



1. 一种控制光学链路或光学网络中光学放大器链的方法,包括监测从每个光学放大器输出的多信道信号的总功率电平,和控制所述光学放大器,以使每个光学放大器的输出信号的总功率电平等于预定额定总功率电平与该光学放大器的补偿功率电平之和,其中至少部分地从该光学放大器中的信道损耗估计来确定所述补偿功率电平,其中所述方法还包括:从为所述光学放大器建立的预定噪声特征和到所述光学放大器的总输入信号功率来计算所述信道损耗估计。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述信道损耗的所述估计 D 是使用以下等式计算得出:

$$D = C \cdot \log \left( 1 + \frac{k}{P_{in}} \right),$$

其中, C 是常数, k 是取决于所述光学放大器特征的常数,以及  $P_{in}$  是监测的到所述光学放大器的总输入信号功率。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中每个光学放大器的所述信道损耗的所述估计还将用于所述链中前一光学放大器的所述补偿功率电平考虑在内。

4. 如权利要求 3 所述的方法,其中每个光学放大器的所述补偿功率电平是该光学放大器引入的放大噪声引起的所述信道损耗估计与所述前一光学放大器的所述补偿功率电平之和。

5. 如权利要求 4 所述的方法,其中所述链中的所述前一光学放大器的所述补偿功率电平是从所述前一光学放大器的监测总输出功率计算得出的。

6. 如权利要求 5 所述的方法,其中通过从所述前一光学放大器的监测总输出功率减去所述额定总功率电平,而计算得出所述前一光学放大器的所述补偿功率电平。

7. 如权利要求 6 所述的方法,还包括为每个光学放大器将指示所述光学放大器的所述总功率电平的控制信号发送到所述链中的下一光学放大器。

8. 如前面权利要求 1-2 中任一项所述的方法,其中所述光学链路或光学网络是 WDM 通信链路或光学网络。

9. 如权利要求 7 所述的方法,其中所述光学链路或光学网络是 WDM 通信链路或光学网络,且所述控制信号在所述 WDM 信号的监控信道上发送。

10. 一种控制光学链路或光学网络中光学放大器链的装置,包括:

监测部件,用于监测来自所述光学放大器的多信道信号输出的总功率;及

控制部件,用于控制所述光学放大器,以使来自所述光学放大器的所述信号输出的总功率等于所述光学放大器预定额定功率电平与补偿功率电平之和,其中至少部分地从该光学放大器中的信道损耗估计来确定所述补偿功率电平,

其中所述装置还包括用于监测到所述光学放大器的输入信号的总功率的部件,和从所述输入信号的总功率和所述光学放大器的噪声特征来计算所述光学放大器中的所述信道损耗估计的部件。

11. 如权利要求 10 所述的装置,其中通过将所述光学放大器引入的放大噪声引起的所述信道损耗估计 D 加上所述光学放大器连接其中的链中的前一光学放大器的所述补偿功率电平,来确定所述补偿功率电平。

12. 如权利要求 11 所述的装置,其中还包括用于从所述输入信号来确定所述前一光学放大器的所述补偿功率电平的部件。

13. 如权利要求 12 所述的装置,其中还包括用于从所述输入信号确定所述前一光学放大器的总输出功率的部件,及用于从所述确定的总输出功率减去所述前一光学放大器的额定功率电平以得到所述前一光学放大器的所述补偿功率电平的值的部件。

14. 一种光学通信链路,包括光学放大器链和用于控制所述光学放大器操作的控制部件,其中所述控制部件包括用于监测每个所述光学放大器的多信道输出信号的总功率的部件、用于确定每个光学放大器中预期的信道损耗估计的部件、和用于控制每个光学放大器放大所述信号,以便所述总功率等于额定总功率电平与该光学放大器补偿功率电平之和的部件,其中至少部分地从该光学放大器中所述信道损耗估计来确定所述补偿功率电平,

