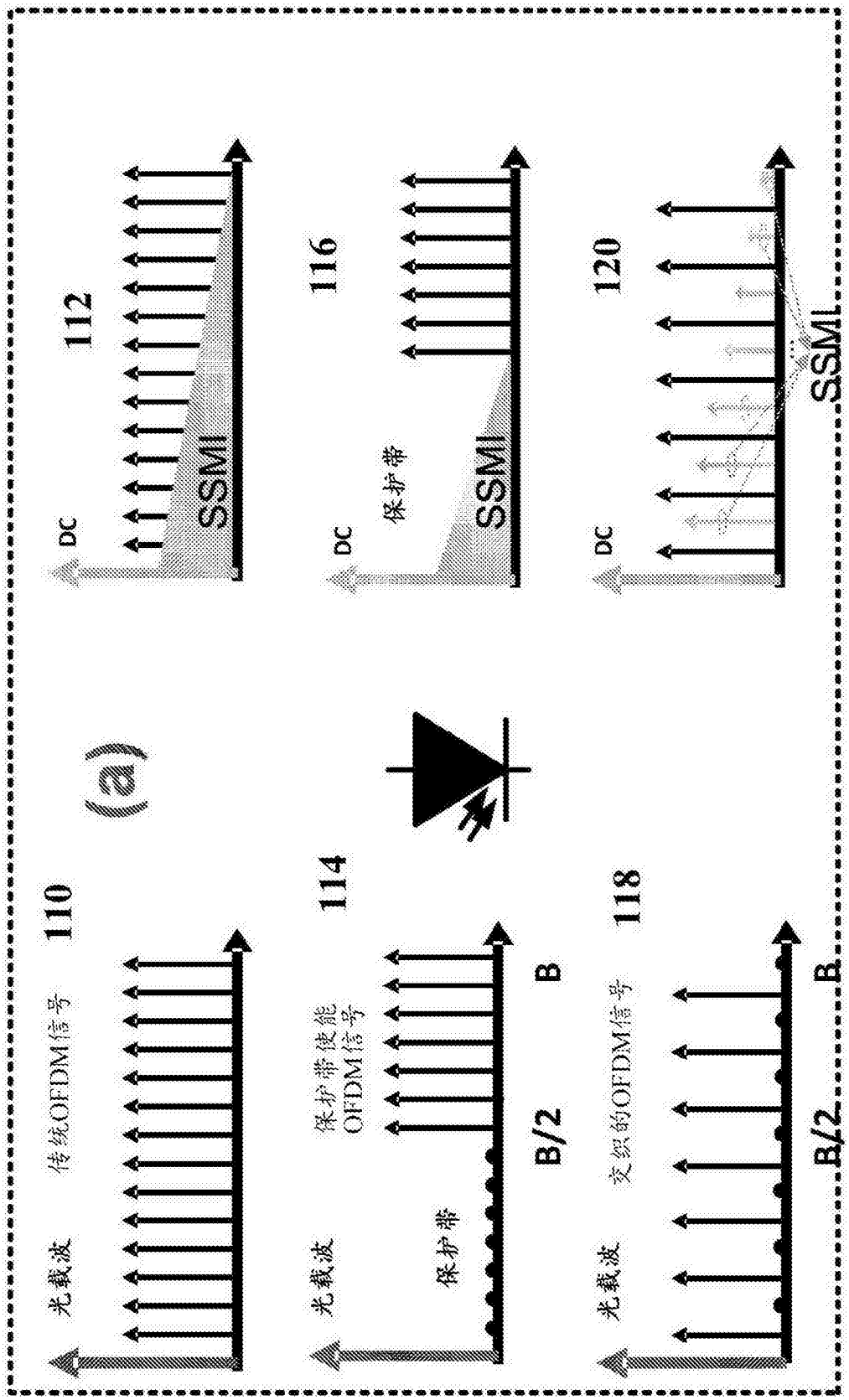

光载波
传统OFDM信号
110
(a)
112
DC
SSMI
116
保护带
SSMI
120
SSMI
光载波
保护带
保护带使能
OFDM信号
114
B/2
B
光载波
交织的OFDM信号
118
B/2
B

