



[12] 发 明 专 利 说 明 书

[21] ZL 专利号 00800811.6

[45] 授权公告日 2004 年 1 月 28 日

[11] 授权公告号 CN 1136680C

[22] 申请日 2000.5.9 [21] 申请号 00800811.6

[30] 优先权

[32] 1999. 5. 10 [33] US [31] 09/307,704

[86] 国际申请 PCT/CA00/00537 2000. 5. 9

[87] 国际公布 WO00/69099 英 2000. 11. 16

[85] 进入国家阶段日期 2001. 1. 10

[71] 专利权人 AFC 技术公司

地址 加拿大安大略

[72] 发明人 杨丹丹 马克·M·狄格南

审查员 刘世茹

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利
商标事务所

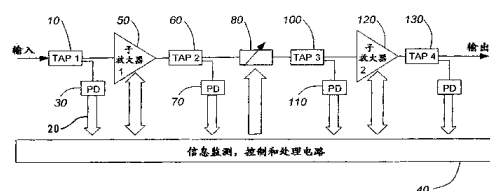
代理人 蒋世迅

权利要求书 2 页 说明书 15 页 附图 4 页

[54] 发明名称 具有动态增益均衡的输入独立无倾
斜宽带放大器

[57] 摘要

一种宽带光放大器，它能够提供恒定的放大器增益分布，修正 ASE 噪声，并把增益倾斜减至最小，这是通过与输入和所需输出电平有关的每级增益，损耗，和功率控制的组合，动态地控制不同级放大器实现的。多级放大器有独立控制每级的中央控制电路，该放大器包括：多个串行耦合级，每级是衰减器级，增益设置子放大器级，或功率电平设置级。中央控制电路确定哪些级是有源的增益或功率受控。



1. 一种多级宽带光放大器，它提供可变的放大量给可变的输入光信号以得到输出光信号，该信号具有任意所需的功率电平并基本恒定的增益分布，包括：

中央控制电路；

第一级，用于接收输入光信号和提供恒定的增益分布给中间光信号输出；

第二级，用于产生具有设定功率电平的信号，它是基于所需的输出信号功率电平由所述中央控制电路确定的，与从第一级输出的中间光信号功率电平无关；

第三级，用于响应于中央控制电路，提供功率控制给从第二级输出的信号，因而输出信号有所需的功率电平；和

耦合在各级之间的多个抽样耦合器；

其中每级耦合到中央控制电路；

其中每级是独立地受中央控制电路的控制；和

其中每个抽样耦合器还耦合到中央控制电路。

2. 按照权利要求 1 的放大器，其中第一级包括：第一光学子放大器，它有由中央控制电路控制的可调整增益设置。

3. 按照权利要求 2 的放大器，其中所述控制电路还包括：用于通过从可调整增益设置中减去与放大自发辐射（ASE）噪声有关的增益因子计算实际放大器增益的计算电路。

4. 按照权利要求 1, 2 或 3 的放大器，其中第二级包括：光信号衰减器，它有中央控制电路控制的可变衰减量设置。

5. 按照权利要求 4 的放大器，其中控制电路调整可变的衰减量设置，从预定值调整到由预定值与衰减因子之和确定的设置，与放大自发辐射（ASE）噪声有关。

6. 按照权利要求 5 的放大器，还包括：用于基于预定的参考功率电平和输入光信号的功率电平计算衰减因子的计算电路。

7. 按照权利要求 4 的放大器, 其中基于输入光信号功率电平与衰减器输出光信号功率电平的比较, 控制电路调整可变的衰减量设置。

8. 一种用可变量放大可变输入光信号的方法, 用于提供具有任意所需功率电平和基本恒定增益分布的输出光信号, 包括以下步骤:

1) 传送输入光信号通过中央控制装置控制的光学子放大器, 它提供基本恒定的增益分布并输出中间光信号;

2) 传送中间光信号通过中央控制装置控制的可变光衰减器, 它产生衰减器输出信号并基于所需的输出功率电平均衡衰减器输出信号的功率电平; 和

3) 传送衰减器输出信号通过中央控制装置控制的光功率子放大器, 它设定输出功率电平到所需的功率电平。

9. 按照权利要求 8 的方法, 其中第一步骤还包括:

a) 传送光信号通过光学子放大器, 它有由控制装置设定到所需增益的可调整增益, 用于产生中间光信号;

b) 检测来自光学子放大器的中间光信号; 和

c) 修正可调整增益以修正噪声电平。

10. 按照权利要求 8 或 9 的方法, 其中第二步骤还包括:

i) 馈入中间光信号到有可变衰减量的光衰减器, 用于衰减所述光信号以产生衰减器输出信号;

ii) 基于中间光信号的功率电平, 确定衰减因子;

iii) 基于衰减因子, 调整可变的衰减量。

11. 按照权利要求 10 的方法, 其中步骤 ii) 还包括: 基于噪声电平和预定的参考功率电平, 计算衰减因子。

具有动态增益均衡的输入独立无倾斜宽带放大器

本发明涉及增益平坦宽带光放大器，具体涉及用于多信道密集波分复用（DWDM）基光波通信系统和网络的光纤放大器。

光放大器，特别是掺铒光纤基放大器（EDFA），是现在最普遍使用的放大弱光信号的光放大装置。这些光放大器用于网络单元，例如，分插复用器，光交叉连接，开关，和路由器。大量地用于短距离和长距离光通信网，它们还可以用于 CATV 广播。最新的波分复用（WDM）系统，其中单根光纤同时运载的所有光信道有不同的光波长，需要更多地利用 EDFA。这主要是因为存在着多个波长，其中每个波长作为一个单独的信道，提供很大的数据运载容量。不仅如此，利用单根光纤上多个波长还提供网络规划和数据/话音业务路由的灵活性。

常规的 EDFA 带宽最近已从标准的 1525-1565 nm 区域扩展到新的 1565-1605 nm 区域（见 1998 年 2 月 20 日申请的美国专利申请序列号 09/026,657）。所以，现在有更大的可用带宽，产生更多的信道。这就允许光网络以高达每秒太拉比特的速率传输信息。

