



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103229439 A

(43) 申请公布日 2013. 07. 31

(21) 申请号 201080070334. 6

H04J 14/06 (2006. 01)

(22) 申请日 2010. 11. 29

(85) PCT申请进入国家阶段日
2013. 05. 24

(86) PCT申请的申请数据
PCT/JP2010/071270 2010. 11. 29

(87) PCT申请的公布数据
W02012/073308 JA 2012. 06. 07

(71) 申请人 株式会社日立制作所
地址 日本东京都

(72) 发明人 佐佐木慎也

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

代理人 徐殿军

(51) Int. Cl.
H04J 14/00 (2006. 01)
H04J 11/00 (2006. 01)
H04J 14/04 (2006. 01)

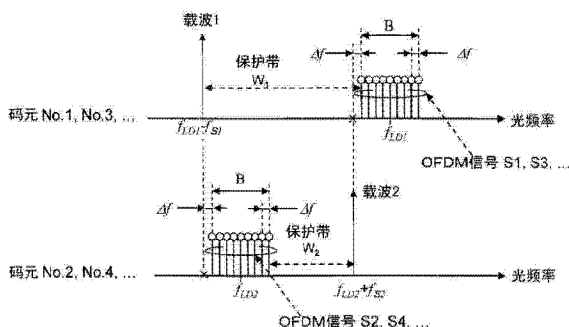
权利要求书3页 说明书16页 附图11页

(54) 发明名称

光通信系统、光发送器及转发器

(57) 摘要

本发明涉及在光 OFDM 通信系统中降低光接收器的所需频带的技术。按照 OFDM 的每个码元时间交替地发送不同的频谱的光 OFDM 信号, 在将该光用光纤传送后, 用延迟时间等于 1 码元时间的延迟干涉仪和平衡型直接检波接收器进行光电转换并接收。



1. 一种光通信系统,其中光发送器在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,经由光纤用光信号进行发送,光接收器对在该光纤中传播来的光信号进行光电转换,将各子载波信号解调而再现原来的数字数据,其特征在于,

上述光发送器具备:

发送信号处理部,在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,由调制后的子载波信号生成基带 OFDM 信号;和

电光转换部,将该基带 OFDM 信号调制为激光,生成光 OFDM 信号;

由上述发送信号处理部和上述电光转换部按照每个码元时间交替地发送波长不同的光 OFDM 信号;

上述光接收器具有:

至少一个由延迟干涉部和平衡型光电转换部构成的组,该延迟干涉部使经由光纤从上述光发送器接收到的光 OFDM 信号的一部分延迟码元时间而与光 OFDM 信号合成,该平衡型光电转换部将合成后的光信号转换为电信号;和

接收信号处理部,由上述光电转换部的输出得到子载波信号,根据该子载波信号将数据解调,再现原来的数字数据。

2. 如权利要求 1 所述的光通信系统,其特征在于,

上述光发送器将由多个子载波和载波构成的光 OFDM 信号的波长按照每个码元时间交替地改变而发送。

3. 如权利要求 2 所述的光通信系统,其特征在于,

上述载波的频率与单个的子载波的频率的差至少为多个子载波整体的频带宽度的二分之一以上。

4. 如权利要求 1 ~ 3 中任一项所述的光通信系统,其特征在于,

上述光发送器,

对于第 1 载波、和频率比该第 1 载波大的第 2 载波,

生成包含多个子载波和处于该子载波的下边带波中的第 1 载波的第 1 光 OFDM 信号,

生成包含多个子载波和处于该子载波的上边带波中的第 2 载波的第 2 光 OFDM 信号,

对该第 1 光 OFDM 信号及第 2 光 OFDM 信号按照每个码元时间交替地进行发送。

5. 如权利要求 1 ~ 4 中任一项所述的光通信系统,其特征在于,

在上述接收信号处理部中,按照对上述光电转换部的输出进行模拟数字 A/D 转换并将转换后的信号进行快速傅立叶变换而得到的每个子载波,减去 1 码元时间之前的子载波的数据,得到每个码元时间的子载波。

6. 如权利要求 1 ~ 4 中任一项所述的光通信系统,其特征在于,

上述光接收器还具备将来自上述光发送器的光 OFDM 信号根据波长分别向两个输出端口分波的滤光器;

使来自上述滤光器的两个输出端口的光向两个上述延迟干涉部分别入射,将这两个上述延迟干涉部的各自的输出用两个上述平衡型光电转换部分别转换为电信号;

上述接收信号处理部对转换后的电信号按照每个码元时间交替地进行选择,根据所选择的信号得到子载波信号,再现原来的数字数据。

7. 如权利要求 1 ~ 6 中任一项所述的光通信系统,其特征在于,

上述电光转换部具有：

光源部，按照每个码元时间交替地输出 2 波长的光；

振荡部，分别产生两个频率的正弦波信号和余弦波信号；

第 1 加法器，对基带 OFDM 信号的实部，按照每个码元时间交替地加上两个频率的余弦波信号；

第 2 加法器，对基带 OFDM 信号的虚部，按照每个码元时间交替地加上两个频率的正弦波信号；和

光 I - Q 调制器，用来自上述第 1 加法器及第 2 加法器的信号对来自上述光源部的光进行调制，输出光 OFDM 信号。

8. 如权利要求 7 所述的光通信系统，其特征在于，

上述两个频率的正弦波信号是相反相位。

9. 如权利要求 1 ~ 6 中任一项所述的光通信系统，其特征在于，

上述电光转换部具有：

光源部，按照每个码元时间交替地输出 2 波长的光；

振荡部，分别产生不同的两个频率的余弦波信号；

加法器，对基带 OFDM 信号的实部，按照每个码元时间交替地加上两个频率的余弦波信号；

光 I - Q 调制器，用来自上述加法器的信号及基带 OFDM 信号的虚部对来自上述光源部的光进行调制并输出；

上述光发送部还具有将在 OFDM 信号的两侧出现的两个载波的一个截断的带通滤波器。

10. 如权利要求 1 ~ 6 中任一项所述的光通信系统，其特征在于，

上述发送信号处理部具有：

振荡部，产生正弦波信号和余弦波信号；

第 1 加法器，对基带 OFDM 信号的实部加上来自上述振荡部的余弦波信号；和

第 2 加法器，对基带 OFDM 信号的虚部加上来自上述振荡部的正弦波信号；

上述电光转换部具有：

光源部，分别输出 2 波长的光；

第 1 光 I - Q 调制器，用来自上述第 1 加法器的信号对来自上述光源部的光中的一方进行调制；和

第 2 光 I - Q 调制器，用来自上述第 2 加法器的信号对来自上述光源部的光中的另一方进行调制；

上述电光转换部中，来自上述第 1 加法器的信号和来自上述第 2 加法器的信号按照每个码元时间交替地向上述第 1 光 I - Q 调制器和上述第 2 光 I - Q 调制器输入，上述电光转换部将上述第 1 光 I - Q 调制器的输出与上述第 2 光 I - Q 调制器的输出合波并输出。

11. 一种光发送器，是光通信系统中的光发送器，在该光通信系统中，上述光发送器在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制，经由光纤用光信号进行发送，光接收器对在该光纤中传播来的光信号的一部分延迟码元时间并与该光信号合成，对合成后的光信号进行光电转换，将各子载波信号解调而再现原来的数字数据，其特征在

于,

上述光发送器具备:

发送信号处理部,在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,由调制后的子载波信号生成基带 OFDM 信号;和

电光转换部,将该基带 OFDM 信号调制为激光,生成光 OFDM 信号;

由上述发送信号处理部和上述电光转换部按照每个码元时间交替地发送不同的 2 波长的光 OFDM 信号。

12. 一种转发器,是光通信系统中的转发器,在该光通信系统中,光发送器在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,经由光纤用光信号进行发送,光接收器对在该光纤中传播来的光信号进行光电转换,将各子载波信号解调而再现原来的数字数据,其特征在于,

上述转发器具备上述光发送器及上述光接收器;

上述光发送器具备:

发送信号处理部,在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,由调制后的子载波信号生成基带 OFDM 信号;和

电光转换部,将该基带 OFDM 信号调制为激光,生成光 OFDM 信号;

由上述发送信号处理部和上述电光转换部按照每个码元时间交替地发送不同的 2 波长的光 OFDM 信号;

上述光接收器具有:

至少一个由延迟干涉部和平衡型光电转换部构成的组,该延迟干涉部使经由光纤从上述光发送器接收到的光 OFDM 信号的一部分延迟码元时间并与光 OFDM 信号合成,该平衡型光电转换部将合成后的光信号转换为电信号;和

接收信号处理部,由上述光电转换部的输出得到子载波信号,根据该子载波信号将数据解调,再现原来的数字数据。

光通信系统、光发送器及转发器

技术领域

[0001] 本发明涉及光通信系统、光发送器及转发器 (transponder), 特别涉及使用多载波的光 OFDM 通信系统, 更具体地讲, 涉及在光 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分复用) 通信系统中降低光接收器的所需频带宽度的光通信系统、光发送器及转发器。

背景技术

[0002] 目前实用化的光通信系统的多数采用了使用光的强度的 2 值的调制解调技术。具体而言, 在发送侧将数字信息的“0”和“1”转换为光的强度的开启、关闭 (ON/OFF), 向光纤发送, 将在光纤中已传播的光在接收侧进行光电转换, 将原来的信息复原。近年来, 随着因特网的爆发性的普及, 对光通信系统要求的通信容量飞跃性地提高。对于通信容量的大容量化的需求, 到目前为止, 通过使光的开启、关闭的速度、即调制速度上升来应对。但是, 在使该调制速度上升而实现大容量化的方法中, 一般有以下所述的课题。

[0003] 有如果使调制速度上升则被光纤的色散所限制的可传送的距离变短的课题。一般被色散限制的传送距离按比特率的平方变短。即, 如果比特率成为 2 倍, 则受色散限制的传送距离成为 1/4。同样, 还有如果使调制速度上升则受光纤的偏振色散限制的可传送的距离变短的课题。一般而言, 如果比特率成为 2 倍, 则受偏振色散限制的传送距离成为 1/2。如果具体地表示色散的影响, 则如果以比特率 10Gbps 使用单模光纤, 则受色散限制的传送距离是 60km, 但如果成为比特率为 40Gbps 的系统, 则其距离变短为约 4km。进而, 在下一代的 100Gbps 系统的情况下, 受色散限制的传送距离成为 0.6km, 这样不能实现传送距离为 500km 左右的主干光通信系统。为了构建超高速的主干光通信系统, 目前为了抵消传送路径的色散而将具有负的色散的所谓色散补偿光纤的特殊的光纤设置在中继器或收发机中。该特殊光线较昂贵, 此外需要决定设置在收发机或光中继器内部中的色散补偿光纤的量的高级的设计, 这两者推升了光通信系统的价格。

[0004] 所以, 最近, 作为使通信容量增加的光调制解调方式, 使用 OFDM 技术的光通信系统的研究受到关注。OFDM 技术是通过将在 1 码元 (symbol) 时间内相互正交的、即具有 1 码元时间的倒数的整数倍的频率的许多正弦波 (将其称作子载波) 的各自的振幅和相位设定为规定的值, 由此来搭载 (调制) 信息, 用将这些子载波聚束后的信号将载波 (输送波) 调制并发送的技术。该 OFDM 技术在电话局与家庭之间通信的 VDSL (Very high bit rate Digital Subscriber Line, 超高比特率数字用户线路) 系统、或家庭内的电力线通信系统、还有地面波数字 TV 系统中使用而实用化。进而, 在下一代的便携电话系统中也计划使用。

[0005] 光 OFDM 通信系统是以光为载波、采用 OFDM 技术的通信系统。在 OFDM 技术中, 如上述那样使用许多子载波, 进而, 各个子载波的调制方式例如可以采用 4 - QAM、8 - PSK 或 16 - QAM 等多级调制方式, 所以 1 码元时间与比特率的倒数相比非常长。作为其结果, 受上述色散或偏振色散限制的传送距离与在光通信系统中设想的传送距离 (例如在国内的主干系统中是 500km) 相比足够长, 不需要上述色散补偿光纤。结果, 有可能能够实现低成本光

通信系统。

[0006] 使用直接检波接收方式的光通信系统与无线通信系统不同,接收到的光电流与光的电场的绝对值的平方成比例(另一方面,在无线通信系统中,流到接收天线中的电流与电场成比例)。因为该特征,所以在使用直接检波接收方式的光 OFDM 通信中,发生在无线 OFDM 通信中没有的课题。即,由于接收到的光电流与光电场的绝对值的平方成比例,所以有子载波间的差拍信号 (beat signal) 与本来的信号发生干涉的课题。将该课题以下称作子载波间差拍干涉。

[0007] 现有技术文献

[0008] 非专利文献

[0009] 非专利文献 1 :Brendon J. C. Schmidt, Arthur J. Lowery and Liang B. Du, “Low Sampling Rate Transmitter for Direct - Detection Optical OFDM”, OFC/NFOEC2009, OWM4, 2009

发明概要

[0010] 发明要解决的课题

[0011] 在以往的光 OFDM 通信中,进行了避免该子载波间差拍干涉的提案。该提案是作为从发送器发送的光信号而在子载波信号以外还同时发送载波、进而在这些载波与子载波信号之间在频率轴上设置保护带 (guard band) 的提案。将该光 OFDM 信号的频谱表示在图 3 中。观察该图也可知,将作为 OFDM 信号的多个子载波和载波同时发送,并且在载波与 OFDM 信号之间,在频率轴上设定了与 OFDM 信号的频带宽度 (B) 大致相等的宽度的保护带。将直接检波接收到该光 OFDM 信号的情况下的光电流的频谱表示在图 4 中。由该图可知,在本来应接收的信号(载波与子载波的差拍信号)的低频侧存在子载波间差拍信号,由于它们能够在频率轴上分离,所以对于接收特性没有表现出影响。这是在以往光 OFDM 通信中提案的、避免子载波间差拍干涉的方法。

[0012] 在避免该子载波间差拍干涉的方法中有两个课题。首先,为了生成具有图 3 的频谱的光 OFDM 信号,在进行信号生成时需要也将载波包含在内,光发送器的高频电路、特别是数字模拟转换部(例如,相当于后述的图 2 的 116、116 - 1) 被要求超高速动作。这是第一课题。如果更具体地叙述,则本来能够以 $2B$ 的速度生成基带 OFDM 信号,但在包括载波而生成信号的情况下需要以 $4B$ 的速度动作。

