



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03119270. X

[43] 公开日 2003 年 10 月 22 日

[11] 公开号 CN 1450737A

[22] 申请日 2003.3.6 [21] 申请号 03119270. X

[30] 优先权

[32] 2002. 3. 29 [33] JP [31] 098074/2002

[71] 申请人 富士通株式会社

地址 日本神奈川县

[72] 发明人 大井宽己 岩渊隆志 寺原隆文

熊迫淳一 石川丈二 高原智夫

[74] 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

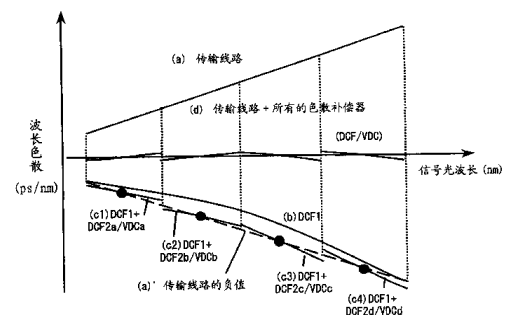
代理人 李 辉

权利要求书 2 页 说明书 26 页 附图 41 页

[54] 发明名称 色散补偿设备

[57] 摘要

提供一种色散补偿设备。为了在光信号整个波长频带上补偿色散和色散斜度，将波长频带分割成多个频带，并执行色散补偿以使每频带的中央波长中的色散为零。



1. 一种在波长分割复用光传输系统中使用的色散补偿设备，包括：  
频带分割单元，将波长分割复用光信号分割成多个波长频带；和  
5 固定色散补偿单元，为分割后的波长分割复用光信号执行剩余色散  
补偿。
2. 一种在波长分割复用光传输系统中使用的色散补偿设备，包括：  
频带分割单元，将波长分割复用光信号分割成多个波长频带；和  
可变色散补偿单元，为分割后的波长分割复用光信号同时执行补偿。
- 10 3. 根据权利要求 1 或 2 的色散补偿设备，还包括：  
交织单元，设置在所述频带分割单元的前级，分离波长分割复用光  
信号，并将波长分割复用光信号转换成多个信道间隔变宽的光信号。
4. 一种在波长分割复用光传输系统中使用的色散补偿设备，包括：  
可变色散补偿单元，为波长复用光信号的整个或者部分同时执行色  
15 散补偿；  
光分割单元，分割波长复用光信号；和  
固定色散补偿单元，补偿每个分割信道的光信号的剩余色散。
5. 根据权利要求 4 的色散补偿设备，其中所述光分割单元将波长分  
割复用光信号分割成多个波长频带。
- 20 6. 根据权利要求 4 的色散补偿设备，其中所述光分割单元将波长复  
用光信号分割成各个信道的光信号。
7. 根据权利要求 1、2 或 4 的色散补偿设备，被设置在一个光接收  
机内。
8. 根据权利要求 1、2 或 4 的色散补偿设备，被设置在一个线内放  
25 大器内。
9. 根据权利要求 1、2 或 4 的色散补偿设备，其中线内色散补偿为  
一个接收到的波长复用光信号所经受的色散执行 105%至 120%的补偿。
10. 一种在波长复用光传输系统中使用的色散补偿设备，包括：  
频带分割单元，将波长分割复用光信号分割成多个波长频带；和

色散补偿单元，降低各个分割后波长频带的频带之间的剩余色散差值。

11. 根据权利要求 10 的色散补偿设备，其中所述色散补偿单元是一个固定色散补偿器。

5 12. 根据权利要求 10 的色散补偿设备，其中所述色散补偿单元是一个可变色散补偿器。

13. 根据权利要求 10 的色散补偿设备，被设置在一个线内放大器内。

14. 根据权利要求 10 的色散补偿设备，还包括：

10 同时色散补偿单元，用于同时为一个输入波长分割复用光信号执行色散补偿，其中所述同时色散补偿单元为一个接收到的波长分割复用光信号所经受的每跨距的色散执行 105% 到 120% 的线内补偿。

15. 一种使用根据权利要求 10 的色散补偿设备的波长复用光传输系统，是一个包括色散补偿设备的线内放大器和不包括色散补偿设备的线内放大器的混合系统。

15 16. 根据权利要求 13 的色散补偿设备，其中光放大器设置在线内放大器内的色散补偿设备的前级或后级。

17. 根据权利要求 10 的色散补偿设备，其中为各个分割波长频带设置一个使用色散补偿光纤作为拉曼放大介质的光放大器。

18. 一种在多跨距光传输系统中使用的色散补偿设备，包括：

20 色散补偿单元，在每个线内放大器中为每个跨距的色散量执行 105% 至 120% 的过补偿。

19. 根据权利要求 18 的色散补偿设备，其中执行补偿以使多跨距光传输系统内光接收机上的总色散量接近于零。

25 20. 根据权利要求 19 的色散补偿设备，其中根据波长分割复用光信号的中央信道的每跨距色散量信息来设置每个线内放大器内和接收机侧上的色散补偿量。

## 色散补偿设备

## 5 技术领域

本发明涉及一种色散补偿设备，用于进一步提高光通信系统的容量、速度和距离。

## 背景技术

10 近年来，随着网络使用量的迅速增加，需要进一步提高网络的系统容量。现在，基于每信道 10Gb/s 传输速率的波长复用(WDM)光传输系统已经投入实际使用。今后，预计需要进一步提高容量，并且从频率使用效率和成本的观念来看，需要每信道 40Gb/s 或更快的超高速传输系统。在超高速传输系统中，必须非常准确地补偿传输线路色散所导致的波长  
15 衰减。

在传输速率为 10Gb/s 或更快的光传输系统中，色散容限非常小。例如，40Gb/s NRZ 系统的色散容限等于或小于 100ps/nm。同时，对于陆地光传输系统来说，跨距长度并不总是统一的。在使用一条大约 17 ps/nm/km 的 1.3 m 零色散单模光纤(SMF)的系统的情况下，即使长度仅相差几公里，  
20 也将超过色散容限。然而，当前在通信公司的光纤网络内，并不能准确地掌握大多数的跨距长度和色散值。另外，因为色散值根据光纤温度、应力等随时间而变化，所以不仅在系统操作开始时，而且在系统使用时都必须严格监视色散量以调整每跨距的色散补偿量。例如，当在 500 公里 DSF(色散偏移光纤)传输线上出现 100 度的温度变化时，其色散变化量  
25 变为约 105 ps/nm，几乎等于 40Gb/s NRZ 信号的色散容限。

(色散改变量) = (零色散波长的温度相关性) × (传输线路的温度变化量) × (传输线路的色散斜度) × (传输距离)

$$= 0.03(\text{nm}/^{\circ}\text{C}) \times 100(^{\circ}\text{C}) \times 0.07(\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}) \times 500(\text{km})$$

$$=105 \text{ ps/nm}$$

因此，对于使用 SMF 传输线路、以及 1.55  $\mu\text{m}$  零色散偏移光纤 (DSF) 或 NZ-DSF 传输线路的系统，必须执行自动色散补偿。

而且，当传输波长分割复用 (WDM) 信号时，必须考虑色散斜度和色散。

图 1 示范性地图示一个 WDM 传输系统的结构。图 2 图示各种变化因素导致的传输线路色散量的变化。

在图 1 所示的结构中，各个波长的光信号从发送终端设备的光发射机 #1 至 #n 发送，并由光复用器耦合。复用光信号由光后置放大器放大并输出。当光后置放大器执行光信号放大处理时，由发射机内的传输色散补偿器为光信号执行色散补偿，该色散补偿量是固定的或可变的。在一条光纤传输线路上传播的光信号被放大，以便由光线内放大器 (optical inline amplifier) 补偿传输线路损耗，所述光线内放大器位于光纤传输线路的中途。另外，当光线内放大器放大时，由一个线内色散补偿器补偿因在传输线路上传播导致光信号所经受的色散。线内色散补偿器的色散补偿量是固定的，或者是可变的。然后，光信号在光纤传输线路上经一个线内放大器传播，并输入一个光接收机。

在光接收机内，放大所传播的光信号以补偿其衰减。同时，接收机内的接收色散补偿器执行接收机侧的色散补偿。然后，光解复用器将所传播的光信号分离成相应波长。例如，可变色散补偿器从解复用波长的光信号中消除剩余色散，随后这些信号由光接收机 #1 至 #n 接收。在此，用括号将可变色散补偿器括起来的原因是它们并非总是必需的。是否包括可变色散补偿器可由设计者根据设计的具体情况来决定。如果在随后的结构图中也出现用括号括起来的组成部件，这意味着根据设计者的设计，该组成部件并不总是必需的。

对于光信号色散的温度变化，如图 2 所示，根据零色散波长中的温度变化 (大约  $0.03\text{nm}/^\circ\text{C}$ )，色散特性从 (a) 变化到 (c)。在这种情况下，色散斜度并不改变。另外，如果传输距离不同，色散特性从 (a) 变化到 (b)。在这种情况下，色散斜度也随着色散量变化。对于一条实际的传输线路

光纤(和一条色散补偿光纤(DCF)),即使传输线路的长度相同,由于光纤制造能力的原因,色散值((a)→(c))和色散斜度((a)→(d))也有变化。

作为色散和色散斜度的补偿方法,考虑下述方法:

5 (a)实现一个宽带可变色散补偿器,能够独立地改变色散量和色散斜度量,并为所有波长的信号同时执行色散补偿。

(b)独立地设置一个能够改变色散量的宽带可变色散补偿器和一个能够改变色散斜度量的宽带可变色散斜度补偿器,并同时为所有波长的信号共同执行色散补偿。

10 (c)独立地设置一个能够改变色散量的宽带可变色散补偿器和一个其他色散斜度量补偿了传输线路斜度量的固定色散斜度补偿器,并同时为所有波长的信号执行色散补偿。

(d)分别为每条信道设置一个能够改变色散量的可变色散补偿器,并执行色散补偿。

在方法(a)至(d)中,关键在于可变色散补偿器的可实现性。

15 图3图示作为一个可变色散补偿器例子的VIPA(虚成像相位阵)。作为与VIPA有关的文献,请参考M.Sirasaki等人的“40Gbits/s WDM传输系统用的使用虚成像相控阵(VIPA)的可变色散补偿器(Variable Dispersion Compensator Using the Virtually Imaged Phased Array(VIPA) for 40-Gbit/s WDM Transmission System)”, ECOC 2000,  
20 截止期限之后的论文 2.3.,等。

在使用VIPA的色散补偿器中,通过在x轴方向上移动三维镜,色散补偿量可以在-800 ps/nm到+800 ps/nm的范围内连续变化。

图4图示VIPA可变色散补偿器的透射比特性和群延迟特性。

25 在该图上部图示的透射比特性显示了VIPA中透射比的周期波长相关性。因此,必须进行设计以便波长复用光(WDM光)的各个波长的光信号通过透射比的高通部,即透射比窗口。另外,群延迟图表示群延迟被周期性地提供给光信号。该图说明在透射比窗口开启部分中群延迟的斜度在右侧递减,并将负色散提供给通过窗口的光信号。

例如,VIPA被设计得具有一个循环结构,其中透射比特性具有

200GHz (波长间隔为 1.6nm) 的频率间隔 (自由光谱范围: FSR), 并有利地同时补偿一个 WDM 信号。然而, VIPA 不能补偿色散斜度。日本专利申请 JP 2000-238349 提出了一种通过组合 VIPA 色散补偿器和色散补偿光纤以共同补偿色散和色散斜度来实现的系统。

5 图 5 图示在信道通频带内 VIPA 可变色散补偿器的群延迟特性。

在图 5 上部图示的使用 VIPA 的可变色散补偿器中, 通过在 x 轴方向上移动三维镜获得图 5 下部中图示的群延迟斜度上的变化。通过群延迟的波长的微分来获得色散。因此, 通过移动三维镜, 能够为所有信道频带根据需要改变和执行同时色散补偿。

10 图 6 示范性地图示根据一种常规技术的光接收机的结构。

在该图图示的结构例子中, 包括一个 DCF, 其色散斜度量 (传输线路的色散斜度) 用于补偿传输线路的色散斜度。而且, 使用一个 VIPA 可变色散补偿器同时补偿传输线路和 DCF 所导致的色散。如图 4 所示, VIPA 具有 200GHz 间隔的周期性结构以确保传输频带。在当前的密集 WDM 传输  
15 系统中, 需要 100GHz 的信道间隔 (0.8nm 的波长间隔)。因此, 在图 6 中, 使用交织器将 100GHz 间隔的接收信号分离成 200GHz 间隔的偶数和奇数信道, 并通过分别为偶数和奇数信道设置 VIPA 色散补偿器来同时进行色散补偿。如图 7 所示, 交织器的透射窗口以预定的周期开启 (在该情况下为 200GHz)。该图中所示的实线是用于提取奇数信道的窗口, 而该图中图  
20 示的虚线是用于提取偶数信道的窗口。如上所述, 交织器交替地抽样一个波长复用光信号, 并将光信号分离成奇数信道和偶数信道, 使得分离之后光信号的信道间隔变宽。

然而, 这种结构存在传输线路和 DCF 的色散斜度的波长相关性所导致的问题, 进而导致同时色散补偿上的难度。

25 图 8 图示光纤传输线路上色散特性的典型例子。

主要在 DCF 上, 由于制造问题出现因色散斜度的波长相关性所导致的色散曲线 (然而, 在传输光纤上存在一个近乎线性的色散特性)。因此, 因色散斜度的波长相关性所导致的剩余色散出现在传输线路和 DCF 上。在远程传输中, 这个剩余色散变成一个超过 40Gb/s 信号的色散容限的值。

因此，使用图 6 的结构进行同时补偿是很困难的。

使用一个色散监视器来检测传输线路所经历的色散量(和斜度量)对于实现自动色散补偿系统也是很重要的。

作为一个色散监视器方法的例子，存在一种使用所接收基带信号内  
5 特定频率分量强度的方法。

图 9 图示 40Gb/s NRZ 信号的所接收基带信号内一个 40GHz 分量的强度的检测结果。

资料来源：Y. Akiyama 等人，“通过多个信号波长之间无缝隙切换的 40Gbit/s 传输的自动色散均衡(Automatic Dispersion Equalization  
10 in 40 Gbit/s Transmission by Seamless-switching between Multiple Signal Wavelengths)”，ECOC' 99, pp.1-150-151。

如从左侧的计算结果可以看出的，40GHz 分量的强度随着色散量而变化，并在色散量为零时变成零。在右侧的 100 公里 DSF 传输的实验结果中，传输线路的色散量随着波长变化。因此，以类似于计算结果的方式  
15 获得 40GHz 分量的强度特性。传输线路的零色散波长以大约 0.03nm/°C 随着传输线路温度变化而变化。然而，可以证明 40GHz 分量的强度监视器的最小点也随着这一变化而改变。众所周知，B Hz 分量的强度可用作 B b/s 调制信号以及其它调制方法的色散监视器。众所周知，例如，当色散为零时，B Hz 分量的强度变成一个 RZ 信号的最大值，并变成一个  
20 OTDM 信号的最小值(日本专利申请 JP-平-9-224056)。

作为另外一种方法，考虑一个监视由每个光接收机所检测的误比特率特性或 Q 值的方法。

为了在波长复用系统内实现一个低成本色散监视器，设置一个色散监视器的方法是很重要的。例如，在图 2 所示的(a)或(b)的情况下，如  
25 果能够检测到至少两个信号的色散量，所述信号例如是信号波长频带两端的波长的信号，则可以通过外推法获得色散斜度，并能够检测不同信号波长的色散量。

另外，在(c)的情况下，传输线路的色散斜度量并不随着温度而变化。因此，如果能够检测到信号波长频带的诸如中央波长信号等的至少一个

信号的色散量，则根据该色散量和已知的色散斜度量能够检测不同信号波长的色散量。

同样在(d)的情况下，如果在色散斜度量(或者传输线路长度)已知时能够检测至少一个波长信号的色散值，或者如果在色散斜度量未知时能够检测至少两个波长信号的色散值，可以通过外推法检测不同信号波长的色散量。

上述常规技术的问题总结如下。

在传输速率 10Gb/s 或更快的光传输系统中，色散容限非常小。例如，40Gb/s NRZ 系统的色散容限大约等于 100ps/nm 或更小。同时，对于传输线路的色散，存在下述变化因素。如果发送波长分割多路复用(WDM)信号，则不仅必须考虑色散，而且必须考虑色散斜度。

#### (1) 传输线路长度的不同

对于陆地光传输系统，其跨距长度并不总是统一的。在使用大约 17ps/nm/km 的 1.3 m 零色散单模光纤(SMF)的系统的情况下，即使长度仅相差若干公里也将超过色散容限。然而，在通信公司所拥有的光纤网络内，当前并不能准确地掌握大多数跨距长度和色散值。如图 2 所示，如果传输距离不同，色散特性从(a)变化到(b)。在这种情况下，色散斜度以及色散量都改变。

#### (2) 色散补偿光纤(DCF)的斜度补偿比的不完整

为了同时为波长复用信号执行色散补偿和色散斜度补偿，必须使用其色散斜度率(色散斜度系数/色散系数)匹配于传输线路的色散补偿光纤(DCF)。然而，尤其对于色散系数较小的 NZDSF 光纤(例如增强 LEAF、TrueWave Plus、TrueWave Classic 等)，可制造的 DCF 仅仅是其斜度补偿比低到 50%到 60%的 DCF。

图 10 图示由于色散斜度变化导致的传输线路上色散的波动。

在该图中，为了 100%地补偿传输线路的色散斜度特性(a)，匹配其相反符号特性(a)' 的 DCF 是最理想的。然而，实际上无法获得与(a)' 一样高的斜度补偿比，该比值事实上类似于(b)。因此，用(c)表示的剩余色散出现在传输线路和 DCF 上。

(3) 传输线路光纤和色散补偿光纤(DCF)的色散系数和色散斜度系数的制造变化

因为传输线路和色散补偿光纤(DCF)的色散补偿系数(每单位长度的色散量, 单位是 ps/nm/km)和色散斜度系数(每单位长度的色散斜度, 单位是 ps/nm<sup>2</sup>/km)达到制造精度的极限, 它们具有较大的变化。因此, 如图 2 所示, 即使传输线路和 DCF 的长度相同, 色散量(单位为 ps/nm, (a)→(c), -(a)→(b)')和色散斜度量(单位是 ps/nm<sup>2</sup>, (a)→(d), -(a)→(d)')也不同。

(4) 光纤的零色散波长的温度变化

因为传输线路光纤的零色散波长根据温度随着时间改变, 所以在系统操作开始时和系统使用过程中严格监视色散量时, 必须合理设置每个跨距的色散补偿量。

例如, 如果在 600 公里的传输线路上出现 100°C 的温度变化, 色散改变量变成大约 108 ps/nm, 这几乎等于 40Gb/s NRZ 信号的色散容限。

(色散变化量) = (零色散波长的温度相关性) × (传输线路的温度变化量) × (传输线路的色散斜度) × (传输距离)

$$\begin{aligned} &= 0.03 (\text{nm}/^\circ\text{C}) \times 100^\circ\text{C} \times 0.06 (\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}) \times 600 (\text{km}) \\ &= 108 \text{ps}/\text{nm} \end{aligned}$$

在图 2 中, 由于零色散波长的温度变化(大约 0.03nm/°C)导致色散特性由(a)变化为(c)。在这种情况下, 色散斜度并不变化。

(5) 传输线路光纤和 DCF 的波长相关性的影响

如图 8 所示, 由于与传输线路主要是 DCF(传输光纤具有几乎线性的补偿特性)有关的设计原理的问题, 出现由于色散斜度的波长相关性产生的色散曲线。因此, 在传输线路和 DCF 上出现由于色散斜度的波长相关性导致的剩余色散。在远程传输中, 该剩余色散变成一个超过 40Gb/s 信号的色散容限的很大的值。当为所有信道同时执行色散补偿时, 这变成一个严重的问题。

根据一种已知技术的方法如下。必须使用可变色散补偿器以克服(4)中随着时间变化的色散波动。作为一个可变色散补偿器的例子, 存在图 3

所示的 VIPA。作为设置可变色散补偿器的方法，存在通过包括一个斜度补偿功能来同时为所有信道执行补偿的方法和通过组合一个可变或固定色散斜度补偿器来同时为所有信道执行补偿的方法，或者考虑为每条信道设置一个可变色散补偿器的方法(参见日本专利申请 JP 2000-238349)。

5

### 发明概述

本发明的一个目的是提供一种以可能最低的成本尽可能地最小化剩余色散的色散补偿设备及其结构配置。

根据本发明的第一色散补偿设备，在波长复用光传输系统中，包括：  
10 一个频带分割单元，将波长复用光信号分割成多个波长频带；和一个固定色散补偿单元，为分割后的波长复用光信号执行剩余色散补偿。

根据本发明的第二色散补偿设备，在波长复用光传输系统中，包括：  
一个频带分割单元，将波长复用光信号分割成多个波长频带；和一个可  
变色散补偿单元，为分割后的波长复用光信号同时执行补偿。

15 根据本发明的第三色散补偿设备，在波长复用光传输系统中，包括：  
一个可变色散补偿单元，为波长复用光信号的整个或者部分同时执行色  
散补偿；一个光分割单元，分割波长复用光信号；和一个固定色散补偿  
单元，为每个分割信道的光信号执行剩余色散补偿。

根据本发明的第四色散补偿设备，在波长复用光传输系统中，包括：  
20 一个频带分割单元，将波长复用光信号分割成多个波长频带；和一个色  
散补偿单元，降低各个分割波长频带的频带之间的剩余色散差值。

根据本发明的第五色散补偿设备，在多跨距光传输系统中，包括：  
一个色散补偿单元，在跨距之后的每个线内放大器中为每个跨距的色散  
量执行 105% 至 120% 的过补偿。

25 根据本发明，可以低成本地提供一个高效的色散补偿设备及其方法。

### 附图简要说明

图 1 示范性地图示波长复用传输系统的结构；

图 2 图示由于各种变化因素导致的传输线路色散量的变化；

- 图 3 图示作为一个可变色散补偿器的例子的 VIPA (虚成像相控阵);
- 图 4 图示 VIPA 可变色散补偿器的透射比特性和群延迟特性;
- 图 5 图示 VIPA 可变色散补偿器的群延迟特性;
- 图 6 示范性地图示常规技术的光接收机的结构;
- 5 图 7 解释交织器的操作;
- 图 8 图示光纤传输线路上色散特性的一个典型例子;
- 图 9 图示 40Gb/s NRZ 信号的接收基带信号内 40GHz 分量强度的检测结果;
- 图 10 图示由于色散斜度变化导致传输线路上的色散波动;
- 10 图 11 解释根据本发明优选实施例的原理;
- 图 12 示范性地图示实现根据本发明优选实施例的第一种结构;
- 图 13 示范性地图示根据本发明优选实施例的第二种结构;
- 图 14 示范性地图示根据本发明优选实施例的第三种结构;
- 图 15 示范性地图示根据本发明优选实施例的第四种结构;
- 15 图 16 示范性地图示根据本发明优选实施例的第五种结构;
- 图 17 示范性地图示根据本发明优选实施例的第六种结构;
- 图 18 解释根据本发明另一优选实施例的色散补偿方法;
- 图 19 示范性地图示根据本发明另一优选实施例的第七种结构;
- 图 20 示范性地图示根据本发明优选实施例的第八种结构;
- 20 图 21 示范性地图示根据本发明优选实施例的第九种结构;
- 图 22 示范性地图示根据本发明优选实施例的第十种结构;
- 图 23 示范性地图示根据本发明优选实施例的第十一种结构;
- 图 24 示范性地图示根据本发明优选实施例的第十二种结构;
- 图 25A 和 25B 图示在将根据本发明的优选实施例应用于一个线内放
- 25 大器的情况下的原理结构;
- 图 26 解释根据本发明优选实施例的色散补偿方法的原理 (No. 1);
- 图 27 解释根据本发明优选实施例的色散补偿方法的原理 (No. 2);
- 图 28A 和图 28B 图示与图 25 相对应的用可变色散补偿器替代用于各