掺铒光纤的物理原理是这样的，信号的放大倍数或增益随信号的波长而改变。因此，馈入几个光波长到放大器中，每个波长代表一个单独的信道，就会出现一些问题。由于每个信道是由单个波长发射的，且由于增益与波长有关，不同的信道接收不同的放大倍数。因此，用于多信道传输系统中光放大器的输出必须总是增益平坦的。增益平坦化是利用增益平坦滤波器完成的，例如，光纤光栅，或选取更自然平坦的铒光纤。不管采用什么增益平坦方法，对于给定的总输入信号功率，光放大器中无源的增益平坦装置的结构是很确定的，一旦完成放大器的封装，它不再发生变化。所以，无源的增益平坦放大器的设计总是相对于特定的增益和输入功率。对于每个特定的增益和输入功率，放大器的增益分布是不变的。必须注意，在放大器工作期间，对于大

部分的 WDM 运行，放大器的增益被锁定在恒定的值上。

给出以上的说明，当总的放大器输入电平变化时，就会出现另一个问题。当信道负载因节点处的信道分出或连接处的信道插入而发生变化时，就可以发生这个条件。当这个条件发生时，必须调整放大器的泵浦功率以保持增益恒定。这样做就使放大器增益分布不发生变化。这个方法适用于信道数目的变化，其中每个信道有恒定的功率电平。通过调整泵浦功率以保持放大器的增益恒定，其中每个信道就被均匀地放大，不管有多少个信道是加载的。1999 年 3 月 31 日申请的美国专利申请序列号 09/282206 中公开一个完成此项任务的设备。

遗憾的是，包含在上述申请中的发明有一个缺点，它不适合于某些应用。具体地说，当信道负载保持相同而信道功率发生变化时，它不能维持放大器的增益分布。这个条件通常发生在诸如波分复用（WDM）环形结构的情况下，其中所有的信道或部分信道在节点处可以被替换。

对于诸如上述的应用，锁定放大器增益到恒定值上是不切实际的。当输入信号很小时，锁定增益到特定值就会产生很小的输出信号。这是因为增益是输出与输入之间的比率。若这个比率是固定的，则很小的输入产生很小的输出。类似地，在固定增益下，很大的输入产生很大的输出。这个关系在光学系统设计中就会造成困难，因为传输光纤损耗或链路损耗总是恒定的。因此，若信道输出很低，则它可能太弱而不能到达接收机。

为了可能解决这个问题，可以不把增益锁定在特定的值上。在此情况下，若增益不是锁定的，就不是根据输入调整泵浦功率。特别是当放大器工作在深度饱和区时，放大器的输出可以大致保持相同。然而，因为输入电平已发生变化，增益（或原子级粒子数反转）就不同于设计（和优化）值。原先被嵌入式滤波器或其他方法修正的增益分布可能遭到破坏。这可以引起增益与波长之间关系发生很大的变化，其中一些波长的放大倍数大于另外一些波长，和一些波长有较多放大的功率。其结果是，一些信道到达接收机，而另一些信道因太弱而不

能被检测。这个现象称之为放大器增益倾斜 (tilt)。图 1 表示发生的这种情况。从此图可以看出, 增益和增益平坦度是与输入信号电平有关的。

为了解决放大器增益倾斜问题, 提出一些具有专用特性的已知放大器。这些放大器有很小的输入动态范围, 若不调整泵浦功率, 则增益分布在此范围内可以保持不变。然而, 这种很小的输入动态范围限制了这些放大器的应用。我们需要的是这样的光放大器, 它不仅有大输入动态范围, 而且还使增益倾斜效应减至最小。在不改变输出增益响应分布的情况下, 这种放大器必须均匀地响应不同的输入电平。这种放大器还必须允许用户控制输出信号功率电平, 无须担心增益倾斜。

为了完成上述的任务, 该放大器必须是有源的增益受控。实现有源的增益控制, 必须根据每个新的输入/输出功率条件调整增益平坦装置。

按照以上的需要, 提出两种有源的增益平坦控制方法。这两种方法利用有源控制的声光滤波器, 或光开关和增益平坦滤波器的组合, 其中每个开关/滤波器的组合相当于不同要求的增益。对于每个新的信号和/或放大自发辐射 (ASE) 条件, 这两种方法采用不同的增益平坦滤波器分布。假设铍光纤增益频谱有复杂的形状, 声光方法要求采用几个声光滤波器。这种方法显然是很昂贵的。此外, 每个声光滤波器要求复杂的 RF 电子器件和专用的控制程序, 以及调整和优化该组合的复杂反馈机构。同样, 声光器件中很大的插入损耗妨碍了它们在实验室之外使用。

利用有源增益平坦控制的第二种方法是采用两个光开关, 一个光开关在输入端, 另一个光开关在输出端, 并结合若干个并行的增益平坦滤波器。控制电路每次检测到输入电平时, 它把输入电平与预编程序表进行比较, 并转换到相应的增益平坦滤波器。遗憾的是, 这种方法有某些缺点。具体地说, 这种方法缺乏灵活性, 必须安装 N 个滤波器。若 N 是一个很大的数目, 则这种方法是非常昂贵的。

所以，我们需要的是这样一种有很大动态输入的光放大器，它给用户可提供可调整的功率输出，而同时提供恒定的增益分布，从而保持增益与信号波长之间的关系。此外，这种光放大器还必须能够消除或至少减小增益倾斜现象，提供一个与输入电平或信道数目无关的恒定增益分布。

本发明提供一种宽带光放大器以克服现有技术中的缺陷，该放大器能够提供恒定的放大器增益分布，修正 ASE 噪声，并把增益倾斜减至最小，这是通过与输入和所需输出电平有关的每级增益，损耗，和功率控制的组合，动态地控制不同级放大器实现的。