[0013] 第二课题是接收器的频带也被要求宽频带性。为了接收图 4 的光电流而将信号解调,需要多出保护带 B 的、宽频带的光电转换部。进而,模拟数字转换部(相当于后述的图 11 的 221)也需要以超高速动作的电路。一般高速动作的电子电路非常昂贵,或者在最差的情况下、即在要实现的比特率过高的情况下将难以获得,系统不能实现。

[0014] 提出了一个对于第一课题、即光发送器(特别是数字模拟转换部)的宽频带化的解决对策(非专利文献 1),它是将载波在基带 OFDM 信号的生成后进行相加的方法。

[0015] 非专利文献 1 所记述的技术是为了避免第一课题、即光发送器的数字模拟转换部的高速化的技术。对于第二课题、即光接收器特别是光电转换部或模拟数字转换部的宽频带化及高速化的对策依然是未解决。

[0016] 发明内容

[0017] 本发明是鉴于以上的问题而做出的,目的是提供一种在光 OFDM 通信系统中能够不受子载波间差拍干涉的影响、进而不使光接收器的频带宽频带化而实现的光通信系统、光发送器及转发器。

[0018] 用于解决课题的手段

[0019] 在本发明中,按照每个 OFDM 的码元时间交替地发送不同的频谱的光 OFDM 信号,将该光用光纤传送后,用延迟时间等于 1 码元时间的延迟干涉仪和平衡型直接检波接收器进行光电转换。

[0020] 以下,更具体地记述用来解决课题的手段。关于各图也在实施方式中说明,以下适当参照。

[0021] 使用图 1 说明本发明。在本发明的光通信系统中,光发送器 100 与光接收器 200 用光纤 300 连接。在光发送器 100 内部的发送信号处理部 110 中,将从输入端输入的要通信的数据转换为基带 OFDM 信号。这里,发送信号处理部的结构例如是图 2 所示那样。

[0022] 将基带 OFDM 信号的实部和虚部用电光转换部 120 转换为光 OFDM 信号,向光纤 300 发送。该光 OFDM 信号如图 6 所示,按照每个 OFDM 码元时间交替地取图 7 所示的两种频谱。

[0023] 经过光纤 300 后的该光 OFDM 信号向光接收器 200 入射。光接收器 200 具备延迟时间 T 等于 OFDM 的 1 码元时间的延迟干涉仪 230、平衡型光电转换部 210 及接收信号处理部 220。将通过延迟干涉仪 230 与 1 码元时间前的光信号干涉后的光 OFDM 信号用平衡型光电转换部 210 转换为电信号,将该电信号用接收信号处理部 220 解调为作为信息的数据并输出。

[0024] 在图 8 中表示延迟干涉仪的结构,在图 9 中表示平衡型光电转换部的结构,在图 11 中表示接收信号处理部的结构例。

[0025] 接着,在该光发送器和光接收器的结构中,没有子载波间差拍干涉的影响,光接收器的频带呈现为比以往方式窄。将图 7 的频谱的光电场 $E(t)$ 用下式表示。

[0026] [数式 1] $E(t) = E_c(t) + E_s(t)$ (1)

[0027] 这里, $E_c(t)$ 表示载波的电场, $E_s(t)$ 表示 OFDM 信号的电场。由图 7 可知,由载波的光频率和多个子载波构成的 OFDM 信号的光频率按照每个码元而交替地变化。该光电场 $E(t)$ 经过光纤 300 向延迟干涉仪 230 入射。来自延迟干涉仪 230 的输出端口 1 和 2 (参照图 8) 的光电场分别用下式表示。

[0028] [数式 2]

[0029] $E_{\text{port1}}(t) \propto E(t) + E(t+T)$

[0030] $E_{\text{port2}}(t) \propto E(t) - E(t+T)$ 、 (2)

[0031] 这里, T 表示延迟干涉仪 230 的延迟时间、即 OFDM 的码元时间。

[0032] 这些光被平衡型光电转换部 210 转换为电信号,分别流到平衡型光电转换部 210 的两个光电二极管中的电流表示为数式 3

[0033] [数式 3]

[0034] $i_1(t) \propto |E_{\text{port1}}(t)|^2$

[0035] $i_2(t) \propto |E_{\text{port2}}(t)|^2$ 、 (3)

[0036] 结果,平衡型光电转换部 210 的输出 $V(t)$ 成为下式。

[0037] [数式 4]

$$[0038] \quad V(t) \propto i_1(t) - i_2(t) \propto E(t) \cdot E^*(t+T) + E^*(t) \cdot E(t+T) =$$

[0039]

$$E_C(t) \cdot E_C^*(t+T) + E_C^*(t) \cdot E_S(t+T) + E_C^*(t+T) \cdot E_S(t) + E_S(t) \cdot E_S^*(t+T) + cc \quad (4)$$

[0040] 式(4)右边的第1项表示载波间的差拍信号,第2项和第3项表示载波与OFDM信号的差拍信号(希望的信号),第4项表示OFDM信号间的差拍信号、即子载波间差拍信号。

[0041] 这里,对在图6的信号中、时刻t的码元是码元No. 2、时刻t+T的码元是码元No. 1的情况进行说明。观察频谱(图7),码元No. 1的载波1的频率($f_{LD1} - f_{S1}$)与码元No. 2的OFDM信号的最低频率($f_{LD2} - B/2$)的差设定为子载波间的频率 Δf 。同样,码元No. 2的载波2的频率($f_{LD2} + f_{S2}$)与码元No. 1的OFDM信号的最低频率($f_{LD1} - B/2$)的差设定为子载波间的频率 Δf 。这里,B表示OFDM信号的频带宽度。进而,保护带的频率宽度 W_2 至少为B以上。

[0042] 如果在以上的条件下计算平衡型光电转换部的输出信号(式(4))的频谱,则其结果为图10(a)。在该图中,白圈的信号是OFDM信号S1与S2的和(式(4)右边的第2项与第3项的和),黑圈的信号表示OFDM信号S1与S2的子载波间差拍信号(式(4)右边的第4项)。

[0043] 接着,如果对在图6的信号中、时刻t的码元是码元No. 3、时刻t+T的码元是码元No. 2的情况同样计算频谱,则求出图10(b)。

[0044] 根据图10(a)和图10(b)可知以下的两个情况。首先,子载波间差拍信号和希望的信号(在此情况下是S1与S2的和,或者S2与S3的和)在频率轴上被完全分开,不发生因干涉带来的信号劣化。进而,与以往方式(参照图4)不同,希望的信号分布在子载波间差拍信号的低频侧,因而对光接收机200要求的模拟接收频带成为以往的一半,大约为B。结果,模拟数字转换电路221的所需采样速度也成为以往的一半的约2B。

[0045] 另外,在上述记述中,是保护带的频率宽度 W_2 为完全不发生子载波间差拍干涉的最小值B的情况,但即使多少容许发生因干涉带来的信号劣化,也需要满足数式5。

[0046] [数式5]

$$[0047] \quad W_2 > B/2, \quad (5)$$

[0048] 平衡型光电转换部210的输出电信号进入到接收信号处理部220中。在图11中表示接收信号处理部220的功能框图。平衡型光电转换部210的输出电信号首先在接收信号处理部220(图11)的模拟数字转换电路221转换为数字信号后,由循环前缀除去(CPR)部将循环前缀(cyclic prefix)去除,将该信号用串行并行转换部223转换为并行数据,将该并行数据用FFT部224转换为各子载波。由于各子载波被用在时间上为前后的两个码元的和(在图10中,是S1+S2或S2+S3)的数据调制,所以为了将其去除,实施由差动放大器227和延迟1码元时间T的延迟电路228构成的差分运算。这是为如下目的而实施的,即:在各码元时间中为S1+S2、S2+S3、S3+S4、...这样相同码元在时间上接连出现,所以以通过该差分运算进行转换以使得在各码元时间中为S1、S2、S3、S4、...那样各码元仅出现一次的目的而实施的。然后,进行与以往的OFDM信号的接收信号处理相同的过程。即,由子载波

解调部按照每个子载波将数据解调, 将它们的并行数据用并行串行转换部 226 恢复为串行数据, 作为数据输出。

[0049] 以上是本发明的基本动作原理。能够实现作为本发明的本来目的的避免子载波间差拍干涉、并且接收器的模拟频带为以往的一半的光 OFDM 通信系统。

[0050] 根据本发明的第 1 技术方案, 提供一种光通信系统, 光发送器持续码元时间将数字数据映射至相互正交的多个子载波而调制, 经由光纤用光信号发送, 光接收器将在该光纤中传播来的光信号进行光电转换, 将各子载波信号解调而再现原来的数字数据, 上述光发送器具备: 发送信号处理部, 持续码元时间将数字数据映射至相互正交的多个子载波而调制, 根据调制后的子载波信号生成基带 OFDM 信号; 电光转换部, 将该基带 OFDM 信号调制为激光, 生成光 OFDM 信号; 由上述发送信号处理部和上述电光转换部按照码元时间交替地发送波长不同的光 OFDM 信号; 上述光接收器具有: 使经由光纤从上述光发送器接收到的光 OFDM 信号的一部分延迟码元时间并与光 OFDM 信号合成的延迟干涉部、和将合成后的光信号转换为电信号的平衡型光电转换部的至少一个组; 接收信号处理部, 从上述光电转换部的输出得到子载波信号, 根据该子载波信号将数据解调, 再现原来的数字数据。

[0051] 根据本发明的第 2 技术方案, 提供一种光发送器, 是光发送器持续码元时间将数字数据映射至相互正交的多个子载波而调制并经由光纤用光信号发送、光接收器将在该光纤中传播来的光信号进行光电转换、将各子载波信号解调而再现原来的数字数据的光通信系统中的上述光发送器, 具备: 发送信号处理部, 持续码元时间将数字数据映射至相互正交的多个子载波而调制, 根据调制后的子载波信号生成基带 OFDM 信号; 电光转换部, 将该基带 OFDM 信号调制为激光, 生成光 OFDM 信号; 由上述发送信号处理部和上述电光转换部按照码元时间交替地发送波长不同的光 OFDM 信号。

[0052] 根据本发明的第 3 技术方案, 提供一种转发器, 是光发送器持续码元时间将数字数据映射至相互正交的多个子载波而调制并经由光纤用光信号发送、光接收器将在该光纤中传播来的光信号进行光电转换、将各子载波信号解调而再现原来的数字数据的光通信系统中的转发器, 具备上述光发送器及上述光接收器; 上述光发送器具备: 发送信号处理部, 持续码元时间将数字数据映射至相互正交的多个子载波而调制, 根据调制后的子载波信号生成基带 OFDM 信号; 电光转换部, 将该基带 OFDM 信号调制为激光, 生成光 OFDM 信号; 由上述发送信号处理部和上述电光转换部按照码元时间交替地发送波长不同的 2 波长的光 OFDM 信号; 上述光接收器具有: 使经由光纤从上述光发送器接收到的光 OFDM 信号的一部分延迟码元时间并与光 OFDM 信号合成的延迟干涉部、和将合成后的光信号转换为电信号的平衡型光电转换部的至少一个组; 接收信号处理部, 从上述光电转换部的输出得到子载波信号, 根据该子载波信号将数据解调, 再现原来的数字数据。

[0053] 发明效果

[0054] 根据本发明, 在光 OFDM 通信系统中, 能够提供不受子载波间差拍干涉的影响、进而能够不使光接收器的频带宽频带化而实现的光通信系统、光发送器及转发器。

附图说明

[0055] 图 1 是本发明的光 OFDM 通信系统的功能框图。

[0056] 图 2 是发送信号处理部的功能框图。

- [0057] 图 3 是以往的光 OFDM 通信系统的光 OFDM 信号光的频谱的示意图。
- [0058] 图 4 是以往的光 OFDM 通信系统的接收电信号的频谱的示意图。
- [0059] 图 5 是电光转换部的功能框图的说明图。
- [0060] 图 6 是说明本发明的光 OFDM 信号的时间序列的示意图。
- [0061] 图 7 是说明本发明的光 OFDM 信号光的频谱的一例的示意图。
- [0062] 图 8 是延迟干涉部的结构图。
- [0063] 图 9 是平衡型光电转换部的结构图。
- [0064] 图 10 是说明本发明的接收电信号的频谱的一例的示意图。
- [0065] 图 11 是本发明的第 1 实施方式的接收信号处理部的功能框图。
- [0066] 图 12 是本发明的第 1 实施方式的电光转换部的结构图。
- [0067] 图 13 是本发明的第 2 实施方式的电光转换部的结构图。
- [0068] 图 14 是说明与本发明的第 2 电光转换部一起使用的滤光器的透射特性的频谱的示意图。
- [0069] 图 15 是本发明的第 3 实施方式的发送信号处理部的功能框图。
- [0070] 图 16 是本发明的第 3 实施方式的电光转换部的结构图。
- [0071] 图 17 是本发明的第 3 实施方式的电光转换部的各部中的光频谱的示意图。
- [0072] 图 18 是说明本发明的第 3 实施方式的光 OFDM 信号的时间序列的示意图。
- [0073] 图 19 是说明本发明的第 3 实施方式的光 OFDM 信号光的频谱的示意图。
- [0074] 图 20 是本发明的第 4 实施方式的光接收器的功能框图。
- [0075] 图 21 是说明与本发明的第 4 实施方式的光接收器一起使用的滤光器的透射特性的频谱的示意图。
- [0076] 图 22 是本发明的第 4 实施方式的光接收器的接收电信号的频谱的示意图。
- [0077] 图 23 是本发明的第 4 实施方式的光接收器的接收信号处理部的功能框图。

具体实施方式

[0078] 以下,说明本实施方式。

[0079] 1. 第 1 实施方式

[0080] 参照图 1 等说明第 1 实施方式。这里,为了说明而将子载波的调制假定为 4-QAM,但本实施方式并不限制于此,对任意的子载波调制方式能够采用。此外,子载波的条数假设为 N 条(N 是整数)。