其中所述控制部件设置为监测到每个光学放大器的总输入信号功率,并从所述监测的总输入信号功率计算每个光学放大器的所述信道损耗估计。

15. 如权利要求 14 所述的光学通信链路,其中所述控制部件设置为使用以下等式计算所述信道损耗的所述估计:

$$D = C \cdot \log \left( 1 + \frac{k}{P_{in}} \right),$$

其中, C 是常数, k 是取决于所述光学放大器特征的常数,以及  $P_{in}$  是监测到所述光学放大器的总输入信号功率。

16. 如权利要求 15 所述的光学通信链路,其中任一所述光学放大器的所述补偿功率电平等于所述光学放大器引入的放大噪声引起的所述信道损耗估计 D 与所述链中前一光学放大器的所述补偿功率电平之和。

17. 如权利要求 16 所述的光学通信链路,其中所述控制部件具有用于接收指示所述前一光学放大器的监测总输出功率的信号的部件,并且所述链中所述前一光学放大器的所述补偿功率电平从所述前一光学放大器的所述监测总输出功率来计算得出。

18. 如权利要求 17 所述的光学通信链路,其中所述控制部件设置为通过从所述前一光学放大器的所述监测总输出功率减去所述前一光学放大器的额定总功率电平,而计算所述前一光学放大器的所述补偿功率电平。

19. 如权利要求 18 所述的光学通信链路,其中所述控制部件包括用于每个光学放大器的单独本地控制单元,每个控制单元设置为经所述多信道信号的预定信道,而从所述前一光学放大器的所述控制单元接收所述前一光学放大器的所述总输出功率电平上的信息,并经所述预定信道将其总输出功率电平上的信息发送到所述链中下一光学放大器的所述控制单元。

20. 一种用于控制光学放大器操作的控制单元,其中所述控制单元包括用于监测所述光学放大器多信道输出信号的总功率的部件、和用于控制光学放大器放大所述信号,以使所述总功率大致等于额定总功率电平与该光学放大器补偿功率电平之和的部件,

其中至少部分地从该光学放大器中的信道损耗估计来确定所述补偿功率电平,并且其中从为所述光学放大器建立的预定噪声特征和到所述光学放大器的总输入信号功率来计算所述信道损耗估计。

21. 一种包括如权利要求 20 所述控制单元的光学放大器。

22. 一种光学网络,包括光学放大器链和用于控制所述光学放大器操作的控制部件,其中所述控制部件包括用于监测每个所述光学放大器的多信道输出信号的总功率的部件、用于确定每个光学放大器中预期的信道损耗估计的部件、和用于控制每个光学放大器放大所述信号,以便所述总功率等于额定总功率电平与该光学放大器补偿功率电平之和的部件,其中至少部分地从该光学放大器中所述信道损耗估计来确定所述补偿功率电平,

其中所述控制部件设置为监测到每个光学放大器的总输入信号功率,并从所述监测的总输入信号功率计算每个光学放大器的所述信道损耗估计。

23. 如权利要求 22 所述的光学网络,其中所述控制部件设置为使用以下等式计算所述信道损耗的所述估计:

$$D = C \cdot \log \left( 1 + \frac{k}{P_{in}} \right),$$

其中,C 是常数,k 是取决于所述光学放大器特征的常数,以及  $P_{in}$  是监测到所述光学放大器的总输入信号功率。

24. 如权利要求 23 所述的光学网络,其中任一所述光学放大器的所述补偿功率电平等于所述光学放大器引入的放大噪声引起的所述信道损耗估计 D 与所述链中前一光学放大器的所述补偿功率电平之和。

25. 如权利要求 24 所述的光学网络,其中所述控制部件具有用于接收指示所述前一光学放大器的监测总输出功率的信号的部件,并且所述链中所述前一光学放大器的所述补偿功率电平从所述前一光学放大器的所述监测总输出功率来计算得出。

26. 如权利要求 25 所述的光学网络,其中所述控制部件设置为通过从所述前一光学放大器的所述监测总输出功率减去所述前一光学放大器的额定总功率电平,而计算所述前一光学放大器的所述补偿功率电平。