本发明提供一种有输入和输出的宽带光放大器，所述放大器包括：可编程控制电路；第一光学子放大器，它有受控制电路控制的可调整增益设置并产生中间光信号；第二光学子放大器，它有受控制电路控制的可调整泵浦功率设置并产生输出光信号；光信号衰减器，它有受控制电路控制的可变衰减量设置并产生衰减器输出信号；第一光信号抽样装置，它抽样输入光信号；第二光信号抽样装置，它抽样中间光信号；第三光信号抽样装置，它抽样衰减器输出光信号；其中第一光学子放大器耦合在第一抽样装置与第二抽样装置之间；光信号衰减器耦合在第二抽样装置与第三抽样装置之间；第二光学子放大器耦合到第三抽样装置；每个抽样装置还耦合到控制电路；基于抽样装置的抽样输入，控制电路控制每个光学子放大器和光衰减器。

较好的是，基于输入光信号与中间光信号之间的比率，所述控制电路控制所述第一子放大器的可调整增益设置。

更好的是，所述控制电路还包括：通过从可调整增益设置中减去与放大自发辐射（ASE）噪声有关的增益因子计算实际放大器增益的计算电路。

最好的是，基于输入光信号的功率电平，控制电路调整可变的衰减量设置。

方便的是，控制电路调整可变的衰减量设置，从预定值调整到由预定值与衰减因子之和确定的设置值。

更方便的是，控制电路还包括：用于基于预定的参考功率电平和输入光信号的功率电平计算衰减因子的计算电路。

方便的是，衰减因子存储在控制电路的存储器中。

最方便的是，基于输入光信号功率电平与衰减器输出光信号功率电平的比较，控制电路调整可变的衰减量设置。

在本发明的另一个实施例中，提供一种多级宽带光放大器，它包括：中央控制电路；第一级，用于接收输入光信号并提供恒定的增益分布给中间光信号输出；第二级，用于产生具有设定功率电平的信号，它与第一级输出的中间光信号功率电平无关；第三级，用于提供功率控制给第二级输出的信号；和耦合在各级之间的多个抽样耦合器。其中每级耦合到中央控制电路，每级独立地受中央控制电路的控制，和每个抽样耦合器还耦合到控制电路。

较好的是，第一级包括：光学子放大器，它有受中央控制电路控制的可调整增益设置。

较好的是，第二级包括：光信号衰减器，它有受第二控制电路控制的可变衰减量设置。

更好的是，第三级包括：光功率子放大器，它有受中央控制电路控制的可调整泵浦功率设置。

最好的是，该放大器还包括：提供进一步增益控制的多个级。

较好的是，该放大器还包括：提供进一步输出功率控制的多个级。

在本发明的另一个实施例中，提供一种放大光信号的方法，它包括：

a) 馈入光信号到至少一个光学子放大器，用于提供恒定的增益分布；

b) 馈入光信号到至少一个光信号衰减器，用于提供有预定功率电平的输出信号，它与光信号的功率电平无关；

c) 馈入光信号通过至少一个功率电平光学子放大器，用于设定输出功率电平到所需的功率电平。

本发明的另一个实施例提供放大光信号的多步骤方法，其中

第一步骤包括:

- 传送光信号通过光学子放大器, 它提供恒定的增益分布并输出中间光信号;

第二步骤包括:

- 传送中间光信号通过可变光衰减器, 它产生具有预定功率电平的衰减器输出信号;

第三步骤包括:

- 传送衰减器输出信号通过光功率子放大器, 它设定输出功率电平到所需的功率电平。

方便的是, 第一步骤还包括:

- a) 传送光信号通过光学子放大器, 它有设定到所需增益的可调整增益以产生中间光信号;
- b) 检测来自光学子放大器的中间光信号;
- c) 修正可调整的增益以修正噪声电平。

更方便的是, 第二步骤还包括:

- i) 馈入中间光信号到光衰减器中, 用于衰减所述光信号以产生衰减器输出信号;
- ii) 基于中间光信号的功率电平, 确定衰减因子;
- iii) 基于衰减因子, 调整可变的衰减量。

更方便的是, 步骤 ii) 还包括: 基于噪声电平和预定的参考功率电平, 计算衰减因子。

最方便的是, 步骤 ii) 还包括: 基于中间光信号功率电平与输出光信号功率电平的比较, 调整可变的衰减量。

最好的是, 第三步骤还包括:

- i) 馈入衰减器输出信号到有可控泵浦功率设置的光功率子放大器中以产生输出信号;
- ii) 基于包含在控制电路中的程序, 确定所需的功率电平;
- iii) 基于所需的功率电平, 调整泵浦功率电平。

本发明的另一个实施例提供一种放大输入光信号以产生所需特性

的输出信号的方法，所述方法包括：

- 馈入输入光信号到多级光放大器，它有中央控制电路和多个串行耦合级；
- 基于输入光信号，包含在中央控制电路中的程序，和所需的特性，由中央控制电路确定多级光放大器中的哪些级是要求有源的；
- 发射单独的控制信号给多级光放大器中的每一级，所述控制信号是基于哪些级是要求有源的确定；
- 串行地接收多级光放大器中每一级的输入光信号；
- 基于从中央控制电路送出的控制信号，改变多级光放大器中每一级的输入光信号特性；
- 发射所需特性的输出光信号到多级光放大器的输出端。

本发明的另一个实施例提供一种多级宽带光放大器，它包括：控制电路；耦合到控制电路的至少一个衰减器级；和至少两个子放大器级，每个子放大器级耦合到控制电路；其中每级是独立地受控制电路的控制。

方便的是，每个衰减器级包括：光信号衰减器，它有受控制电路控制的可变衰减量设置；第一衰减器级光信号抽样装置，它耦合到信号衰减器和控制电路；第二衰减器级光信号抽样装置，它耦合到信号衰减器和控制电路；其中光信号衰减器耦合在第一衰减器级抽样装置与第二衰减器级抽样装置之间；基于从第一衰减器级抽样装置和第二衰减器级抽样装置的输入和程控值，控制电路控制信号衰减器的可变衰减量。

方便的是，每个子放大器级包括：光信号子放大器，它有受控制电路控制的可调整设置；第一子放大器级光信号抽样装置，它耦合到信号子放大器和控制电路；和第二子放大器级光信号抽样装置，它耦合到信号子放大器和控制电路；其中信号子放大器耦合在第一子放大器级抽样装置与第二子放大器级抽样装置之间；和基于来自子放大器级抽样装置的输入和程控值，控制电路控制可调整的设置。