波长频带的固定色散补偿器情况下的结构；

图 29A 和图 29B 示范性地图示在进行波长频带分割补偿的情况下一个具体的线内放大器的结构 (No. 1)；

5 图 30A 和图 30B 示范性地图示在进行波长频带分割补偿的情况下一个具体的线内放大器的结构 (No. 2)；

图 31A 和图 31B 示范性地图示在进行波长频带分割补偿的情况下一个具体的线内放大器的结构 (No. 3)；

图 32A 和图 32B 示范性地图示在进行波长频带分割补偿的情况下一个具体的线内放大器的结构 (No. 4)；

10 图 33A 和图 33B 示范性地图示在进行波长频带分割补偿的情况下一个具体的线内放大器的结构 (No. 5)；

图 34 示范性地图示使用图 29 至图 33 所示执行频带分割补偿的线内放大器的系统的结构 (No. 1)；

15 图 35 示范性地图示使用图 29 至图 33 所示执行频带分割补偿的线内放大器的系统的结构 (No. 2)；

图 36 示范性地图示使用图 29 至图 33 所示执行频带分割补偿的线内放大器的系统的结构 (No. 3)；

图 37A 至图 37C 图示在 600 公里 SMF 传输中线内色散补偿比  $D_{\text{DCL}}=100\%$  和 114% 的情况下剩余色散的 Q 损失 (Q penalty)；

20 图 38 图示在 600 公里 SMF 传输中通过在接收机侧上调整色散补偿量使剩余色散为零的情况下的 Q 损失和线内剩余色散量的特性；

图 39 示范性地图示与优化线内色散补偿量的优选实施例相对应的第一种结构；

图 40 图示图 39 所示结构的又一个具体例子；和

25 图 41 示范性地图示通过组合频带分割色散补偿和线内过补偿实现的结构。

### 优选实施例的描述

在根据本发明的优选实施例中，如果由于传输线路和 DCF 的色散斜

度的波长相关性导致的剩余色散过大而不可忽略，则通过将一 个波长频带分割成预定频带来执行色散补偿。

图 11 解释根据本发明优选实施例的原理。

例如，在图 11 所示的(a)传输线路和(b)DCF1 的剩余色散特性的情 况下(为所有信道同时补偿)，一个波长复用信号被解复用成多个波长频带(在该图中为 4 个频带)，通过为每个波长频带设置(c)固定色散补偿器(DCF)或可变色散补偿器(VDC)来精细地调整色散补偿量，从而能够将所有信道的剩余色散降低到一个很小的值(d)。在该图中，把预定量的色散给予波长频带内的所有信道，使得为每个波长频带的中央波长执行 100 %的色散补偿。如果使用一个固定色散补偿器来执行精细调整，必须通过预先测量一条传输线路的色散特性(或者掌握作为光纤特有特性的色散偏移量)来确定固定色散补偿量。然而，如果由于温度变化导致传输线路的色散随着时间改变，则所有信道的色散量在相同方向上变化。因此，可以通过改变同时使用的可变色散补偿器来维持补偿状态。

下面的所有结构图示所发送波长复用信号的波长间隔是 100GHz(大约 0.8nm)的情况下的例子。另外，仅图示一个光接收机内色散补偿器的结构例子。然而，在线内放大器或发射机侧的站内设置一个色散补偿器的情况下也可以进行类似的配置。

图 12 示范性地图示实现根据本发明优选实施例的第一种结构；

在这个结构例子中，在使用 DCF1 和可变色散补偿器为 100GHz 间隔的所有信道同时执行色散补偿之后，使用一个交织器将波长间隔分离成 200GHz(大约 1.6nm)的间隔。然后，通过频带分割滤光器将波长频带分别分割成 n 个波长频带，并在每个波长频带内使用一个固定色散补偿器来执行精细调整。

首先，在光纤传输线路 10 上传播的波长复用光信号被光前置放大器 11 放大，所述光前置放大器是图 12 所示的接收机，同时，其色散斜度由 DCF1 补偿。然后，100GHz 间隔的光信号输入给可变色散补偿器 12，它为所有的波长同时执行色散补偿。接着，由交织器 13 将 100GHz 间隔的光信号分离成偶数信道和奇数信道，从而将光信号转换成 200GHz 间隔的光

信号。光信号分别输入给频带分割滤光器 14-1 和 14-2，分别将它们的波长频带分割成  $n$  个频带。由用于一阶色散精细调整的 DCF 15 补偿各个频带内的剩余色散之后，这些信号被解复用成各个信道的光信号，并分别由光接收机 #1 至 #40 接收。

5       在此，光接收机数量是 40。这是因为图 12 假设复用波长的数量为 40。然而，复用波长的数量并不仅限于这个数值。但是，必须依据复用波长数量设置光接收机的数量。在下面的结构例子的解释中，这也是类似的。

在此，输入频带分割滤光器 14-1 的光信号是奇数信道信号，而输入  
10 频带分割滤光器 14-2 的光信号是偶数信道信号。频带分割滤光器由诸如 JDS Uniphase、OPlink、Dicon、Avanex、HD 光纤系统和 Chorum 等公司销售。

图 13 示范性地图示根据本发明优选实施例的第二种结构。

与图 12 不同，图 13 图示在波长间隔分离成 200GHz 间隔之后设置用  
15 于 200GHz 间隔的可变色散补偿器的结构。

在光纤传输线路 10 上传播的光信号被光前置放大器 11 放大，同时，其色散斜度由 DCF1 补偿。光信号随后输入给交织器 13，它将 100GHz 间隔的波长复用光信号抽样为 200GHz 间隔的光信号，并将奇数和偶数信道分别发送给用于 200GHz 间隔的可变色散补偿器 12-1 和 12-2。可变色散  
20 补偿器 12-1 和 12-2 分别为输入光信号执行色散补偿处理，并将信号输入给频带分割滤光器 14-1 和 14-2。频带分割滤光器 14-1 和 14-2 将抽样后的光信号分割成  $n$  个频带。然后，由 DCF15 为各个频带执行一阶色散的精细调整。被执行精细调整的各个频带的光信号由光解复用器 16 解复用成各个信道的光信号，并由光接收机 #1 至 #40 接收。

25       图 14 示范性地图示根据本发明优选实施例的第三种结构。

与图 13 不同，图 14 图示这样的结构，使用二级交织器将波长间隔分离成 400GHz (大约 3.2nm) 间隔，然后由频带分割滤光器将光信号分割成  $n$  个波长频带，并由固定色散补偿器为各个波长频带执行精细调整。频带分割滤光器因其特性而在分割波长位置上具有保护频带(无透射的

波长范围)。通过由交织器加宽一个信号光波长的波长间隔,放松了对频带分割滤光器的要求(即使保护频带很宽,不能传输的信道数量变成零或被降低)。还可以实现这样一种结构,其中进一步增加交织器的级数以加宽波长间隔。

5 在光纤传输线路 10 上传播的光信号由光前置放大器放大,同时,其色散斜度由 DCF1 补偿。光信号随后由交织器 13 分离成奇数和偶数信道。结果,光信号的波长间隔从 100GHz 变化到 200GHz。然后,200GHz 间隔的光信号的色散由可变色散补偿器 12-1 和 12-2 补偿。交织器 20-1 和 20-2 进一步将 200GHz 间隔的光信号抽样成 400GHz 间隔的光信号,它们分别  
10 被输入给频带分割滤光器 14-1 至 14-4。频带分割滤光器 14-1 至 14-4 将输入信号的频带分割成  $n$  个频带。然后,DCF 15 为各个频带执行一阶色散补偿的精细调整,并将信号输入给光解复用器 16。由光解复用器 16 解复用成各条信道的光信号分别由光接收机 #1 至 #40 接收。如上所述,在分割频带之前加宽光信号的波长间隔降低了在分割频带时光信号出现  
15 在频带边界上的概率。因此,这在消除因频带分割损失光信号的意义上是很有有效的。

图 15 示范性地图示根据本发明优选实施例的第四种结构。

与图 14 不同,图 15 图示在由频带分割滤光器后面的交织器组合相同波长频带的信号之后,由固定色散补偿器执行精细调整的结构。使用  
20 这种结构,能够降低精细调整所需要的固定色散补偿的数量。

在光纤传输线路 10 上传播的波长复用信号由光前置放大器 11 放大,同时,其色散斜度由 DCF1 补偿。然后,由交织器 13 抽样光信号,并且信道间隔为原始波长复用光信号的信道间隔(100GHz)两倍(200GHz)的光信号被分别输入给可变色散补偿器 12-1 和 12-2。在由可变色散补偿器  
25 12-1 和 12-2 为光信号执行色散补偿之后,这些信号由交织器 20-1 和 20-2 进一步抽样。这些信号变成信道间隔为原始波长复用光信号的波长间隔(100GHz)四倍(400GHz)的信号,并被输入到频带分割滤光器 14-1 至 14-4。

频带分割滤光器 14-1 至 14-4 分别将输入光信号分割成  $n$  个频带,然后,由各级上的交织器 21a-1 至 21b- $n$  和 22-1 至 22- $n$  组合相同波长

频带的光信号，并由 DCF15 为各个频带执行一阶色散补偿的精细调整。在执行精细调整之后，光信号被输入给光解复用器 16，它将这些信号解复用成各条信道。这些信号随后由光接收机 #1 至 #40 接收。

图 16 示范性地图示根据本发明优选实施例的第五种结构。

- 5       在这个结构例子中，在由 DCF1 同时为所有信道执行补偿之后，频带分割滤光器将光信号分割成  $n$  个波长频带，固定色散补偿器为各个波长频带执行精细调整，并在由频带耦合滤光器耦合光信号之后设置可变色散补偿器。

10       在光纤传输线路 10 上传输的光信号由光前置放大器 11 放大，同时由 DCF1 补偿其色散斜度。然后，由交织器 13 抽样波长复用光信号，并且 200GHz 间隔的光信号被输入给频带分割滤光器 14a-1 和 14a-2。频带分割滤光器 14a-1 和 14a-2 分别将光信号分割成  $n$  个频带，并将信号输入给用于各个频带的 DCF 15。然后，DCF 15 执行一阶色散补偿的精细调整。执行精细调整之后的光信号被输入给频带耦合滤光器 14b-1 和 14b-2，  
15       由其耦合相应频带并将耦合信号输入给可变色散补偿器 12-1 和 12-2。可变色散补偿器 12-1 和 12-2 执行色散补偿。光解复用器 16 将光信号解复用成各条信道，并由光接收机 #1 至 #40 接收。

图 17 示范性地图示根据本发明优选实施例的第六种结构。

20       与图 16 不同，图 17 所图示的结构使用两级交织器将波长间隔分离成 400GHz (大约 3.2nm) 间隔，由频带分割滤光器将光信号分割成  $n$  个波长频带，由固定色散补偿器为每个波长频带执行精细调整，并在频带耦合滤光器耦合波长频带信号之后设置可变色散补偿器。尽管增加了可变色散补偿器的数量，但是降低了对频带分割滤光器的不透射波长频带的要求。

25       在光纤传输线路 10 上传播的光信号由光前置放大器 11 放大，同时，由 DCF1 补偿其色散斜度。然后，由交织器 13 抽样光信号，并将其分离成 200GHz 间隔的奇数信道和偶数信道。如此分离后的各奇数信道和偶数信道由交织器 20-1 和 20-2 进一步分离成偶数信道和奇数信道，并输入给频带分割滤光器 14a-1 至 14a-4。

频带分割滤光器 14a-1 至 14a-4 将各个光信号分割成  $n$  个频带，并将各个频带的光信号输入给用于一阶色散补偿精细调整的 DCF 15，由其执行色散补偿的精细调整。然后，精细调整后的光信号由频带耦合滤光器 14b-1 至 14b-4 耦合。随后由可变色散补偿器 12-1 至 12-4 为光信号  
5 执行色散补偿。由光解复用器 16 将可变色散补偿器 12-1 至 12-4 的输出解复用成各条信道，并由光接收机 #1 至 #40 接收。

图 18 解释根据本发明另一优选实施例的色散补偿方法。

该图图示在与图 1 类似的 (a) 传输线路和 (b) DCF1 (同时补偿所有信道) 的剩余色散特性的情况下的另一种色散补偿方法。设置多条 (在该图  
10 中为 4 个) 色散补偿光纤 (固定色散补偿器)，并为其长度执行精细调整，从而消除了传输线路、DCF1 和 DCFs2 (a, b, ……) 的色散斜度。而且，通过为各个波长频带设置可变色散补偿器来同时补偿剩余色散，从而将所有信道的剩余色散降低到一个与图 11 所示的情况相比更小的值。因为以类似于图 11 所示的方式使用固定色散补偿器为色散斜度执行精细调  
15 整，因此必须预先测量传输线路的色散和色散斜度特性。如果此后由于温度变化导致传输线路的色散随着时间改变，则所有信道的色散量在同一方向上变化。因此，可以通过使共同使用的可变色散补偿器可变来维持补偿状态。

根据本发明的优选实施例，即使出现传输线路和 DCF 色散斜度的波长特性所导致的剩余色散，或者色散和色散斜度的变化很大，也能够  
20 在波长复用传输系统内低成本和小型化地为所有信道有效地执行色散补偿。因此，能够实现远程传输。

下面的结构例子是不仅能够实现图 18 所示原理也能够实现图 11 所示原理的一个结构例子。

25 图 19 示范性地图示根据本发明另一优选实施例的第七种结构。

该图图示了这样的结构，其中在 DCF1 同时为所有信道执行补偿之后，波长间隔被分离成 200GHz (大约 1.6nm) 间隔，频带分割滤光器将光信号分割成  $n$  个波长频带，并由可变色散补偿器为各个波长频带执行精细调整。需要其数量为波长频带数量两倍的可变色散补偿器。可以设置

一个为色散斜度补偿执行精细调整的固定色散补偿器以准确地如参考图 18 所述补偿色散和色散斜度。

在光纤传输线路 10 上传播的波长复用光信号由光前置放大器 11 放大，同时由 DCF1 补偿其色散斜度。然后，由交织器 13 将光信号分离成奇数和偶数信道，分离后的光信号被分别输入给频带分割滤光器 14-1 和 14-2。频带分割滤光器 14-1 和 14-2 将波长频带分割成  $n$  个频带，并输出光信号。DCF 30 用于为色散斜度补偿执行精细调整。然而，如果在接收侧不需要高精度的色散补偿，则可以不设置这些 DCF。将 DCF 30 放在括号内的原因是希望设置 DCF 30，但是如果不设置的话也可以。

在光信号通过 DCF 30 之后，由可变色散补偿器 12a-1 至 12a- $n$  为它们的各个频带执行色散补偿。光信号随后被发送给光解复用器 16，它们将光信号解复用成各条信道。各条信道的光信号由光接收机 #1 至 #40 接收。

图 20 示范性地图示根据本发明优选实施例的第八种结构。

与图 19 不同，图 20 图示这样的结构，其中使用两级交织器将波长间隔分离成 400GHz (大约 3.2nm) 的间隔，然后由频带分割滤光器将光信号分割成  $n$  个波长频带，并由可变色散补偿器为各个波长频带执行精细调整。需要其数量为波长频带数量四倍的可变色散补偿器。可以设置为色散斜度补偿进行精细调整的固定色散补偿器以准确地如参考图 18 所述补偿色散和色散斜度。

在光纤传输线路 10 上传播的光信号由光前置放大器 11 放大，同时由 DCF1 补偿其色散斜度。然后，交织器 13 将光信号分离成奇数和偶数信道。随后由下一级中的交织器 20-1 和 20-2 进一步抽样和分离光信号，并输入给频带分割滤光器 14-1 至 14-4。频带分割滤光器 14-1 至 14-4 将各个输入光信号分割成  $n$  个频带。由任意设置的 DCF 30 为分割信号的色散斜度补偿执行精细调整，并由可变色散补偿器 12a-1 至 12d- $n$  为信号执行色散补偿。然后，将光信号输入给光解复用器 16，由其将信号解复用成各条信道。随后由光接收机 #1 至 #40 接收这些光信号。

图 21 示范性地图示根据本发明优选实施例的第九种结构。

与图 20 不同, 图 21 图示这样的结构, 其中在交织器组合相同波长频带的信号之后, 由可变色散补偿器执行精细调整。使用这种结构, 能够降低可变色散补偿器的数量。在这个例子中, 可变色散补偿器的数量等于波长频带的数量。

5        在光纤传输线路 10 上传播的光信号由光前置放大器 11 放大, 同时, 由 DCF1 补偿其色散斜度。然后, 交织器 13 将光信号分离成奇数信道和偶数信道, 并且光信号被分别输入给频带分割滤光器 14-1 和 14-2。频带分割滤光器 14-1 和 14-2 将光信号的频带分割成  $n$  个频带, 并由交织器 21-1 至 21- $n$  组合频带分割滤光器 14-1 和 14-2 所分割频带之中相同频带  
10 的光信号。由任意设置的 DCF 30 为各个频带的色散斜度补偿执行精细调整。然后, 可变色散补偿器 12-1 至 12- $n$  执行色散补偿, 光解复用器 16 将光信号解复用成各条信道, 并由光接收机 #1 至 #40 接收。

图 22 示范性地图示根据本发明优选实施例的第十种结构。

与图 21 不同, 图 22 图示这样的结构, 其中在由频带分割滤光器之  
15 后的交织器组合相同波长频带的信号之后, 可变色散补偿器执行精细调整。使用这种结构, 能够减少可变色散补偿器的数量。在这个例子中, 需要其数量为波长频带数量两倍的 200GHz 可变色散补偿器。或者, 可以在交织器将相同波长频带的信号进一步组合成 100GHz 信号之后, 设置其数量等于波长频带数量的 100GHz 可变色散补偿器。

20        在传输线路上传播的光信号由光前置放大器 11 放大, 同时, 由 DCF1 补偿其色散斜度。然后, 由交织器 13 将光信号分离成奇数信道和偶数信道。交织器 20-1 和 20-2 进一步抽样和分离这些信号, 并分别将其输入给频带分割滤光器 14-1 至 14-4。频带分割滤光器 14-1 至 14-4 将输入光信号分离成  $n$  个频带。接着, 由交织器 21a-1 至 21b- $n$  组合相同频带的  
25 的光信号, 并由 DCF30 为各个频带的色散斜度补偿执行精细调整。然后, 由可变色散补偿器 12a-1 至 12b- $n$  为信号执行色散补偿。光解复用器 16 将光信号解复用成各条信道, 并由光接收机 #1 至 #40 接收。

图 23 示范性地图示根据本发明优选实施例的第十一种结构。

该图图示了这样的结构, 其中由 DCF1 和用于 100GHz 间隔的可变色

散补偿器为所有信道同时执行补偿，随后由光解复用器解复用所有信道，并由固定色散补偿器为各条信道执行精细调整。

在光纤传输线路 10 上传播的光信号由光前置放大器 11 放大，同时，由 DCF1 补偿其色散斜度。然后，由可变色散补偿器 12 为信号执行色散  
5 补偿。由光解复用器 16 将执行色散补偿之后的光信号解复用成各条信道。然后，由 DCF15 为各条信道执行一阶色散的精细调整，然后这些信号被光接收机 #1 至 #40 接收。

图 24 示范性地图示根据本发明优选实施例的第十二种结构。

与图 19 不同，该图图示这样的结构，其中在将波长间隔分离成  
10 200GHz 间隔之后设置用于 200GHz 间隔的可变色散补偿器。

在光纤传输线路 10 上传播的光信号由光前置放大器 11 放大，同时，由 DCF1 补偿其色散斜度。然后，交织器 13 将光信号抽样和分离成奇数和偶数信道。由可变色散补偿器 12-1 和 12-2 为各个光信号执行色散补偿，并由光解复用器 16 将这些信号解复用成各条信道。然后，由 DCF15  
15 为各条信道的光信号执行一阶色散的精细调整，并由光接收机 #1 至 #40 接收这些信号。

下面解释线内放大器内的色散补偿设备。

作为对上述(2)DCF 斜度补偿率的不完整性、(3)传输线路/DCF 斜度系数的制造变化和(5)色散斜度波长相关性的影响的解决方案，还使用将  
20 波长频带分离成多个频带进行补偿的方法。

图 25A 和 25B 图示根据本发明优选实施例应用于一个线内放大器的情况下的原理结构。图 26 和图 27 解释根据本发明优选实施例的色散补偿方法的原理。

图 25A 图示通过将波长频带分离成四个频带来执行补偿的基本结构  
25 (应用固定色散补偿器的情况)。在设置色散补偿器 DCF1(色散补偿量  $d_1$ )公用于所有的波长复用信号信道之后，频带分割滤光器 20-1 将信号分割成四个波长频带(从短波长一侧  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ ,  $\Lambda_3$  和  $\Lambda_4$ )。用于补偿频带之间剩余色散差值的 DCF2<sub>1</sub>、DCF2<sub>2</sub>、DCF2<sub>3</sub> 和 DCF2<sub>4</sub> 被设置在相应频带上。在每个跨距或多个跨距中，执行调整以便在图 26 所示的(a)传输线路和

(b) DCF1 的剩余色散特性的情况下, 由固定色散补偿器 DCF2<sub>1</sub>、DCF2<sub>2</sub>、DCF2<sub>3</sub> 和 DCF2<sub>4</sub> 在各个波长频带的中央波长上执行 100% 色散补偿。结果, 可以把所有信道的剩余色散减小到小值 (d)。不仅色散补偿光纤, 而且诸如啁啾光纤布拉格光栅 (CFBG) 和 VIPA 色散补偿器等各种类型的设备都可以用作色散补偿器。图 25B 图示不使用同时补偿所有信道的色散补偿器 DCF1 而仅使用为各个频带执行调整的多个色散补偿器的结构。其效果类似于图 25A 的情况。然而, 必须使用其色散补偿量同图 27 一样大的色散补偿器作为固定色散补偿器 DCF2<sub>1</sub>、DCF2<sub>2</sub>、DCF2<sub>3</sub> 和 DCF2<sub>4</sub>。

由频带分割滤光器 20-2 (尽管其名称是频带分割, 但是因为作为光学元件特性的光传播可逆性, 它也可以用作频带耦合元件) 耦合色散补偿后光信号的频带, 并输出频带耦合信号。

图 28 图示这样的结构, 与图 25A 和 25B 对应, 利用可变色散补偿器替换用于各个波长频带的固定色散补偿器。

如何设置色散补偿量与图 26 (图 28A 所示结构的情况) 和图 27 (图 28B 所示结构的情况) 相同。然而, 因为色散补偿量可变, 所以能够准确地执行色散补偿, 此外, 还能够解决由于传输线路等的温度变化导致色散量随着时间改变。