图 1A

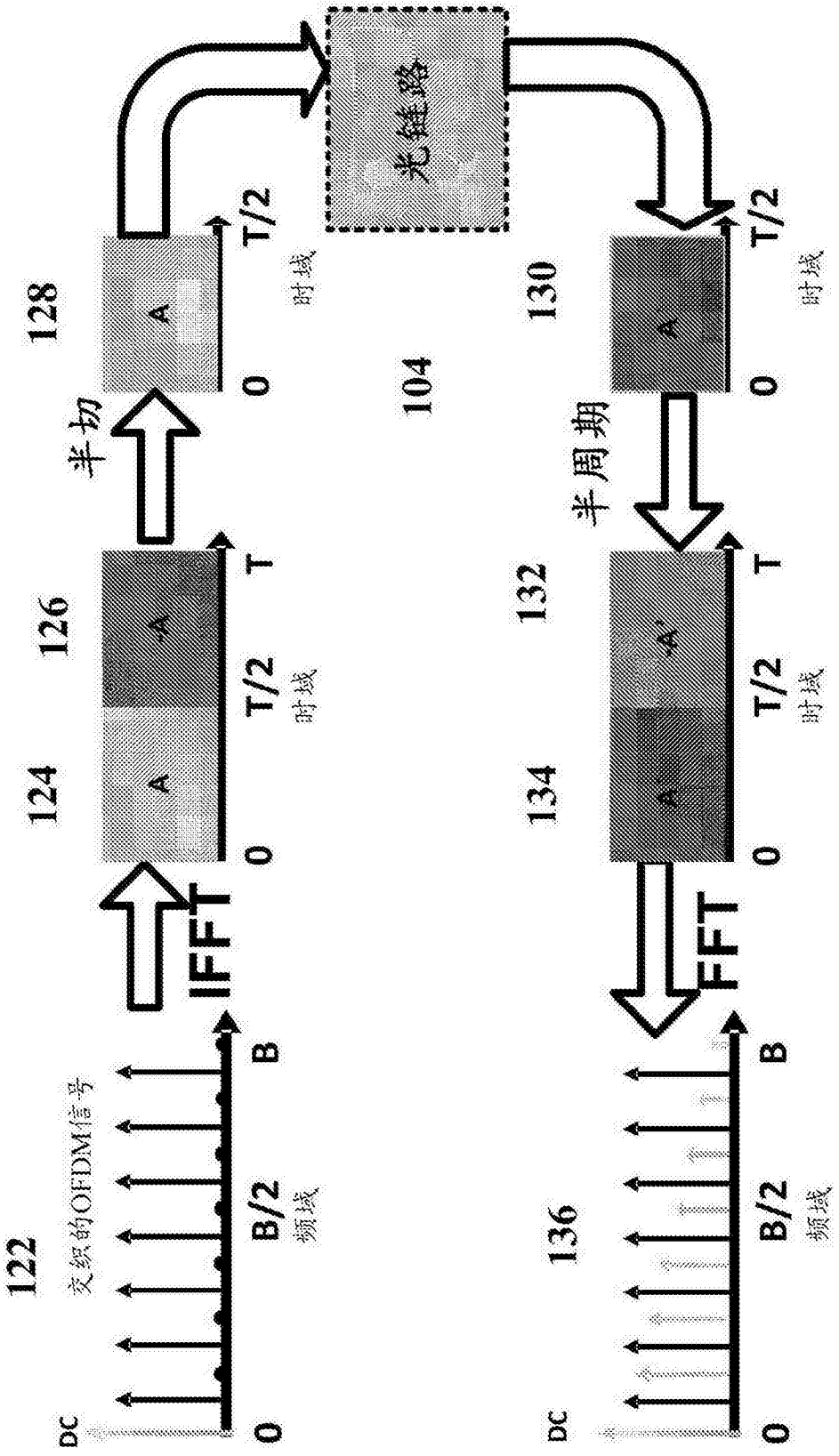

122
交织的OFDM信号
DC
0
B/2
B
频域
IFFT
124
126
A
A'
0
T/2
T
时域
半切
128
半周期
104
光链路
130
132
134
FFT
136

图 1B

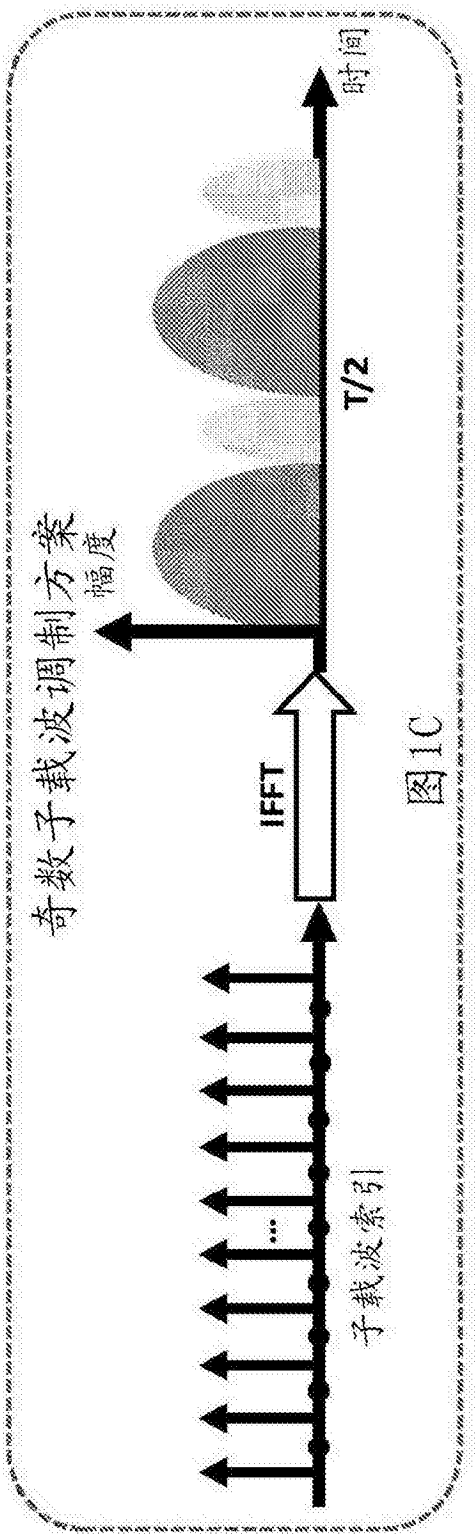
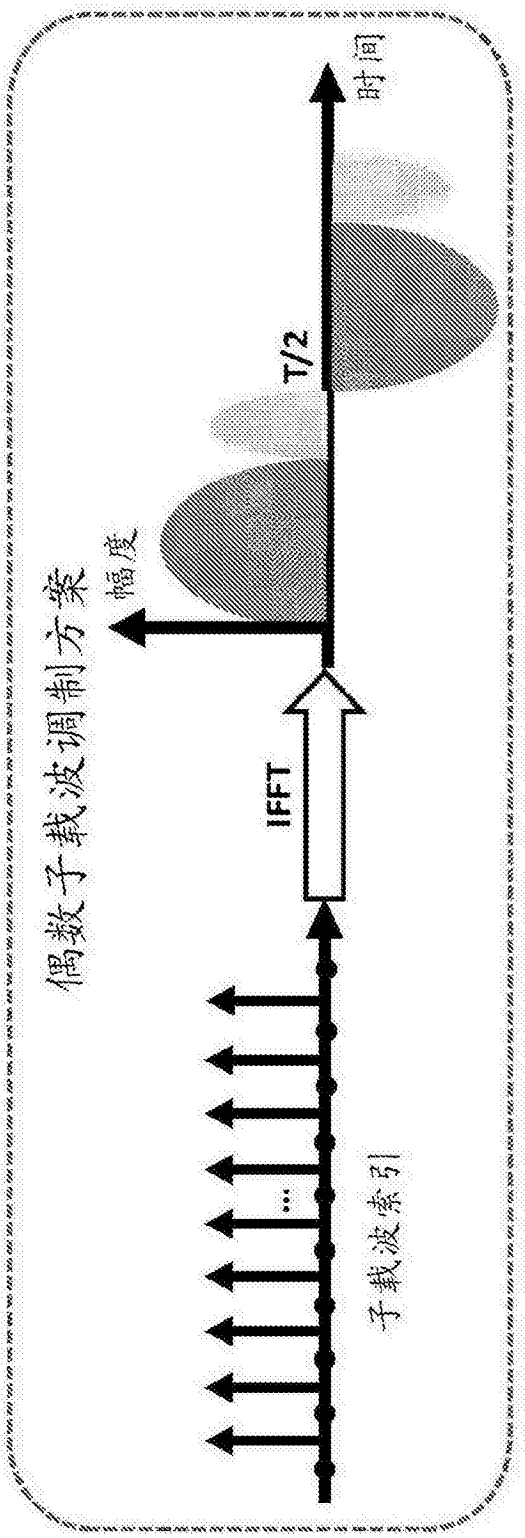