较好的是，第一衰减器级耦合在接收输入信号子放大器级与产

生输出信号的子放大器级之间。

更好的是，该放大器还包括：第二衰减器级，它耦合到产生输出信号的子放大器级输出端。

本发明的另一个实施例提供一种多级宽带光放大器，它有独立控制每级的中央控制电路，该放大器包括：多个串行耦合级，其中每级是从以下各级中选取的：

衰减器级；

增益设置子放大器级；和

功率电平设置级；

其中，中央控制电路确定哪些级是有源的增益或功率受控。

较好的是，每个衰减器级包括：光信号衰减器，它有受中央控制电路控制的可变衰减量设置。

更好的是，每个增益设置子放大器级包括：光信号增益子放大器，它有受中央控制电路控制的可调整增益设置。

最好的是，每个功率设置子放大器级包括：光信号功率子放大器，它有受中央控制电路控制的可调整泵浦功率设置。

方便的是，中央控制电路按照嵌入式程序确定和改变每个子放大器的控制模式，它取决于不同的输入情况和输出要求。

本发明的优点是很清楚的。该放大器结构的灵活性给出可以编程的放大器，输出一个独立于输入功率电平的信号，而且是一个有所需特性的信号。此外，通过均衡输入信号中不同信道之间的信号功率，可以消除或减小增益倾斜问题。本发明提供一种非常灵活的解决上述问题的方法。增益倾斜被减小，增益响应保持恒定，并可以设定输出功率电平到所需值。

结合以下附图，并阅读以下本发明的详细描述，可以更好地理解本发明，其中：

图 1 是增益倾斜的效果图。

图 2 是按照本发明无倾斜的可控输出放大器模块的示意图。

图 3 是添加另一个放大器单元的本发明示意图。

图 4 是按照本发明的放大器性能图。

为了使放大器能够处理高度变化的输入信号，而同时对于每个输入提供具有所需信号输出功率电平的完全相同输出分布，图 2 中公开一种新颖的放大器结构。与标准的放大器控制过程比较，这种放大器要求单独地控制每个子放大器部分。这种新颖的放大器给每个子放大器部分提供增益和功率控制以获得无增益倾斜的性能。

放大器被分成两个或多个子放大器部分，每个子放大器部分至少包含一个有源的增益媒体。每个子放大器部分要求单独的控制，且通常至少需要一个独立的可调整泵浦激光器，用于该部分的增益控制。每个子放大器部分可以有它自己的无源部件。子放大器的输出可能已经被无源的增益平坦化。

利用电子方法控制它的泵浦激光器，第一个子放大器部分被锁定在恒定的增益上。这就提供与输入电平无关的准确增益控制。不管放大器接收到的总输入电平或每个信道输入电平有多高，通过连续地调整泵浦激光器的泵浦功率，这个子放大器部分提供恒定的增益。在子放大器部分的输出端和输入端添加一个抽头耦合器，就可以完成这种连续的调整。可以利用微处理器检测这个子放大器部分的输入电平和输出电平。基于检测到的输入电平和输出电平，连续地调整泵浦激光器的功率，提供相对于输入具有恒定增益的输出。

当调整泵浦功率使增益被锁定时，这个子放大器部分的输出增益分布保持恒定，但输出电平发生变化。把第一个子放大器的输出增益锁定在恒定值上，就可以给所有的输入电平提供相同的增益分布，从而保持增益与波长之间的关系。

为了进一步改变信号，在子放大器部分的输出端添加一个电子控制的可变衰减器。当输入电平增大时，这个衰减器增大它的衰减量设置；而当输入电平减小时，这个衰减器减小它的衰减量设置。这个衰减器的净效应是子放大器部分输出的功率均衡。所以，可变衰减器均衡下行方向的功率电平，给任何随后的子放大器提供一个具有恒定增益分布和恒定功率电平的信号。因为信噪比不会受信号衰减量的影响，

衰减器放置在第一个子放大器部分的输出端，而不是放置在它的输入端。这是因为整个放大器的信噪比下降主要是由第一个子放大器部分确定的。

在衰减器之后，可以插入其他的子放大器和/或增益平坦装置。不管利用什么部件或部件组合，最后的放大器输出有恒定的增益分布，因为随后子放大器部分接收的信号在增益与功率和波长之间关系方面具有相同的特性。余下的一些子放大器配置成固定的泵浦功率模式，它独立于放大器的输入情况。这就给每个信道提供尽可能大的输出功率。最后的可变衰减器可以添加在放大器的最后输出端。若需要较低的功率电平，可以调整这个最后的衰减器。

参照图 2，我们研究新颖放大器结构（topography）的工作。信号首先馈入到放大器的输入端。第一个抽头耦合器（Tap 1）检测这个输入信号的幅度，并经光电检测器 30 发送这个信息到子控制电路 20。子控制电路 20 与中央控制电路 40 进行通信。

子控制电路 20 调整包含在子放大器 50 中泵浦激光器的泵浦功率以获得所需的增益。为了得到准确的增益控制，必须考虑放大自发辐射（ASE）的偏置或增益因子。这是因为子放大器 50 的输出（中间输出信号，它不是最后的输出）是输出信号与 ASE 增益因子之和。按照以下的公式可以相当准确地确定 ASE 增益因子：

$$\text{增益因子} = 10 \cdot \log(1 + A / (G \cdot P_{in})),$$

其中

G 是线性标度的放大器增益，

A 是增益锁定在 G 上的线性标度 ASE 功率，和

P_{in} 是线性标度的输入信号功率。

在这些变量中， G 是恒定的，需要利用它锁定放大器增益。然而， P_{in} 是可变的，使增益因子与输入功率有关。 G 还定义成总的子放大器输出信号电平与总的子放大器输入信号电平之比率。