即, 在图 28A 中, 在色散补偿光纤 DCF1 为输入光信号执行色散补偿之后, 频带分割滤光器 20-1 将信号分割成相应频带  $\Lambda_1$  至  $\Lambda_4$ , 并将其输入给频带分割滤光器 20-2。频带分割滤光器 20-2 耦合被分割成相应频带并输入的光信号, 并作为一个频带的光信号输出耦合后的信号。图 28B 图示从图 28A 所示的结构中省去集中执行色散补偿的色散补偿光纤 DCF1 后的结构。

根据本发明的优选实施例, 即使传输线路和 DCF 的色散/色散斜度的制造变化很大, 或者 DCF 的斜度补偿比很小, 或者存在四阶色散导致的剩余色散, 也能够密集波长复用传输系统内低成本和小型化地为所有信道执行有效的色散补偿。因此, 能够实现远程传输。

图 29A 至 33B 示范性地图示在波长频带分割补偿的情况下一个线内放大器的具体结构。

在图 29A 中, 设置用于分布式拉曼放大的泵激光源 (pump light source) 25, 并在下一级中设置 EDFA 26, 使得光信号被放大。在使用色散补偿光纤 DCF1 同时执行色散补偿之后, 由频带分割滤光器 20-1 将一个波长频带分割成两个频带  $\Lambda_1$  和  $\Lambda_2$ 。由色散补偿光纤 DCF2 为频带之一执行进一步的色散补偿。对于频带  $\Lambda_1$ , 按照需要设置一个(可变或固定)光衰减器 27, 它提供一个与色散补偿光纤 DCF2 所产生光损耗几乎相等的损耗。在频带分割滤光器 20-2 耦合各个频带的光信号之后, 输出耦合信号, 并由 EDFA 28 放大, 然后输出到一条传输线路上。

图 29B 图示将波长频带分割成  $n$  个频带的结构。基本结构与图 29A 所示的结构相同。因此, 相同的构成元件用相同的参考数字表示, 省略关于此结构的解释。

图 29A 和 29B 示范性地图示由两极掺铒光纤放大器 (EDFA) 构成线内放大器的结构。根据情况执行改善光信号噪声比 (OSNR) 的分布式拉曼放大 (DRA)。图 29A 图示将一个波长频带分割成两个频带的结构。在该图中, 使用频带分割滤光器将一个波长频带分割成短波长侧的蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 和长波长侧的红频带 ( $\Lambda_2$ )。设置在频带分割滤光器的前级安装的色散补偿器 (DCF1) 以便在蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 的中央信道上最佳地补偿色散。因此, 色散补偿器未设置在蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 的光路上。然而, 根据需要在蓝频带的光路上插入可变或固定光衰减器, 用于提供与色散补偿器 DCF2 几乎相等的光损耗。假设传输线路光纤的色散斜度是  $S$  (ps/nm<sup>2</sup>/km), DCF 的斜度补偿比是  $\beta$  (0 至 1), 蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 和红频带 ( $\Lambda_2$ ) 的中央信道之间的波长差值是  $\Delta \lambda$  (nm), 每跨距的传输线路长度是  $L$  (km)。在这种情况下, 在每跨距上蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 和红频带 ( $\Lambda_2$ ) 的中央信道之间剩余色散差值变成  $S \cdot (1-\beta) \cdot \Delta \lambda \cdot L$ 。因此, 执行调整的 DCF 的色散补偿量可以设置如下:

$$\Delta d = -S \cdot (1-\beta) \cdot \Delta \lambda \cdot L。$$

图 29B 图示将波长频带分割成  $n$  个频带的进一步扩展的结构。波长频带被分割成从短波长侧到长波长侧的  $n$  个频带, 设置用于执行调整的色散补偿器 DCF2<sub>1</sub>、DCF2<sub>2</sub>、……、DCF2 <sub>$n-1$</sub>  和 DCF2 <sub>$n$</sub> , 用于在各个信号频带被分割之后优化其中的色散补偿量。各个色散补偿器的色散补偿量被设

置为  $0$ 、 $\Delta d$ 、 $\dots$ 、 $(n-2) \cdot \Delta d$ 、 $(n-1) \cdot \Delta d$ 。类似于图 29A， $\Delta d$  的数值可以设置如下： $\Delta d = -S \cdot (1 - \beta) \cdot \Delta \lambda \cdot L$  ( $\Delta \lambda$  是相邻波长频带的中央信道之间的波长差值)。在图 29A 和图 29B 中，根据需要设置一个用于补偿波长频带之间损耗差值的可变或固定光衰减器。

5 图 30A 和 30B 图示用可变色散补偿器替代图 29A 和图 29B 中用于各个波长频带的固定色散补偿器的结构。尽管设置色散补偿量的方法与图 29A 和图 29B 所示结构中的相同，但是色散补偿量是可变的。因此，优点在于能够实现更高精度的色散补偿，并且可以解决传输线路中温度变化导致色散量随着时间改变的问题。

10 在图 30A 中，在分布式拉曼放大(通过泵激光源 25 的放大)之后，通过 EDFA 26 执行放大，由 DCF1 优化蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 的色散补偿。然后，频带分割滤光器 20-1 分割波长频带。由可变色散补偿器 1 优化红频带 ( $\Lambda_2$ ) 的色散补偿。蓝频带路径上的光衰减器向蓝频带光信号提供与可变色散补偿器 1 的损耗基本上相等的损耗。这防止在通过频带分割滤光器耦合光信号时出现蓝频带和红频带光信号的光强度之间的差值。然后，频带分割滤光器 20-2 耦合并输出这些频带，由 EDFA 28 放大，然后输出到一条传输线路。

20 在图 30B 中，用可变色散补偿器替代图 29B 所示的 DCF。因为用于补偿频带  $\Lambda_1$  的可变色散补偿器的色散值是可变的，所以可以根据需要设置频带分割滤光器前级中的 DCF1。

除了分割频带的数量为  $n$  之外，图 30B 所示的结构类似于图 30A 所示的结构。因此，图 30A 中所示的相同组成元件用相同的参考数字来表示，将省略对它们的描述。

25 在图 31A 和 31B 中，与上述结构例子相同的组成元件用相同的参考数字表示，将省略对它们的描述。图 31A 和图 31B 示范性地图示由色散补偿光纤拉曼放大单元 30 (以下称作 DCFRA: 是使用 DCF 作为放大介质执行拉曼放大的放大单元。DCFRA 同时执行光放大和色散补偿) 和后一级上的 EDFA 28 组成的线内放大器的结构。如何分割波长频带信号和如何设置用于调整的色散补偿光纤与图 29A 和图 29B 所示的相同。DCFRA 30 位

于频带分割滤光器之前，并调整泵激光的功率和波长以提供所有波长频带 ( $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n$ ) 的增益。如图 31A 和图 31B 所示，DCFRA 30 的级数根据所需增益可以为 1、2 或更多。在图 31A 和图 31B 中，根据需要设置用于补偿波长频带之间损耗差值的可变或固定光衰减器。因为如上  
5 所述在频带分割滤光器的前级中执行频带  $\Lambda_1$  的色散补偿，所以可以不特别设置用于此频带的 DCF，而是在设计时根据需要设置。

在图 32A 和图 32B 中，与图 31A 和图 31B 相同的组成元件用相同的参考数字表示，将省略对它们的解释。图 32A 和图 32B 图示用可变色散补偿器替代图 31A 和图 31B 中用于各个波长频带的固定色散补偿器的结  
10 构。如何设置色散补偿量与图 31A 和 31B 所示结构中的相同。然而，色散补偿量是可变的。因此，能够实现更准确的色散补偿，此外，能够拒绝因为传输线路上温度变化导致色散量随着时间改变的问题。

在图 32A 中，由 DCF1 根据需要在前一级或和 DCF2 一起执行频带  $\Lambda_1$  的色散补偿。因此，仅设置一个可变或固定光衰减器。

15 在图 32B 中，在频带  $\Lambda_1$  的路径上设置可变色散补偿器 1。因此，如果光信号的放大足够大，则可以省略 DCF1 和 DCF2。

在图 33A 和图 33B 中，与图 31A 和图 31B 相同的组成元件用相同的参考数字表示，将省略对它们的描述。图 33A 和图 33B 示范性地图示在频带分割补偿单元内或者在频带分割补偿单元之前和之内设置 DCFRA 的  
20 结构。在图 33A 中，使用频带分割滤光器将波长频带分割成短波长侧上的蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 和长波长侧上的红频带 ( $\Lambda_2$ )。设置在频带分割补偿单元内部的色散补偿器 DCF2<sub>1</sub> 和 DCF2<sub>2</sub> 分别执行调整，以便它们的色散补偿量之和  $d_1+d_2$  和  $d_1+d_2+\Delta d$  变成蓝频带 ( $\Lambda_1$ ) 和红频带 ( $\Lambda_2$ ) 的中央信道中的最佳补偿量。而且，设置它们的长度以在补偿器 DCF2<sub>1</sub> 和 DCF2<sub>2</sub> 上获得足够的  
25 拉曼放大增益。类似于图 27，DCF 的色散补偿量可以设置如下： $\Delta d = -S \cdot (1-\beta) \cdot \Delta \Lambda \cdot L$ 。另外，可以调整 DCF2<sub>1</sub> 和 DCF2<sub>2</sub> 的拉曼放大增益以使波长频带的光电平相同。即，通过调整拉曼放大增益，能够实现类似于光衰减器的功能。

图 33B 图示将波长频带分割成  $n$  个频带的进一步扩展的结构。波长

频带被分割成从短波长侧到长波长侧的  $n$  个频带，并设置用于调整的色散补偿器 DCF2<sub>1</sub>、DCF2<sub>2</sub>、……、DCF2<sub>n-1</sub>、DCF2<sub>n</sub>，它们将用于在分割之后优化各个信号频带的色散补偿量。各个色散补偿器的色散补偿量设置如下： $d_2$ 、 $d_2 + \Delta d$ 、……、 $d_2 + (n-2) \cdot \Delta d$ 、 $d_2 + (n-1) \cdot \Delta d$ 。可以以类似于图 33A 5 的方式设置  $\Delta d$  的值： $\Delta d = -S \cdot (1 - \beta) \cdot \Delta \lambda \cdot L$  ( $\Delta \lambda$  是相邻波长频带的中央信道之间的波长差值)。而且，调整 DCF2<sub>1</sub>、DCF2<sub>2</sub>、……、DCF2<sub>n</sub> 的拉曼放大增益，以便波长频带的光电平相同。

图 34 至图 36 示范性地图示使用图 29 至图 33 所示的执行频带分割补偿的线内放大器的系统的结构。

10 这些图图示一个 6 跨距传输的例子。也可以为不同的跨距数量实现类似的结构。另外，这些附图图示在将一个波长频带分割成两个频带情况下的例子。然而，当将一个波长频带分割成更多频带时也可以实现类似的结构。

在图 34 中，根据本发明的上述优选实施例使用每个线内放大器 35 15 执行频带分割补偿，并提供频带分割的色散补偿量之间的差值  $\Delta d$ 。从发射机 Tx #1 至 #n 输出的各个波长的光信号由光耦合器 40 耦合，并输出到一条传输线路上。在传输线路上，由线内放大器 35 中继光信号，并由光耦合器 41 将其分割成各个波长。光信号随后通过任意设置的可变色散补偿器 42，并由接收机 Rx #1 至 #n 接收。

20 在图 35 和图 36 中，与图 34 相同的组成元件用相同的参考数字表示，将省略对它们的解释。在图 35 中，每两个跨距执行频带分割补偿，并提供分割频带的色散补偿量之间的差值  $2 \Delta d$ 。在图 36 中，每三个跨距执行频带分割补偿，并提供分割频带的色散补偿量之间的差值  $3 \Delta d$ 。因为图 36 中每三个跨距的结构更接近于图 34 中每一个跨距的结构，所以将线内 25 放大器的剩余色散降低到一个更小的数值。因此，抑制了光纤的色散和非线性效应导致的波长损失。然而，因为分割补偿单元的数量变大，成本和体积自然增加，从确保光信号噪声比(OSNR)的观点来看这是不利的。必需考虑整个系统的折衷来确定频带分割单元的实际设置位置。

下面解释用于确定如何设置线内部分的色散补偿量的优选实施例。

因为上面所述的(1)传输线路的长度变化和(2)色散系数的制造变化,必需实际测量所安装光纤传输线路(所有部分或者每个线内部分)的色散量,并且必需安装具有适合于所测量量的色散量的色散补偿光纤。然而,因为存在(2)色散斜度的制造变化的问题,即使严格地为一条信道(例如一个中央信道)补偿色散,也不能为其它信道执行严格的色散补偿。为了执行严格的色散补偿,一种在每个跨距上确保尽可能大的色散容限并在接收机侧为所有信道执行严格色散补偿的方法是有效的。

图 37A 至 37C 图示在 600 公里 SMF 传输(100 公里×6 跨距)中线内色散补偿比  $D_{DCI}=100\%$  和  $114\%$  情况下的 Q 损失(Q 值的损失量)和剩余色散(传输线路和色散补偿器的总色散量)。

在此, Q 损失是 Q 值的连续值(back-to-back value)和在传输线路上传输之后的 Q 值之间的差值。Q 值是在通过将光信号波形转换成电信号获得一个眼图,并在眼睛的中央垂直获取眼睛的横截面时,将“1”侧和“0”侧上抽样分布的标准偏差之和除以“1”侧和“0”侧的抽样分布中央上的信号之间的幅值获得的一个数值。

图 37A 是 Q 损失和总剩余色散值的曲线图。图 37B 图示在设置线内色散补偿量以  $100\%$  补偿传播色散量的情况下使接收端上剩余色散为零时的眼图。图 37C 图示在设置线内色散补偿比以  $114\%$  补偿传播色散量的情况下的眼图。

如图 37A 至图 37C 所图示的,在  $114\%$  过补偿情况下的波长损失和 Q 损失比  $100\%$  色散补偿情况下更小(完全波形变形更有利)。然而,必需严格地通过在接收端上调整色散补偿量( $D_{DCR}$ ),使剩余色散为零。但是,注意到,根据传输条件(光纤种类、传输距离、比特率等)的不同,可以将  $D_{DCI}$  优化成不同数值。

图 38 图示在 600 公里 SMF 传输(100 公里×6 跨距)中通过在接收端上调整色散补偿量( $D_{DCR}$ )使剩余色散为零的情况下的 Q 损失特性和线内色散补偿剩余量(每跨距的传输线路的色散量+线内 DCF 的剩余色散量)。

可以证明过补偿(线内色散补偿剩余量为负)使线内 DCF 的损失更小。而且,证明能够确保一个明显大于  $40\text{Gb/s}$  信号的色散容限(大约

70ps/nm)的容限(当允许 1.5dB 损失时大约 400ps/nm)。

在此,通过下述等式获得一个色散偏移量  $\Delta D$ :

$$\Delta D(\text{ps/nm}) = (\text{每跨距的色散量}(\text{ps/nm})) \times (1 - \text{色散补偿比})$$

在此,色散补偿比=(色散补偿比的百分数)/100。在图 38 所示的情  
5 况下,(每跨距的色散量(ps/nm))=(17(ps/nm/km))×(100(km)(每跨距))  
=(1700(ps/nm))。

在线内色散补偿量对应于大约 114%补偿的-200ps/nm 的附近位置  
上 Q 损失最佳,并在从大约 105%补偿到大约 120%补偿的范围上获得非  
常好的特性。

10 因此,根据本发明的优选实施例,即使传输线路和 DCF 的色散/色散  
斜度的制造变化很大,或者 CCF 的斜度补偿比很低,或者存在色散斜度  
的波长相关性导致的剩余色散,也能够超高速波长复用传输系统内低  
成本和小型化地为所有信道执行有效的色散补偿。因此,能够实现远程  
传输。

15 图 39 示范性地图示与优化线内色散补偿量的优选实施例对应的第  
一种结构。

在该图中,与图 34 相同的组成元件用相同的参考数字表示,并省略  
对它们的解释。

如果在各个线内中继部分中的中央信道内的色散量被实际测量为  
20  $D_1$ 、 $D_2$ 、…… $D_{n-1}$ 、 $D_n$ ,则将线内放大器 ILA1、ILA2 和 ILA(n-1)的色散补  
偿量设置如下: $d_{\text{DCL}1} = -(1 + \gamma) \cdot D_1$ ,  $d_{\text{DCL}2} = -(1 + \gamma) \cdot D_2$ , ……  
 $d_{\text{DCL}(n-1)} = -(1 + \gamma) \cdot D_{n-1}$ 。 $\gamma$  是色散补偿量的过补偿率,一般是 0.10 至  
0.15(10%至 15%)。在发送端,也可以设置用于改善传输特性的色散补  
偿(光后置放大器中的色散补偿)DCT(色散补偿量  $d_{\text{DCT}}$ )(作为一个典型值  
25  $d_{\text{DCT}} = 0$ (未设置))。为了通过补偿色散线内放大器的过补偿将剩余色散(传  
输线路和色散补偿器的总色散量)设置为  $D_{\text{RD}}$ (零为一个典型值),光前置放  
大器的接收色散补偿器 DCR 的接收机侧上的色散补偿量被设置为  $\gamma(D_1 +$   
 $D_2 + \dots + D_{n-1}) - d_{\text{DCT}} - D_n + D_{\text{RD}}$ 。

如果各个跨距的色散量相等( $D_1 = D_2 = \dots = D_{n-1} = D_n = D$ ),则获得

$((n-1)\gamma - 1)D - d_{\text{DCF}} + D_{\text{RD}}$ 。而且，可以为每条信道或者所有信道设置一个可变色散补偿器，用于调整随着时间改变的各种色散变化。

图 40 图示一个更具体结构的例子。

在该图中，与图 39 相同的组成元件用相同的参考数字表示。

- 5 在每个线内放大器 50 中，使用 DCF 执行分布式拉曼放大(DRA)和色散补偿光纤拉曼放大(DCFRA)。DCFRA 单元的级数根据所需要的增益可以是一个或者多个。在任何一种情况下，调整每个 DCF 的长度，以便 DCF 的色散补偿量之和等于图 39 所示的色散补偿量，并能够确保每个 DCF 的拉曼放大增益的所需值或者一个更大的值。同时，不能将色散补偿量的过补偿率  $\gamma$  设置得过大，以确保在接收端 DCF 上使用拉曼增益的长度为一个所需要的量。

接收端上的中继器 51 的结构与线内放大器 50 基本相同。然而，光放大器是一个光前置放大器，它进行放大以在接收端上检测一个信号。

- 15 图 41 示范性地图示通过组合频带分割色散补偿和线内过补偿实现的结构。

在该图中，与图 40 相同的组成元件用相同的参考数字表示，将省略对它们的解释。

- 20 对于各个线内放大器 50，设置用于执行过补偿的色散补偿光纤  $DCL_1$  至  $DCL_{(n-1)}$ ，并执行  $d_{\text{DCL}_1}$  至  $d_{\text{DCL}_{n-1}}$  的过补偿。而且，频带分割滤光器设置在为频带分别执行色散补偿的色散补偿光纤的后级上。

在接收端上光前置放大器内设置的色散补偿器执行色散补偿，以使在色散补偿光纤 DCR 和色散补偿光纤后级的频带分割色散补偿器内的剩余色散变成零。或者，可以在将波长复用光信号解复用成各个波长的光信号之后，通过设置可变色散补偿器为色散补偿分别执行精细调整。