图1C



奇数子载波/偶数子载波调制方案的时间和频域

图1D

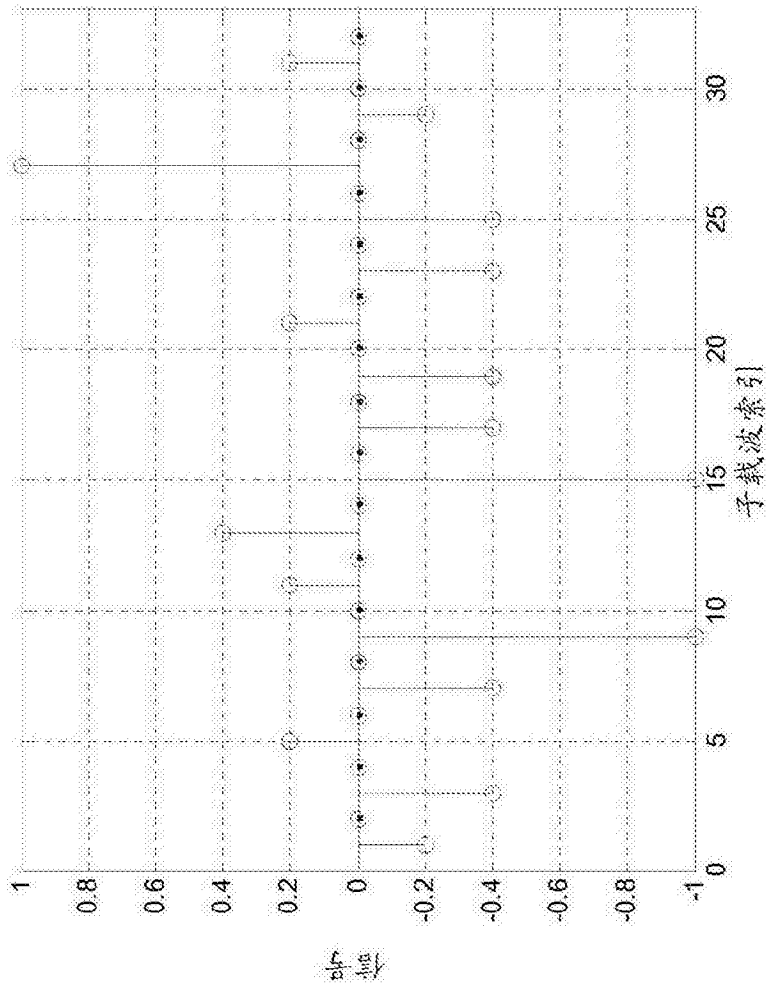


图 1E

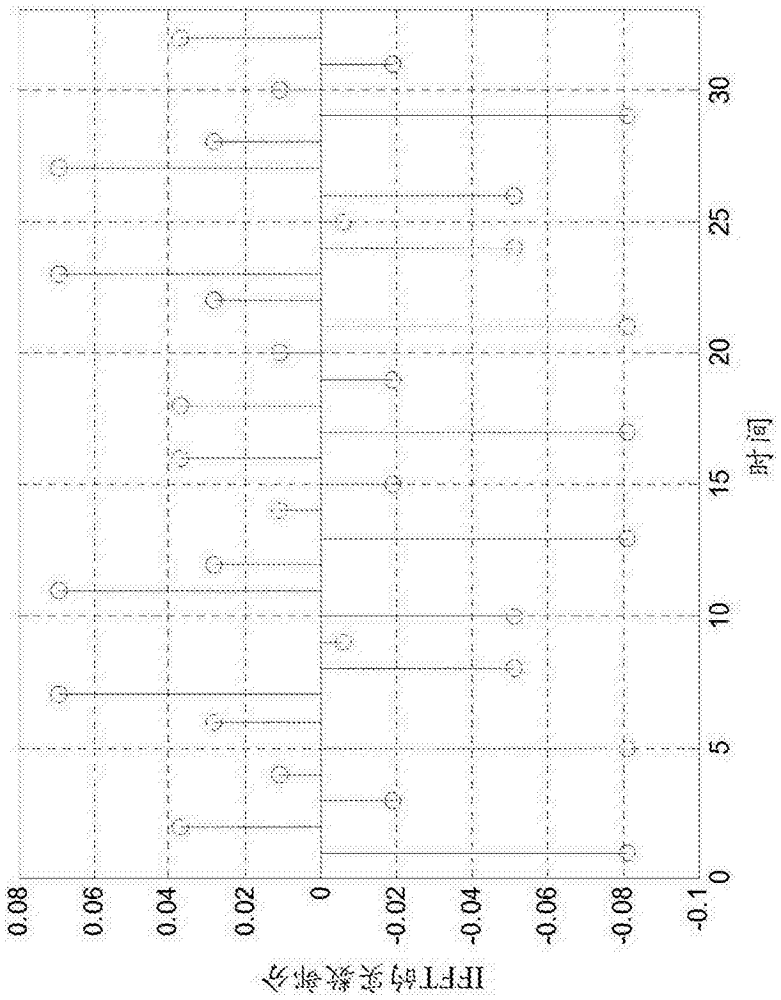

IFFT的实数部分
时间
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06
-0.08
-0.1
0
5
10
15
20
25
30