[0081] 在图 1 中表示本实施方式的光 OFDM 通信系统的结构图。

[0082] 光 OFDM 通信系统例如具备光发送器 100、光纤 300 和光接收器 200。光发送器 100 例如具有发送信号处理部 110 和电光转换部 120。光接收器 200 具有延迟干涉仪 230、平衡型光电转换部 210 和接收信号处理部 220。光发送器 100 与光接收器 200 经由光纤 300 连接。

[0083] 如果本来要通信的数字数据输入到光发送器 100 中,则被光发送器 100 的内部的发送信号处理部 110 转换为基带 OFDM 信号,该信号被电光转换部 120 转换为光 OFDM 信号。该光 OFDM 信号经过作为传送路径的光纤 300 到达直接检波光接收器 200。光 OFDM 信号被光电转换部 210 直接检波接收并转换为电信号。该电信号理想地是上述基带 OFDM 信号,该

信号被接收信号处理部 220 解调为本来要通信的数字数据并输出。

[0084] 图 2 表示第 1 实施方式的发送信号处理部 110 的功能框图。

[0085] 发送信号处理部 110 例如具备串行并行(S/P)转换部 111、子载波调制部 112、逆 FFT 部(逆快速傅立叶变换部) 113、并行串行(P/S)转换部 114、和数字模拟(D/A)转换部 116、116-1。另外,也可以在 P/S 转换部 114 与 D/A 转换部 116、116-1 之间设置循环前缀插入(CPI)部 115,附加循环前缀。

[0086] 本来要通信的数据被 S/P 转换部 111 转换为 $2N$ 个并行数据。这里, N 是搭载数据的子载波的条数。子载波的调制在 4-QAM 的情况下是 $2N$ 个并行数据,但例如在 16-QAM 的情况下为 $4N$ 个。即,串行数据转换为“1 码元的比特数 \times 子载波的条数”个并行数据。子载波调制部 112 使用该并行数据对 N 条子载波加以调制。该调制后的子载波($C_k, k=0, 1, \dots, N-1$)被输入到逆 FFT 部 113 中。输入的信号被逆 FFT 部(逆快速傅立叶变换部)113 转换为时间轴的数据,被 P/S 转换部 114 转换为串行数据。该串行数据的实部和虚部分别经过 D/A 转换部 116 和 116-1 被转换为模拟信号并输出。将该输出的信号称作基带 OFDM 信号。

[0087] 在说明本实施方式的电光转换部 120 的结构及动作之前,首先作为理解的辅助而说明图 5 所示的电光转换部的例子。将作为发送信号处理部 110 的 D/A 转换部 116、116-1 的输出信号的基带 OFDM 信号的实部和虚部在加法器 125 和 125-1 中分别加上 RF 振荡器 123 的输出 RF 信号(频率 f_s)的余弦波(\cos 分量)和正弦波(\sin 分量。由于将余弦波的相位错移 90° ,所以也可以经过移相器 124 而生成),并分别施加在光 I-Q 调制器 122 的 I 端口和 Q 端口上。光 I-Q 调制器 122 周知有例如利用在 LiNbO_3 (铌酸锂)基板上制作成的光波导中的电光学效应的设备,但并不限于于此,例如也可以是在 InP 基板上制作成的设备。

[0088] 激光器(光源)121 发出光频率 f_{LD} 的光,该光入射到光 I-Q 调制器 122 中。在光 I-Q 调制器 122 中,将该光的 I 分量用输入到 I 端口中的电信号调制,将光的 Q 分量用输入到 Q 端口中的电信号调制,将这两个分量、即调制后的 I 分量的光与 Q 分量的光相加并输出。光 I-Q 调制器 122 的输出光(以下称作光 OFDM 信号)的频谱以光频率 f_{LD} 为中心,通过作为多个子载波的集合的 OFDM 信号和由频率 f_s 的 RF 信号生成的光的下边带波分量(频率是 $f_{LD} - f_s$ 。以下称作载波)构成(当然载波也可以是上边带波分量 $f_{LD} + f_s$)。这里, f_s 如果设基带 OFDM 信号的频带为 B ,设希望的保护带宽度为 W ,则例如设定为 $W+B/2$ 。于是,该情况下的光 I-Q 调制器 122 的输出光的频谱为图 3 (在图 3 中为 $W \cong B$)。基于该例,接着说明本实施方式的电光转换部的结构和其动作。

[0089] 在图 12 中表示本发明的第一实施方式的电光转换部的结构。

[0090] 将作为发送信号处理部 110 的输出的基带 OFDM 信号的实部和虚部分别加上 RF 信号的 \cos 分量和 \sin 分量,将其施加在光 I-Q 调制器 122 的 I-端口和 Q-端口上,对来自激光器 121-1 的光加以调制的基本动作与上述例子是相同的。

[0091] 与上述例子不同的点,首先是通过 RF 振荡器 126 控制来自激光器 121-1 的光以使其按照 OFDM 信号的每个码元时间交替地选取两个不同光频率 f_{LD1} 和 f_{LD2} 的某一个点。该光频率的切换例如可以将激光器 121-1 用半导体激光器实现、并使该半导体激光器的驱动电流根据 RF 振荡器 126 的输出信号稍稍变化来实现。另外,将两个光频率差 $f_{LD1} - f_{LD2}$

(假定为 $f_{LD1} > f_{LD2}$) 设定为多少将在后面叙述。不限于于此, 也可以是通过其他方法产生两个光频率的光光源部。

[0092] 此外, 对基带 OFDM 信号的实部和虚部加上的 RF 信号将两个 RF 振荡器 123-1 和 123-2 的输出(各自的振荡频率是 f_{S1} 和 f_{S2}) 的某一方的输出用 2x1 电开关 127-1 和 127-2 选择这一点也与上述例子不同。进而, RF 振荡器 123-1 和 123-2 的各自的输出的正弦波分量相互相差 180° 相位(即为反相位。另外, 余弦分量为同相位)。这可以通过将移相器 124-1 和 124-2 的设定分别设定为 -90° 和 $+90^\circ$ 来实现。另外, 也可以是通过其他方法分别产生两个频率的正弦波分量和余弦波分量的振荡部。

[0093] 2x1 电开关 127-1 与 127-2 的切换按照 OFDM 信号的每个码元时间同步进行。此外, 切换也与上述激光器 121-1 的光频率的按照每个码元时间的切换(受 RF 振荡器 126 控制) 同步。进而, 该按照每个码元时间的切换与发送信号处理部 110 的时钟同步。即, 光发送器 100 的全部的逻辑电路、振荡器、切换开关通过相同的时钟而取同步。

[0094] 此时的光 OFDM 信号(即光 I-Q 调制器 122 的输出光) 可以如图 6 那样示意地表示。即, 某个码元(假设称作码元 No. 1) 的来自激光器 121-1 的光的频率是 f_{LD1} , 对基带 OFDM 信号加上的 RF 信号的频率是 f_{S1} 。其下个码元 No. 2 的来自激光器 121-1 的光的频率是 f_{LD2} , 对基带 OFDM 信号加上的 RF 信号的频率是 f_{S2} 。再接着它的码元、即码元 No. 3、5、... 使用与码元 No. 1 相同的光频率 f_{LD1} 和 RF 信号频率 f_{S1} , 码元 No. 4、6、... 使用与码元 No. 2 相同的光频率 f_{LD2} 和 RF 信号频率 f_{S2} 。

[0095] 此外, 如已经叙述那样, 由于两个 RF 信号的正弦分量相互为相反相位, 所以使用频率为 f_{S1} 的 RF 信号生成的码元 No. 1、3、5、... 的载波为下边带波, 使用频率为 f_{S2} 的 RF 信号生成的码元 No. 2、4、6、... 的载波为上边带波。进而, 如果将 RF 信号的频率 f_{S1} 和 f_{S2} 例如如后述那样设定为不同的值, 则光 OFDM 信号的频谱可以为图 7 那样。图 7 的上方的图是码元 No. 1、3、5、... 时的频谱, 图 7 的下方的图是码元 No. 2、4、6、... 时的频谱。

[0096] 作为 RF 振荡器 123-1 和 123-2 的输出的 RF 信号的频率 f_{S1} 和 f_{S2} 例如如下这样决定。即, 如果设保护带的频带宽度为 W_1 和 W_2 、设 OFDM 信号的频带为 B , 则可以由数式 6

[0097] [数式 6]

$$[0098] \quad f_{S1} = W_1 + \frac{B}{2}$$

$$[0099] \quad f_{S2} = W_2 + \frac{B}{2}, \quad (6)$$

[0100] 给出(参照图 7)。保护带的频带宽度 W_1 和 W_2 为了提高光的频谱利用效率而设定得尽可能窄, 另一方面, 为了避免由直接检波时发生的子载波间差拍信号带来的干涉而需要设定得较宽。

[0101] 在完全避免因子载波间的差拍信号带来的干涉的情况下(图 10 的情况下), 保护带的频带宽度 W_1 和 W_2 的最小值分别是约 $2B$ 和 B 。更正确地讲, 需要满足数式 7

[0102] [数式 7]

$$[0103] \quad W_1 \geq W_2 + B + 2 \cdot \Delta f$$

$$[0104] \quad W_2 \geq B, \quad (7)$$

[0105] 的关系。这里， Δf 表示子载波间的频率间隔，有数式 8

[0106] [数式 8]

[0107] $B = (N - 1) \cdot \Delta f$ 、 (8)

[0108] 的关系。

[0109] 激光器的光频率差 $f_{LD1} - f_{LD2}$ 根据图 7 和式(7)，由下式给出。

[0110] [数式 9]

[0111] $f_{LD1} - f_{LD2} = B + W_2 + \Delta f \geq 2B + \Delta f$ 、 (9)

[0112] 另外，在不能完全避免因子载波间的差拍信号带来的干涉的情况下、即多少容许因子载波间差拍干涉带来的信号品质劣化的情况下的保护带的频带宽度 W_1 和 W_2 至少需要分别为约 $3B/2$ 和 $B/2$ 以上。在此情况下，接收到的 OFDM 信号中的高频侧的子载波(全部子载波的约一半)受到子载波间差拍干涉的影响，其余一半的低频侧的子载波不受干涉的影响，是没有接收信号品质的劣化的状态。

[0113] 在本实施方式的说明中，关于满足式(6)和式(7)的最小值的两条件的情况、即完全避免因子载波间的差拍信号带来的干涉的情况，以下继续说明。该情况下的频谱是图 7 所示那样的。即，码元 No. 1、3、…的载波 1 与码元 No. 2、4、…的 OFDM 信号中的最低频率侧子载波的频率间隔是 Δf 。同样，码元 No. 2、4、…的载波 2 与码元 No. 1、3、…的 OFDM 信号中的最低频率侧子载波的频率间隔是 Δf 。

[0114] 由上述电光转换部 120 生成的光 OFDM 信号作为光发送器 100 的发送光，在作为传送路径的光纤 300 中传输，到达光接收器 200。在光接收器 200 中，首先入射到延迟干涉仪 230 中。

[0115] 在图 8 中表示延迟干涉仪 230 的构造。从延迟干涉仪 230 的输入端口入射的光被光耦合器 231 分离为两个光，一个被延迟时间部 233 延迟 OFDM 的 1 码元时间 T 后，与分离后的另一个光被光耦合器 232 合成，从输出端口 1 和输出端口 2 输出。

[0116] 在图 9 中表示平衡型光电转换部 210 的具体的结构。来自延迟干涉仪 230 的两个输出端口的光被平衡型光电转换部 210 转换为电信号。平衡型光电转换部例如由两个光电二极管和前置放大器构成，将被光电二极管从光转换为电流的两个信号进行减法运算，从平衡型光电转换部 210 输出。

[0117] 在图 10 中表示平衡型光电转换部 210 的输出信号的频谱。图 10 (a)是将图 6 的光 OFDM 信号的码元 No. 1 和码元 No. 2 用延迟干涉部 230 合成的情况下的频谱，图 10 (b)是将图 6 的光 OFDM 信号的码元 No. 2 和码元 No. 3 用延迟干涉部 230 合成的情况下的频谱。该图 10 是满足式(6)和式(7)的最小值的两条件的光 OFDM 信号的情况。

[0118] 根据图 10 可知，在低频侧能够得到要接收的 OFDM 信号的和($S1+S2, S2+S3, \dots$)，在高频侧能够得到不同的码元时间的子载波间的差拍信号。如果满足式(6)和式(7)的两条件，则 OFDM 信号和子载波间差拍信号在频谱上能够完全分离。进而，与以往方式(参照图 4)不同，在低频侧呈现所要求的 OFDM 信号，不需要的子载波间差拍信号出现在高频侧，所以光接收器 200 的模拟部件例如光电二极管、前置放大器、A/D 转换器所需要的频带用 OFDM 信号的频带宽度 B 左右是足够的。

[0119] 在图 11 中表示接收信号处理部 220 的功能框图。平衡型光电转换部 210 的输出信号输入到接收信号处理部 220 中。光电转换部 210-1 的输出信号被模拟数字(A/D)转换

部 221 数字化,被循环前缀除去(CPR)部 222 去除循环前缀,被串行并行(S/P)转换部 223 转换为 N 条并行数据。这些并行数据在 FFT(快速傅立叶变换)部 224 中被分离为 N 条子载波信号。然后,由子载波解调部 225 将搭载在各子载波中的数据解调,由并行串行(P/S)转换部 226 转换为串行数据,作为接收信息数据输出。

[0120] 在本实施方式的接收信号处理部 220 中,在由 FFT 部 224 分离为各子载波后,将其信号与 1 码元前的信号求差,向下一级的解调部 225 传递。具体而言,FFT 部 224 的输出各子载波被输入到差动放大器 227、227-1 中。该差动放大器的输出被延迟电路 228、228-1 延迟 OFDM 的 1 码元时间 T,连接在差动放大器 227、227-1 的另一个输入上。因而,由该差动放大器 227、227-1 输出当前码元的信号与 1 码元时间前的信号的差。

[0121] 如在图 10 中说明那样,接收到的子载波信号通过延迟干涉仪 230 的作用而成为连续的两个码元的和,所以如果将这样的延迟电路和差动放大器按照每个子载波使用,则在各个差动放大器的输出中,能够得到各码元的信号(S1, S2, S3, …)。

[0122] 差动放大器 227、227-1 的输出如上述那样被子载波解调部 225 解调,被接着的并行串行转换部 226 转换为串行数据,作为光接收器 200 的输出信号输出。这是接收到的数据。