- 25 根据本发明，能够在波长复用光通信中低成本和高精度地执行有效的色散补偿。

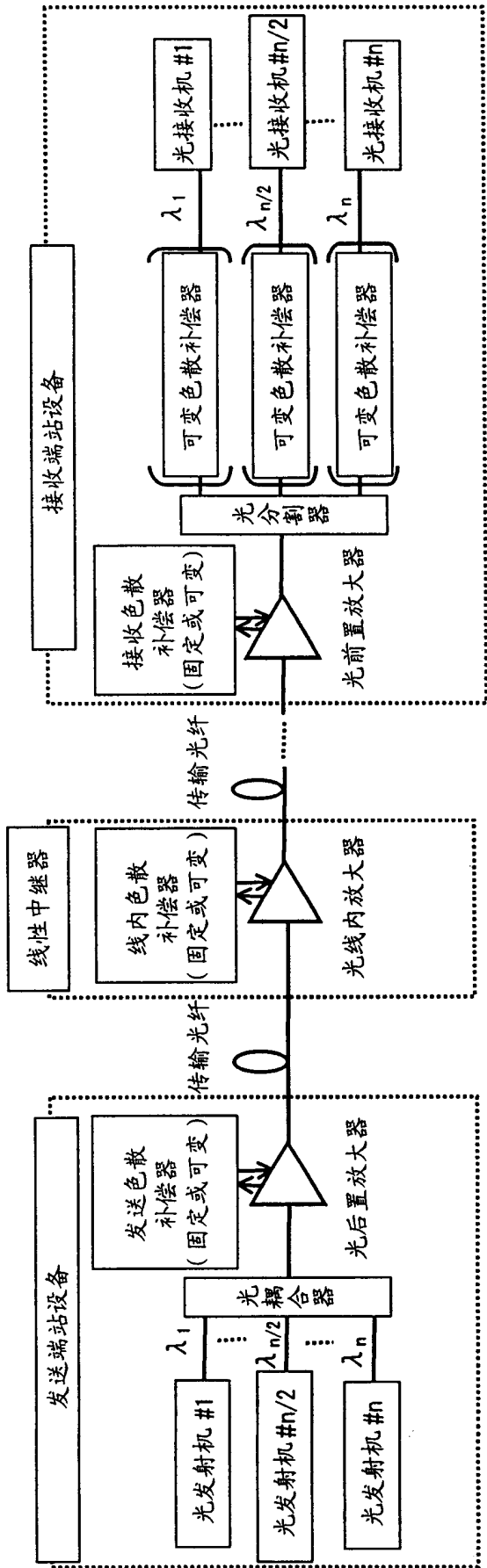


图1 现有技术

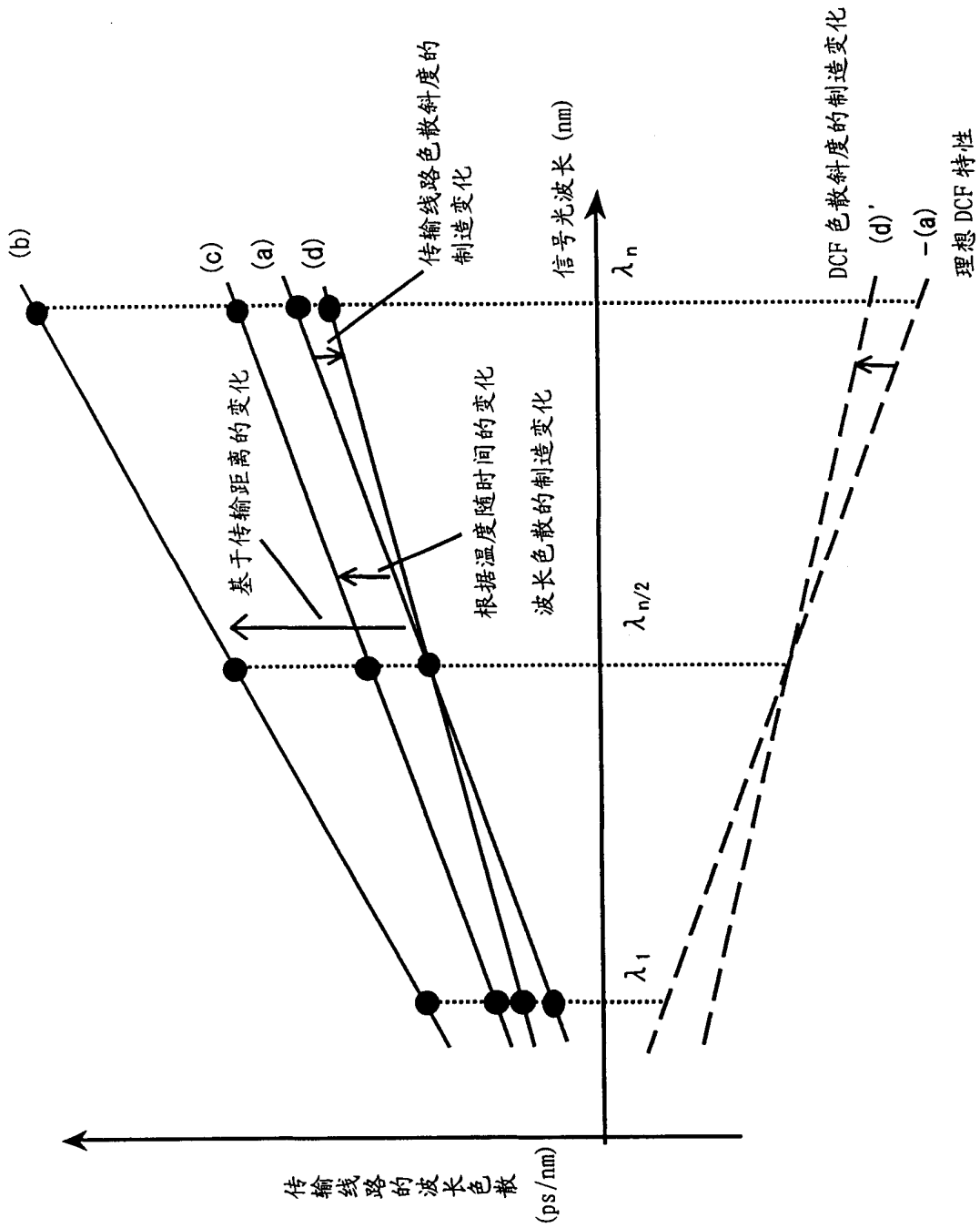


图 2 现有技术

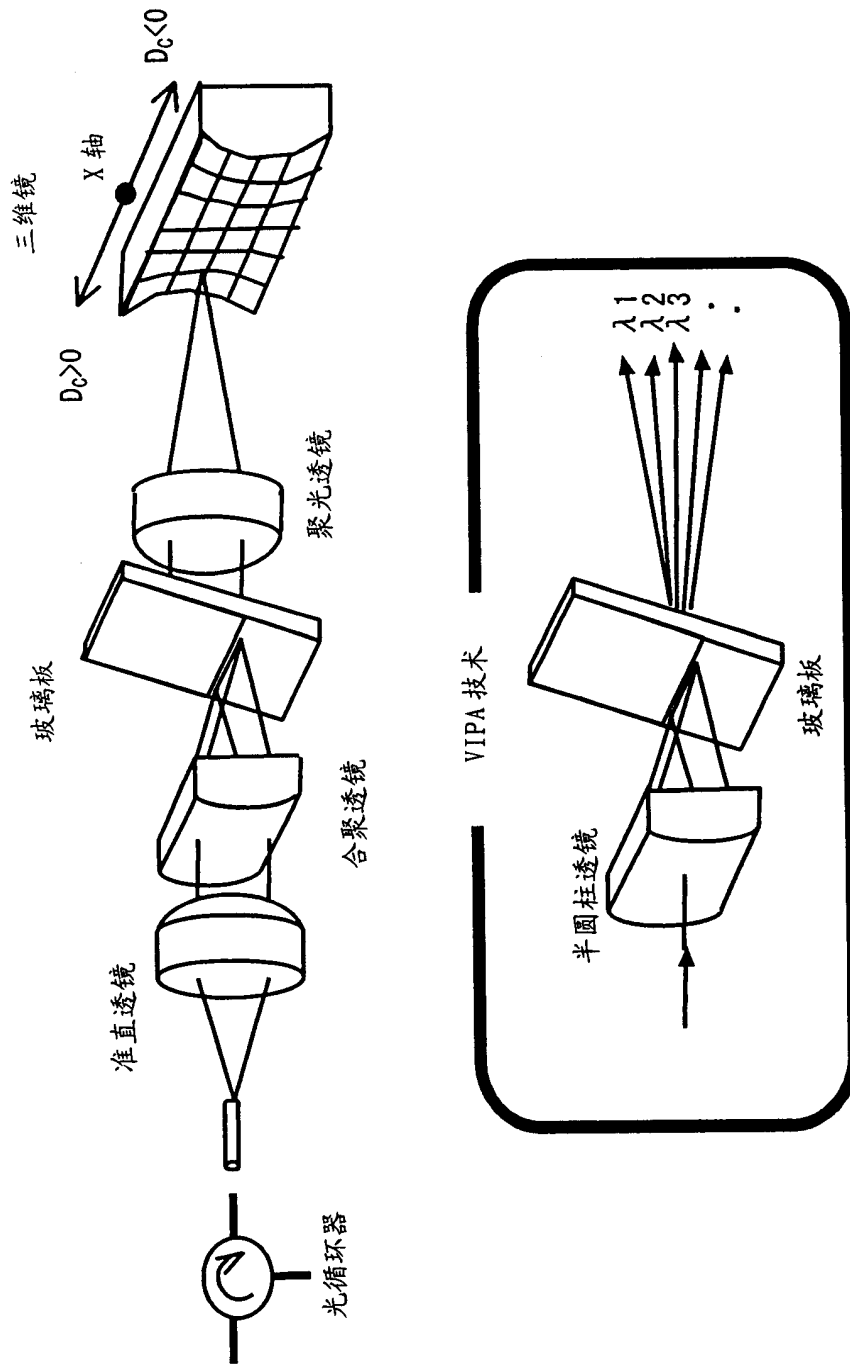


图 3 现有技术

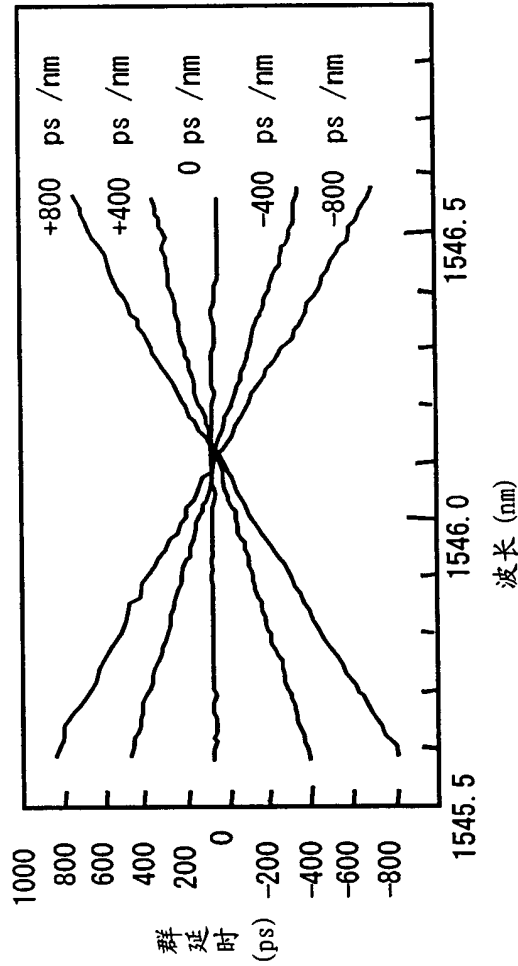
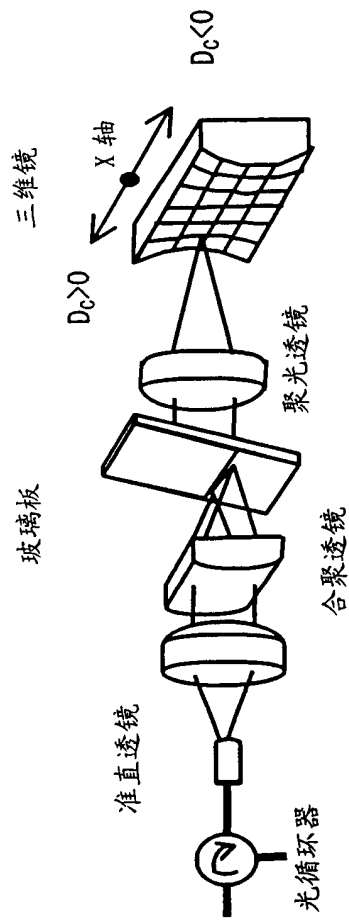