27. 如权利要求 26 所述的光学网络,其中所述控制部件包括用于每个光学放大器的单独本地控制单元,每个控制单元设置为经所述多信道信号的预定信道,而从所述前一光学放大器的所述控制单元接收所述前一光学放大器的所述总输出功率电平上的信息,并经所述预定信道将其总输出功率电平上的信息发送到所述链中下一光学放大器的所述控制单元。

## 补偿光学链路或光学网络中多信道信号的信道损耗的方法、设备

[0001] 本发明涉及用于补偿光学链路或光学网络中多信道信号信道损耗的方法、设备和数据载体。本发明特别但不只是适用于补偿多跨波分复用 (WDM) 链路和网络中信道损耗的方法、设备和数据载体。

[0002] 通过长距离链路或网络 (100km+) 的多信道光学信号的传输要求一系列的放大器增大信号的功率, 补偿信号在遍历链路或网络时的衰减。多信道信号一般包括多个信道信号。每个光学放大器的增益或功率控制一般依靠监测每个光学放大器输入信号和输出信号的总功率, 比较被监测功率和额定 (理想) 总功率, 以及控制光学放大器的操作以便总输出功率大致等于额定总功率。额定总功率是多信道信号中信道的目标功率之和, 并且基于光学链路的设计要求确定。

[0003] 此方式的一个问题是它未将多信道信号沿光学链路发射时由光学放大器引入信号中的噪声考虑在内。在放大时, 放大器将噪声引入多信道信号中, 并且此噪声影响从放大器输出的多信道信号的被监测总功率, 且因此影响到链中下一放大器的多信道信号输入。因此, 在多信道信号放大以得到等于额定总功率的功率时, 一部分功率由噪声吸收, 导致每个信道的功率低于目标功率。此影响在下文称为信道损耗, 并且与放大器增益和链路中放大器的数量一起增大, 从而对于长距离链路 (如其距离超过 3000 公里的链路) 而变得极大。

[0004] 根据本发明第一方面, 提供了一种控制光学链路或光学网络中放大器链的方法, 包括监测从每个放大器输出的多信道信号的总功率电平 (level) 和控制光学放大器, 以便每个光学放大器的输出信号总功率电平等于预定额定总功率电平与该放大器补偿功率电平之和, 其中至少在一定程度上是从该放大器中信道损耗估计确定补偿功率电平。

[0005] 通过将放大器输出信号增大到高于额定功率电平的电平, 本发明有利地削弱了信道损耗的影响。

[0006] 信道损耗的估计可从为放大器确立的预定噪声特征和到放大器的输入信号功率计算得出。信道损耗估计 D 可使用以下等式计算得出:

$$[0007] \quad D = C \cdot \log \left( 1 + \frac{k}{P_{in}} \right),$$

[0008] 其中, C 是常数, 如等于 10, k 是取决于放大器特征的常数, 以及  $P_{in}$  是到放大器的被监测总输入信号功率。这样, 对由于放大器引入噪声而导致的信道损耗进行了补偿。

[0009] 对于包括少量放大器的链, 只需单独对待链的每个放大器, 并从到放大器的输入信号功率确定信道损耗 D 便可得到令人满意。但是, 随着链中放大器的数量增大, 此方法失去了效用。链中一个放大器总功率输出的增大导致到链中下一放大器的总输入功率增大。这对降低下一放大器中信道损耗有积极影响。但是, 到下一放大器的输入也将包括由前一放大器引入的噪声电平。此噪声电平将影响等式 1 中产生的输入信号 (假设为无杂音输入信号) 的被监测功率, 从而低估下一放大器中的信道损耗。因此, 在第一个放大器后保持了每个放大器的残余信道损耗。此影响随着链中放大器数量的增大而增长。

[0010] 因此,在优选设置中,每个放大器的信道损耗估计还将链中前一放大器使用的补偿功率电平考虑在内。这样,任何特定放大器的补偿功率电平将由于该放大器将引入到输出信号中的噪声和前面放大器已经引入信号的噪声而产生的信道损耗考虑在内。因此,对多信道输入信号中信道功率低估引起的残余信道损耗进行了补偿。