[0123] 2. 第 2 实施方式

[0124] 使用图 13 说明第 2 实施方式。在本实施方式中,电光转换部 120 与第 1 实施方式不同,其他部分都与第 1 实施方式相同,其说明省略。

[0125] 图 13 是表示第 2 实施方式的电光转换部 120 的功能块和滤光器 130 的图。

[0126] 作为发送信号处理部 110 的输出的基带 OFDM 信号的实部,在加法器 125 中被与由 2x1 开关 127 选择的作为频率 f_{s1} 的 RF 振荡器 123-1 或频率 f_{s2} 的 RF 振荡器 123-2 的输出的余弦波(COS)相加,施加在光 I-Q 调制器 122 的 I 端口上。另一方面,基带 OFDM 信号的虚部被原样施加在光 I-Q 调制器 122 的 Q 端口上。入射到光 I-Q 调制器 122 中的光是光的频率按照每个 OFDM 码元时间而交替地变化为 f_{LD1} 和 f_{LD2} 的光,该光是从激光器 121-1 射出的光。激光器 121-1 例如能够由半导体激光器实现,在此情况下,通过使半导体激光器的驱动电流对应于 RF 振荡器 126 的输出而按照每个 OFDM 码元时间稍稍变化,能够将光的频率切换为 f_{LD1} 和 f_{LD2} 。

[0127] 另外,上述 2x1 开关 127 的切换定时及来自激光器的光的频率的切换(其受 RF 振荡器 126 控制)也按照 OFDM 信号的每个码元时间同步进行。进而,该按照每个码元时间的切换与发送信号处理部 110 的时钟同步。即,光发送器 100 的全部的逻辑电路、振荡器、切换开关以相同的时钟取同步。

[0128] 在本实施方式的电光转换部 120 中,与第 1 实施方式的电光转换部同样,按照每个 OFDM 码元时间,RF 信号(频率是 f_{s1} 或 f_{s2})和光的频率(f_{LD1} 和 f_{LD2})切换。该 RF 信号、光的频率和保护带的频带宽度 W_1 和 W_2 的关系也与第 1 实施方式相同。

[0129] 与第 1 实施方式不同的点是,由于 RF 信号(频率为 f_{s1} 或 f_{s2})仅被施加在光 I-Q 调制器的 I 端口上,所以该电光转换部 120 的输出光的频谱存在由多个子载波构成的 OFDM 信号、和在其高频侧及低频侧由上述 RF 信号生成的载波(在第 1 实施方式中,载波仅表示在 OFDM 信号的高频侧或低频侧。参照图 7)。

[0130] 使本实施方式的电光转换部 120 的光通过滤光器 130。图 14 表示滤光器 130 的

透射特性和该滤光器 130 的输出光的频谱。滤光器是带通滤波器, 设置为, 将处于 OFDM 信号的两侧的载波(频率 $f_{LD1} \pm f_{S1}$ 和 $f_{LD2} \pm f_{S2}$) 的一方截断。例如, 至少将频率 $f_{LD1} + f_{S1}$ (在图 14 中, 在上侧的图中在 OFDM 信号的高频侧出现的载波(未图示)) 和频率 $f_{LD2} - f_{S2}$ (在图 14 中, 在下侧的图中在 OFDM 信号的低频侧出现的载波(未图示)) 截断。结果, 滤光器 130 的输出光的频谱如图 14 那样, 在 OFDM 码元为 No. 1、No. 3、... 时由低频侧的载波(频率 $f_{LD1} - f_{S1}$) 和 OFDM 信号 S1、S3、... 构成, 在 OFDM 码元为 No. 2、No. 4、... 时由高频侧的载波(频率 $f_{LD2} + f_{S2}$) 和 OFDM 信号 S2、S4、... 构成。

[0131] 另外, 滤光器 130 例如可以通过由电介质多层膜制作的滤光器、由光波导形成的光梳状分波器(interleaver) 等实现。进而, 该滤光器在波长复用系统的情况下, 在单独搭载到各光发送器 100 中的情况下, 也可以使用将各光发送器 100 的输出光合波的所谓合波器实现。在此情况下, 合波器可以通过所谓的 AWG(Arrayed Waveguide Grating, 阵列波导光栅) 实现。

[0132] 根据以上的本实施方式的说明可知, 作为传送路径的光纤中的光 OFDM 信号、即滤光器 130 的输出光, 是与第 1 实施方式的光相同的光。因而, 光接收器 200 的结构和其各部的作用与第 1 实施方式相同, 详细的说明省略。

[0133] 以上是第 2 实施方式的说明。另外, 在本实施方式中, 发送器的结构比第 1 实施方式简单是特征之一。

[0134] 3. 第 3 实施方式

[0135] 使用图 15 ~ 图 18 等说明第 3 实施方式。

[0136] 在本实施方式中, 将基带 OFDM 信号与 RF 信号通过数字信号处理相加。

[0137] 光发送器 100 与光接收器 200 经由作为传送路径的光纤 300 连接是与第 1 实施方式相同的。

[0138] 在图 15 中表示发送信号处理部 110 - 2 的功能框图。在光发送器 100 中, 将要发送的数据由发送信号处理部 110 - 2 转换为基带 OFDM 信号。要发送的数字数据与第一实施方式及第二实施方式同样被进行信号处理, 从循环前缀插入部 115 输出。该输出对应于基带 OFDM 信号的实部和虚部。这些输出通过 1x2 电开关 117 - 1 和 117 - 2。该 1x2 电开关 117 - 1 和 117 - 2 分别按照每个 OFDM 码元时间 T 将两个输出交替地切换。该开关的切换定时与 OFDM 码元的切换同步。因而, OFDM 码元 No. 1、No. 3、... 的输出与码元 No. 2、No. 4、... 的输出不同。这些输出中的基带 OFDM 信号的实部在加法器 125、125 - 2 中被与发送信号处理部的内部的频率 f_s 的 RF 振荡器 123 - 3 的余弦波(cos) 输出相加, OFDM 信号的虚部在加法器 125 - 1、125 - 3 中被与 RF 振荡器 123 - 3 的正弦波(sin) 输出相加。将加上 RF 信号后的基带 OFDM 信号用 4 台数字模拟转换(A/D) 电路 116 输出。另外, RF 振荡器 123 - 3 的频率 f_s 为

[0139] $f_s = B/2 + \Delta f$ (10)

[0140] 该设定是使频谱宽度为最小的设定。这里, B 是基带 OFDM 信号的频带宽度, Δf 是子载波的频率间隔。

[0141] 将基带 OFDM 信号与 RF 信号在数字信号处理中相加的方法在图 15 以外还有。例如, 也可以是添加图 15 的逆 FFT 转换部 113 的输入所需要的 RF 频率端口和补零(zero padding) 用的端口而进行逆 FFT 转换的方法。

[0142] 发送信号处理部 110 - 2 的 4 个输出信号(基带 OFDM 信号 S1、S3、…与 RF 信号的的和的实部和其虚部,以及基带 OFDM 信号 S2、S4、…与 RF 信号的的和的实部和其虚部)被引导到图 16 的电光转换部 120 - 2 中。

[0143] 电光转换部 120 - 2 具有以固定波长振荡的激光器 121、对其光进行调制的 Mach - Zehnder 光调制器 128 和驱动它的 RF 振荡器 123 - 4、将该光调制器 128 的输出的光分波的滤光器 129、对分波后的两个光分别加以调制的 2 台光 I - Q 调制器 122 - 1 和 122 - 2、和将它们输出合波的滤光器 400。

[0144] 接着,使用图 17 说明该电光转换部 120 - 2 的动作。激光器 121 的振荡频率被设定为 $(f_{LD1} + f_{LD2})/2$ (图 17 (a)参照)。作为激光器 121 而使用通常半导体激光器。该激光器 121 的射出光向 Mach - Zehnder 光调制器 128 入射。该 Mach - Zehnder 光调制器 128 将偏流点设定为其透射特性的消光点,作为驱动信号而使用频率 $(f_{LD1} - f_{LD2})/2$ 的 RF 振荡器 123 - 4 的正弦波输出。此时,Mach - Zehnder 光调制器 128 的输出光的频谱为图 17(b)。即,该光具有两个频谱分量(频率 f_{LD1} 和 f_{LD2})。使该光向滤光器 129 入射。滤光器 129 将在 Mach - Zehnder 光调制器 128 的输出光中包含的两个频谱分量分离,分别向两个输出端口射出。作为该滤光器 129,已实用化了所谓的光梳状分波器等。另外,光频率 $f_{LD1} - f_{LD2}$ 的设定遵循式(9)(假定为 $f_{LD1} > f_{LD2}$)。

[0145] 滤光器 129 的两个输出分别是频率 f_{LD1} 的光和频率 f_{LD2} 的光。将这些光分别用光 I - Q 调制器 122 - 1 和 122 - 2 调制并输出。

[0146] 光 I - Q 调制器 122 - 1 的驱动信号是基带 OFDM 信号 S1、S3、…与 RF 信号(频率 f_s)的和信号。同样,光 I - Q 调制器 122 - 2 的驱动信号是基带 OFDM 信号 S2、S4、…与 RF 信号的和信号。通过将电开关 117 - 1、117 - 2 按照每个码元时间切换,将各驱动信号按照每个码元时间向光 I - Q 调制器 122 - 1、122 - 2 交替地输入。另外,在电开关 117 - 1、117 - 2 以外,也可以用适当的方法向光 I - Q 调制器交替地输入驱动信号。

[0147] 表示由这些信号驱动的光 I - Q 调制器 122 - 1 和 122 - 2 的输出光的频谱的是图 17 (c)~图 17 (f)。即,图 17 (c)表示在光 I - Q 调制器 122 - 1 的输出光的 OFDM 码元为 No. 1、No. 3、…时的频谱,图 17 (d)表示在光 I - Q 调制器 122 - 1 的输出光的 OFDM 码元为 No. 2、No. 4、…时的频谱,图 17 (e)表示在光 I - Q 调制器 122 - 2 的输出光的 OFDM 码元为 No. 1、No. 3、…时的频谱,图 17 (f)表示在光 I - Q 调制器 122 - 2 的输出光的 OFDM 码元为 No. 2、No. 4、…时的频谱。这里,图示了式(10)成立的情况。

[0148] 两个光 I - Q 调制器 122 - 1 和 122 - 2 的输出光被滤光器 400 合波,该光被作为光发送器 100 的输出光向作为传送路径的光纤 300 发送。

[0149] 作为滤光器 400,既可以是与上述滤光器 129 同样的光梳状分波器,也可以是单纯的光耦合器。

[0150] 在光纤 300 中传输来的光信号向光接收器 200 入射。该光接收器是在第 1 实施方式或第 2 实施方式中使用的光接收器 200。

[0151] 以上是第 3 实施方式。

[0152] 另外,本实施方式的滤光器 400 的输出光、即光发送器 100 的输出光的频谱为图 19。比较图 19 与图 7 可知,本实施方式的频谱的载波增加了。即,码元 No. 1、No. 3、…的时刻的载波 2 及码元 No. 2、No. 4、…的时刻的载波 1。这些多余的载波在光接收器中生成多余

的信号,即码元 No. 1、No. 3、…的时刻的载波 2 与码元 No. 2、No. 4、…的时刻的 OFDM 信号 S2、S4、…的差拍信号、还有码元 No. 2、No. 4、…的时刻的载波 1 与码元 No. 1、No. 3、…的时刻的 OFDM 信号 S1、S3、…的差拍信号。但是,这些与本来想要接收的信号、即码元 No. 1、No. 3、…的时刻的载波 1 与码元 No. 2、No. 4、…的时刻的 OFDM 信号 S2、S4、…的差拍信号、以及码元 No. 2、No. 4、…的时刻的载波 2 与码元 No. 1、No. 3、…的时刻的 OFDM 信号 S1、S3、…的差拍信号相比,由于有保护带的频率宽度 W_2 ,所以存在于高频侧。因而,如果将保护带 W_2 取 OFDM 信号频带宽度 B 以上(参照式(7)),则这些信号与本来想要接收的信号在频谱上能够分离,在接收中没有问题。将该滤光器 400 的输出光在时间轴上示意地表示为图 18。如已经叙述那样,各 OFDM 码元由基带 OFDM 信号和两个载波构成。与第一及第二实施方式的光发送器 100 的输出(参照图 6)不同的点是在各 OFDM 码元中总是存在两个载波这一点。

[0153] 作为本实施方式所特有的特长是,由于由发送信号处理部 110-2 数字地执行 RF 信号的加法运算,所以不需要在光发送器 100 内准备物理的 RF 振荡器、加法器或以高速动作的电开关,因而能够以低成本实现,进而,不需要如第 1 或第 2 实施方式那样使用多个电开关取同步的切换,因而控制变得简单等。

[0154] 4. 第 4 实施方式

[0155] 以下使用图 20 等表示第 4 实施方式。第 1、第 2 或第 3 实施方式的光发送器 100 的输出光在作为传送路径的光纤 300 中传输,向光接收器 200 入射。

[0156] 在图 20 中表示本实施方式的光接收器 200 的结构。该光接收器 200 具有滤光器 240、两个延迟干涉仪 230-1 和 230-2、将它们的输出转换为电信号的平衡型光电转换部 210-2 和 210-3、和从它们的输出中提取数据的接收信号处理部 220-2。

[0157] 接着说明该光接收器 200 的动作。向光接收器 200 入射的光的频谱例如图 19 所示那样的。以下,使用第 3 实施方式的光 OFDM 信号说明。该光首先向滤光器 240 入射。在图 21 中表示滤光器 240 的透射特性和输入光的频谱。图 20 的从输入端口(COM)向输出端口(A)的透射特性是实线,从输入端口(COM)向输出端口(B)的透射特性用单点划线表示在图 21 中。即,在输出端口(A)中载波 1 被截断,在输出端口(B)中,载波 2 被截断。例如,在输出端口(A)侧,将比 $f_{LD2}+B/2$ 低的频率截断,在输出端口(B)侧,将比 $f_{LD1}-f_s$ 高的频率截断。