图5 现有技术

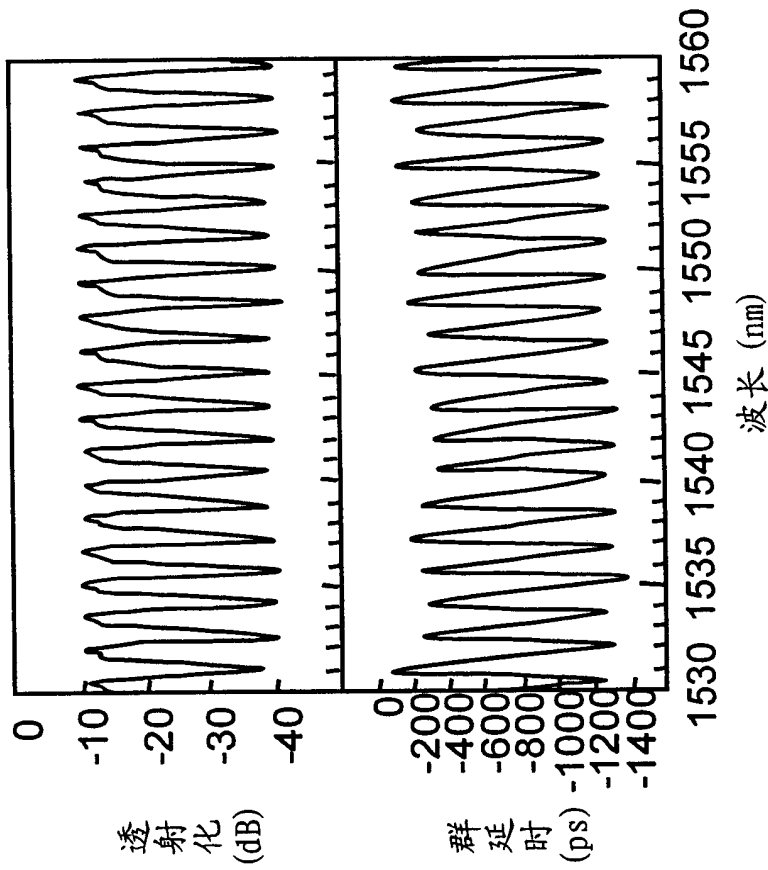


图 4 现有技术

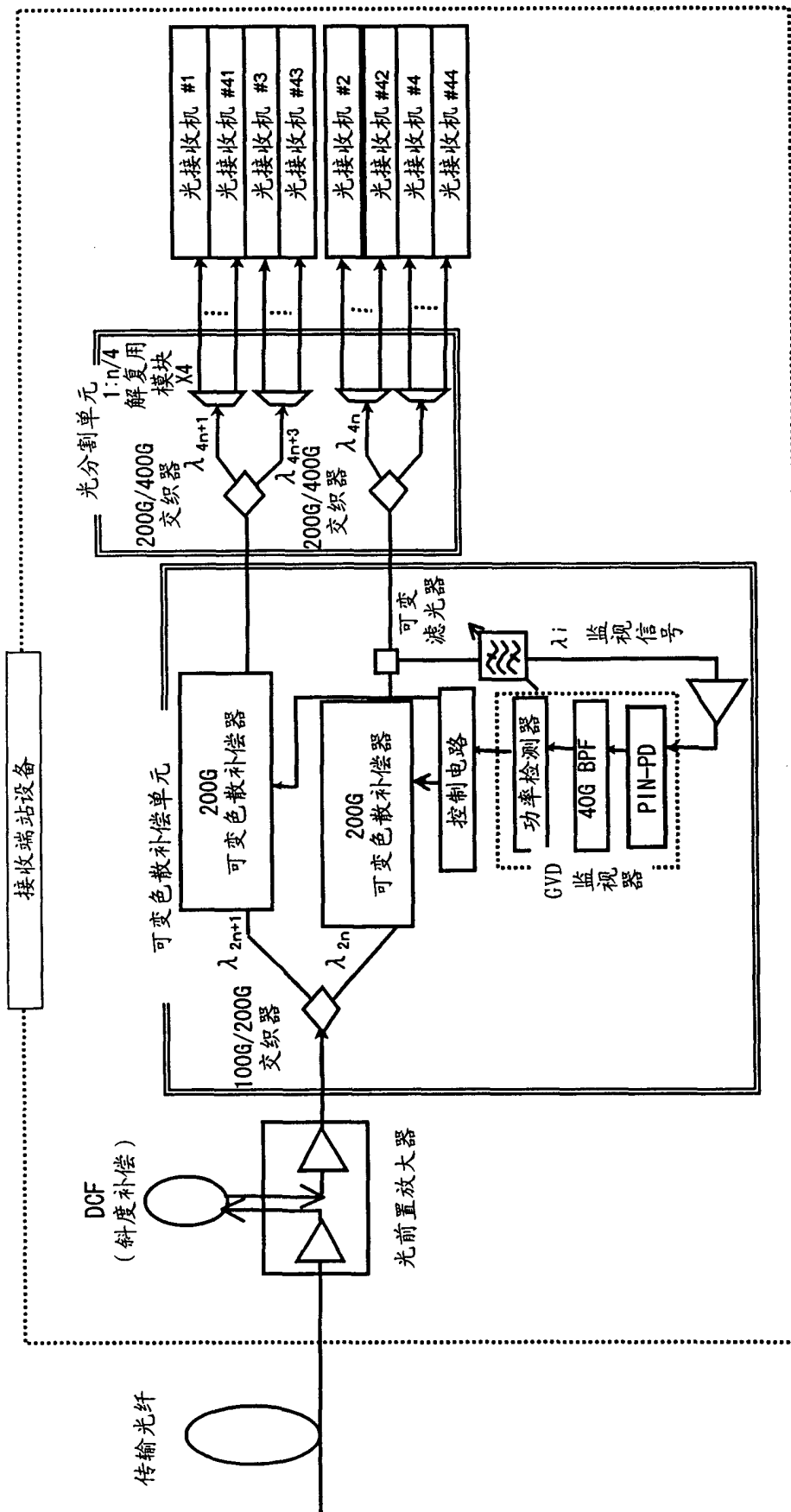


图 6 现有技术

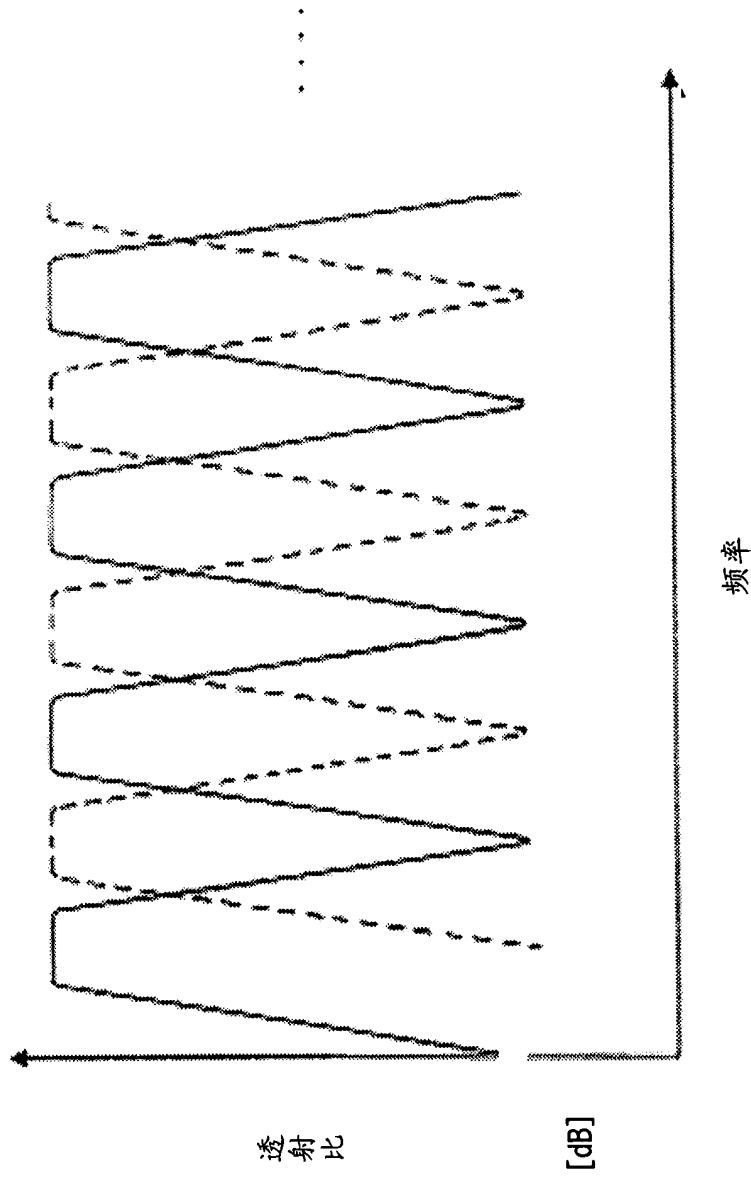


图7 现有技术

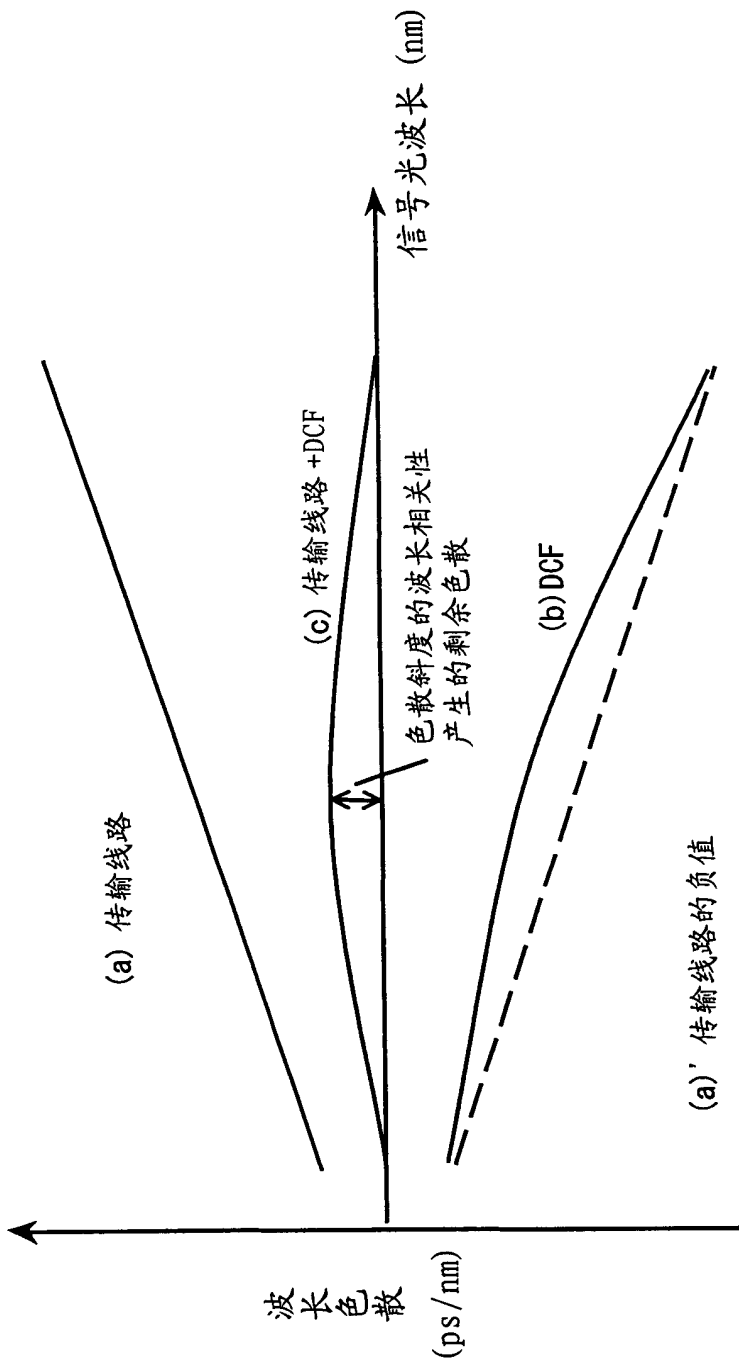


图 8 现有技术

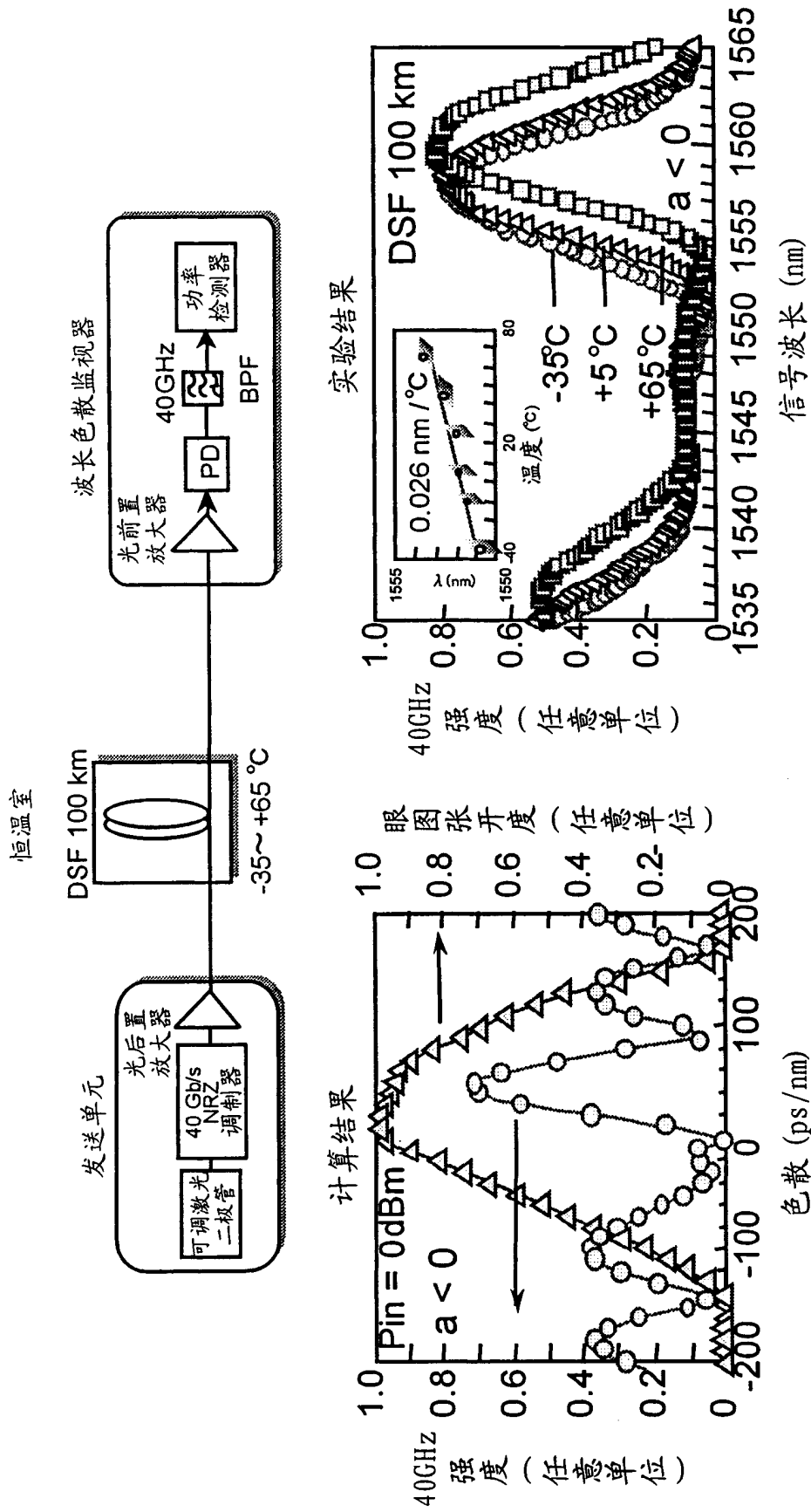


图9 现有技术

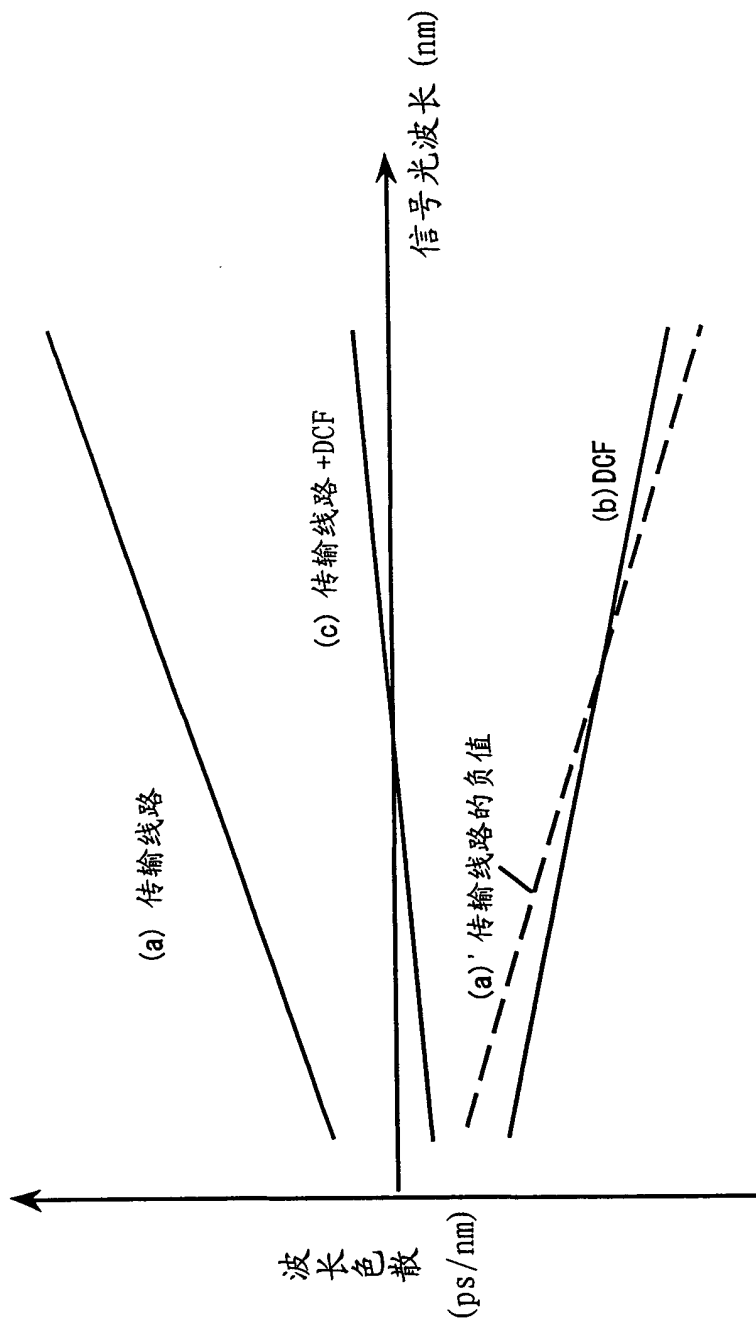


图 10 现有技术

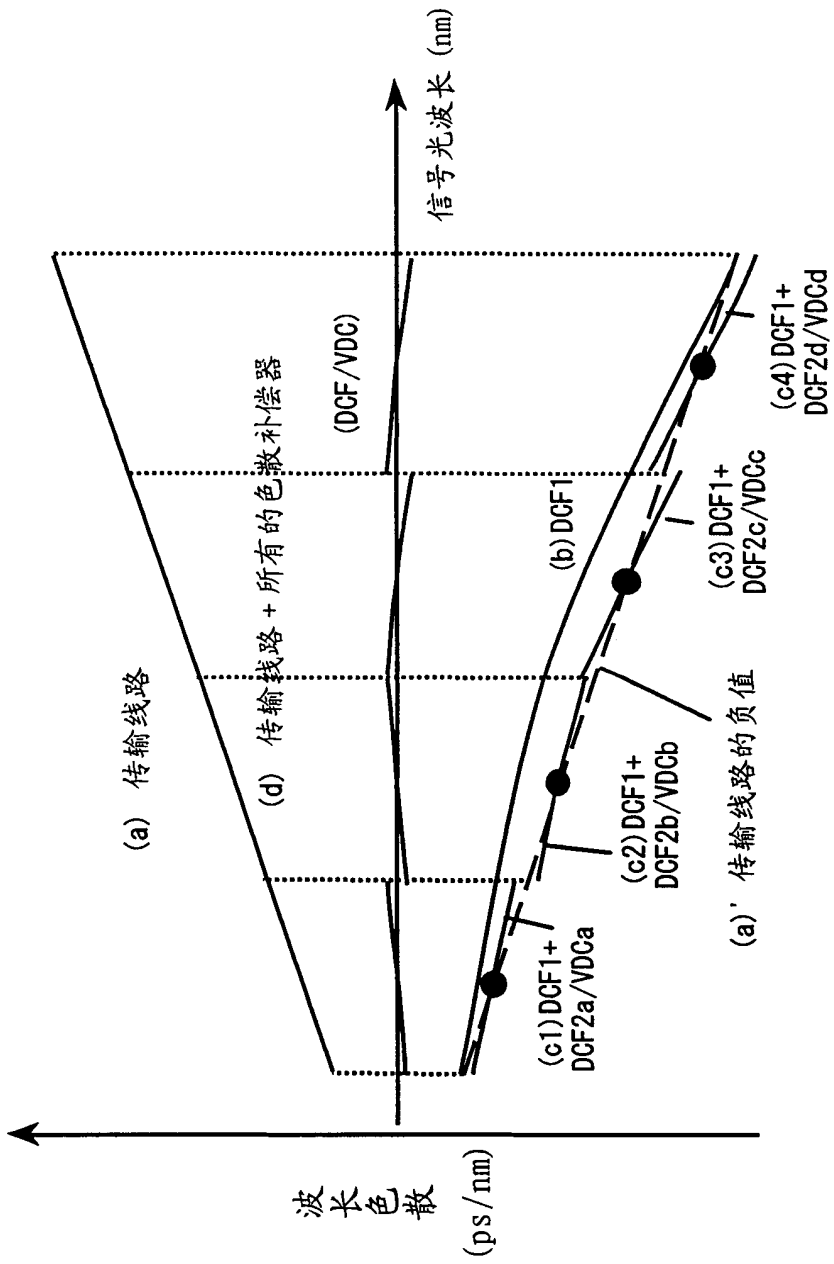


图 11