[0011] 优选是对光学链路或光学网络中放大器 n 的补偿功率电平是该放大器引入的放大噪声引起的估计信道损耗与前一放大器的补偿功率电平之和。

[0012] 有利的是,链路前一放大器的补偿功率电平是从前一放大器输出的信号被监测总功率确定的。通过从前一放大器输出信号的监测总功率减去额定总功率电平,可计算得出前一放大器的补偿功率电平。

[0013] 在前一放大器输出的信号被监测总功率可经光学监控信道发射时,这是有利的。因此,根据此设置,方法可包括为每个放大器发送指示放大器总输出功率的控制信号到链中的下一放大器。方法可在 WDM 通信链路或光学网络中使用,并且控制信号可在 WDM 信号的监控信道上发送。

[0014] 根据本发明第二方面,提供了一种承载指令的数据载体,指令在光学放大器控制单元处理器上执行时,使控制单元监测从放大器输出的多信道信号总功率,并且控制放大器,以便从放大器输出的信号总功率等于预定额定功率电平与补偿功率电平之和,其中至少在一定程度上是从该放大器中信道损耗估计确定补偿功率电平。

[0015] 指令可使控制单元监测到放大器的输入信号功率,并从输入信号功率和放大器的噪声特征计算放大器中信道损耗的估计。

[0016] 通过将放大器引入的放大噪声引起的信道损耗估计 D 加上连接的放大器的链中前一放大器的补偿功率电平,可确定补偿功率电平。指令可使控制单元从输入信号确定上游放大器的补偿功率电平。

[0017] 指令可使控制单元从输入信号确定前一放大器的总输出功率,并且从确定的功率电平减去额定功率电平以得到前一放大器补偿功率电平的值。在一个实施例中,收到的信号是 WDM 信号,并且上游放大器的总功率可从沿 WDM 信号的一个信道,优选为监控信道发送的信息确定。

[0018] 根据本发明第三方面,提供了一种光学通信链路或光学网络,它包括放大器链和用于控制放大器操作的控制部件,其中控制部件包括用于监测每个放大器多信道输出信号的总功率的部件、用于确定每个放大器中预期的信道损耗估计的部件及用于控制每个放大器放大信号,以便总输出功率大致等于额定总功率电平与该放大器补偿功率电平之和的部件,其中至少在一定程度上是从该放大器中信道损耗估计确定补偿功率电平。

[0019] 控制部件可设置为监测到每个放大器的总输入功率,并从被监测的总输入功率计算每个放大器的信道损耗估计。控制部件可使用以下等式计算信道损耗的估计:

[0020] 
$$D = C \cdot \log \left( 1 + \frac{k}{P_{in}} \right),$$

[0021] 其中, C 是常数, k 是取决于所述放大器所述特征的常数,以及  $P_{in}$  是到所述放大器的所述被监测总输入信号功率。

[0022] 在优选设置中,任一放大器的补偿功率电平等于放大器引入的放大噪声引起的信道损耗估计 D 与链中前一放大器的补偿功率电平之和。有利的是,控制部件具有用于接收

指示前一放大器被监测的总输出功率的信号的部件,并且链中前一放大器的补偿功率电平从前一放大器被监测总输出功率计算得出。通过从前一放大器的被监测总功率电平减去额定总功率电平,控制部件可计算得出前一放大器的补偿功率电平。

[0023] 控制部件可包括用于每个放大器的单独本地控制单元,每个控制单元设置为经诸如监控信道等预定信道,从前一放大器的控制单元接收有关前一放大器总输出功率的信息,并经预定信道将有关其总输出功率电平的信息发送到链中下一放大器的控制单元。本地控制单元由于避免了在地区或全局控制单元与多个放大器之间需要通信链路,减少了系统的复杂性,因此,它们是有利的。