[0158] 因而,输出端口(A)的光在码元 No. 1、No. 3、…的时刻由载波 2 和 OFDM 信号 S1、S3、…构成,在码元 No. 2、No. 4、…的时刻由载波 2 构成。同样,输出端口(B)的光在码元 No. 1、No. 3、…的时刻仅由载波 1 构成,在码元 No. 2、No. 4、…的时刻由 OFDM 信号 S2、S4、…和载波 1 构成。

[0159] 端口(A)和端口(B)的光分别向延迟干涉仪 230-1 和 230-2 入射。其输出光分别被平衡型光电转换部 210-2 和 210-3 转换为电信号,被向接收信号处理部 220-2 引导。

[0160] 另外,将平衡型光电转换部 210-2 的输出信号的频谱表示在图 22(a)中。在 OFDM 码元 No. 1、No. 2、No. 3、No. 4、…的时刻得到的信号为 OFDM 信号 S1、S1、S3、S3、…,以连续的两个码元重复相同的信号。平衡型光电转换部 210-3 的输出信号也同样,在 OFDM 码元 No. 1、No. 2、No. 3、No. 4、…的时刻得到的信号为 OFDM 信号 S2、S2、S4、S4、…,以连续

的两个码元重复相同的信号。

[0161] 在图 23 中表示接收信号处理部 220 - 2 的功能框图。平衡型光电转换部 210 - 2 和 210 - 3 的输出信号分别被模拟数字转换(A/D)部 221 - 1 和 221 - 2 转换为数字信号。该输出由 2x1 电开关 229 将两个输入信号按照 OFDM 码元的定时而选择输出。因而,其输出在码元 No. 1、No. 2、No. 3、No. 4、...的时刻能够得到 OFDM 信号 S1、S2、S3、S4...的希望

的信号。

[0162] 该 2x1 电开关 229 的输出然后接受与以往例同样的接受信号处理,作为接收数据被从光接收器 200 输出。

[0163] 以上是本实施方式的说明。

[0164] 另外,以上的本实施方式的说明使用来自第 3 实施方式的发送器 100 的光 OFDM 信号进行,但光接收器 200 对于在第 1 及第 2 实施方式中使用的光发送器 100 的光(其频谱为图 7 所示那样)中也能够适用。

[0165] 本实施方式所特有的特长是,能够将保护带的宽度 W_2 用滤光器 240 的透射特性的坡度(参照图 21)决定。即在使用过渡区域(从透射区域向截断区域的过渡区域)的宽度较急剧的滤光器 240 的情况下,可以按照该宽度而将保护带的频率宽度 W_2 设定得较窄。即,能够将 W_2 设定得比式(7)的对于 W_2 的条件窄。因而,具有能够实现占用的光频谱较窄的光通信系统、即频率利用效率较高的光通信系统的特长。

[0166] 5. 其他

[0167] 另外,在第 1、第 2、第 3、第 4 实施方式的各自的上述说明中,记述了光发送器 100 和光接收器 200 单独存在于不同的场所的情况,但当然作为别的实施方式也可以有在相同的光通信装置中实现上述光发送器 100 和光接收器 200 的功能、在这些光通信装置间进行通信的情况。进而,在此情况下,当然有使用将光发送器 100 和光接收器 200 搭载在相同的箱体中或板上的所谓的转发器(transponder)构成的实施方式。

[0168] 根据上述各实施方式,能够提供在光 OFDM 通信系统中、能够降低起因于子载波间的差拍信号的接收灵敏度劣化的光 OFDM 通信系统及光收发器。此外,能够使用在发送器及接收器中使用的模拟部件(驱动器、D/A 转换电路、前置放大器、A/D 转换电路等)的频带抑制为信号频带的 2 倍左右的部件实现光 OFDM 通信系统及光收发器,因而,能够提供比以往低成本的通信系统及光收发机。进而,在上述各实施方式中,由于使用直接检波接收方式,所以与相干接收方式相比结构较简单,因而能够提供低成本的通信系统及光收发器。

[0169] 6. 结构例

[0170] 光通信系统例如是具有光发送器和光接收器,其中光发送器在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,经由光纤用光信号进行发送,

[0171] 光接收器对在该光纤中传播来的光信号进行光电转换,将各子载波信号解调而再现原来的数字数据,

[0172] 光发送器具备:发送信号处理部,在码元时间内将数字数据映射至相互正交的多个子载波而进行调制,对调制后的该子载波信号进行逆快速傅立叶变换(逆 FFT)生成基带 OFDM 信号;和光电转换部,将该基带 OFDM 信号调制为激光,生成光 OFDM 信号;按照每个码元时间交替地发送不同的 2 波长的光 OFDM 信号;

[0173] 光接收器具有:至少一组以上的由延迟干涉部和平衡型光电转换部构成的组,该

延迟干涉部使经由光纤从上述光发送器接收到的光 OFDM 信号的一部分延迟码元时间而与光 OFDM 信号合成,该平衡型光电转换部将光信号转换为电信号;和接收信号处理部,将上述光电转换部的输出进行模拟数字(A/D)转换,对该 A/D 转换后的信号进行快速傅立叶变换(FFT)得到子载波信号,根据该子载波信号将数据解调,将解调后的数据转换为串行数据并再现原来的数字数据。

[0174] 在上述光通信系统中,其特征之一是,上述光发送器将由多个子载波和载波构成的光 OFDM 信号的波长按照每个码元时间交替地改变而发送。

[0175] 在上述光通信系统中,其特征之一是,上述载波的频率与单个的子载波的频率的差至少为多个子载波整体的频带宽度的一半以上。

[0176] 在上述光通信系统中,其特征之一是,在上述接收信号处理部中,按照通过 FFT 得到的每个子载波,减去 1 码元前的子载波的数据。

[0177] 在上述光通信系统中,其特征之一是,上述光接收器由以下部分构成:滤光器,将从上述光发送器送来的光 OFDM 信号的两个波长的光分别向两个输出端口分波;接收信号处理部,使上述滤光器的两个输出端口的光向两个延迟干涉部分别入射,将这两个延迟干涉部的各自的输出用两个上述平衡型光电转换部分别转换为电信号,对该电信号分别进行模拟数字(A/D)转换,将该 A/D 转换后的 2 信号按照每个 OFDM 码元时间交替地选择,将所选择的信号进行快速傅立叶变换(FFT)而得到子载波信号,根据该子载波信号将数据解调,将解调后的数据转换为串行数据,再现原来的数字数据。

[0178] 在上述光通信系统中,其特征之一是,上述延迟干涉部的延迟时间大致等于码元时间。

[0179] 产业上的可利用性

[0180] 本发明例如能够在光通信系统中使用。

[0181] 附图标记说明

[0182] 100 :光发送器

[0183] 110、110 - 1、110 - 2 :发送信号处理部

[0184] 111、223 :串行并行转换(S/P)部

[0185] 112 :子载波调制部

[0186] 113 :逆快速傅立叶变换(FFT)部

[0187] 114、226 :并行串行转换(P/S)部

[0188] 115 :循环前缀插入(CPI)部

[0189] 116、116 - 1 :数字模拟转换(D/A)部

[0190] 117 - 1、117 - 2 :1x2 电开关

[0191] 120、120 - 2 :电光转换部

[0192] 121、121 - 1 :激光器

[0193] 122、122 - 1、122 - 2 :光 I - Q 调制器

[0194] 123、123 - 1、123 - 2、123 - 3、123 - 4、126 :RF 振荡器

[0195] 124、124 - 1、124 - 2 :移相器

[0196] 125、125 - 1、125 - 2、125 - 3 :加法器

[0197] 127、127 - 1、127 - 2、229 :2x1 电开关

- [0198] 128 :Mach — Zehnder 光调制器
- [0199] 129、130、240、400 :滤光器
- [0200] 200 :光接收器
- [0201] 210、210 — 2、210 — 3 :平衡型光电转换部
- [0202] 211 — 1 :光电二极管
- [0203] 212 — 1、212 — 2、212 — 3 :前置放大器
- [0204] 213 :减法器
- [0205] 220、220 — 2 :接收信号处理部
- [0206] 221、221 — 1、221 — 2 :模拟数字转换(A/D)部
- [0207] 222、222 — 1 :循环前缀除去(CPR)部
- [0208] 223 :串行并行转换(S/P)部
- [0209] 224 :快速傅立叶变换(FFT)部
- [0210] 225 :子载波解调部
- [0211] 227、227 — 1 :差动放大器
- [0212] 228、228 — 1 :延迟电路
- [0213] 230、230 — 1、230 — 2 :延迟干涉仪
- [0214] 231、232 :光耦合器
- [0215] 233 :延迟时间部
- [0216] 300 :光纤