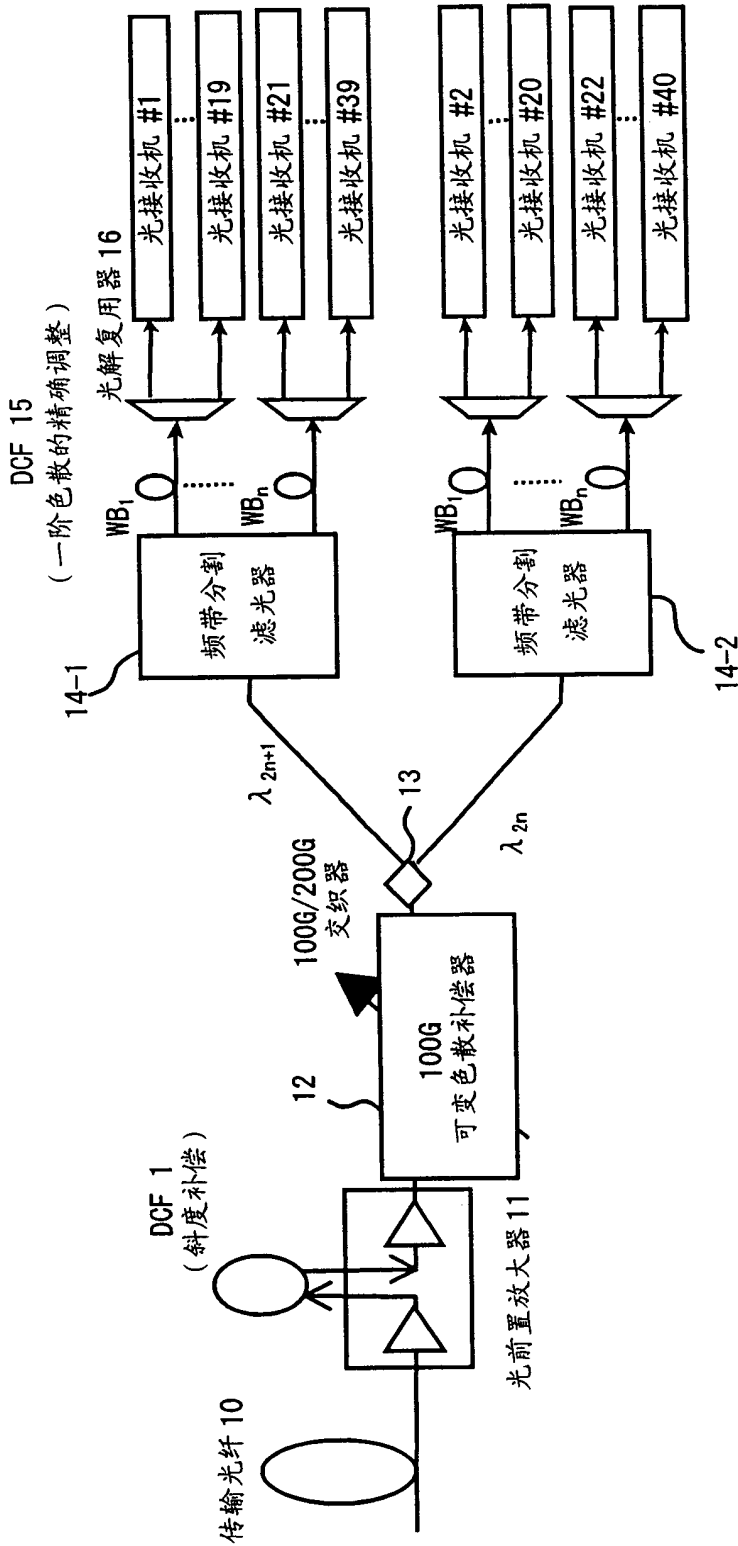


图 12

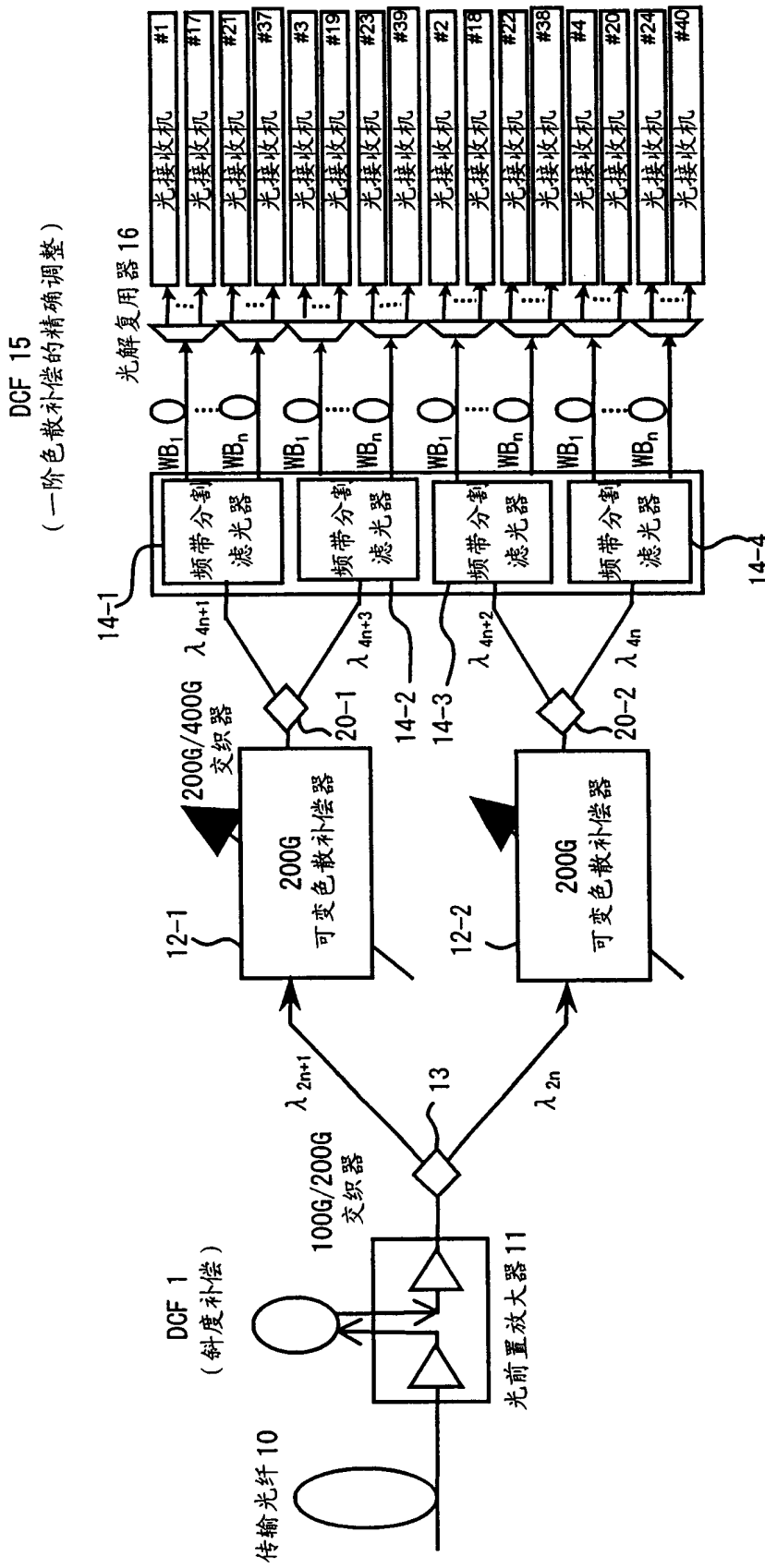


图 14

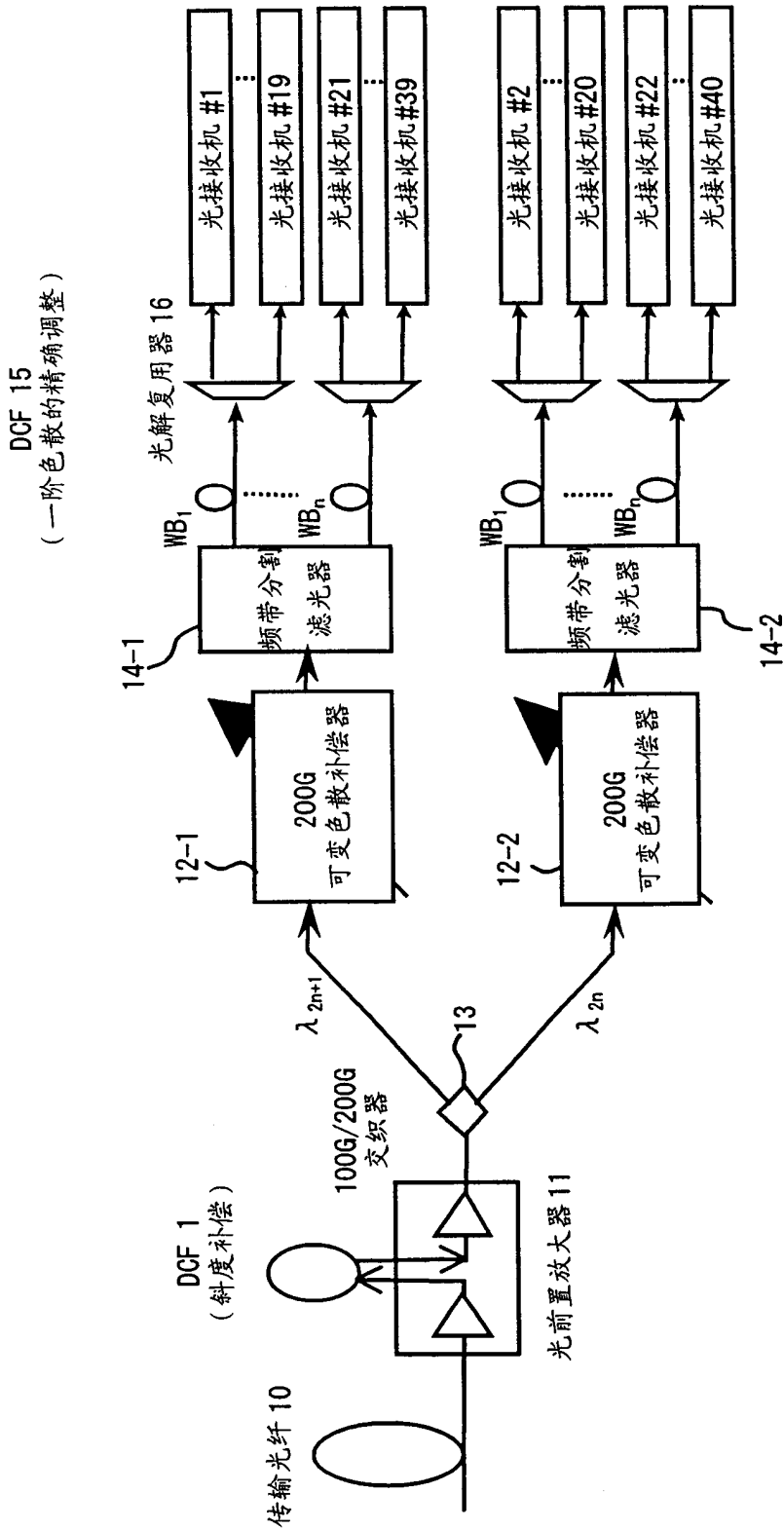


图 13

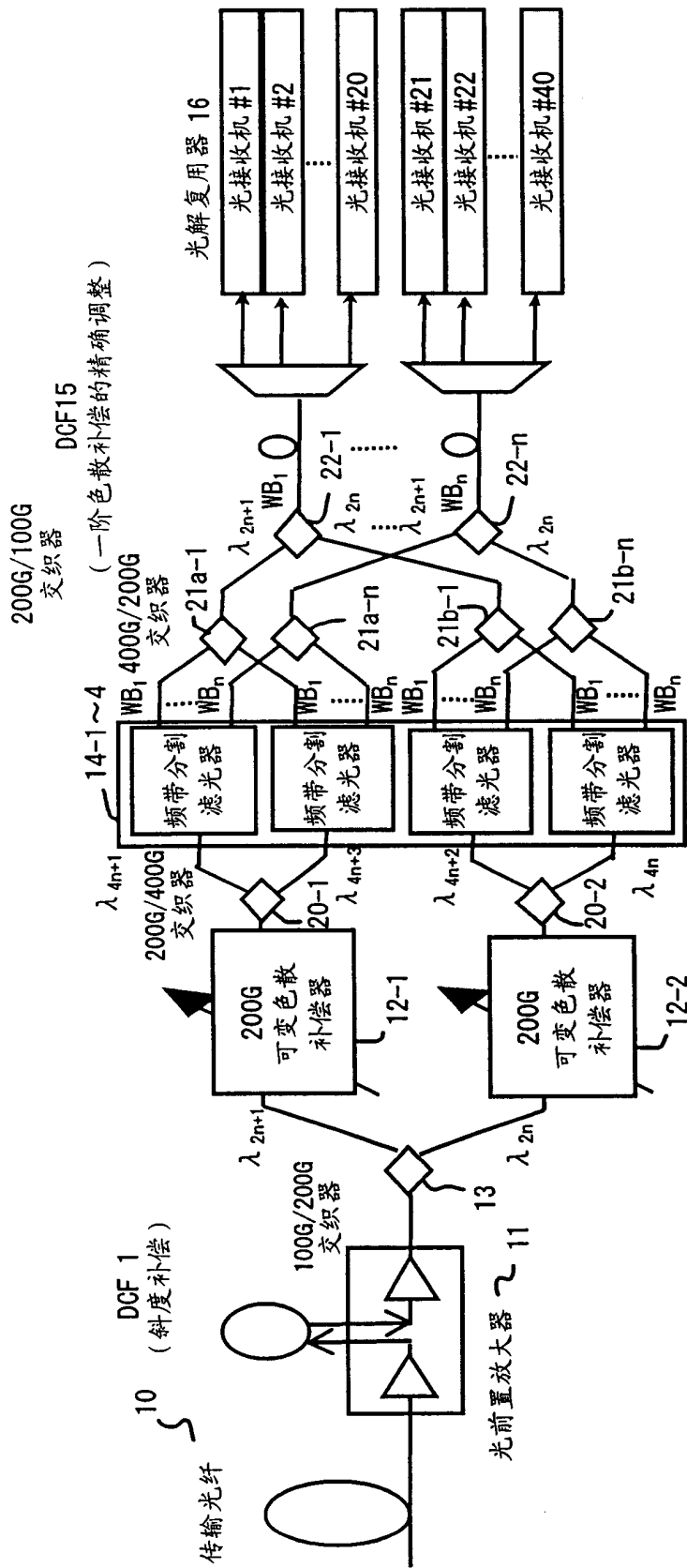


图 15

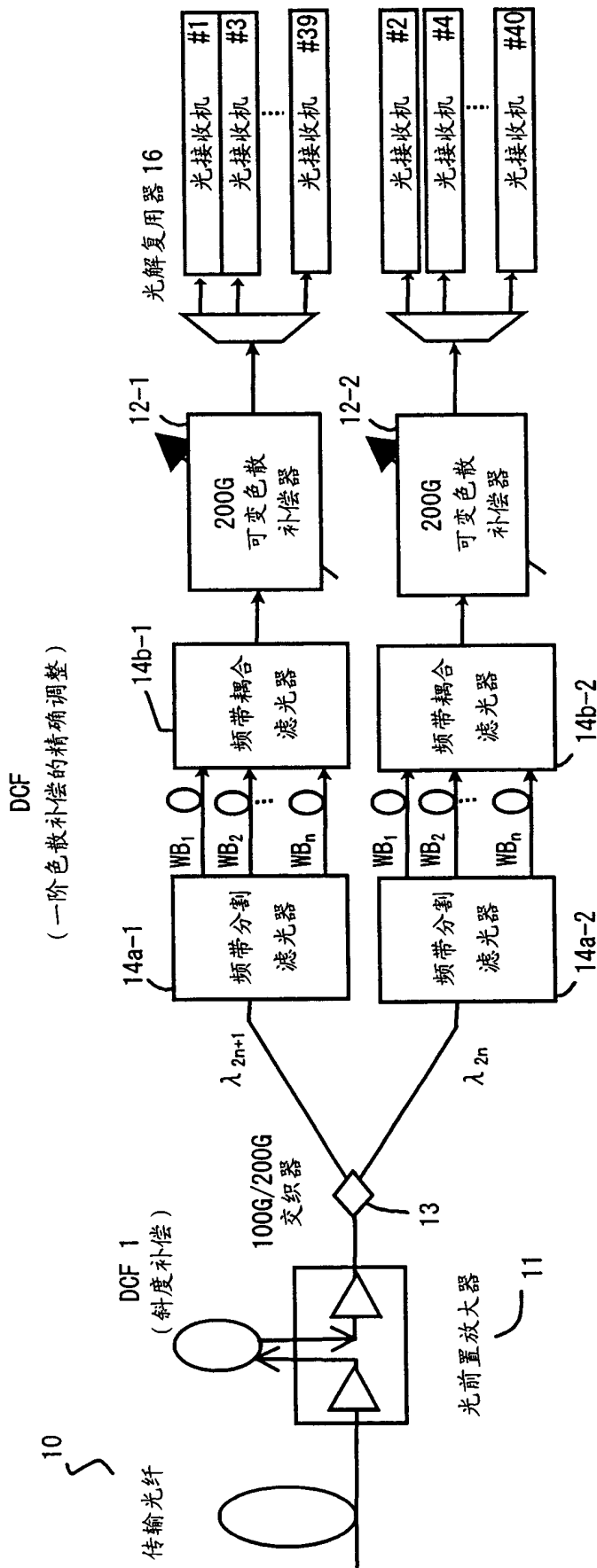


图 16

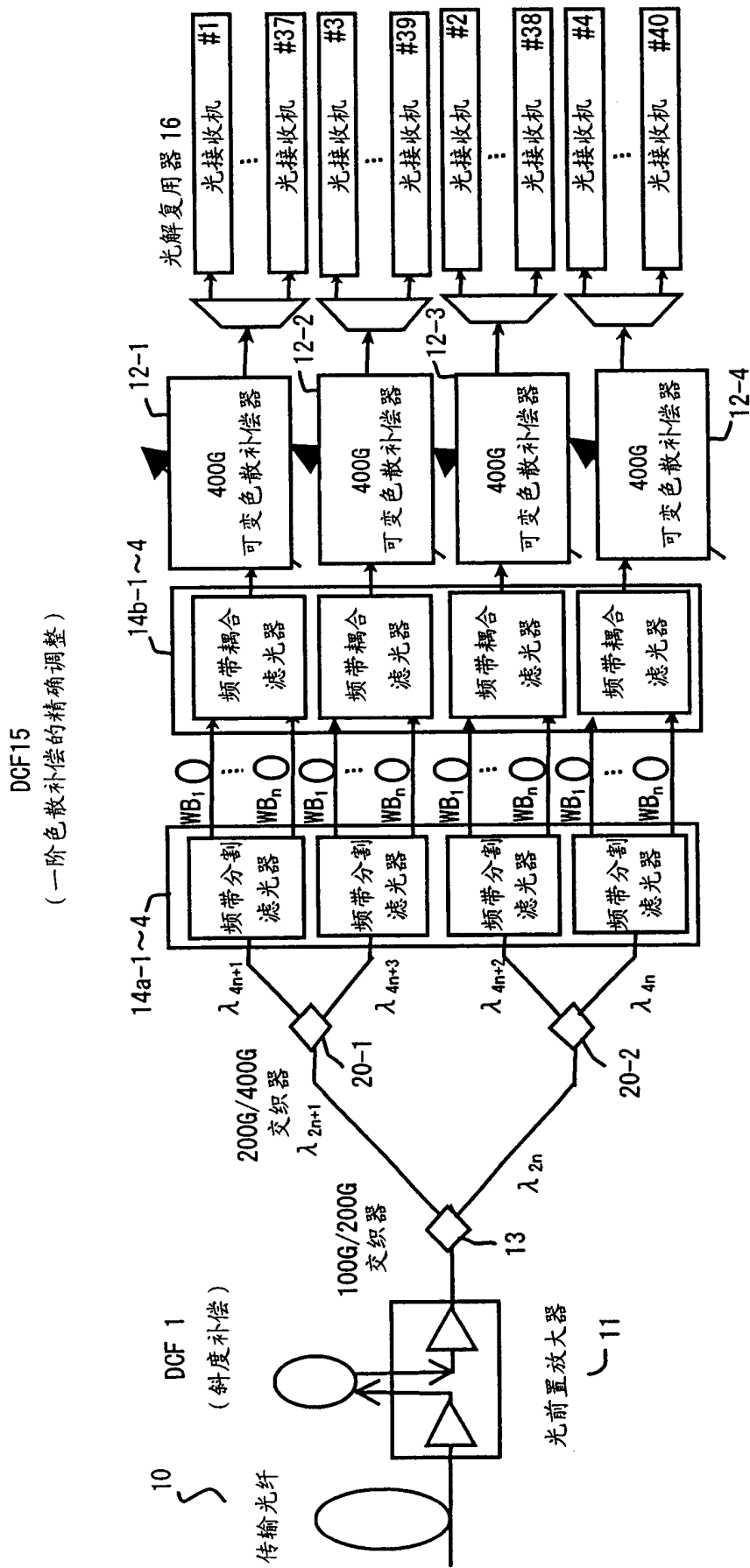


图 17

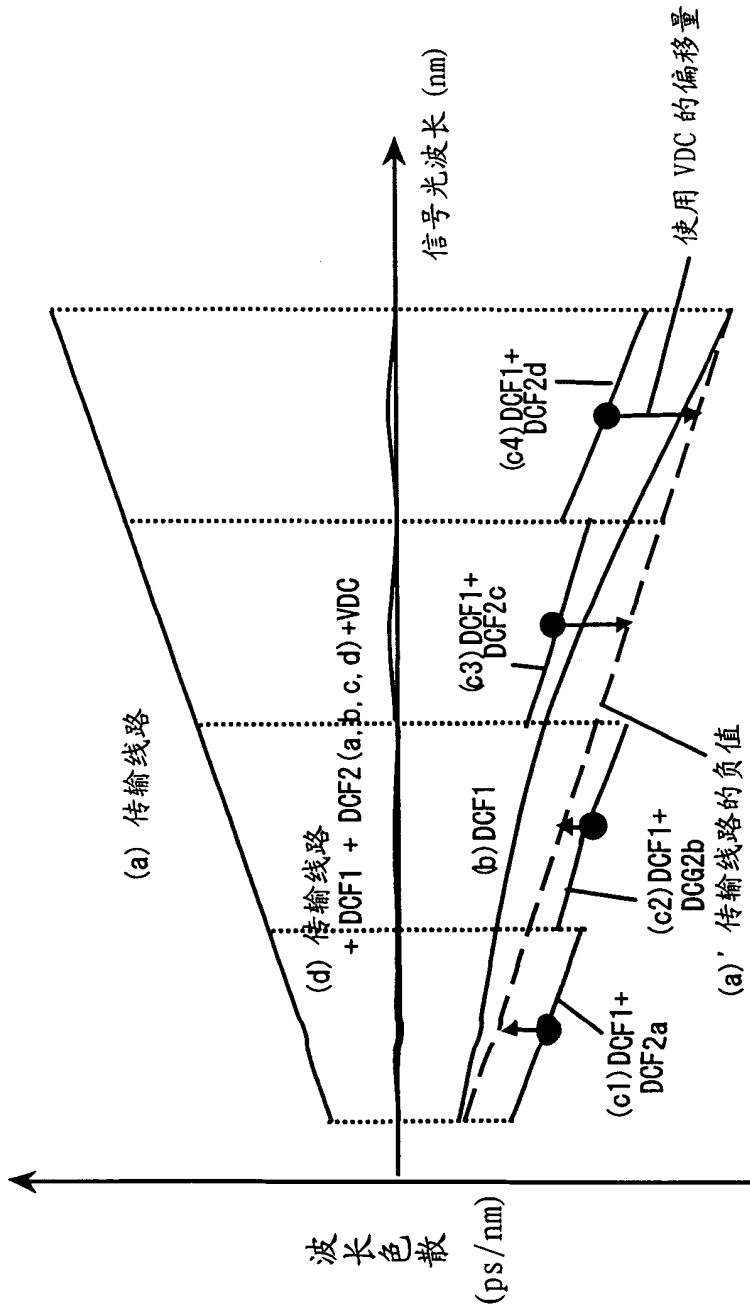


图 18

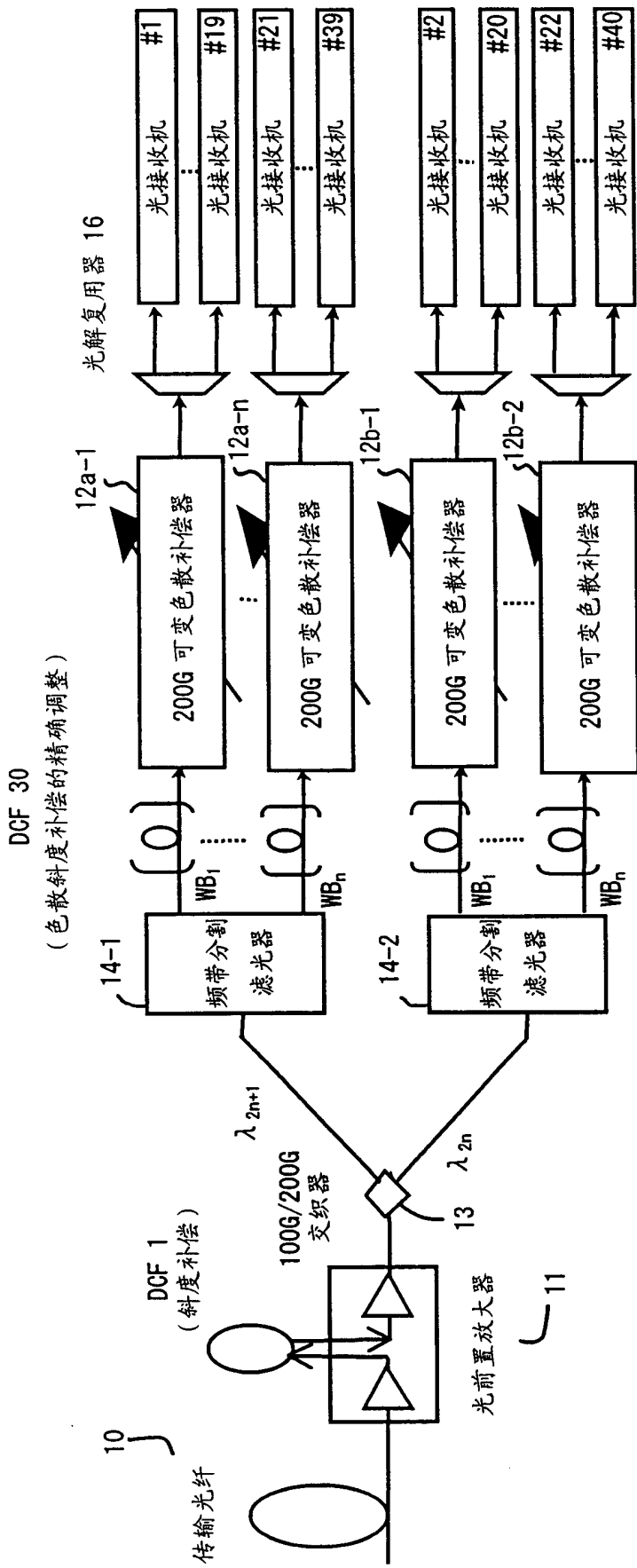


图 19

DCF 30 (色散斜度补偿的精确调整)