[0024] 根据本发明第四方面,提供了一种用于控制光学放大器运行的控制单元,其中控制单元包括用于监测放大器输出的多信道信号总功率的部件和用于控制每个放大器放大信号,以便总输出功率大致等于额定总功率电平与该放大器补偿功率电平之和的部件,其中至少在一定程度上是从该放大器中信道损耗估计确定补偿功率电平。

[0025] 控制单元可包括用于估计放大器中预期的信道损耗的部件。

[0026] 根据本发明第五方面,提供了一种包括根据本发明第四方面的控制单元的放大器。

[0027] 现在将仅以示例方式,参照示出根据本发明的光学网络示意图的图形,描述本发明的实施例。

[0028] 光学网络包括用于生成WDM光学信号的发射器1、用于接收光学信号的接收器2及用于从发射器1向接收器2发射信号的长距离光学通信链路3。沿光学链路3有用于增大光学信号功率以补偿光学信号在沿链路3传播时衰减的掺铒光纤放大器(EDFA)4。在图中,示出了四个EDFA,但将理解,超长距离的链路一般将包括不止四个EDFA(这由链路3中的有点部分指示)。

[0029] 每个EDFA 4具有用于控制EDFA 4操作的相关联控制单元5。在图中,控制单元5示为与放大器4分开,但将理解,控制单元5可以是放大器4的一个集成部分。每个控制单元5具有用于监测输入信号功率的部件5a和用于监测其相关联EDFA 4输出信号功率的部件5b。链路中除最后EDFA 4外的所有EDFA 4具有沿WDM信号监控信道发射信息的部件5c。除链路中第一个启动EDFA 4外的所有EDFA 4具有接收沿WDM信号监控信道发射的信息的部件5d(由具有指向控制单元5的箭头的实线指示)。

[0030] 在使用中,控制单元5控制其相应EDFA 4,以便EDFA的WDM信号总输出功率电平 $P_{out}$ 等于额定总功率电平(WDM信号中不存在噪声时的理想总功率)加上补偿功率电平以补偿信道损耗。在此实施例中,每个控制单元5控制相应的EDFA 4,以便WDM信号的输出功率电平 $P_{out}$ 等于:

$$[0031] \quad P_{out}(n) = P^*(n) + D(n) + E(n), \quad \text{等式 2}$$

[0032] 其中, $P^*(n)$ 是链中第n个放大器的额定总功率, $D(n)$ 是在将输入信号中存在的噪声考虑在内之前的信道损耗的估计,以及 $E(n)$ 是由于输入信号中存在噪声而用来补偿第n个放大器中残余信道损耗所需的额外功率电平。在此等式中,对于启动放大器, $n = 0$ 。

[0033] 为每个信道确定目标功率。额定总功率 $P^*$ 与WDM信号信道的目标功率之和成比例,并且预设计到控制单元5中。信道目标功率取决于系统制造商和光学链路/网络的配置。

[0034] 控制单元 5 根据下面的等式,从被监测总输入功率电平  $P_{in}$  计算链路 3 放大器的信道损耗:

$$[0035] \quad D = 10 \cdot \log_{10} \left( 1 + \frac{k}{P_{in}} \right), \text{等式 1}$$

[0036] 其中,  $k$  是取决于所述放大器所述特征的常数,并且  $P_{in}$  是到放大器的被监测总输入信号功率。常数  $k$  可在放大器制造期间或者以后确定,并且取决于放大器添加到信号的噪声电平。确定  $k$  的一种简单方式是:

[0037] 1) 在恒定输出功率模式中设置放大器,总输出功率等于额定功率电平  $P^*$ 。

[0038] 2) 在放大器输入端将信道设为任意波长,从输入功率范围下限到上限改变其功率(此范围将由放大器制造商规定)。

[0039] 3) 通过光学频谱分析器测量一般为 10 或更多个的一系列输入功率的对应信号输出功率。

[0040] 4) 查找曲线  $P^*-D(P_{in})$  的最佳拟合(在最小均方意义上),其中,  $k$  是允许最佳拟合的值。

[0041]  $E(n)$  等于链中前一放大器  $n-1$  的补偿功率电平,并且可根据以下等式计算得出:

$$[0042] \quad E(n) = [P_{out}(n-1) - P^*(n-1)], \quad \text{等式 3}$$

[0043] 其中,  $P_{out}(n-1)$  是前一放大器的总输出功率,并且  $P^*(n-1)$  是前一放大器的定额总功率。在此实施例中,控制单元 5 使用 WDM 信号的监控信道,将有关其相关联放大器总输出功率  $P_{out}$  的信息发送到下一放大器 4 的控制单元 5。下一放大器 4 的控制单元 5 随后可通过从总输出功率  $P_{out}(n-1)$  减去额定功率电平  $P^*(n-1)$ ,确定前一放大器 4 的补偿功率电平  $D(n-1) + E(n-1)$ 。在备选实施例中,控制单元 5 将有关补偿功率电平的信息沿监控信道发射到下一放大器 4 的控制单元 5。

[0044] 因此,本发明的放大器 4 通过根据补偿电平将其输出功率调整到高于额定总功率电平,而补偿了信道损耗。在所述实施例中,每个放大器 4 的补偿电平等于放大器中从到放大器 4 的输入功率和通过 WDM 信号监控信道发射的前一放大器的输出功率确定的信道损耗估计。

[0045] 所附附录解释了如何得出用于确定信道损耗的关系。

[0046] 附录

[0047] 等式 (1) 推导

[0048] 总 EDFA(掺铒光纤放大器)输出功率是放大的信号项与噪声项之和:

$$[0049] \quad P_{out} = S + N$$

[0050] 通过使用增益频谱  $g(f)$  将输入功率频谱密度  $S_{in}(f)$  加权,并在工作频带(在不失一般性的情况下为  $w. g. C$ ) 上积分,可得到  $S$ 。

[0051] 通常,  $S_{in}(f)$  具有表示来自前面 EDFA 的 ASE(放大的自发辐射)噪声的连续部分和对应于 WDM 信道的离散部分。

$$[0052] \quad S = \int_{C\_band} S_{in}(f) \cdot g(f) df$$

[0053]  $g(f)$  总是为正值,因此,根据已知运算定理,存在频率值  $\xi$ ,使得

$$[0054] \quad S = g(\xi) \int_{C\_band} S_{in}(f) \cdot df = g(\xi) \cdot P_{in}$$

[0055] 两个示例可阐明  $g(\xi)$  的物理含意:如果噪声可忽略不计,并且在放大

器输入端只存在一个信道,则  $g(\xi)$  是在信道频率的增益频谱值。这种情况下,  $\max_{\xi} g(\xi) - \min_{\xi} g(\xi)$  是 EDFA 增益平坦度 (gain flatness)。如果在放大器输入端不存在信道,而只是  $S_{in}(f) = W$  的白噪声,则  $g(\xi)$  是在所有 C 频带的平均增益,并且  $\xi$  可视为增益频谱的“重心”。最后,应注意,正如后面将论述的一样,  $g(\xi)$  取决于总增益  $G$  (即,输出与输入功率之间的比率)。

[0056] EDFA 生成的噪声可表示为:

$$[0057] \quad N = \int_{C \text{ Band}} h \cdot f \cdot nf(f) \cdot g(f) df$$

[0058] 对于另一熟知定理,存在另一频率  $v$ ,使得

$$[0059] \quad f_{C \text{ Band}} h \cdot f \cdot nf(f) \cdot g(f) df = h \cdot v \cdot nf(v) \cdot g(v) \cdot B$$

[0060] 其中,  $B$  是 EDFA 波长。

[0061] 定义三个量:

$$[0062] \quad g(\xi) \equiv g$$

$$[0063] \quad a = \frac{nf(v) \cdot g(v)}{nf \cdot g(\xi)}, \text{ 其中, } nf \text{ 是任意的“典型”噪声系数, 以及}$$

$$[0064] \quad N_{in} \equiv h \cdot v \cdot nf \cdot B$$

[0065] 我们可表示为

$$[0066] \quad P_{out} \equiv g \cdot P_{in} + a \cdot g \cdot N_{in}$$

[0067] 因子  $a$  将两个影响考虑在内:第一, ASE 和增益频谱不完全具有相同的形状而是有所不同,这是因为  $nf$  取决于频率;第二,由于增益平坦度原因,“有用”增益  $g$  不同于平均增益。