可以把 ASE 功率 A 考虑为恒定的，并由以下公式给出：

$$A = (h \nu_0 / 2) \cdot NF \cdot G \cdot B_p$$

其中

$h\nu_0$ 是光子能量，它在 $1.5\mu\text{m}$ 放大器窗口内是相对恒定的，

NF 是放大器噪声系数，对于增益锁定放大器，可以把它考虑为大致恒定的，

G 是恒定的放大器增益，

Bp 是放大器带宽，它也是恒定的。

根据以上讨论，只要放大器增益是固定的，ASE 功率大致是恒定的，它与输入电平无关。

一旦知道输入电平，可以准确地确定增益控制的 ASE 增益因子。例如，对于增益锁定在 23 dB 上的放大器，利用以上 ASE 计算公式，总的 ASE 功率是 0.5 mW，它与输入无关。所以，当输入是 $100\mu\text{W}$ 时，增益因子应当是 0.1 dB。若输入是 $1\mu\text{W}$ ，这个增益因子变成 5.5 dB。这意味着，为了使信号增益为 23 dB，必须调整泵浦功率以提供总的输出为 -1.5 dB。这个数字包括都是以 dB 为单位的信号，增益，和增益因子。输出是通过光电检测器 70 由抽头耦合器 60 (Tap 2) 测量的。

根据以上讨论，可以看出输出增益是如何固定在恒定值上的。信号馈入到抽头耦合器 10 (Tap 1)。抽头耦合器 10 把诸如输入电平和功率的信号特性经光电检测器 30 馈入到控制电路 40。抽头耦合器还把该信号馈入到有泵浦激光器的子放大器 50。子放大器 50 的输出（中间光信号）是由抽头耦合器 60 (Tap 2) 作检测。然后，抽头耦合器 60 (Tap 2) 把中间光信号的特性经光电检测器 70 馈入到控制电路 40。考虑到 ASE 噪声，控制电路 40 确定修正的增益设置。再利用以上公式计算 ASE 噪声功率，并把增益因子结合到计算中以确定给出所需增益的正确增益设置。基于这个计算，控制电路 40 控制子放大器 50 中的激光器泵浦功率到合适的设置。这就有效地改变子放大器的增益到修正 ASE 噪声的增益设置上。

因此，利用抽头耦合器 60 (Tap 2) 接收的功率与抽头耦合器 10 (Tap 1) 检测的功率进行比较，正确地设定增益。在考虑到上述增益因子的同时，进行这种比较。每次可以由中央控制电路 40 计算增益因

子。或者，可以利用任何一个控制电路存储器中存储的查阅表。这种查阅表包含预先计算的给定功率电平的增益因子。与增益因子是如何得到的无关，确定子放大器 50 泵浦功率的正确设置，并发出合适的控制命令。

再参照图 2，在子放大器部分之后是可编程的衰减器 80。这个衰减器 80 是由抽头耦合器 60 (Tap 2) 馈入的。衰减器 80 连接到控制电路 40。控制电路 40 也是由光电检测器 70 馈入中间光信号的特性，子放大器 50 的输出信号。衰减器的输出馈入到第三个抽头耦合器 100 (Tap 3)。这个抽头耦合器 100 把衰减器输出的特性经光电检测器 110 馈入到控制电路 40。

现在，我们可以研究这个第二级放大器的工作。根据抽头耦合器 10 (Tap 1) 接收的功率，控制电路 40 调整可编程衰减器 80 的设置。利用连接到中央控制电路 40 的两个抽头耦合器 10 和 100 的功率数据，由中央控制电路 40 计算总的衰减量。在确定衰减器 80 必须提供的所需衰减量时，必须考虑衰减因子。这是由于从子放大器输出中的 ASE 成份。按照以下的公式可以计算所需衰减量的变化，它也称之为衰减因子：

$$\Delta \text{ att}=10*\log(P_1/P_0)+10*\log(1+A/(P_0*G))-10*\log(1+A/(P_1*G))$$

其中

$\Delta \text{ att}$ 是与参考衰减量（例如，0）比较之后以 dB 表示的所需衰减量变化，

P_0 （线性标度）是当衰减量是参考值为 0 时，抽头耦合器 10 (Tap 1) 检测的子放大器 50 输入电平（因此也是整个放大器的输入电平），

P_1 （线性标度）是抽头耦合器 10 (Tap 1) 检测的子放大器 50 线性标度的输入信号功率电平，

A （线性标度）是以前所定义的子放大器 50 输出端处总的 ASE 功率，

G （线性标度）是锁定在恒定值上子放大器 50 的放大器增益。

在以上公式的各元素中，只有 P_1 是真正的变量。 P_0 是预定和预编

程到控制电路的参考值。如以上讨论的, A 在恒定的输出增益 G 下是恒定的。

在特定的环境下, 可以简化以上的公式。例如, 若抽头耦合器 10 (Tap 1) 检测的功率电平很高, 且子放大器 50 的输出不含高的 ASE 成份, 则 $P_1 \cdot G$ 远远大于 A。因此, 以上的公式可以简化成 $\Delta \text{att} = 10 \cdot \log (P_1/P_0)$ 。

另一方面, 若输入信号功率很低, 且 ASE 构成子放大器 50 输出的大部分, 则应当按照以上较复杂的公式计算衰减因子。在此情况下, 即使由于子放大器 50 产生的 ASE 成份, 最后的信号输出随输入功率的变化而略微地变化, 增益与波长之间的关系仍保持恒定。因此, 保留了无倾斜放大器的性能。

可以由中央控制电路 40 实时地计算衰减因子。或者, 可以利用存储在控制电路 40 中的查阅表。这种查阅表包含特定功率电平的特定衰减因子。

衰减因子引起的衰减量变化有效地跟踪输入信号功率的变化。由于衰减器 80 提供的衰减量, 在此之后任何的子放大器接收的信号输出将保持恒定。若足够高的输入使整个放大器饱和, 就得到这样的一个放大器, 其最后输出不仅是无倾斜的, 而且有与输入无关的恒定信号输出。

为了确定是否获得所需的衰减量, 第三个耦合器 100 (Tap 3) 提供一个控制回路。

可以看出, 衰减器的作用是, 保证给第二个子放大器 120 的总输入功率是恒定的, 与整个放大器的输入功率无关。这就保证了饱和, 因此, 第二个子放大器 120 的增益特性对于所有的输入功率电平是相同的。有两种可能的方法可以得到这种情况。