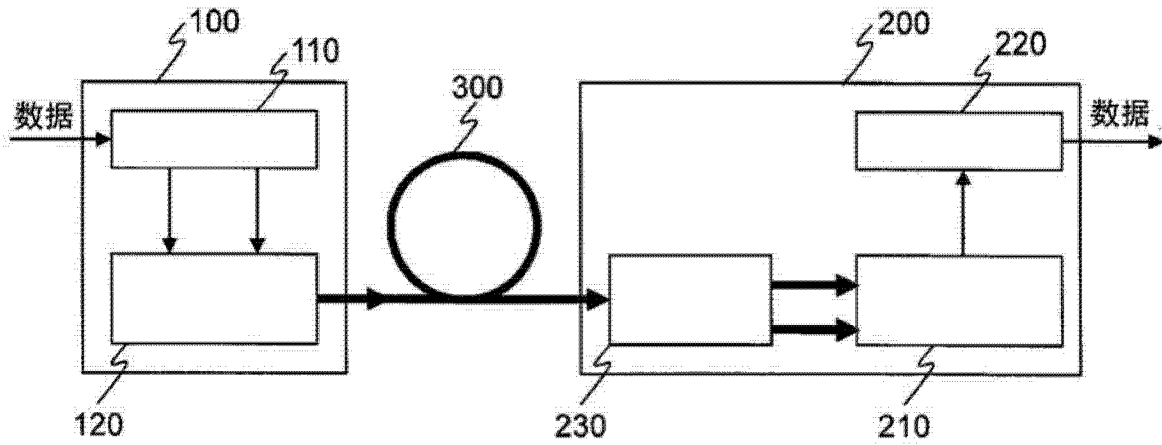


图 1

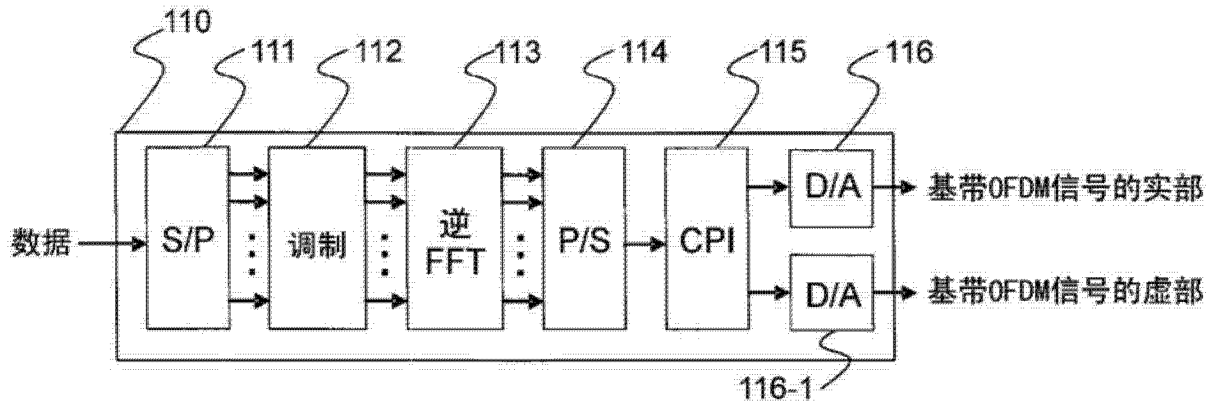


图 2

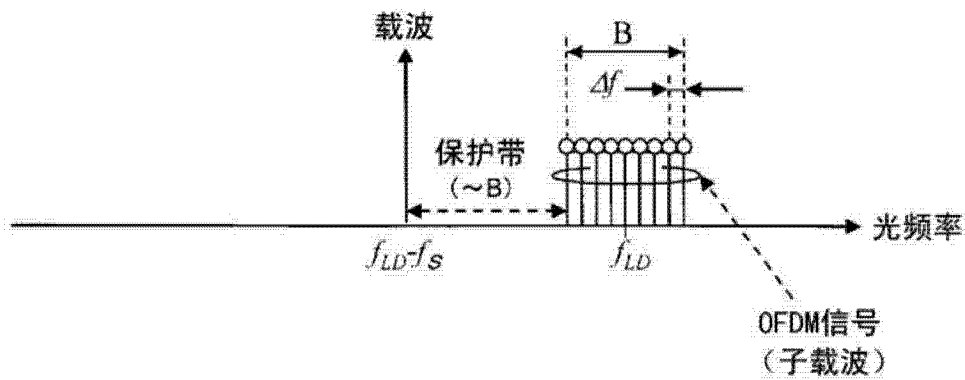


图 3

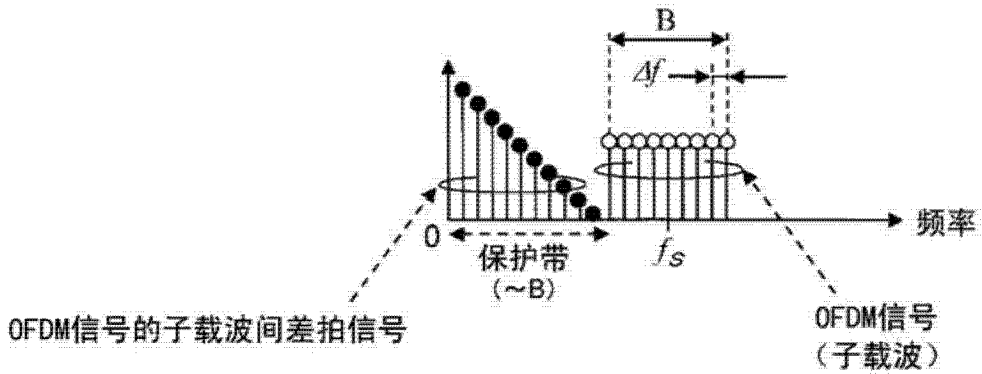


图 4

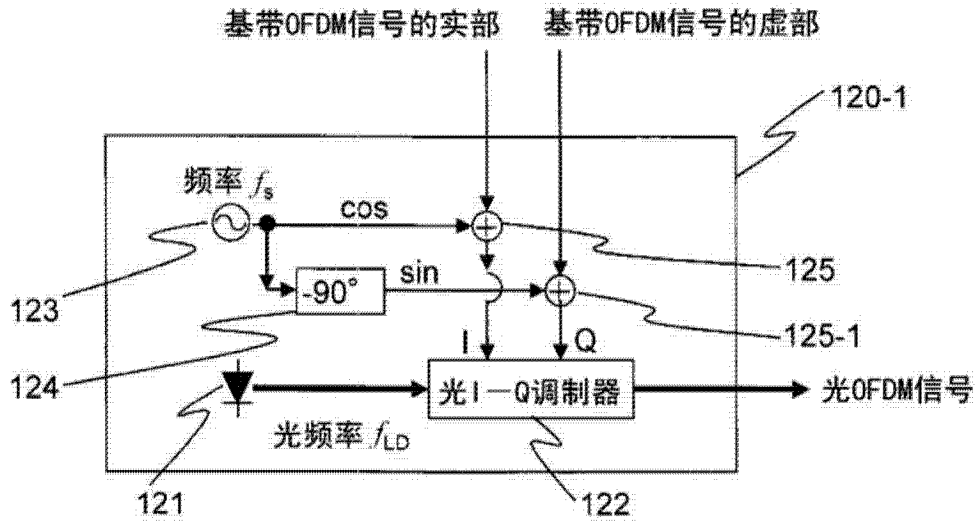


图 5

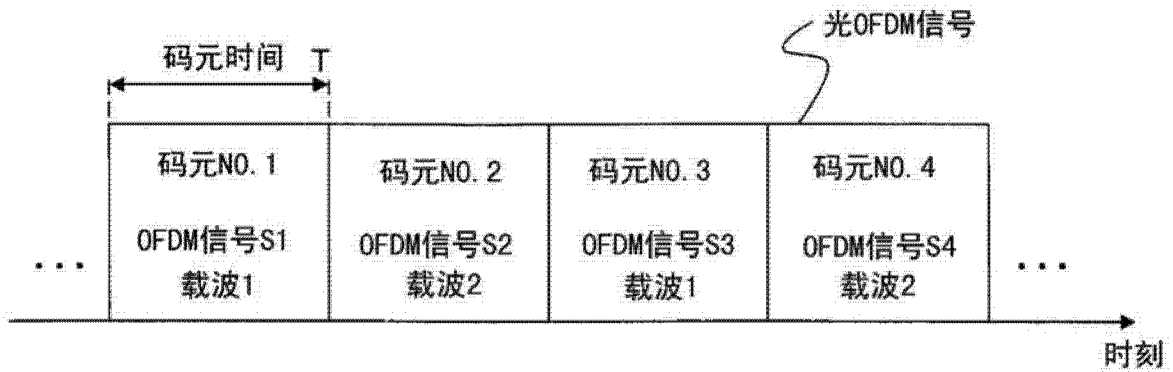


图 6

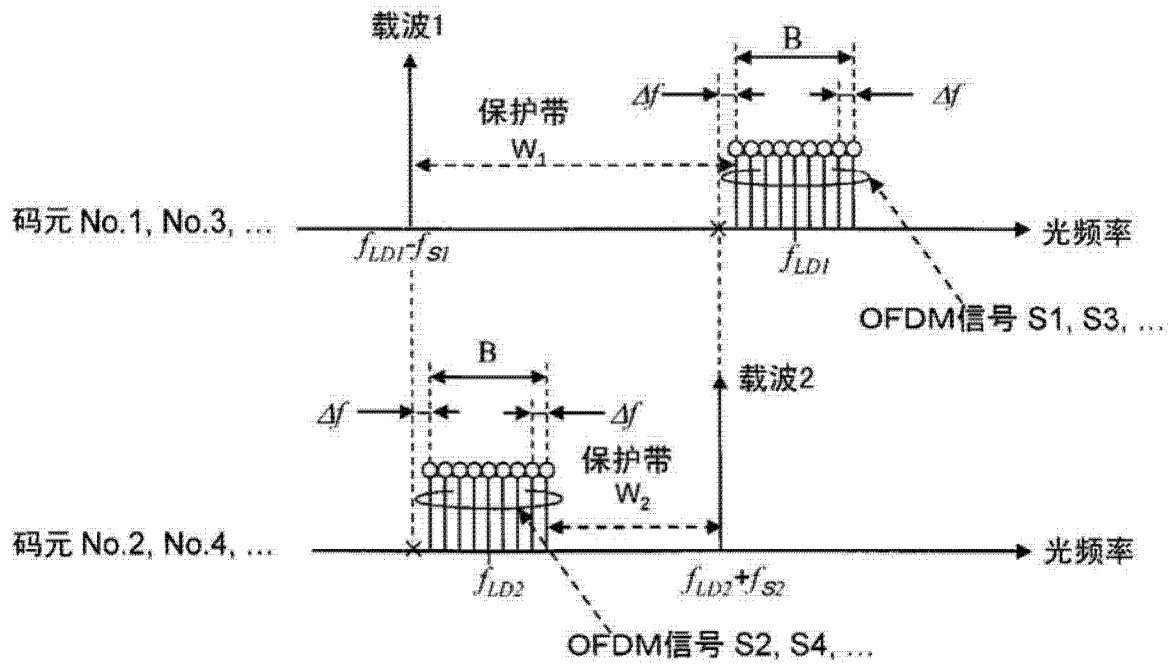


图 7

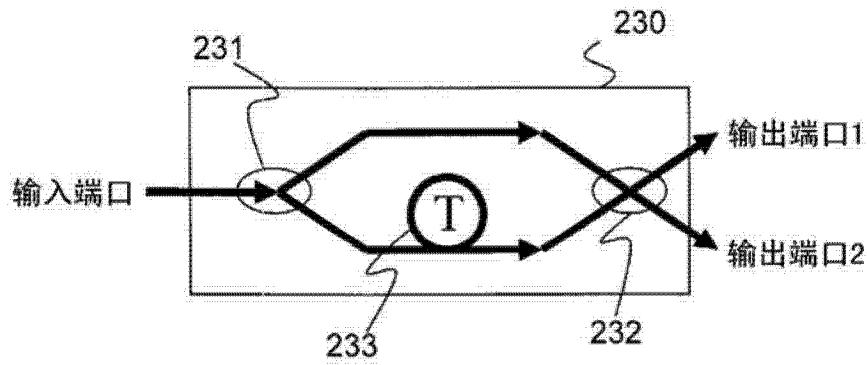