图 1F

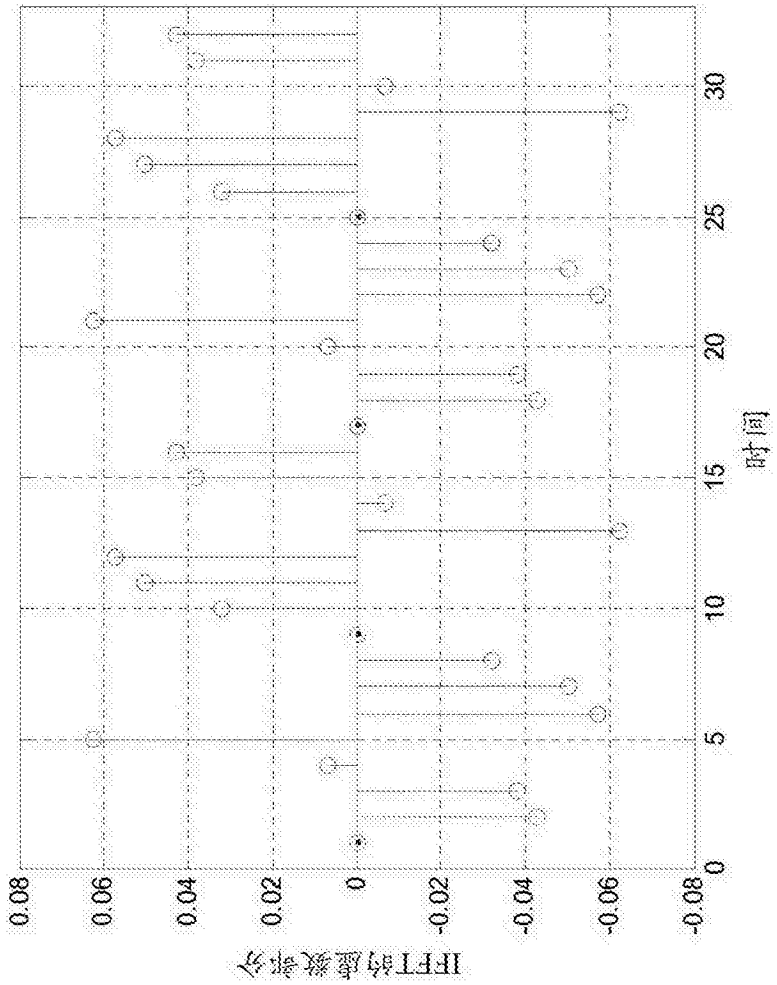


图 1G

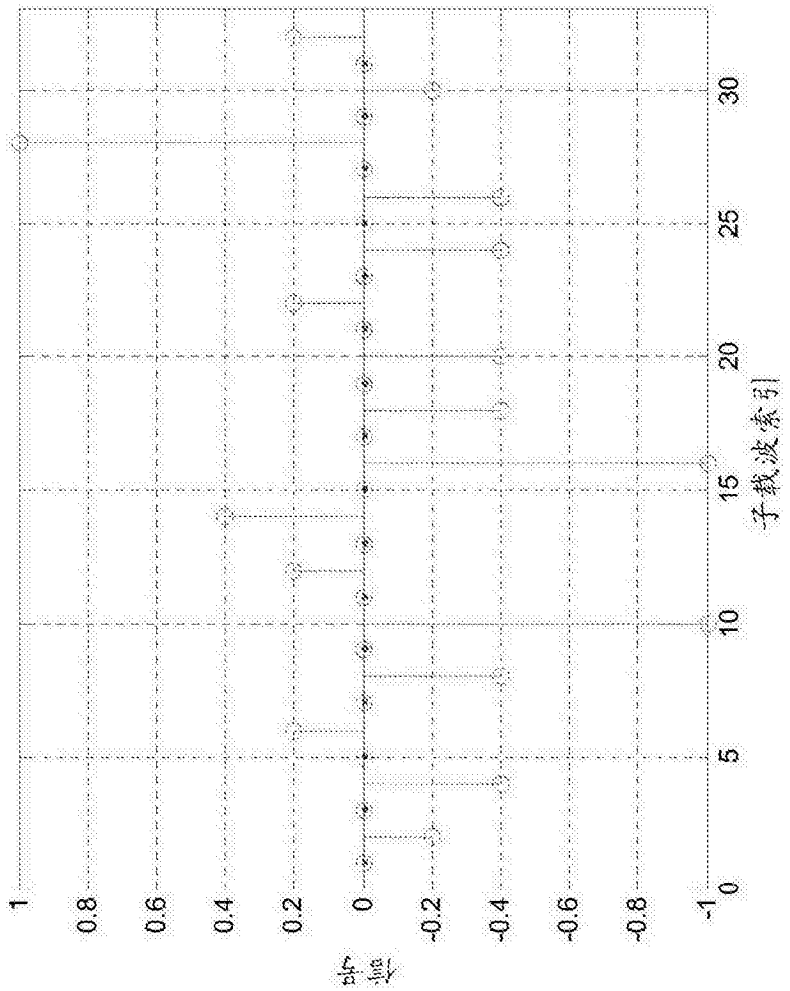


图 1H

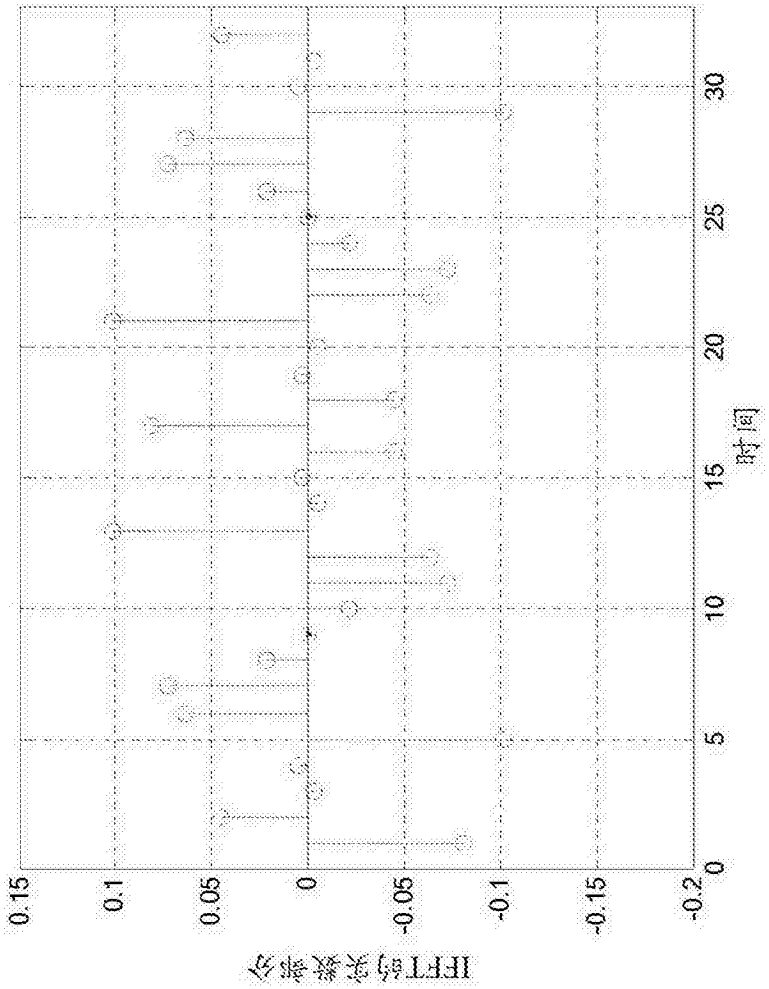


图 1I

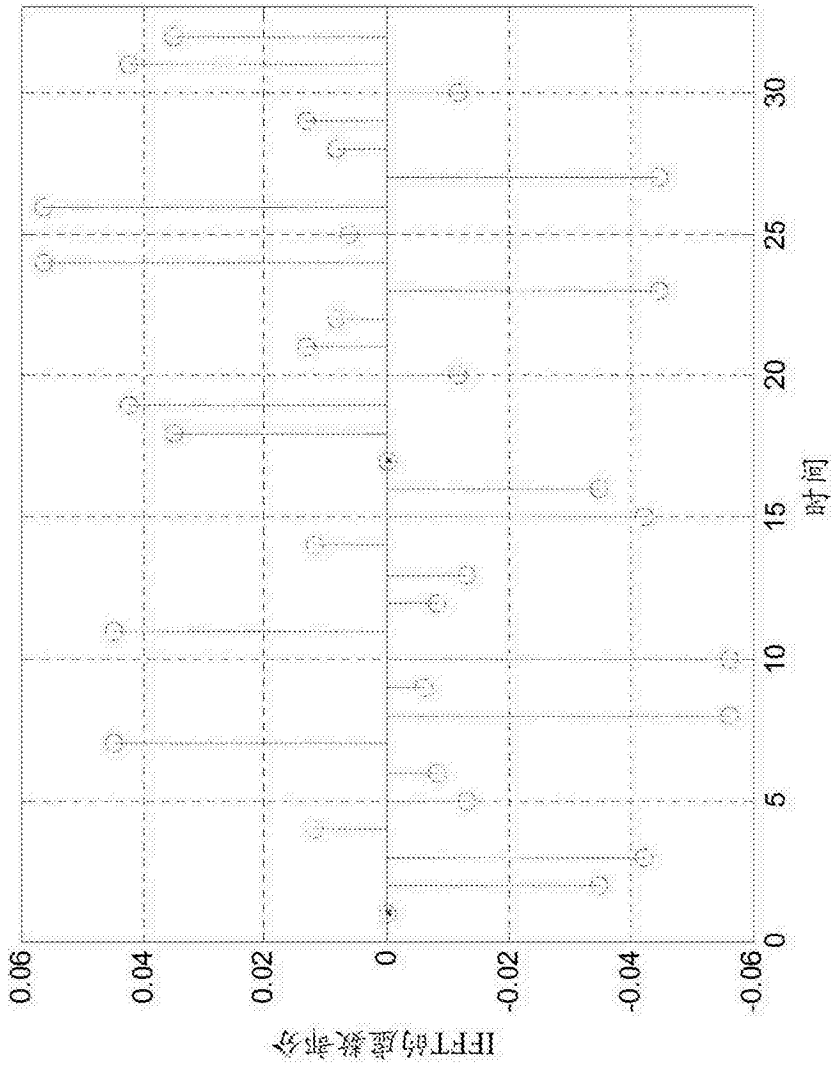


图 1J