第一种方法是利用光电检测器 110 测得耦合器 100 (Tap 3) 的输出功率作为衰减器 80 上的反馈量, 对于所有的输入功率电平, 从衰减器 80 输出相同的功率, 如同输入功率电平是最小的期望值功率的情况。这个最小功率电平可以是以上例子中用 P_0 表示的电平。

第二种方法是在控制电路 40 中包含衰减因子的计算, 它作为总输

入信号电平和最小期望值输入信号电平 P_0 的函数。然后，利用以上给出的公式确定衰减因子。

在衰减器级之后，插入功率电平级。第三个耦合器 100 用于下一个子放大器 120 的输入检测。若要求下一个子放大器 120 具有增益控制，则这个耦合器是有用的。然而，最好是，子放大器 120 用于设定输出信号的功率电平。与包含在控制电路 40 中的程序有关，放大器的最后输出功率可以由子放大器 120 设定。若需要很大的输出信号，则可以相应地设定子放大器 120 的泵浦功率。另一方面，若需要较小的功率输出，则子放大器 120 的功率设置可以由控制电路 40 设定得较低。为了有助于控制子放大器 120，采用另一个耦合器 130 (Tap 4)。耦合器 (Tap 3) 100 和耦合器 (Tap 4) 130 提供一个控制回路，用于正确地控制第二个子放大器 120 的输出。

或者，如图 3 所示，若所需的输出功率低于子放大器 120 可以提供的，可以在子放大器 120 之后插入第二个衰减器 140。第二个衰减器 140 也是受控制电路 40 的控制，它可以把输出信号衰减到所需的电平。可以利用抽头耦合器 (Tap 4) 130 和 (Tap 5) 150 确定子放大器 120 和第二个衰减器 140 的输出是否在所需的电平上。

必须注意，上述的抽头耦合器可以用光学方法耦合到光耦合器的光电检测器。

或者，增益平坦滤波器可以插入在衰减器 80 之后或耦合器 100 之后的放大器内。该滤波器可以是在第二个子放大器 120 之前或第二个子放大器 120 的内部。图 3 中没有画出这种配置。在这种配置中，增益平坦滤波器插入在衰减器之后，由于恒定的增益分布和均衡的功率输出，只需要一个增益平坦滤波器。也不需要对该滤波器进行调整。

从图 3 可以看出，可以在子放大器 120 之后利用另外一些子放大器级。这些放大器级可以包括：增益平坦滤波器，另外一些衰减器，或另外一些子放大器。然而，与添加到放大器中的子放大器级无关，对于任何的输入电平只需要一组滤波器，因为滤波器总是接收具有恒定增益分布和功率电平的信号。这些子放大器级中的每一级可以独立

地受控制电路的控制，提供所需的输出特性。

至于控制电路，它可以是具有嵌入式程序的微处理器，给不同的级提供与光耦合器和光电检测器检测的信号条件有关的特定指令。或者，控制电路可以是用户可编程的，灵活地响应变化的网络条件。与控制该控制电路的程序有关，它给不同子放大器级的指令可以不同。它可以命令子放大器级增加其泵浦功率输出或锁定其增益设置到特定的值上。或者，控制电路还可以命令衰减器级增大或减小它的衰减量，以提供特定的输出信号特性。此外，控制电路可以命令子放大器级锁定它的增益或功率输出，使该子放大器级成为放大器中的中继器单元。总之，控制电路具有足够的灵活性去控制每一级，给放大器提供合适的配置以输出所需的信号特性。

还可以按照这样的方式利用上述中央控制的多级放大器，放大器中的每一级，不管它是衰减器级或控制增益或功率的子放大器级，可以由中央控制电路使它成为有源的。有源的意思是，该级有改变特性的信号，它不只是放大器内的无损耗和无增益的信号中继器。因此，若一个放大器有 7 级，中央控制电路可以给每级以不同的配置。如果需要，一些级可以配置成提供的增益为 1，或者它是一个衰减器级，如果对它没有要求，它可以不提供衰减量。所以，这种放大器在提供任何所需的信号变化方面具有极大的灵活性。

图 4 表示不同输入下的无倾斜放大器性能图。从该图及其图标符号中可以看出，信道数目或每个信道的输入电平都不会改变放大器的增益响应。增益与波长之间的关系不仅独立于信号波长，还独立于信号的功率电平。

虽然图 1 和 4 中曲线表示的波长范围是在 1525 至 1565 nm 内（标准的 EDFA 波段），本发明可应用于扩展的波段（1565 至 1605 nm）或要求增益平坦化的任何其他放大器。