图 8

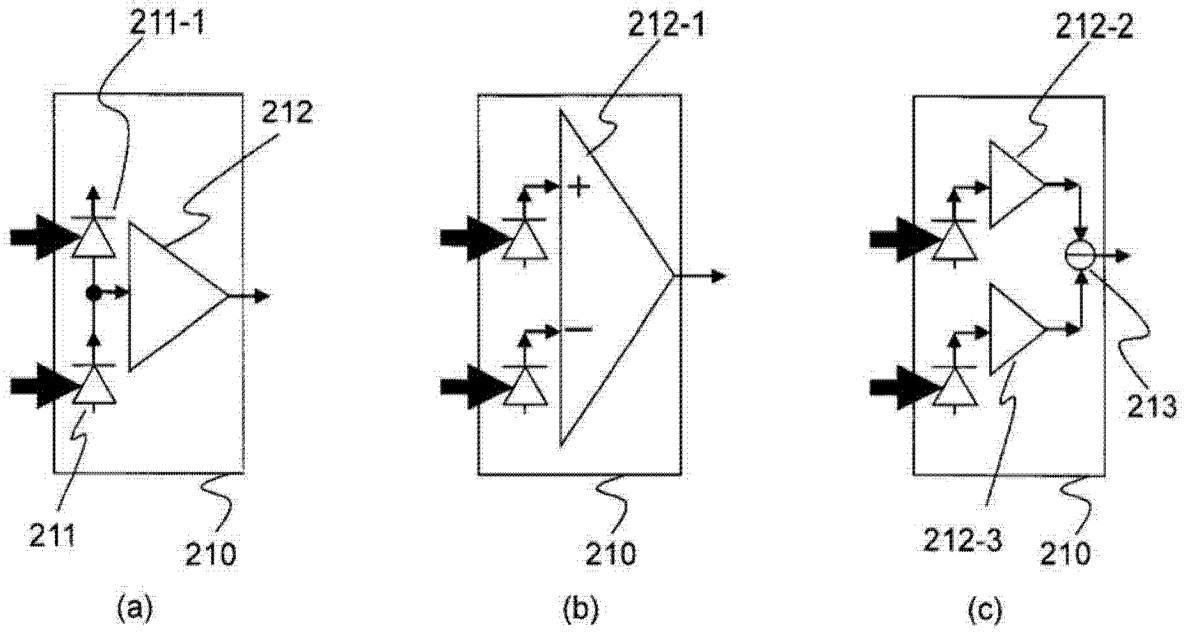


图 9

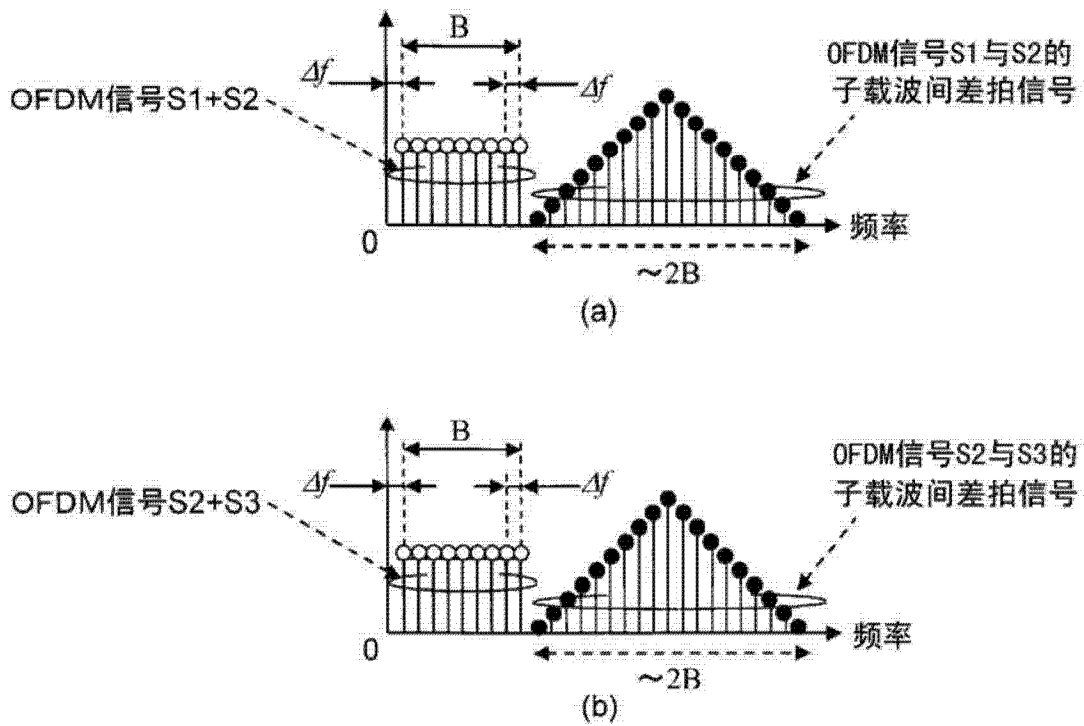


图 10

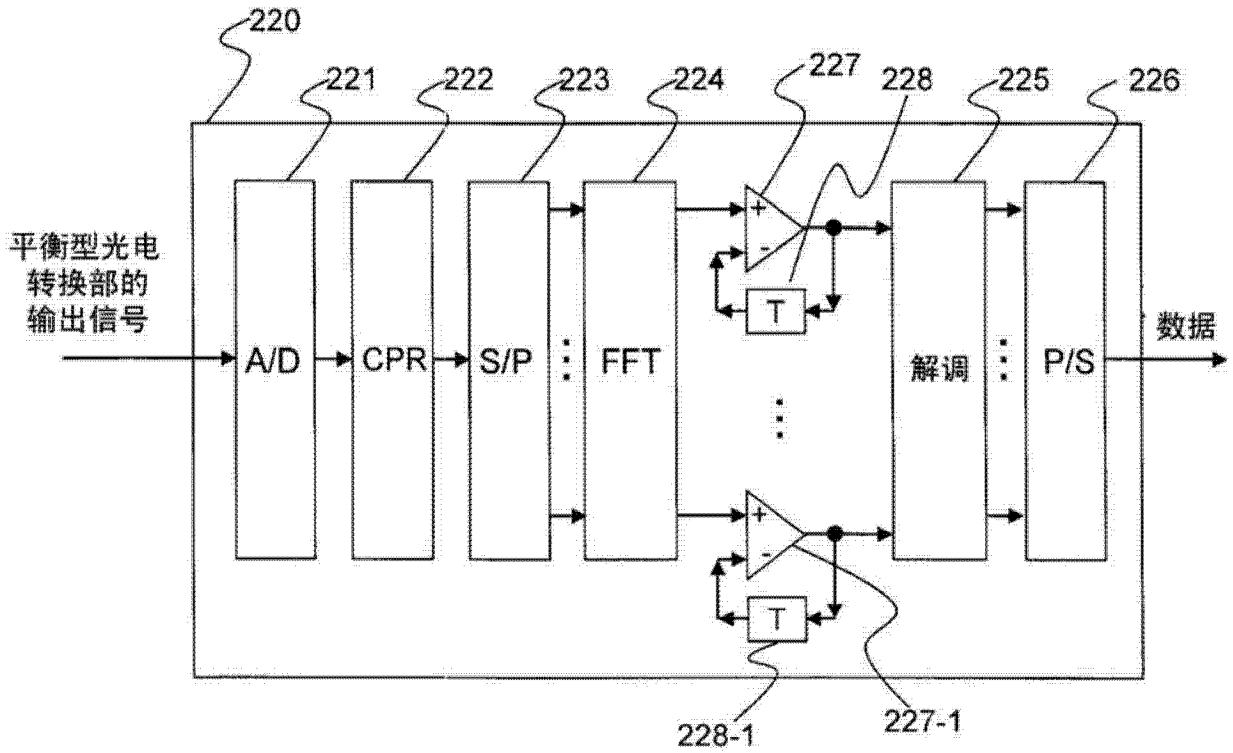


图 11

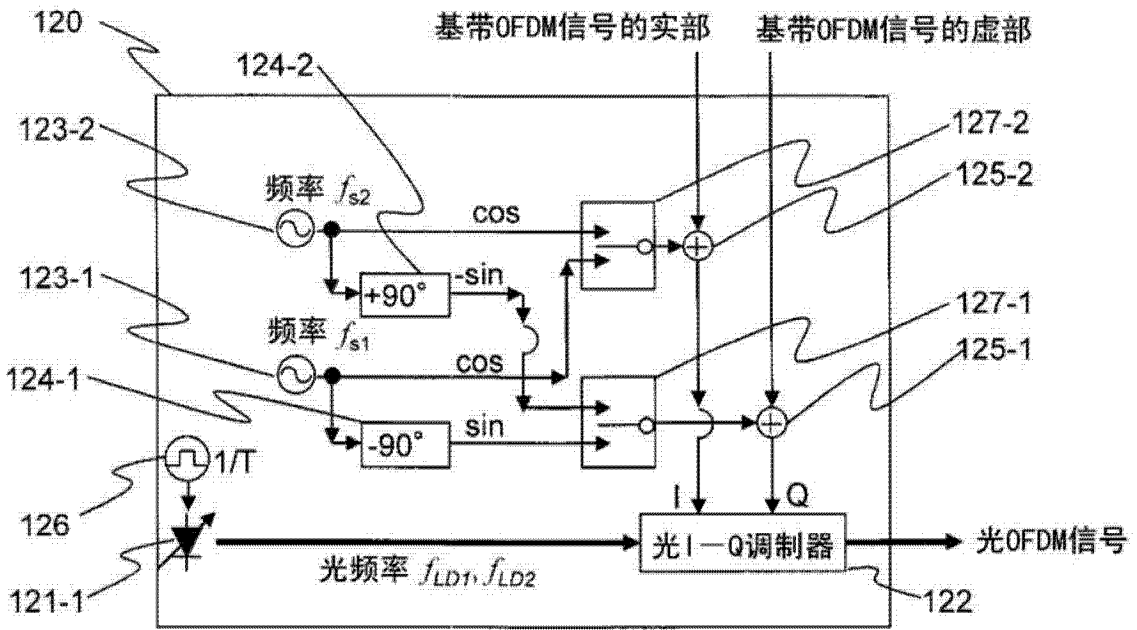


图 12

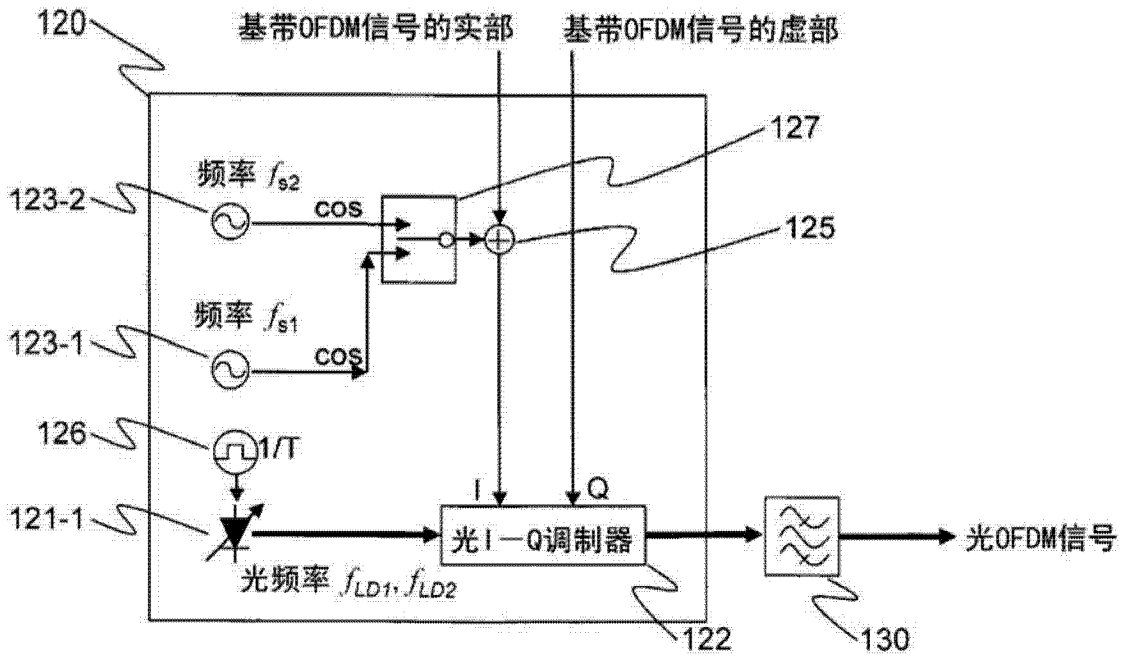


图 13

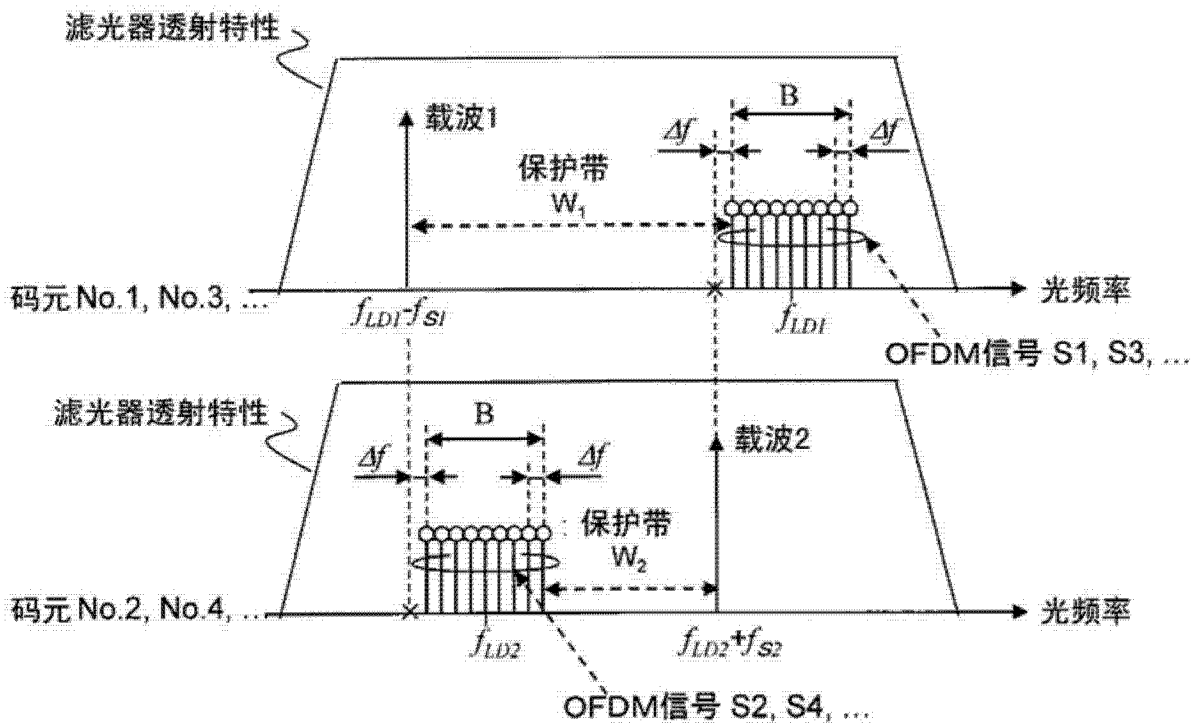


图 14

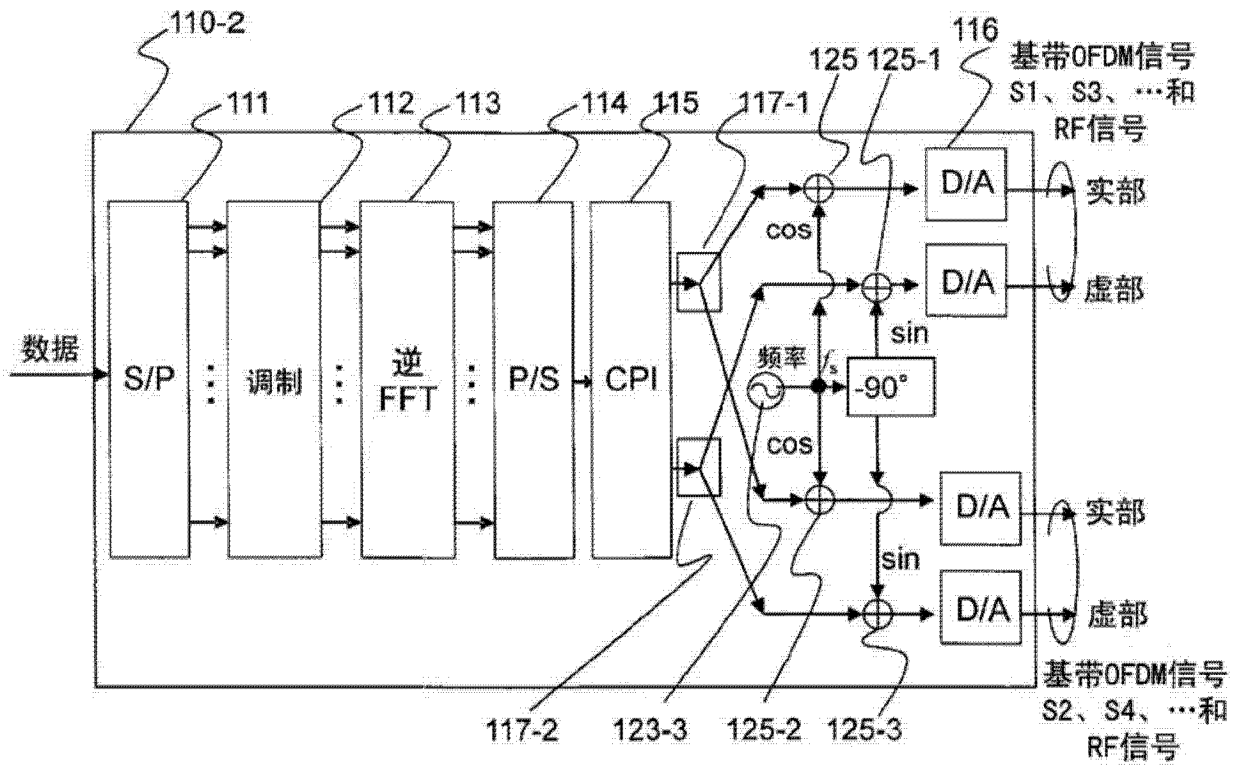