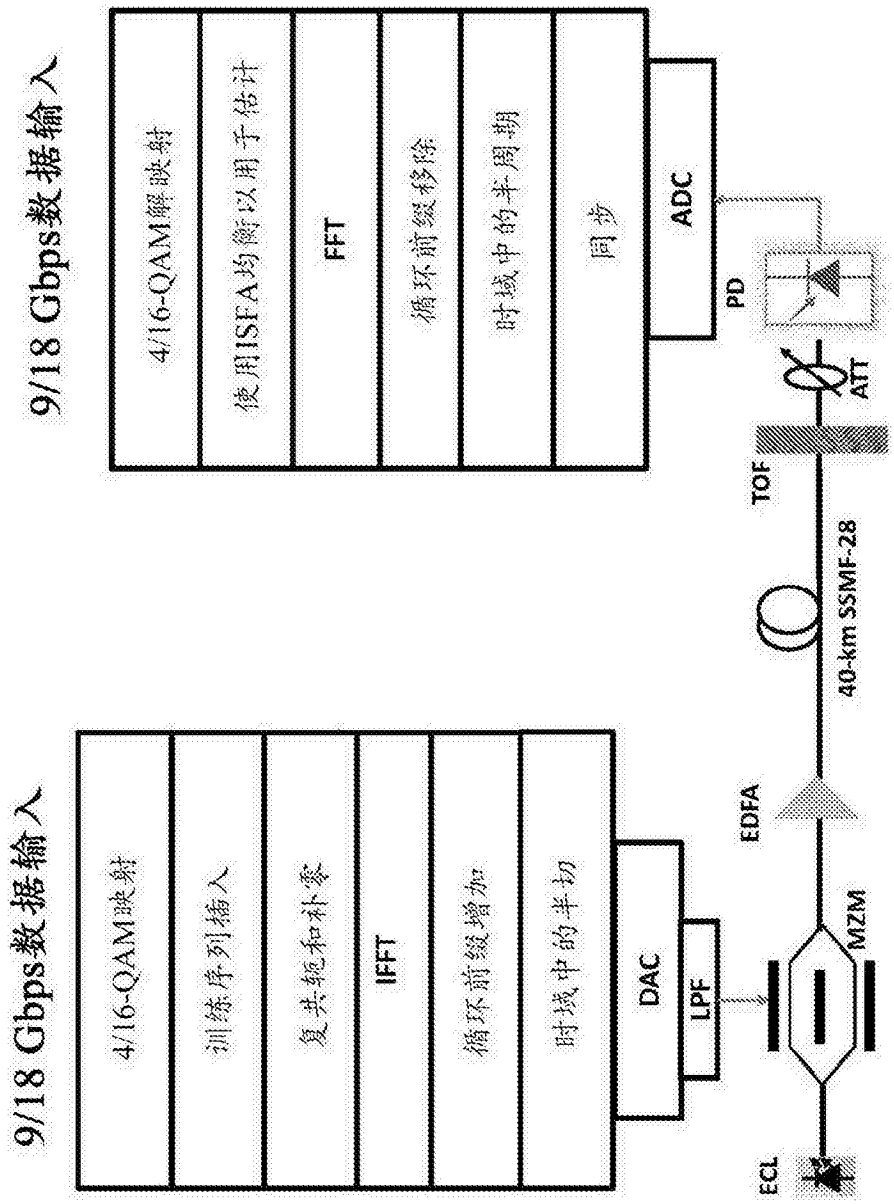

9/18 Gbps数据输入
4/16-QAM映射
训练序列输入
复共轭和补零
IFFT
循环前缀增加
时域中的半切
DAC
LPF
MZM
ECL
EDFA
40-km SSMF-28
TOF
ATT
PD
ADC
同步
时域中的半周期
循环前缀移除
FFT
使用ISFA均衡以用于估计
4/16-QAM解映射
9/18 Gbps数据输入