现在，理解本发明的专业人员能够对上述内容设想出各种结构和实施例或变化，所有这一切都应该是在以下权利要求书所规定的本发明范围内。

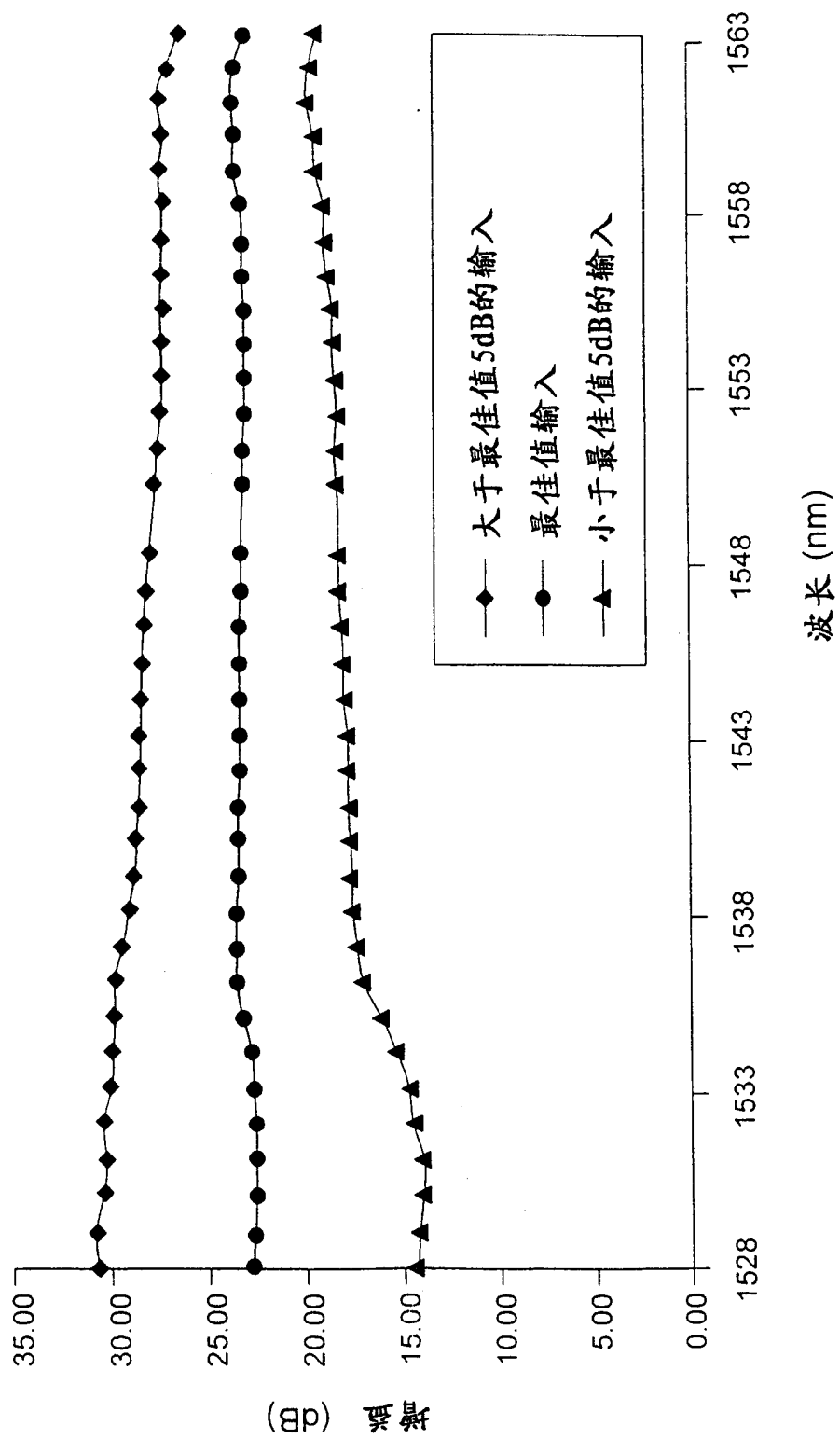


图1