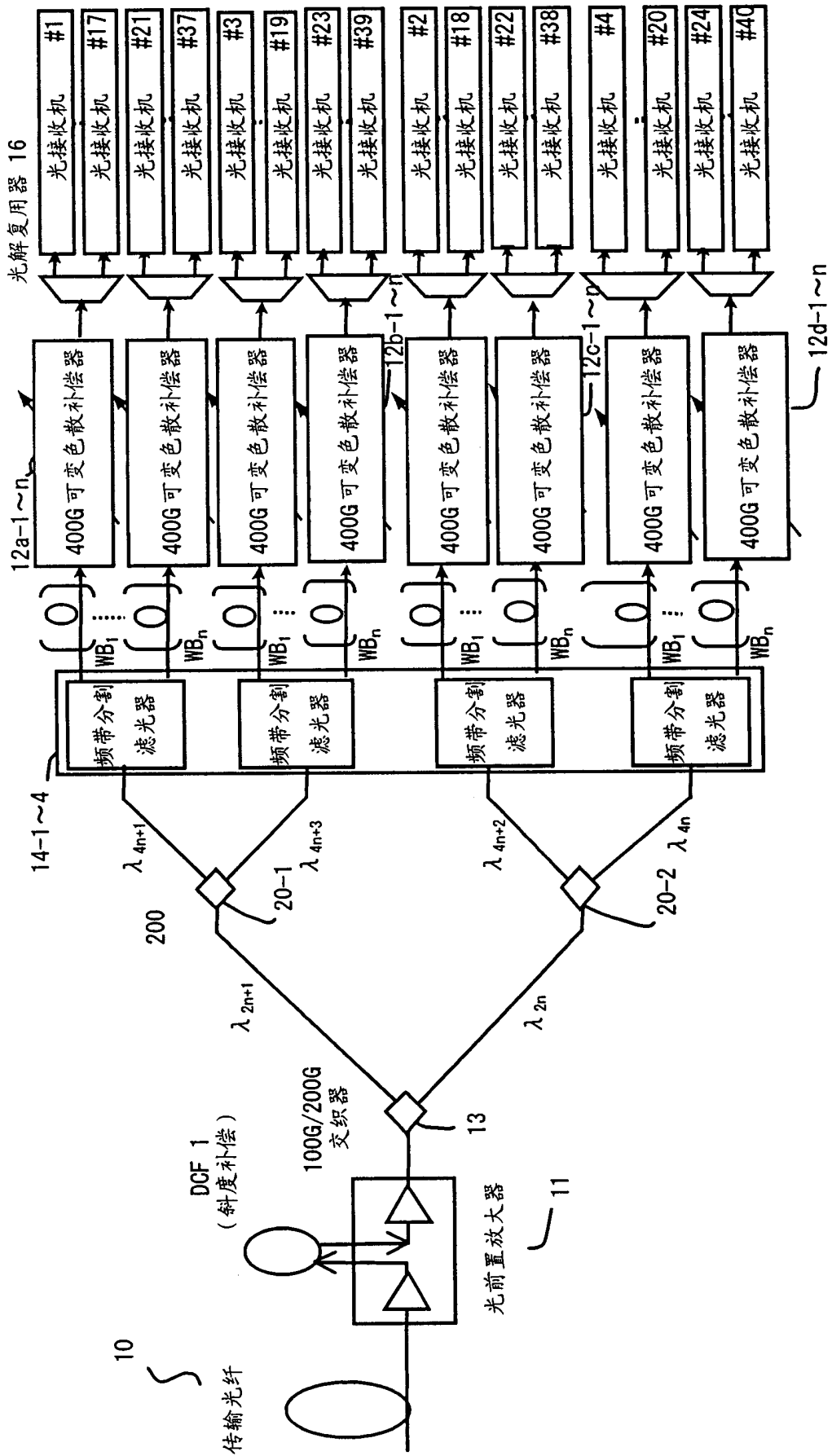


图 20

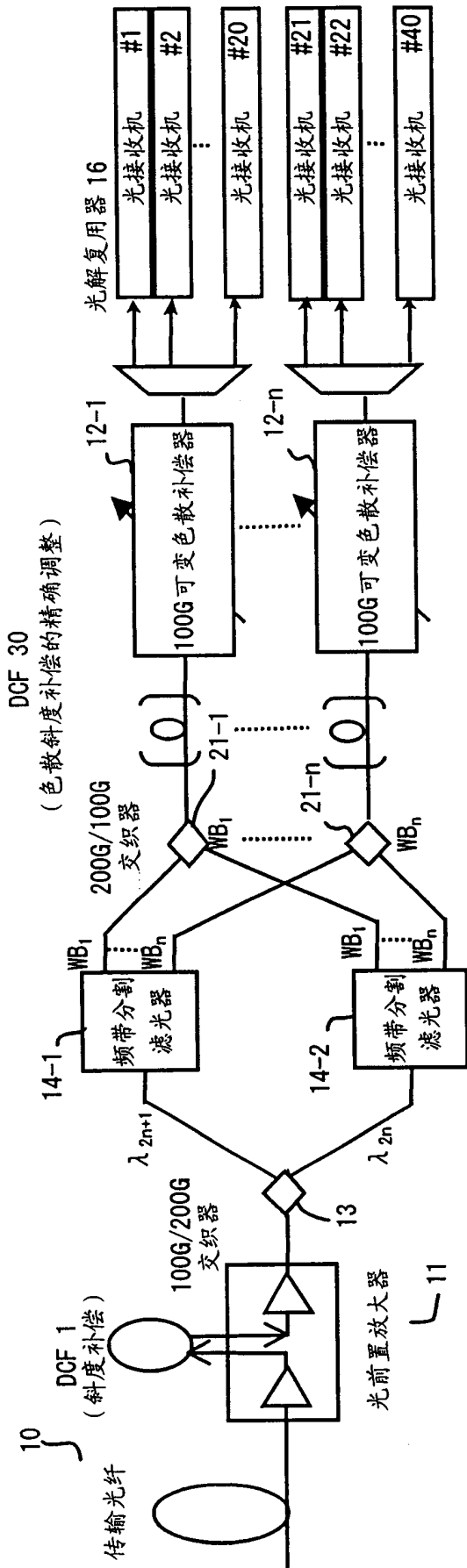


图 21

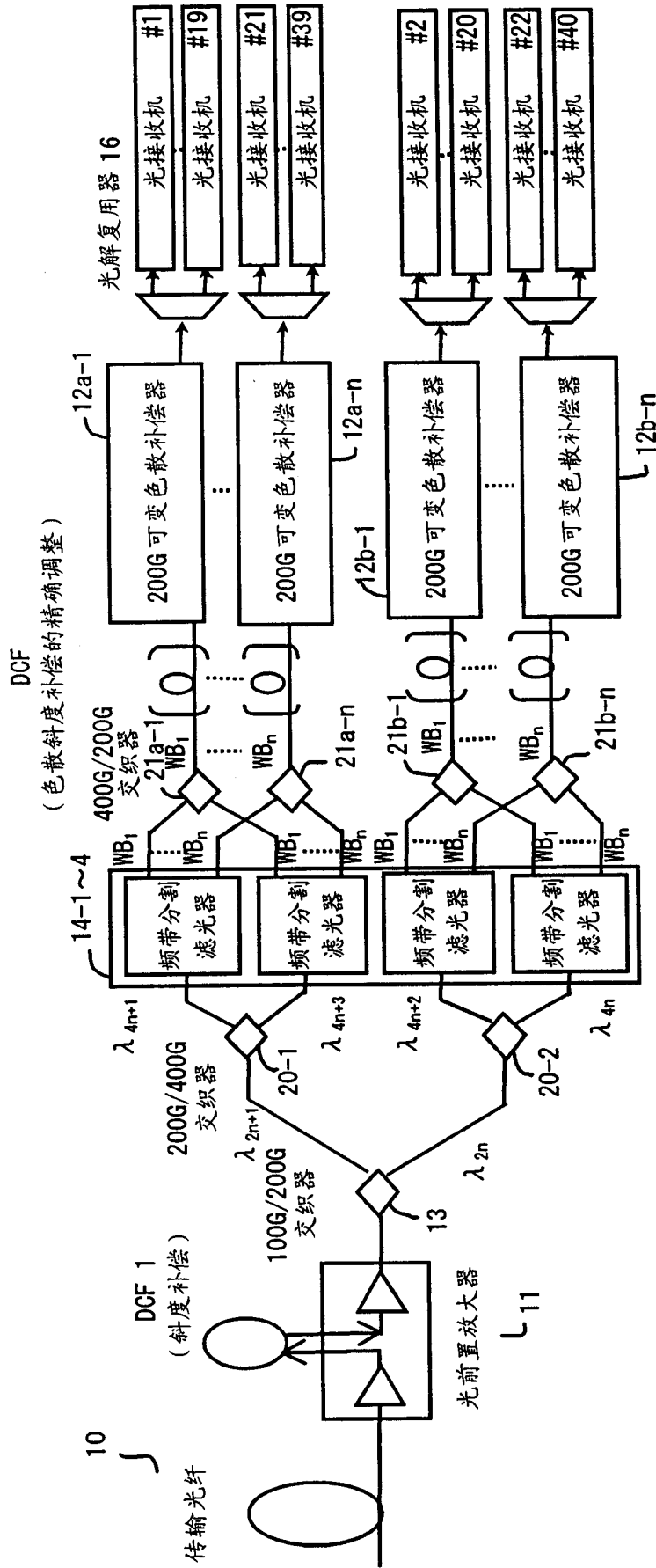


图 22

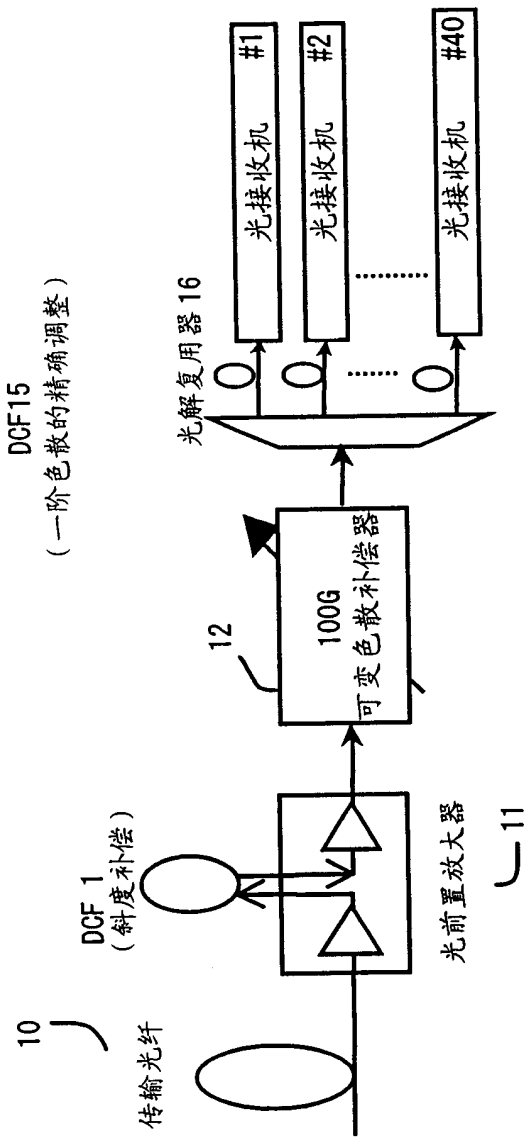


图 23

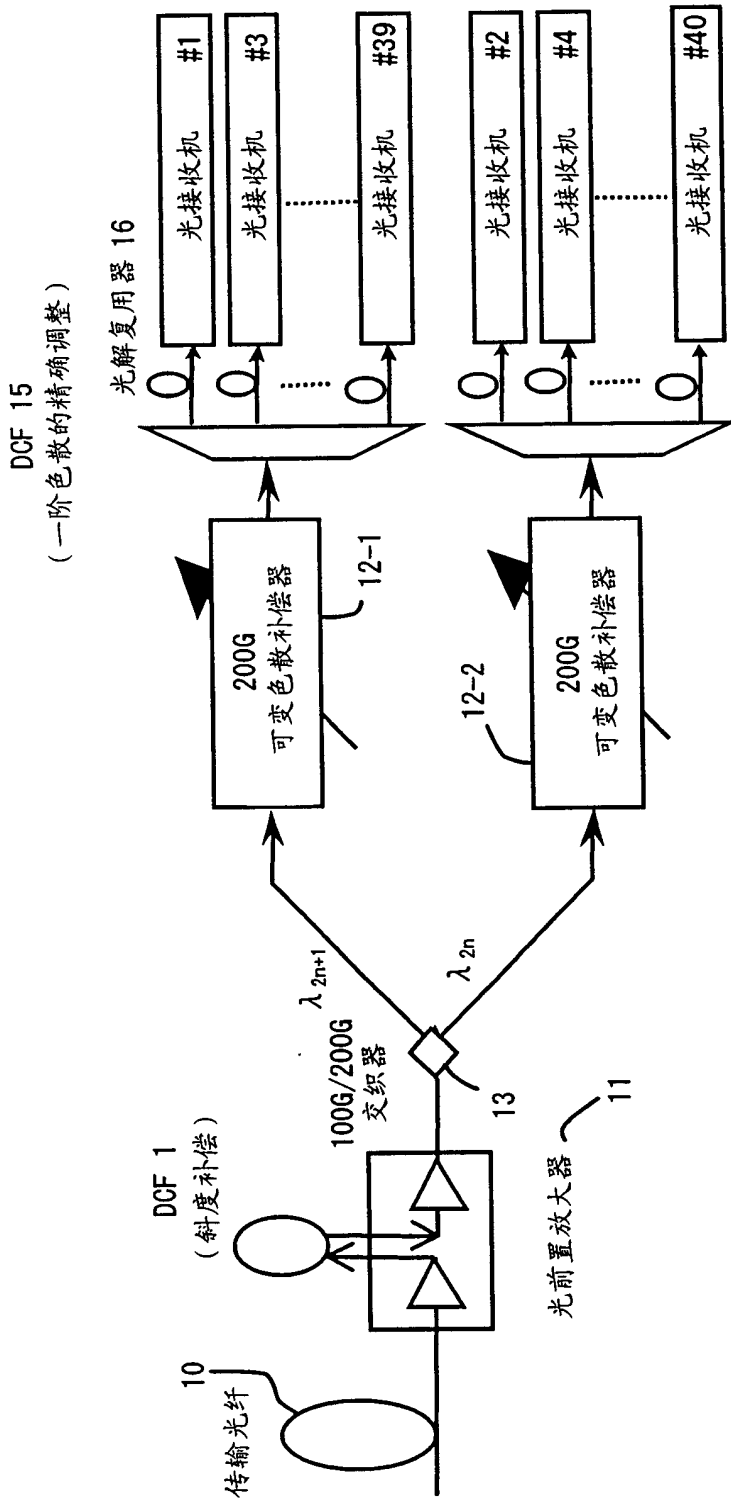


图 24

使用集中色散补偿器和频带调整色散补偿器的情况

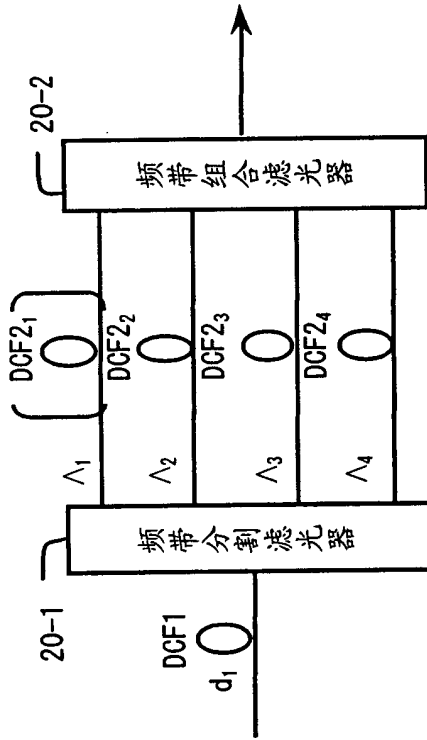


图 25A

仅使用频带调整色散补偿器的情况

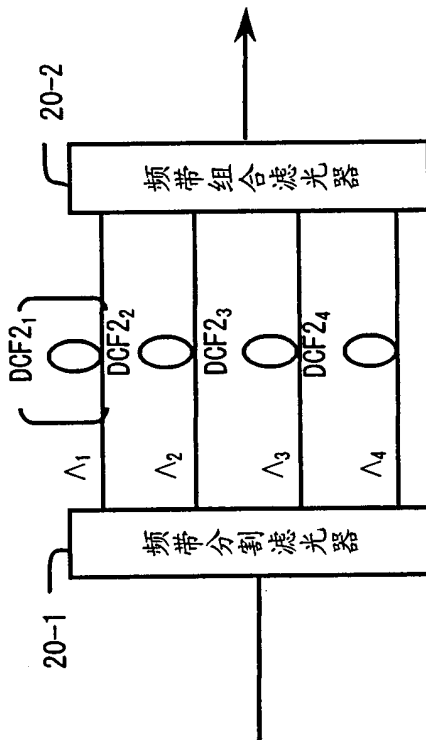


图 25B

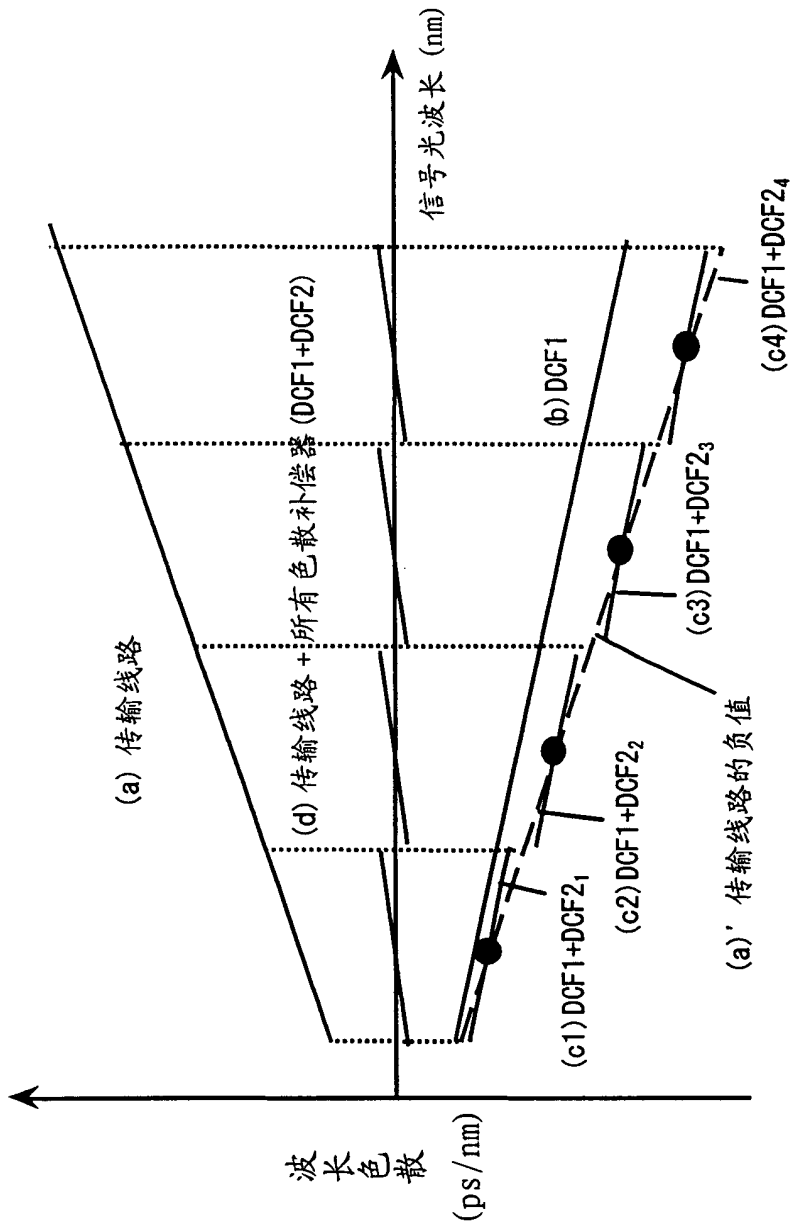


图 26

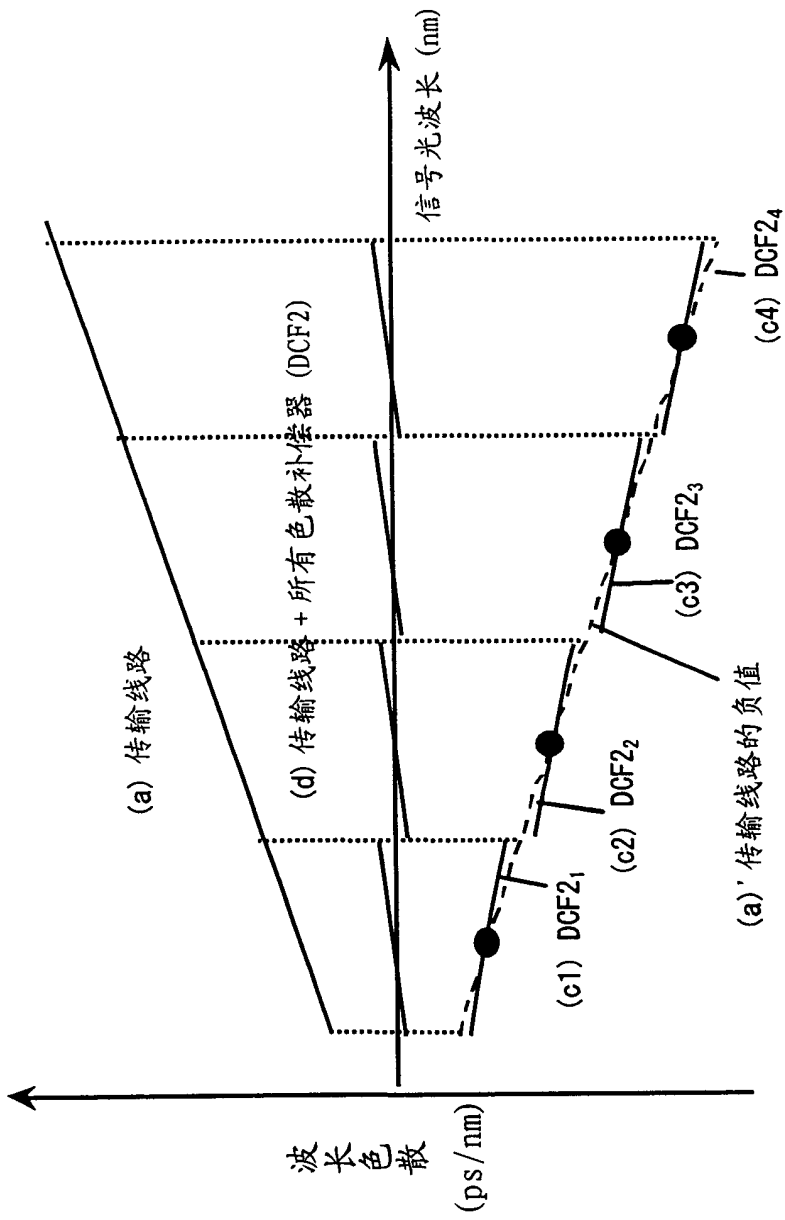


图 27

使用集中色散补偿器和频带调整色散补偿器 (色散补偿量很小) 的情况

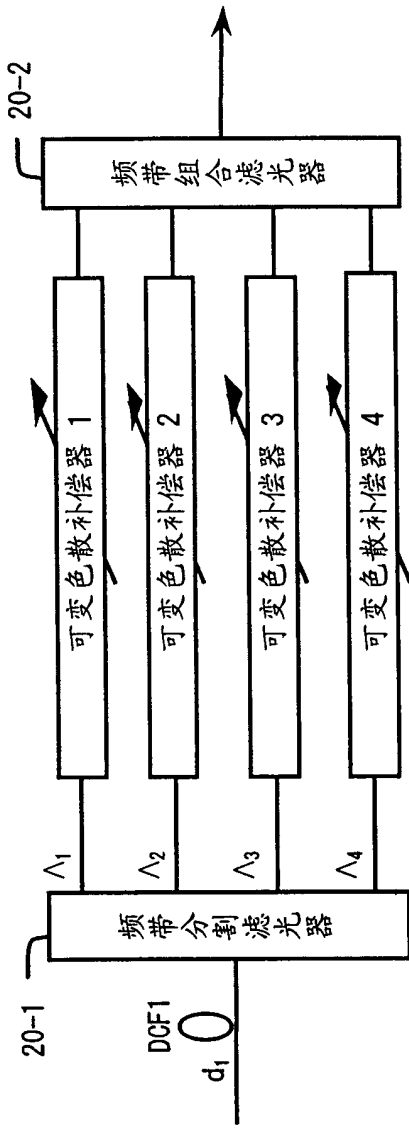


图 28A

仅使用频带调整色散补偿器的情况 (色散补偿量很大)

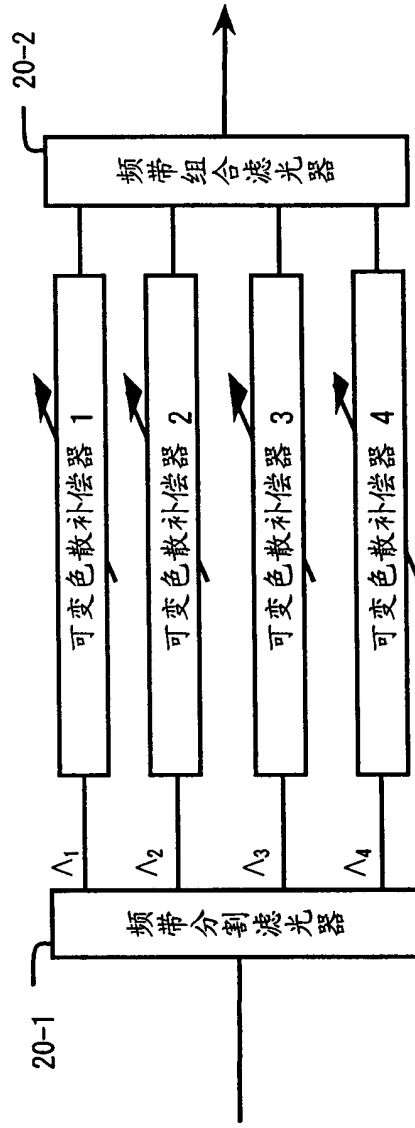


图 28B

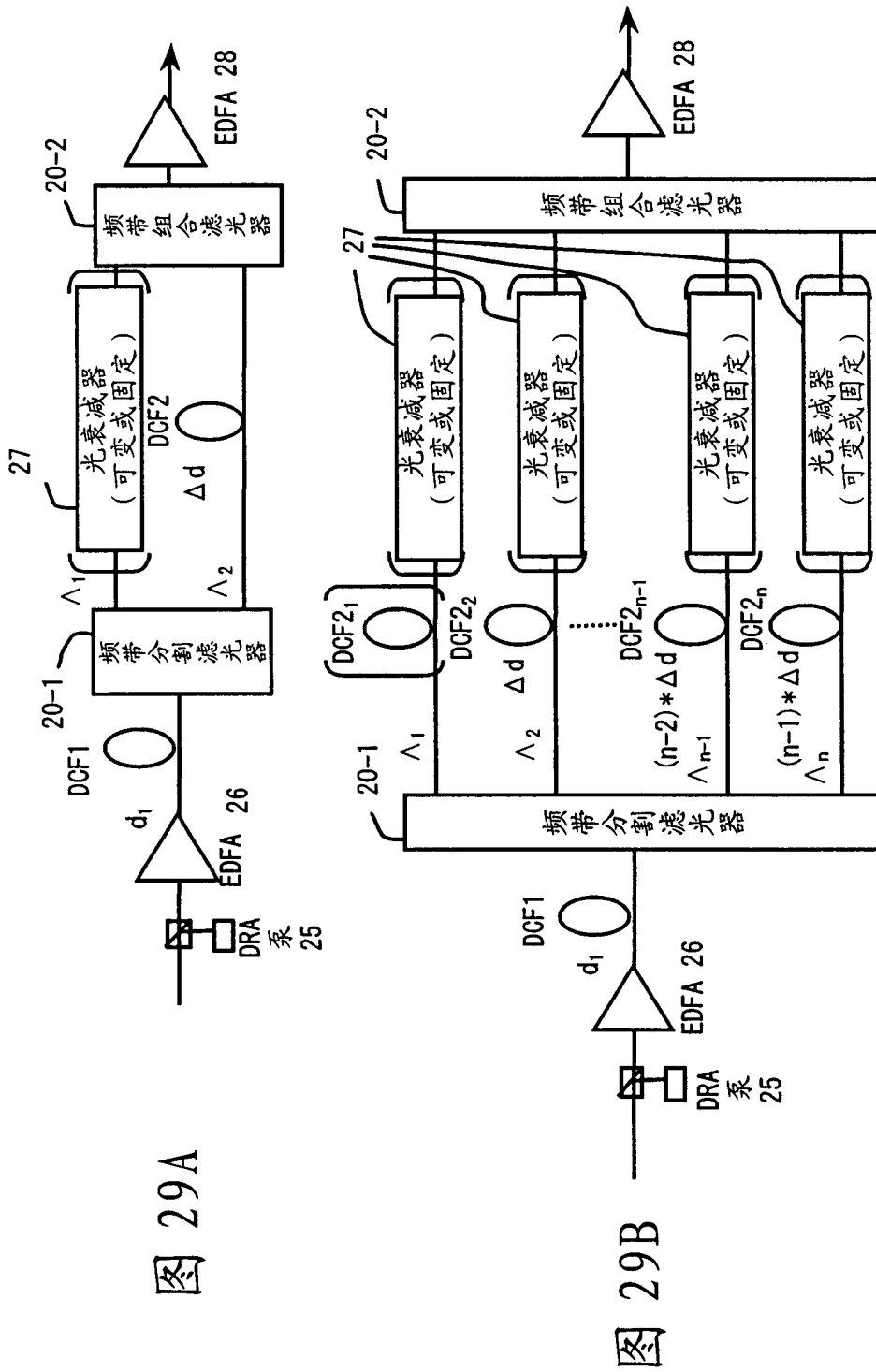
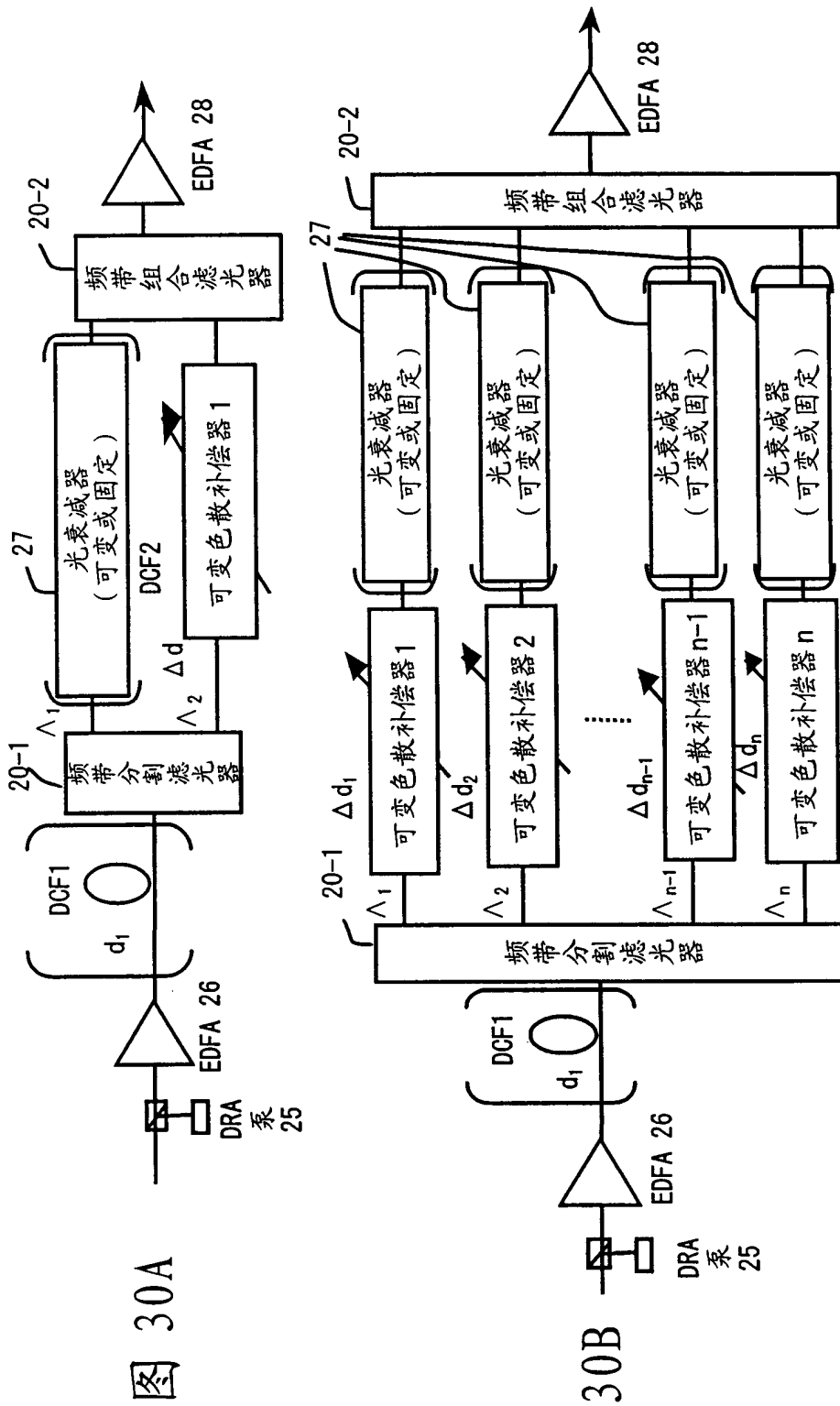
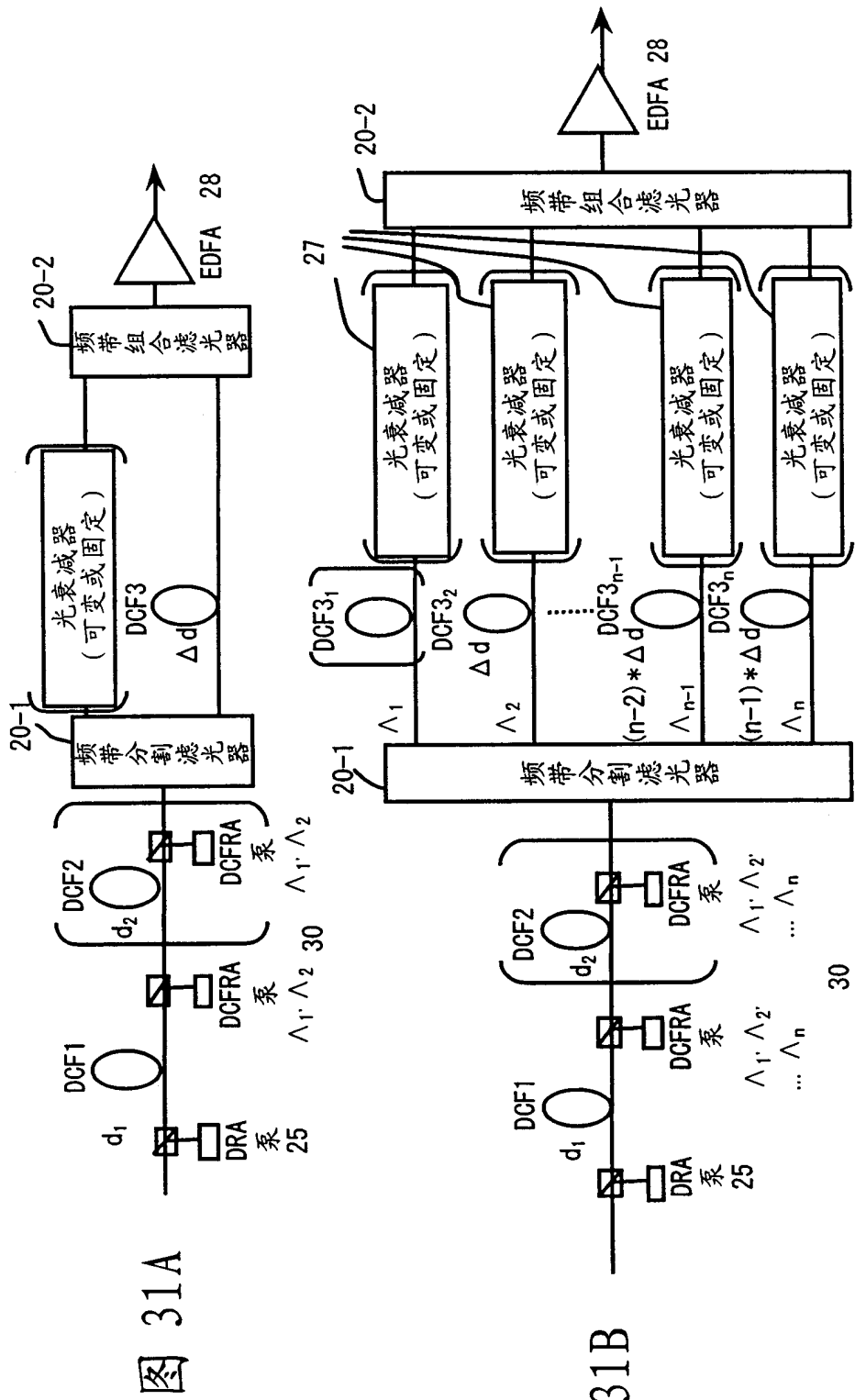