图 2

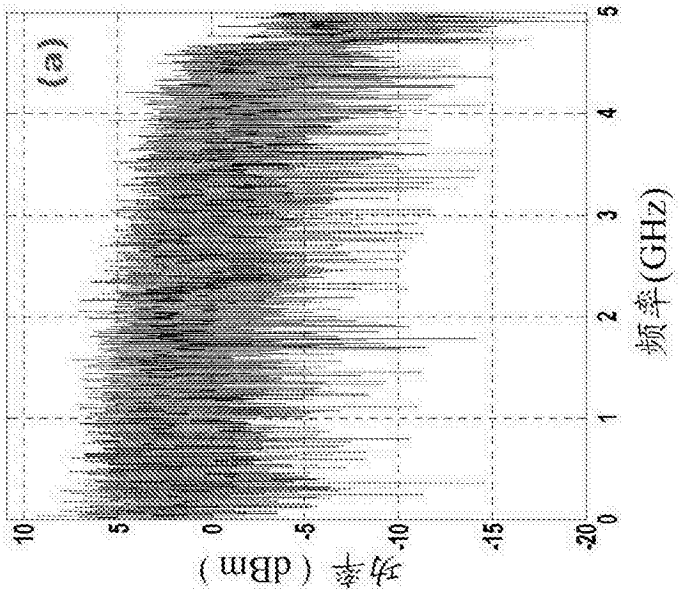


图 3A

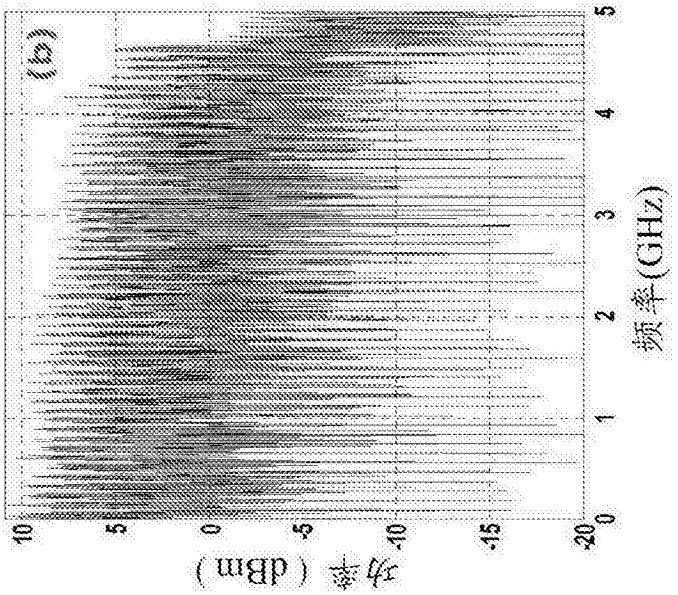


图 3B

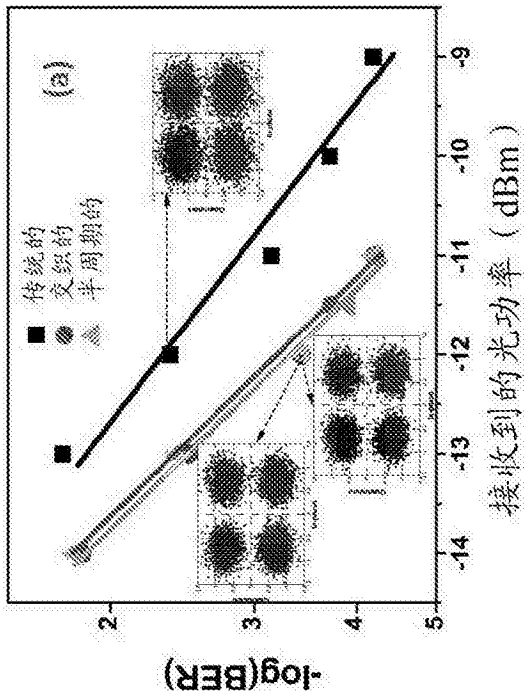


图 4A

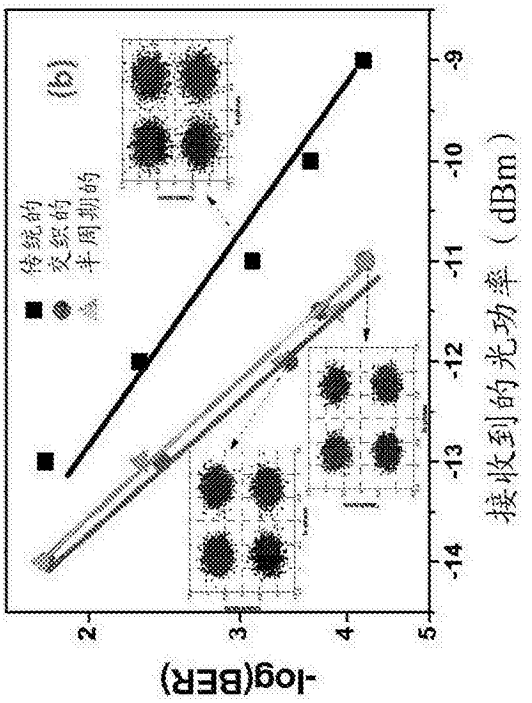

(b)
传统的
交织的
半周期的
-log(BER)
接收到的光功率（dBm）

图 4B

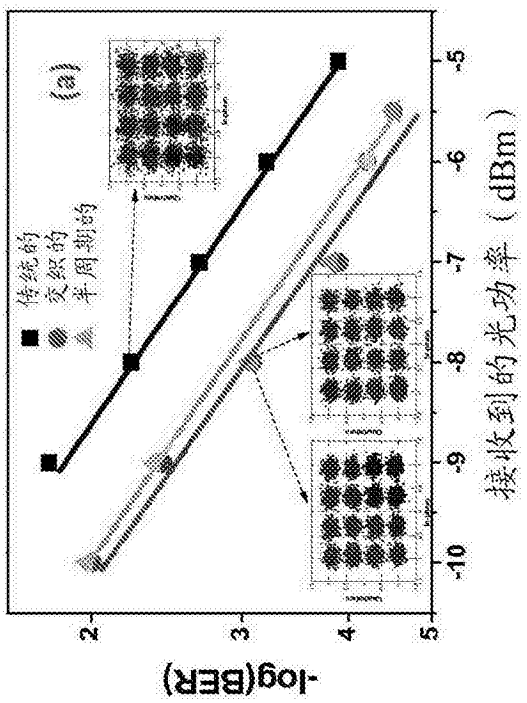

(a)
传统的
交织的
半周期的
-log(BER)
接收到的光功率（dBm）

图 5A

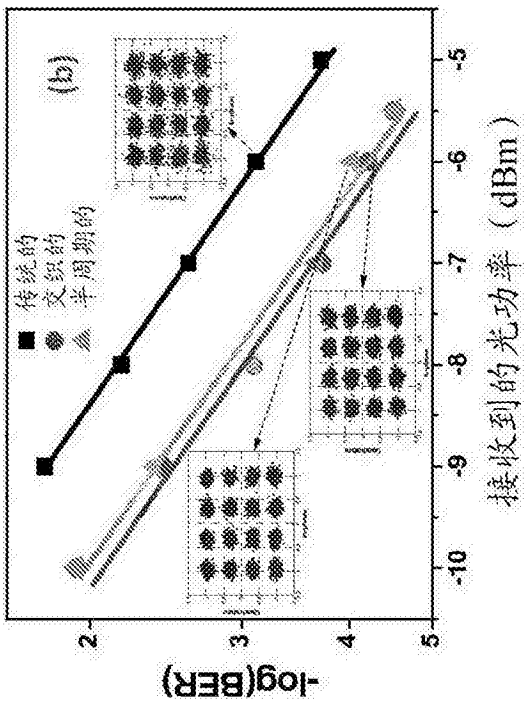