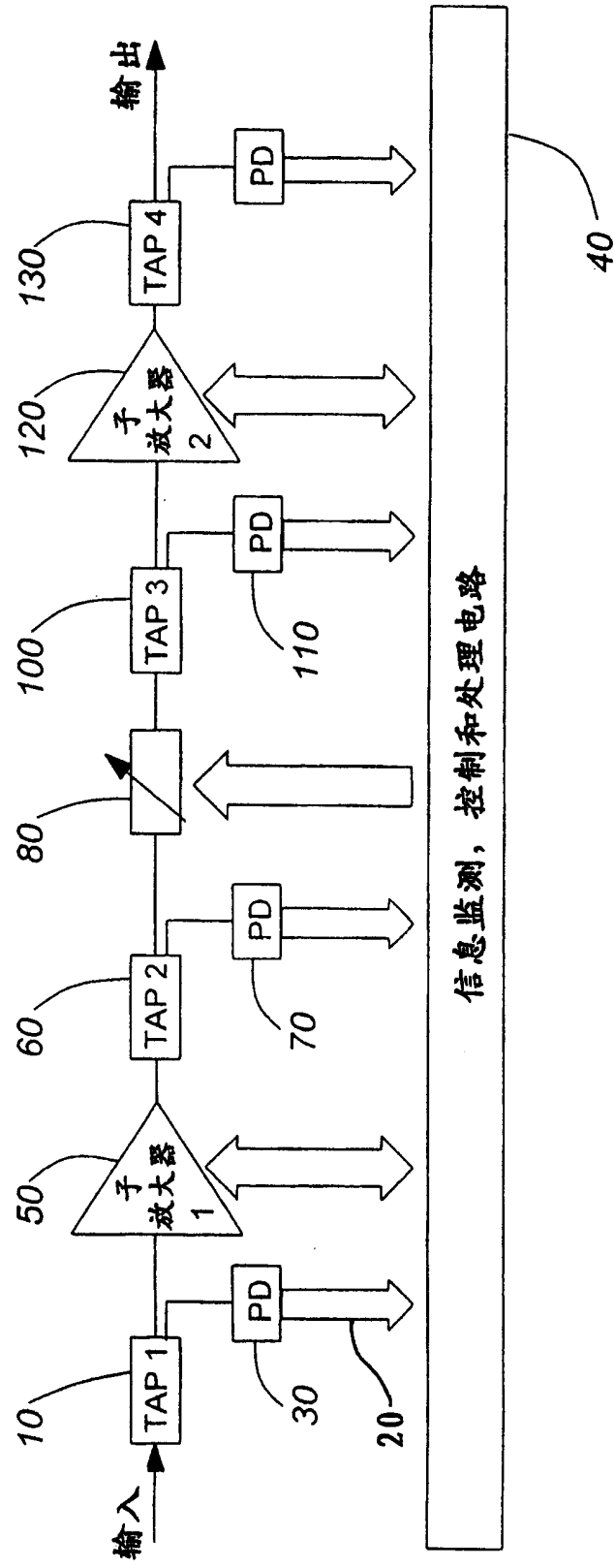


图2

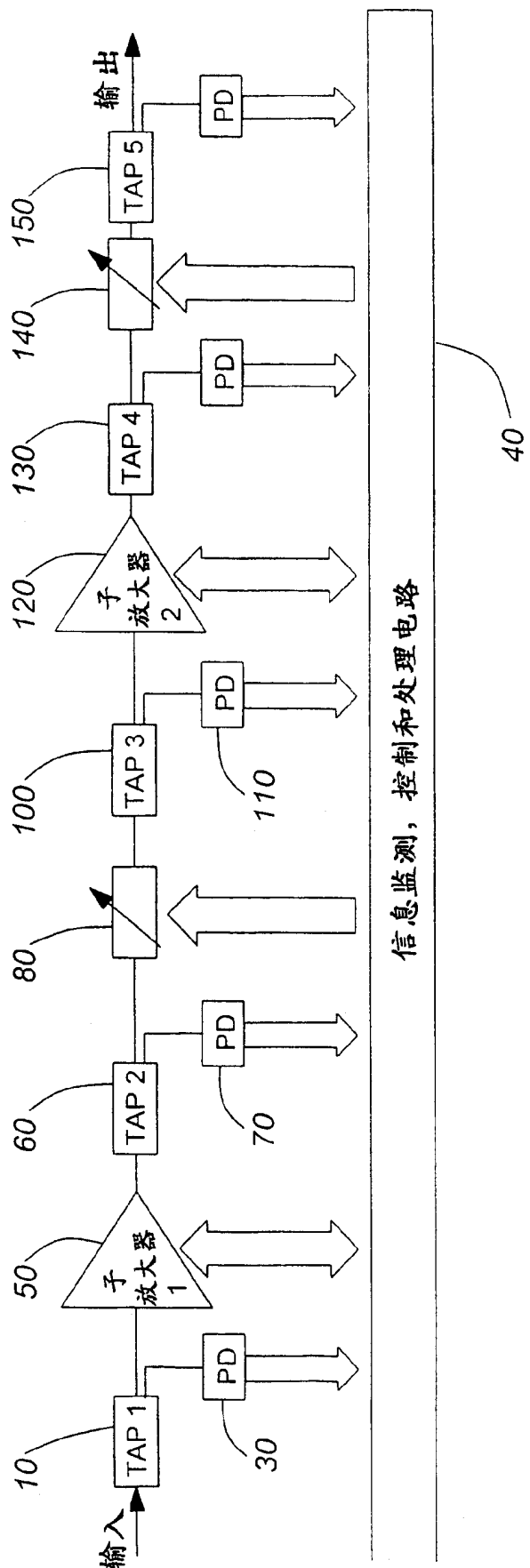


图3

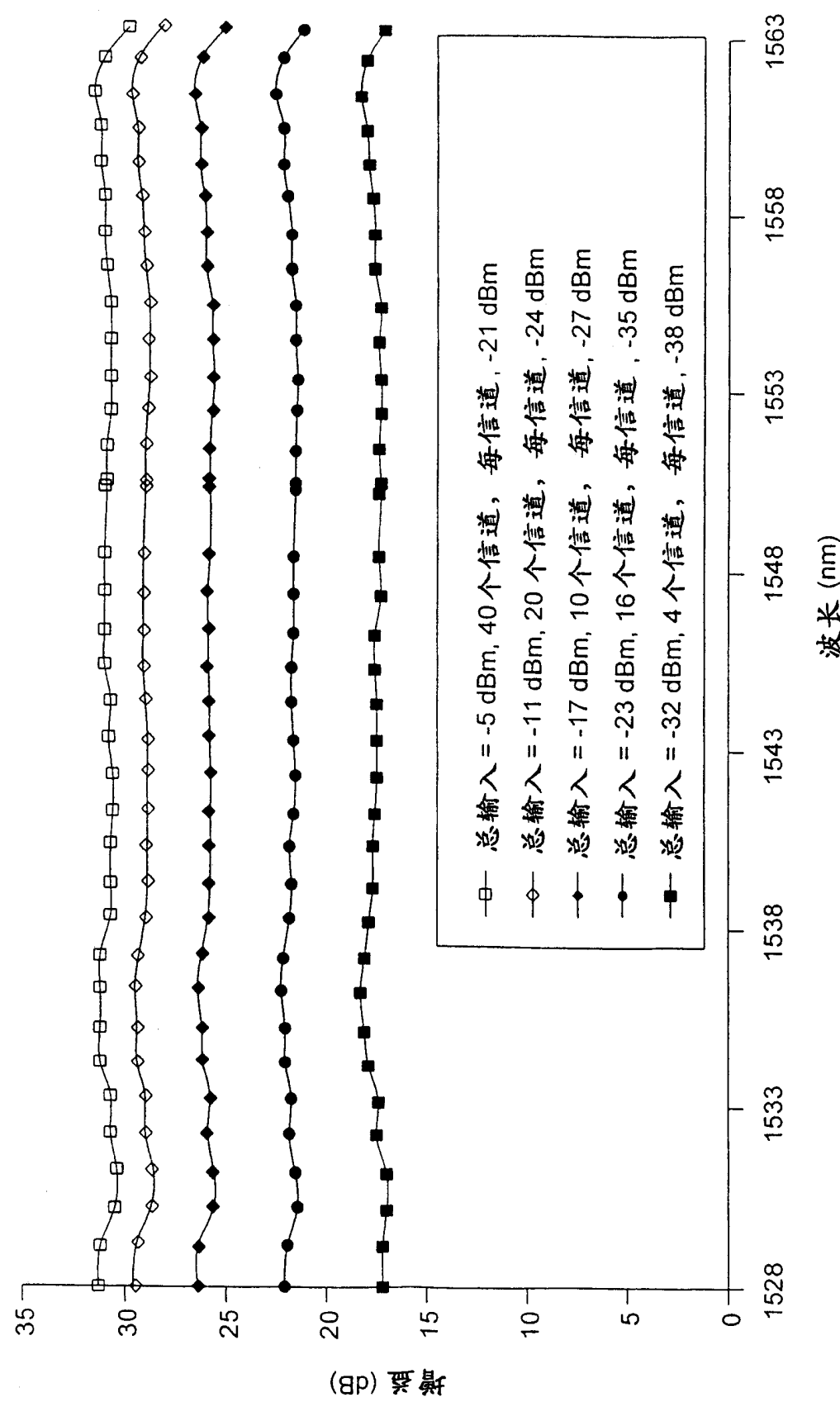


图4