图 29A

图 29B





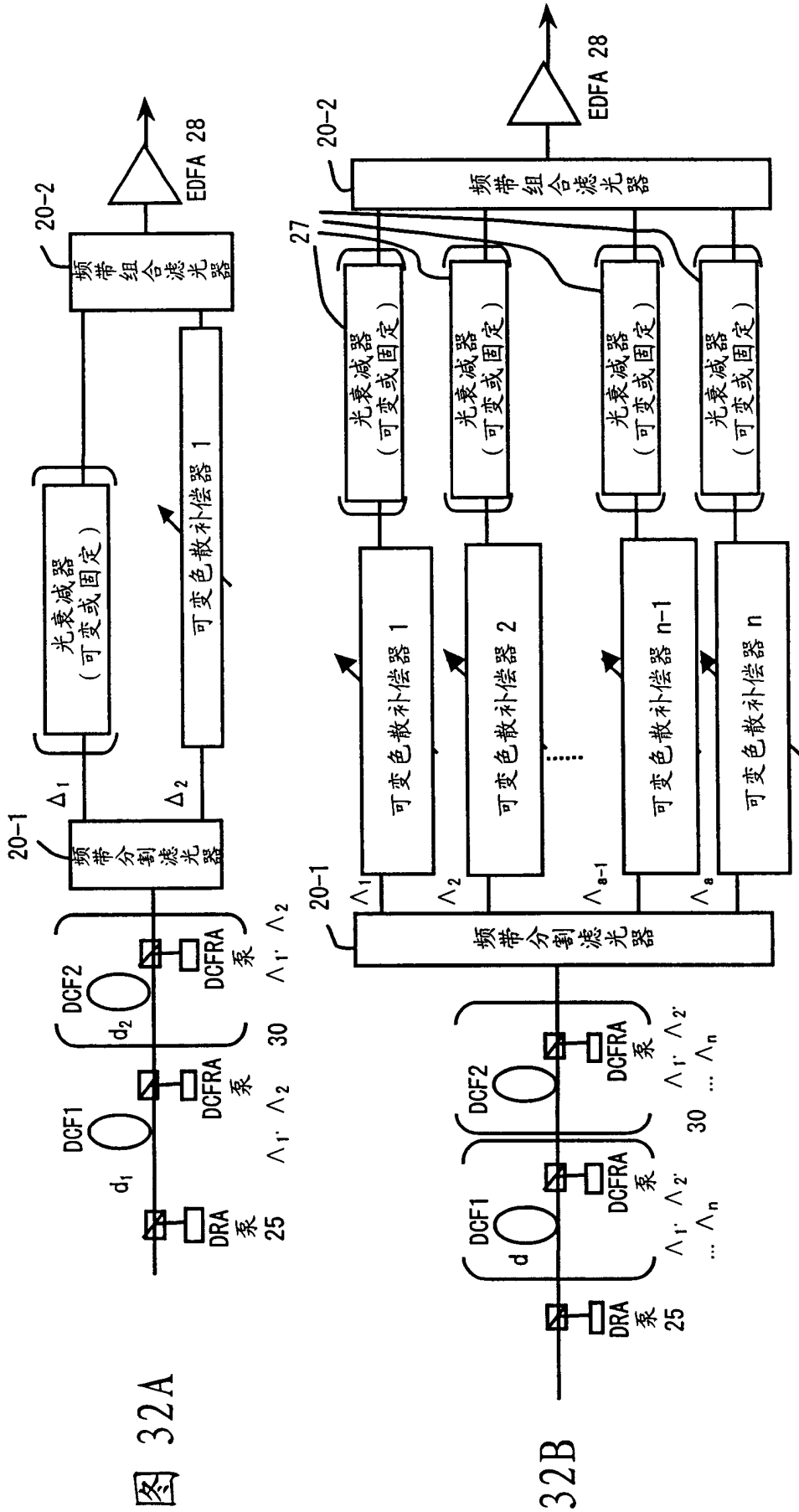
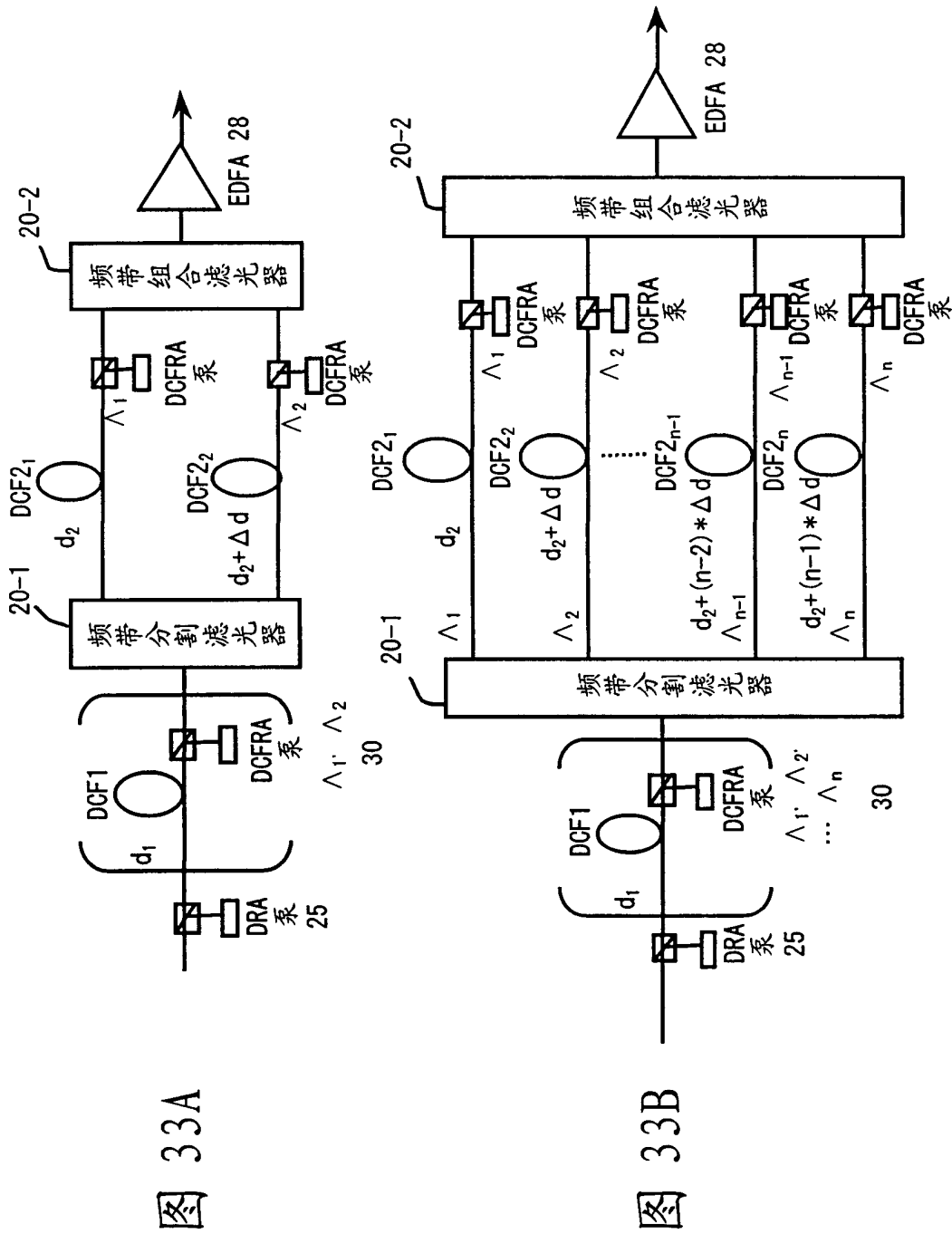


图 32A

图 32B



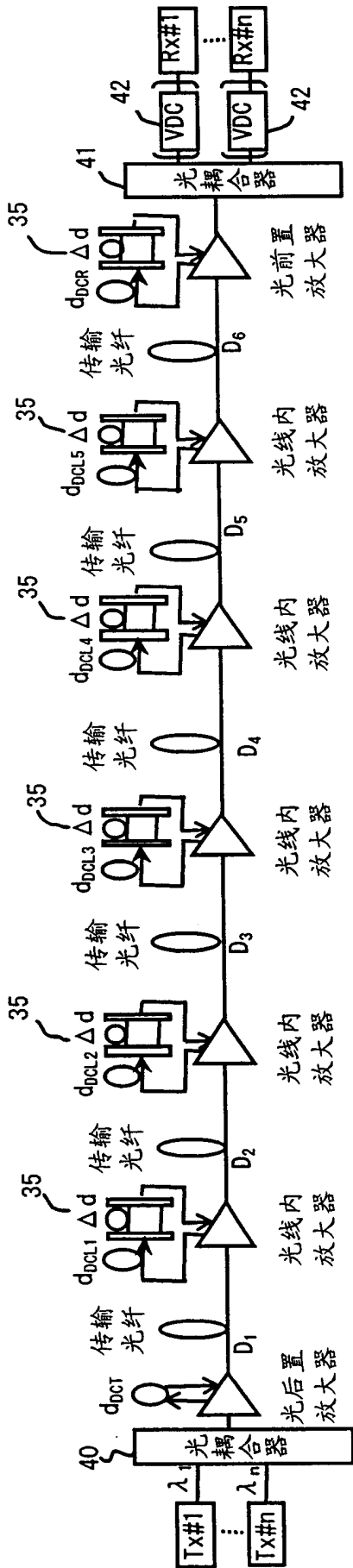


图 34

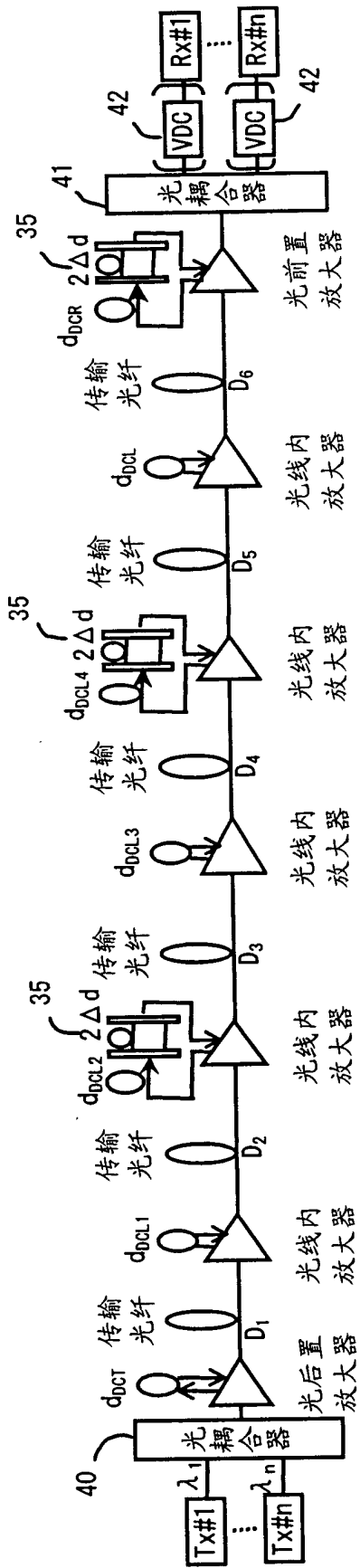


图 35

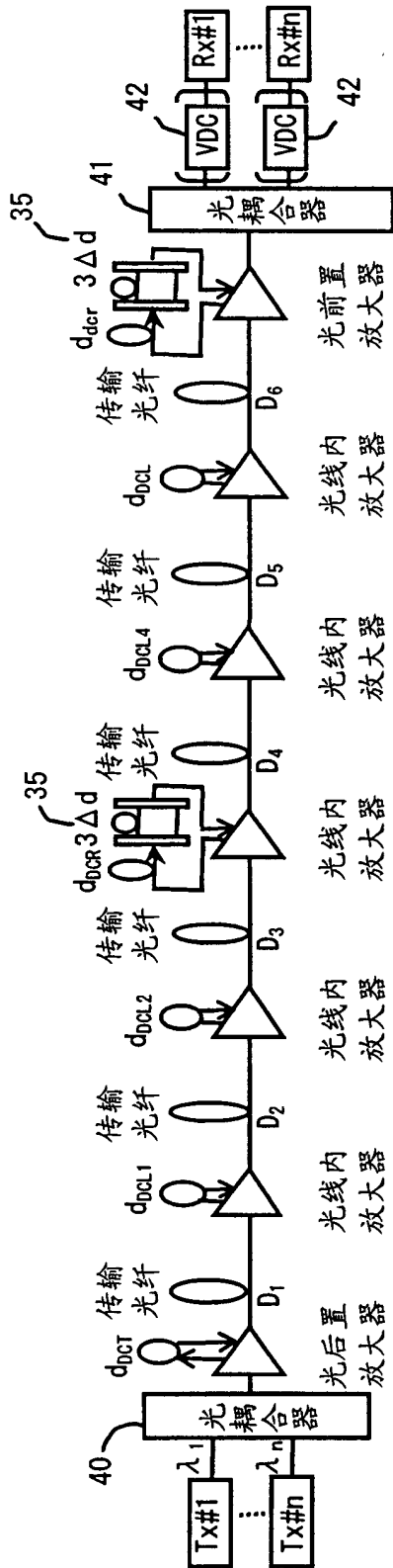


图 36

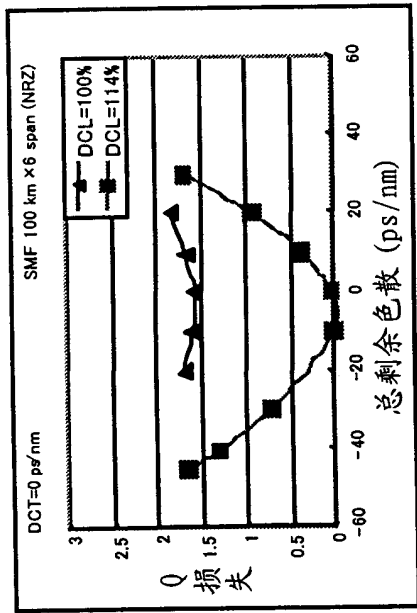


图 37A

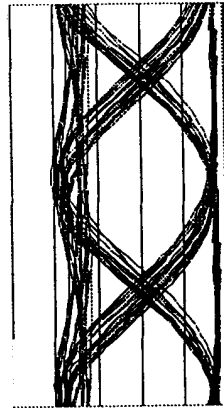


图 37B

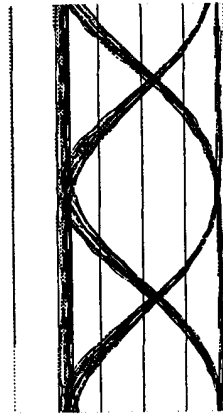


图 37C

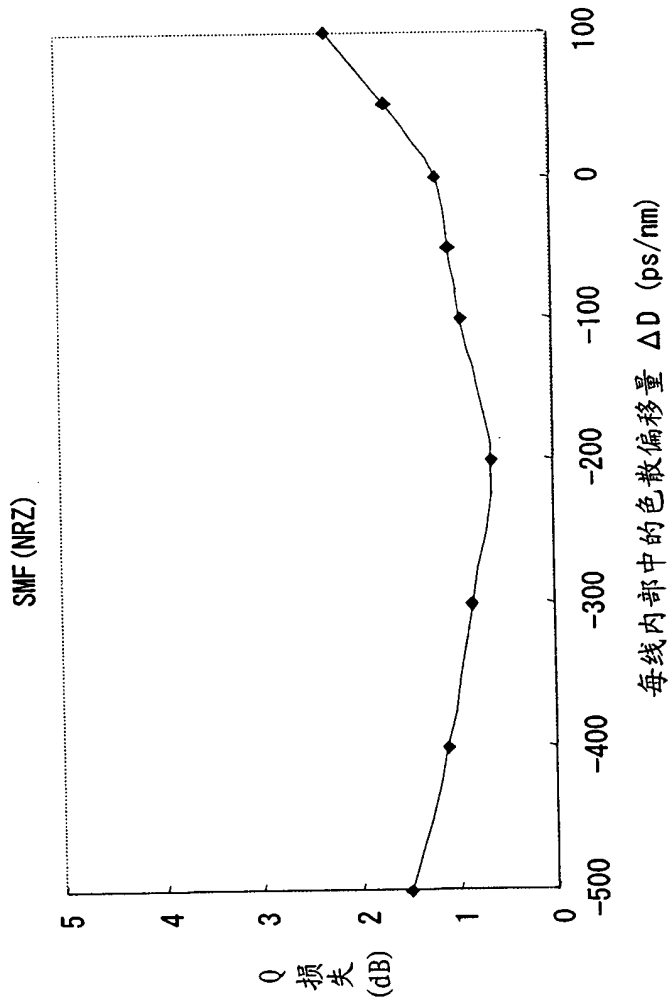


图 38





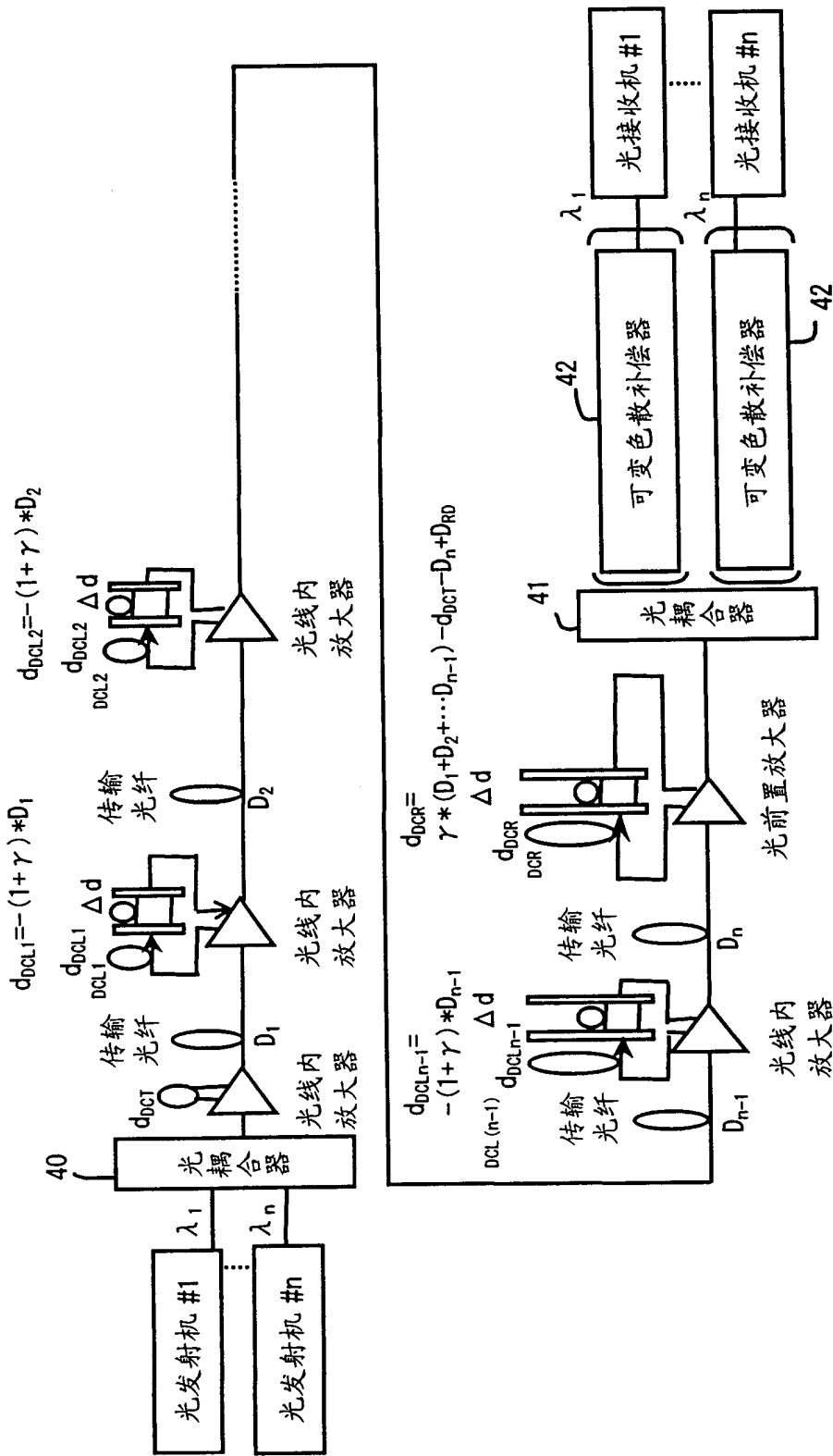


图 41