(b)
传统的
交织的
半周期的
-log(BER)
接收到的光功率（dBm）

图 5B

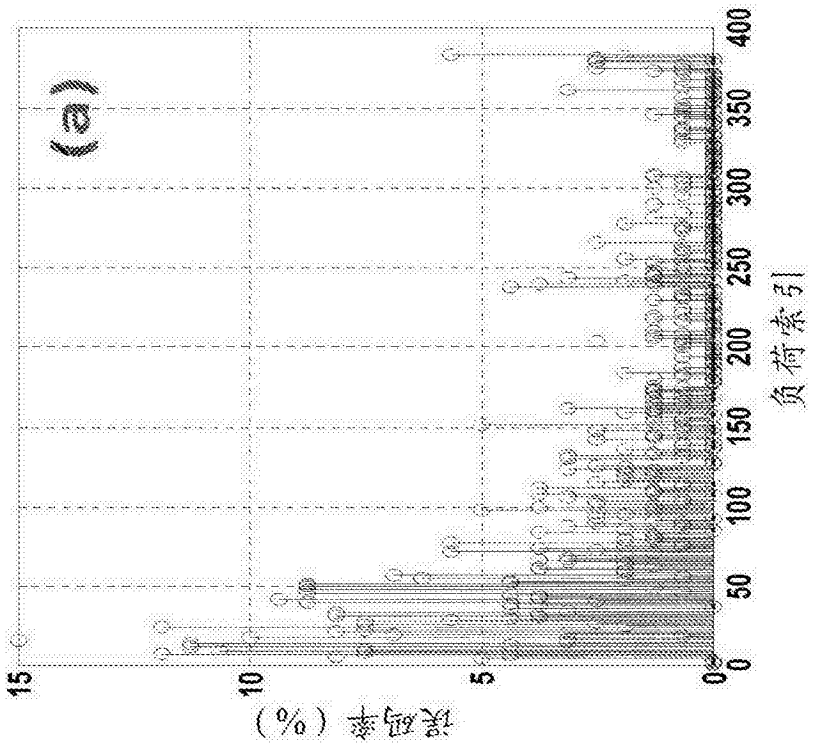

(a)
误码率（%）
负荷索引
0
5
10
15
0
50
100
150
200
250
300
350
400

图 6A

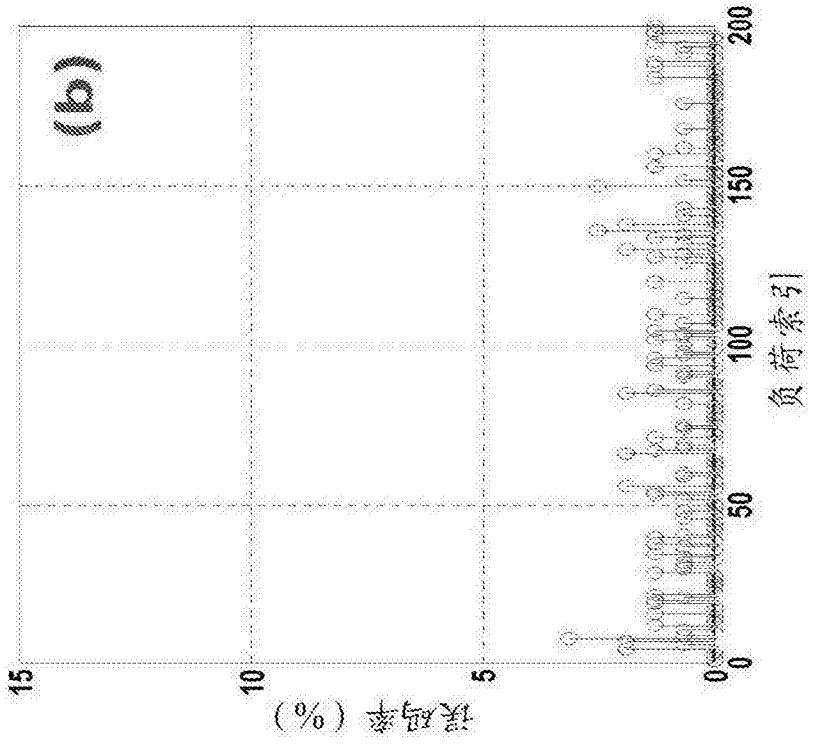

(b)
误码率（%）
负荷索引
0
5
10
15
0
50
100
150
200

图 6B

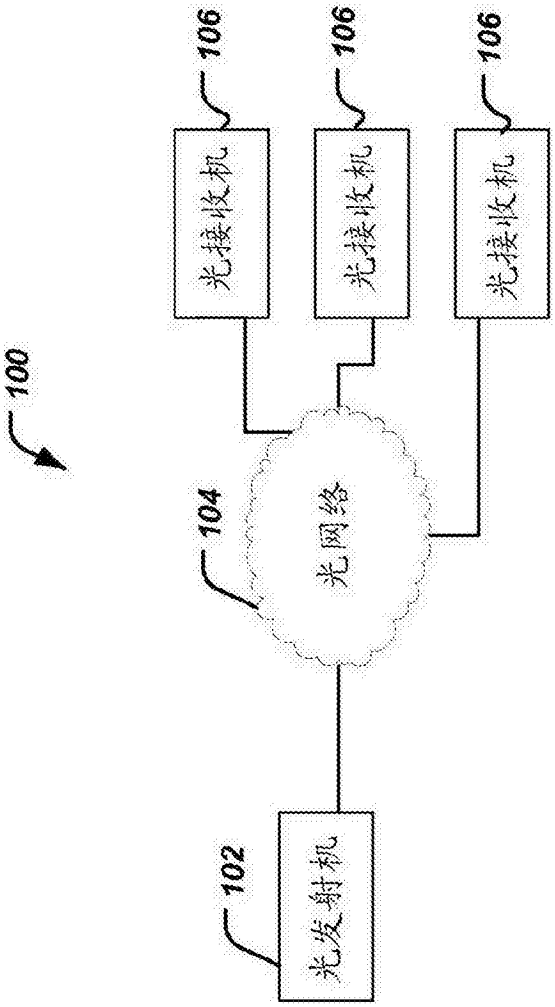

100
光发射机
102
光网络
104
光接收机
106
光接收机
106
光接收机
106

图 7

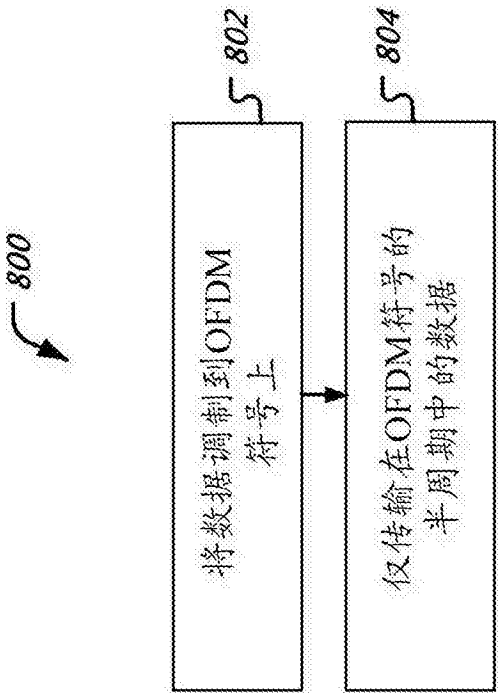