[0068]  $N_{in}$  可视为等效输入噪声,就好象放大器无噪声,并且所有 ASE 在输入端添加并随后放大一样。无论如何,可简单地设置:

$$[0069] \quad k = a \cdot N_{in}$$

[0070] 以得到

$$[0071] \quad P_{out} = g \cdot (P_{in} + k) \quad \text{等式 4}$$

[0072] 或者

$$[0073] \quad g = \frac{P_{out}}{P_{in} + k}$$

[0074] 如果损耗可忽略不计,  $k \sim 0$  并且如预期一样  $g = g^* = P_{out}/P_{IN}$ 。

[0075] 因子

$$[0076] \quad d = \frac{g}{g^*} = \frac{1}{1 + \frac{k}{P_{in}}} \quad \text{等式 5}$$

[0077] 定义由于 ASE 引起的功率损失 (损耗):它在输入功率低 (高增益方式) 时增大。虽然用于  $d$  的等式似乎直接,但应记住  $k$  不是先验已知,而是取决于放大器类型。此外,它不是完全恒定,而是取决于总增益,这是因为增益和噪声系数频谱确实随着总增益变化:为可行目的而使用的有效假设是,至少在损耗不可忽略不计的  $P_{in}$  范围内,  $k$  几乎恒定。

[0078] 为找到抵消损耗的方式,我们可将上述等式 4 两边都乘以  $g^*/g$ :

[0079] 
$$\frac{g^*}{g} P_{out} = g^* \cdot P_{in} + k \cdot g^*$$

[0080] 右侧具有与等式 4 相同的外面,但现在  $g^* P_{in}$  是所需的输出信道功率。在等式 4 中,左侧是总输出功率,因此,上述等式建立我们只需通过增大总输出功率便可抵消损耗。

[0081] 
$$P_{out}^{new} = \frac{g^*}{g} P_{out}$$
 , 也就是说

[0082] 
$$P_{out}^{new} = \frac{P_{out}}{d}$$

[0083] 
$$P_{out}^{new} = P_{out} \cdot \left(1 + \frac{k}{P_{in}}\right)$$

[0084] 这样,我们推导出等式 1。

[0085] 等式 (3) 推导

[0086] 对于光学放大器链,每个放大器通过索引  $n$  识别,假设需要计算额外的功率  $E(n)$  :

[0087]  $P_{out}(n-1) = P^* + D(n-1) + E(n-1)$ ,  $n \geq 1$ , 并且 :

[0088]  $P_{out}(0) = P^* + D(0) + E(0) = P^* + D(0)$ ,  $n = 0$

[0089] 这是因为根据等式 1,可完全抵消在第一放大器输出端的损耗。

[0090]  $P_{out}(n) = P^* + D(n) + E(n)$

[0091] 如果  $L(n)$  是第  $(n-1)$  个放大器与第  $n$  个放大器之间的间距衰减

[0092]  $P_{in}(n) = P_{out}(n-1) - L(n) = P^* + D(n-1) + E(n-1) - L(n)$

[0093] 总增益为 :

[0094]  $G(n) = P_{out}(n) - P_{in}(n) = D(n) + E(n) - D(n-1) - E(n-1) + L(n)$

[0095] 信道增益为 :