图 15

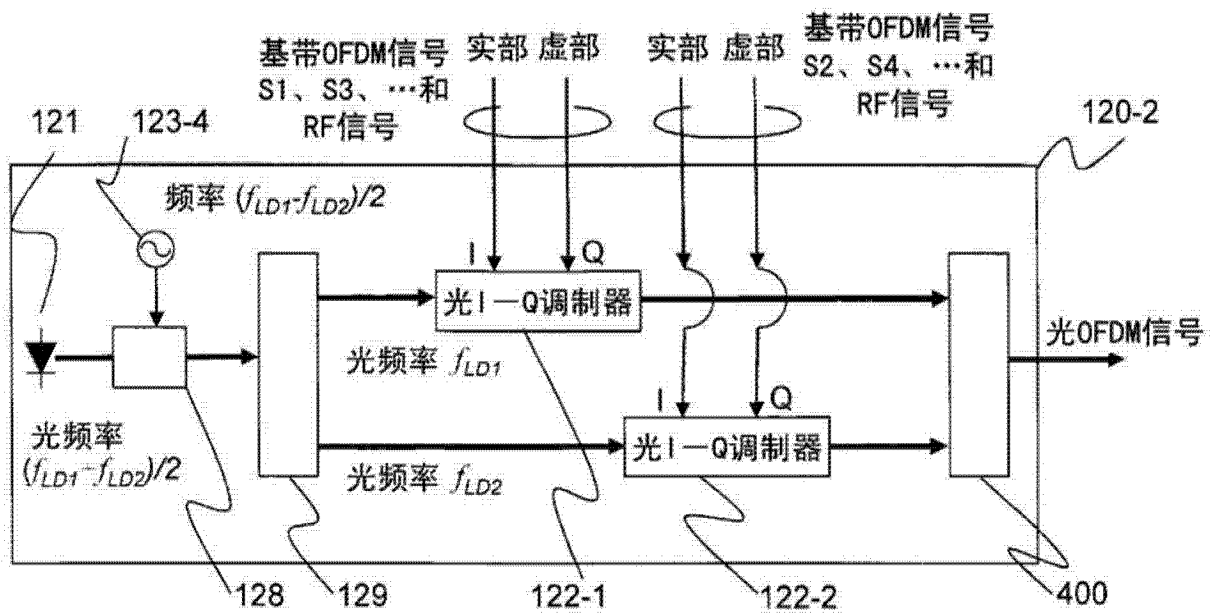


图 16

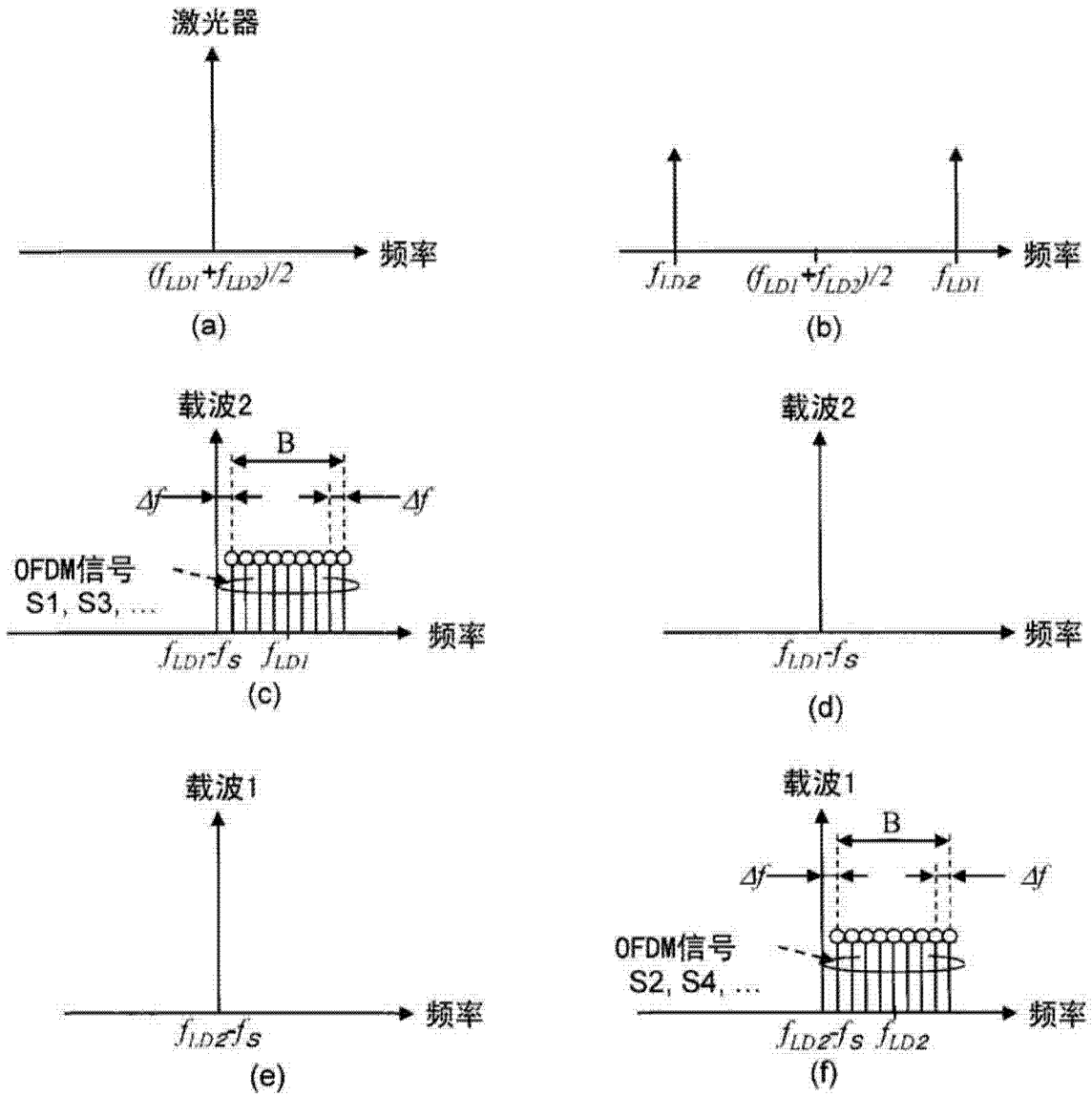


图 17



图 18

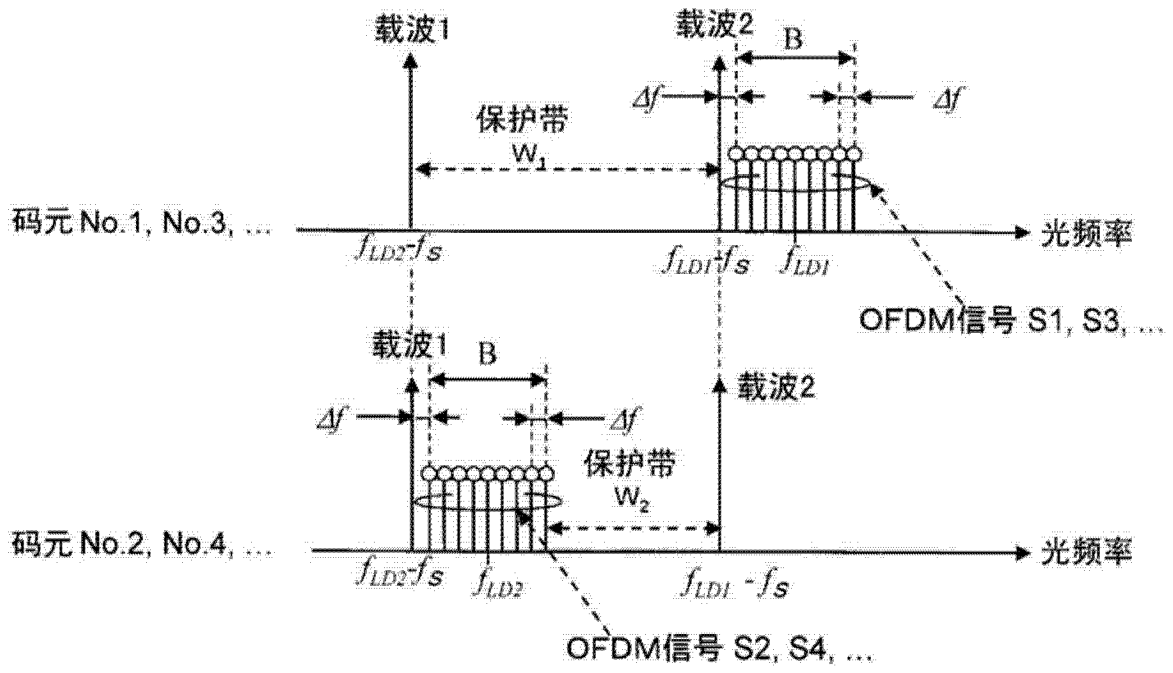


图 19

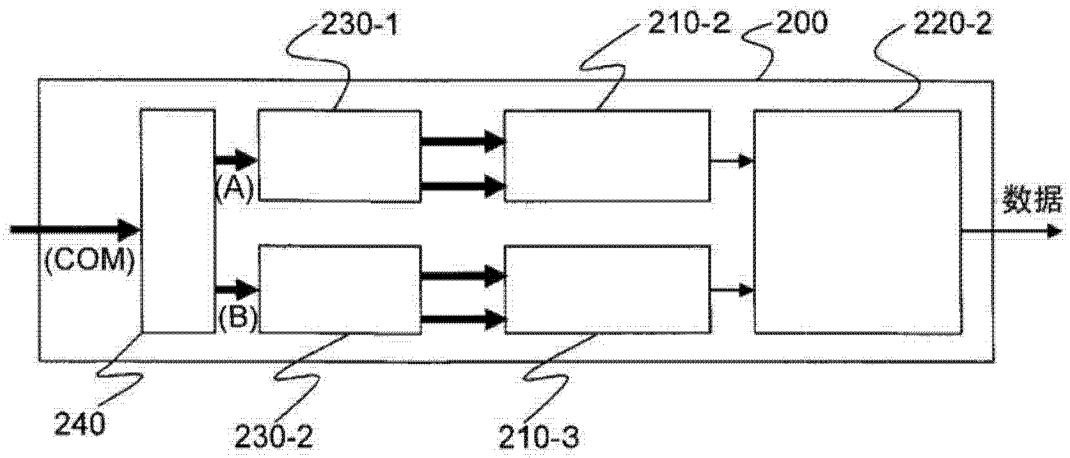


图 20

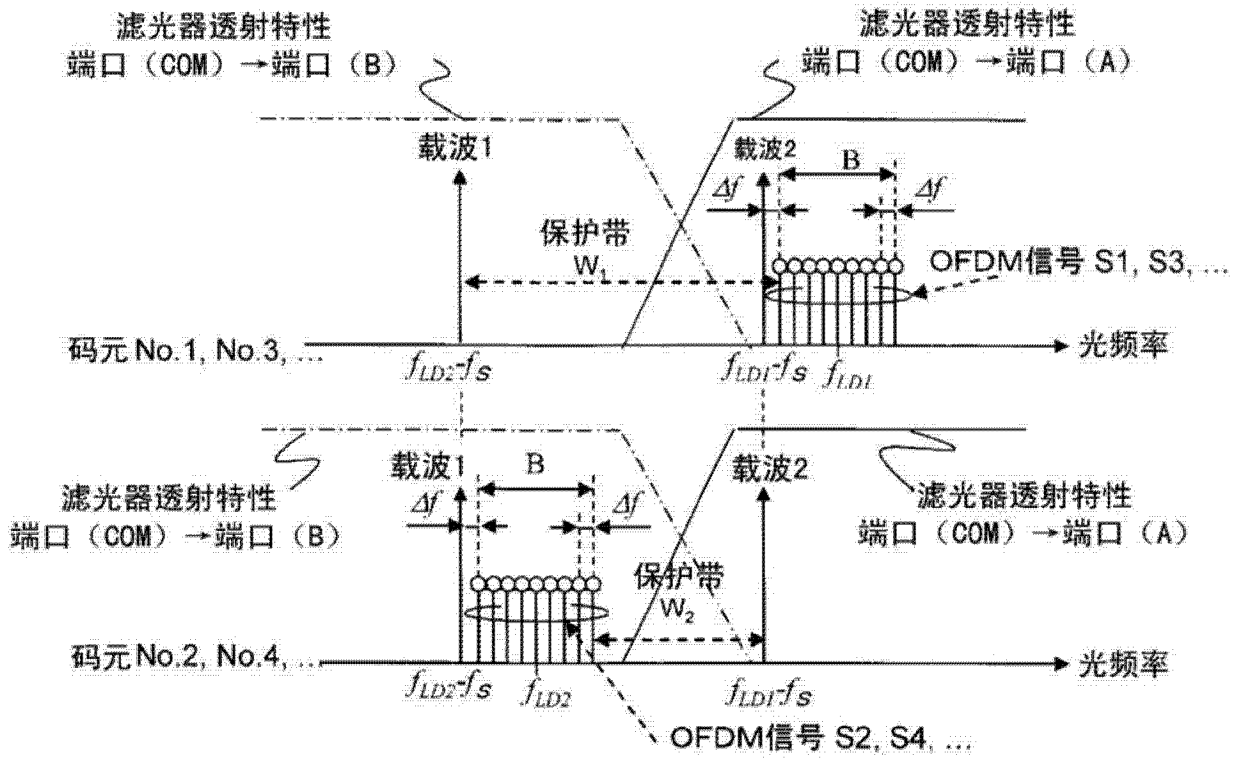


图 21

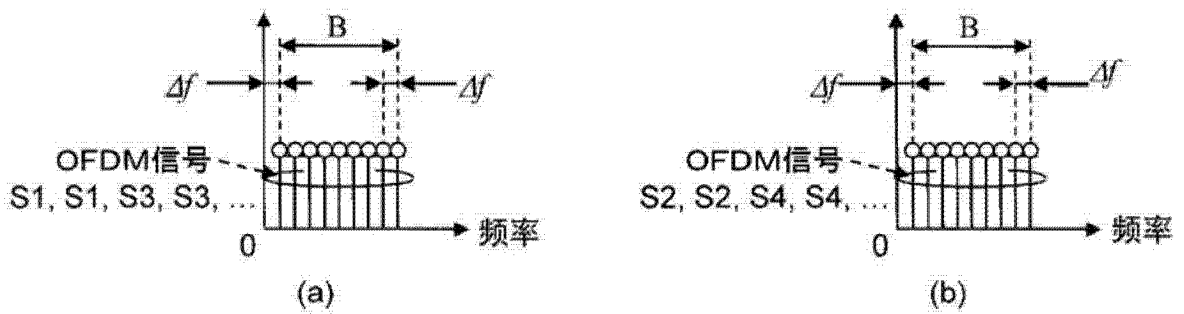


图 22

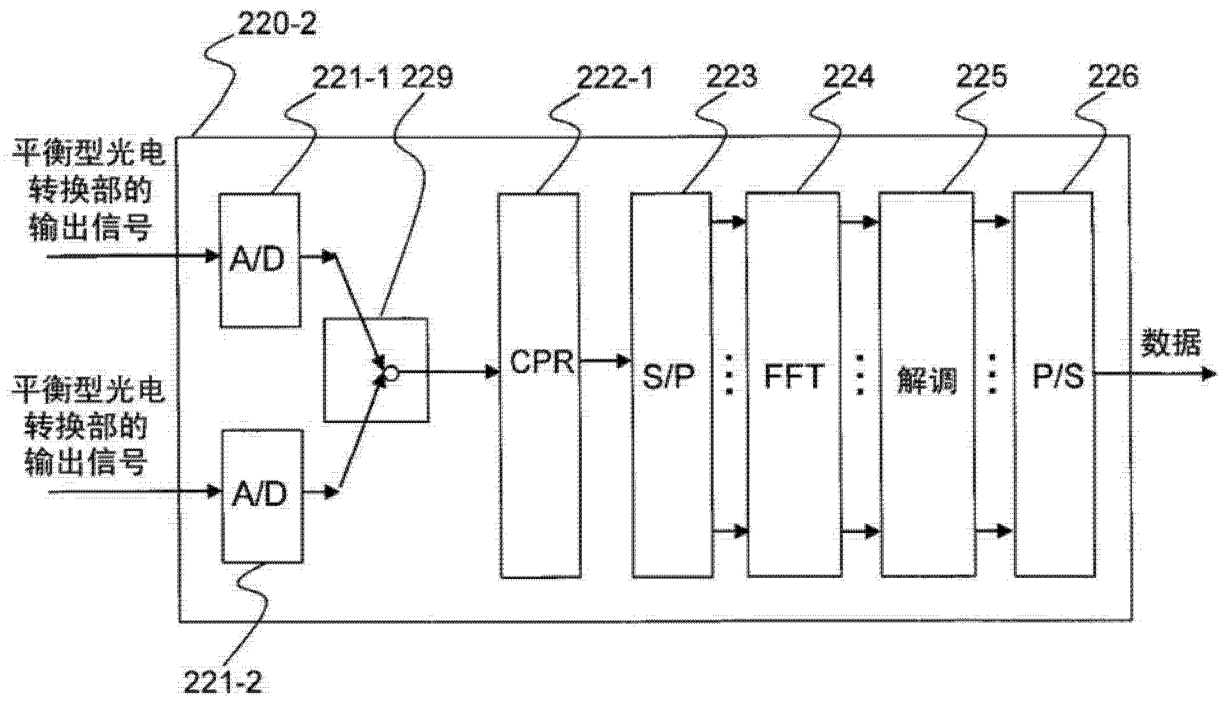


图 23