800
将数据调制到OFDM符号上
802
仅传输在OFDM符号的半周期中的数据
804

图 8

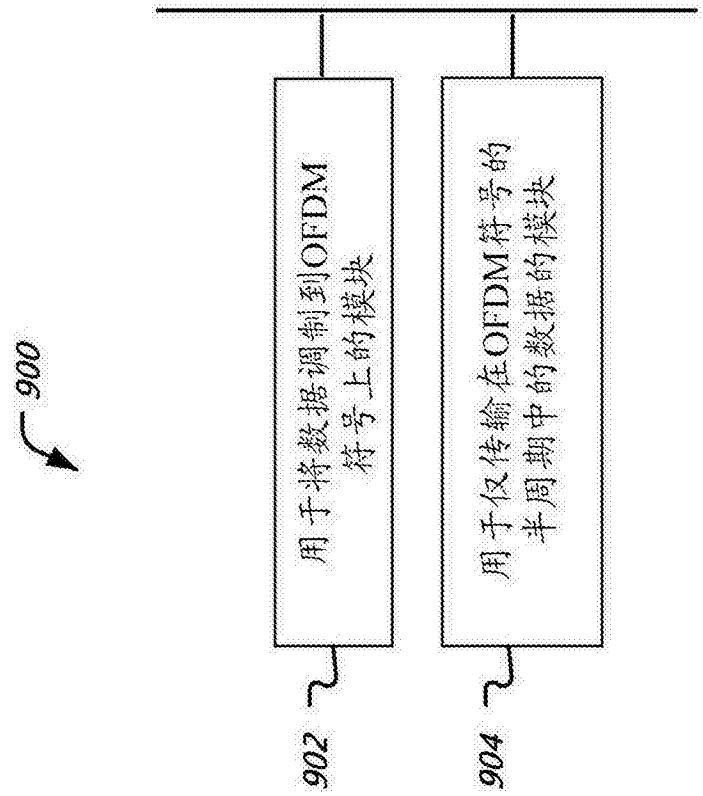

900
用于将数据调制到OFDM符号上的模块
用于仅传输在OFDM符号的半周期中的数据的模块
902
904

图 9

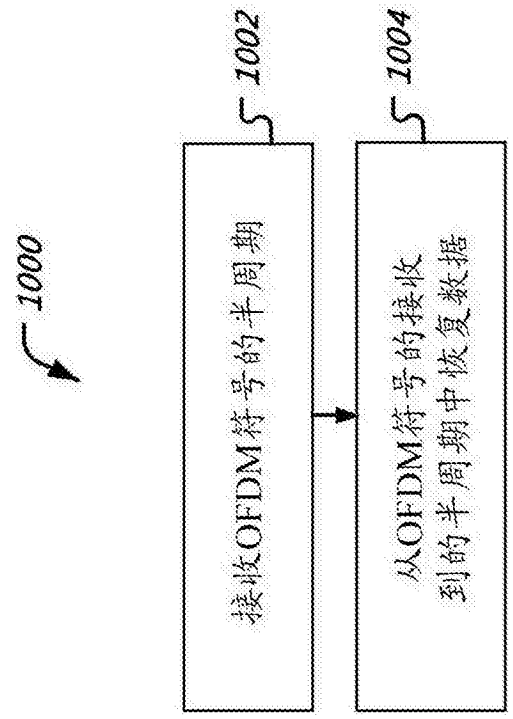

1000
1002
接收OFDM符号的半周期
1004
从OFDM符号的接收到的半周期中恢复数据

图 10

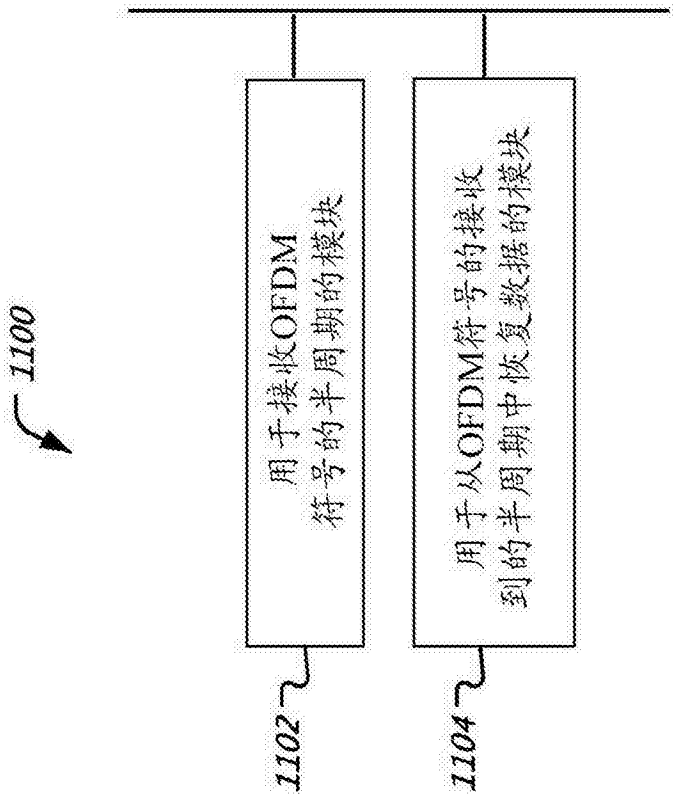

1100
用于接收OFDM符号的半周期的模块
用于从OFDM符号的接收到的半周期中恢复数据的模块
1102
1104

图 11