[0096]  $G_c(n) = G(n) - D(n) = E(n) - D(n-1) - E(n-1) + L(n)$

[0097] 损耗补偿条件可表示为

[0098]  $G_c(n) = L(n)$ , 因此

[0099]  $E(n) = E(n-1) + D(n-1)$

[0100] 此等式右侧的和是相对于链中前一放大器的额定总功率  $P^*(n-1)$  的总额外功率。因此,

[0101]  $E(n) = [P_{out}(n-1) - P^*(n-1)]$

[0102] 这样,我们推导出等式 3。

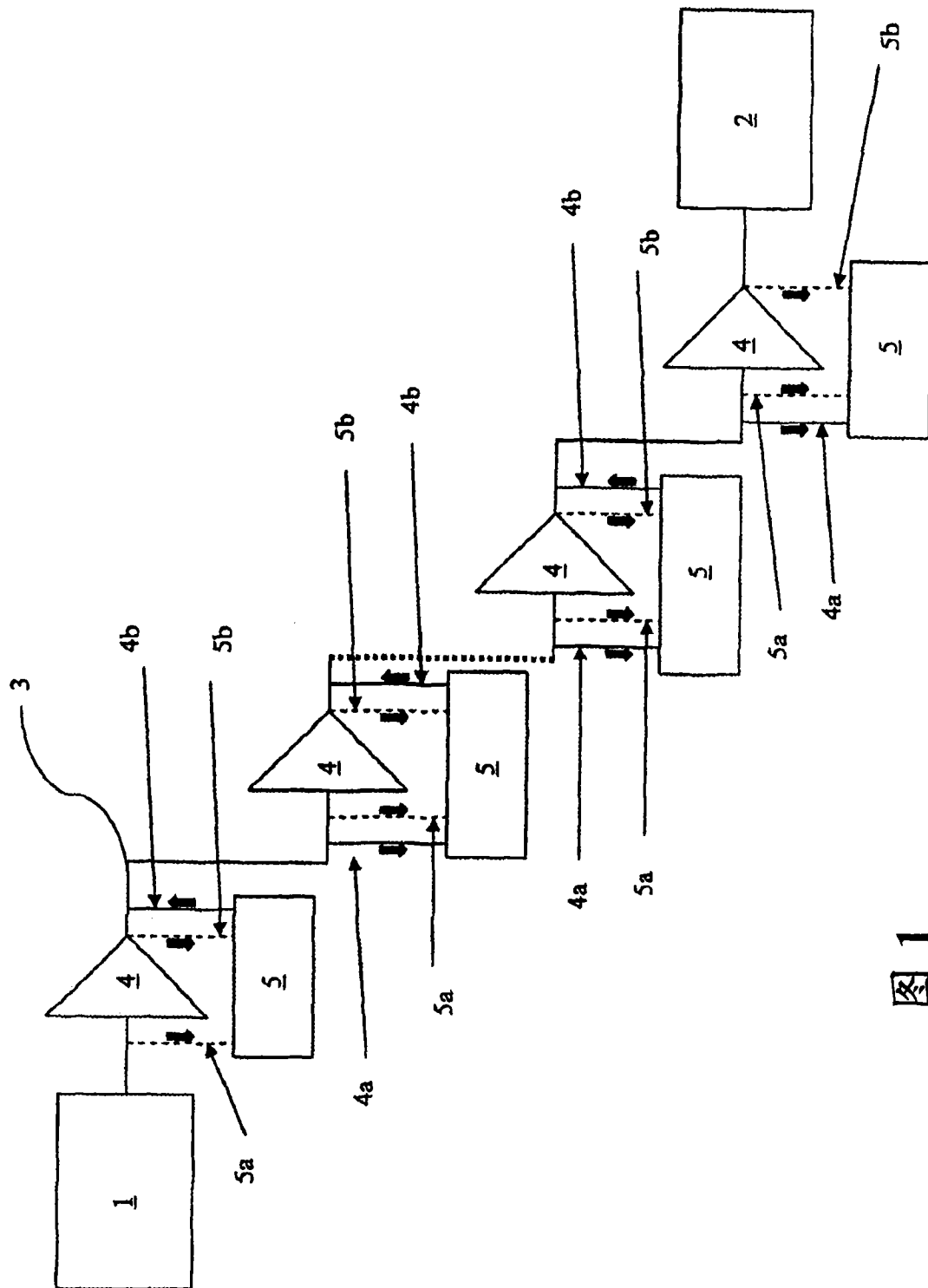


图 1