

FBG 色散补偿技术改进放大器的设计和应用

降低光传输成本是通信系统提供商和网络运营商共同的目标。行业内部激烈的竞争一直就是把成本推向更低的主要驱动力。不过，最近为了证明 10G 到 40G 的过渡是业界必经的趋势，成本问题愈加受到关注。

本文中我们将介绍一下光纤布拉格光栅（FBG）色散补偿技术如何支持新型低成本放大器设计和新的应用方式，从而向梦寐以求的降成本的目标迈出一大步。

FBG 和色散补偿光纤

使用 FBG 反射进行色散补偿和使用色散补偿光纤（DCF）进行补偿的传统方式有本质的区别。通过 FBG 进行色散管理的基本原理是使用一个精确啁啾光纤光栅对不同的波长引入不同的时延。可以专门制作光栅以便模拟光纤或者某个跨度上的色散特性。（见图 1）

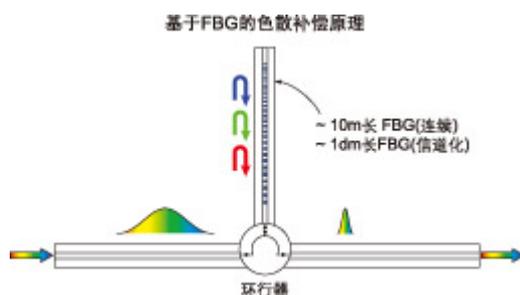


图 1. 光栅针对不同波长引入不同时延，精确啁啾光栅用来模拟被补偿光纤的色散特性。

采用 FBG 进行色散补偿和传统的 DCF 方式相比，有很多明显的优势。不过本文主要描述 FBG 直接导致新的放大器设计和架构的几个特点。

FBG 色散补偿模块(FBG-DCM)最为人知的显著优势是插入损耗小。一般情况 120km 的 FBG-DCM 插入损耗在 3 到 4dB，而同等的 DCF 的插入损耗则大约是 10dB，甚至更高。而且 FBG-DCM 的插损和传输跨度几乎无关，而 DCF-DCM 的插损则随着光纤和传输跨度的增加而增加。

这个距离无关性除了带来更好的模块封装形式外，还引出 FBG-DCM 和 DCF-DCM 相比的另一个主要的优势，那就是迟滞时间，也就是光信号进入一个器件造成的时延。对被动色散补偿器件来说迟滞时间和器件中的光路长度成正比。

对 DCF-DCM 来说 100 毫秒的迟滞时间都是常见的，而 FBG-DCM 的迟滞时间则小三个数量级，在大部分的实际应用中是可以忽略的。

FBG-DCM 另外一个明显优于 DCF-DCM 的特点是它在大光功率输入时不会产生非线性效应，虽然 DCF-DCM 由于非线性效应产生的光功率不大，一般每通道在 -2dBm 以下，但

是 FBG-DCM 技术在现行任何光网络的最高功率上都不会引入非线性效应。

插入损耗小，迟滞时间小到可以忽略，高功率时没有非线性效应，加上封装小这些 FBG-DCM 重要的特性不仅使放大器的结构得到改进，而且对系统总体成本的降低起到了显著作用。

中间接入 EDFA 设计

好好利用 FBG-DCM 的特性，传统的 EDFA 可以通过很多种方式进行优化。不仅性能，比如噪声系数，可以得到很大改善，而且尺寸、成本和结构健壮性都会大幅提高。

让我们首先考察一下 FBG-DCM 和距离无关的低插损可以带来哪些好处。

传统的中间接入放大器 (MSA) 是专门为了补偿 DCF 10dB 的插损而加入的。值得一提的是，其实，实际应用中从预放到辅助放大器，之间的损耗有 12dB，因为需要加入光隔离器防止后向散射。中间接入的 10dB 损耗预留出来是为了支持 DCF，对 100~120 公里的单模光纤进行色散补偿。

而同样的插损，如果使用 FBG-DCM 则可以对 400 公里的距离进行色散补偿，如果对单通道补偿，则距离可以更远。FBG-DCM 内置环形器的特点更在放大器中间接入模块中去除了隔离器这个损耗因素。

FBG-DCM 的低插损特性根据网络不同的拓扑、不同的链路结构和损耗容限，起到的作用大小也不同。该特性可以用来简化 MSA 结构，在一些 FBG 提供的在线色散补偿能力丰富的情况下，甚至可以把 MSA 去掉。后面这种情况下去掉 MSA 减少的成本可以占到整个传输跨度上成本的 40%。

传统的中间接入放大器

传统的 MSA (如图 2) 设计的目的是补偿 DCF-DCM 的插损。比如图 2 就使用了三级双泵浦的设计方法 (或者可以看成是二级预放加上一个辅助放大器)。

这个结构中主要部分是二级可变增益预放大器和中间接入之前一个另加的可变光增益衰减器。预放大器的两级之间的可变光增益衰减器为整个 MSA 提供可变增益 (整个增益区域内有平坦的增益)。在中间接入前另加的可变光衰减器是为了支持不同跨度引起的 DCF 的不同的损耗而设计的。

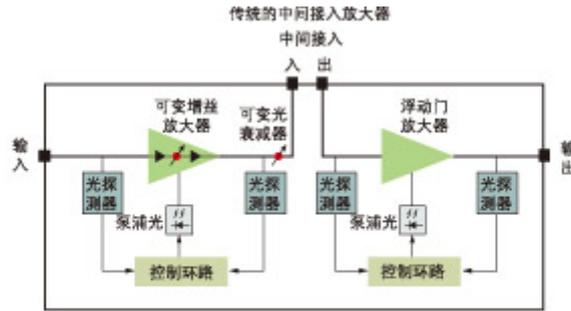


图 2. 色散补偿光纤使中段放大器的设计中加入一些低效因素。

原理上，两个可变增益衰减器可以合并，从而很大程度上简化了结构。但是这个结构必须要很大程度地降低预放的光功率，以免预放输出功率过高（高泵浦功率）。再加上中间接入的大损耗，使整个 MSA 系统的噪声系数显著下降。

但是，即使使用两级预放，MSA 的噪声系数还是要被另一个因素限制：为了使 DCF 产生的非线性效应最小，DCF 的输入功率一般需要限制在每通道 -2dBm 之内。这个要求又进一步限制了预放的增益，也就使噪声系数进一步受到影响。

如果把 DCF-DCM 换成 FBG-DCM，那么其和传输跨度无关的低插损就可以使放大器的两个可变增益衰减器合成一个，也不会影响到噪声系数，另外简化后的结构少了很多无源光器件（比如光隔离器、泵浦信号合成器、连接器），进一步降低了噪声系数。最后因为中间的输入功率不再受非线性效应影响，噪声系数又进一步降低。因为中间插损减小而获得的噪声系数性能的改善情况参见图 3。图中 MSA 的可变增益区域为 10 到 28dB。

不同中间损耗时噪声系数和增益的关系

另外，更低的中间损耗和整体损耗，以及放大器的简化结构都使泵浦光功率的需求总量降低。泵浦功率需求降低，整个 MSA 就有可能只用一个泵浦源。不过为了减少一个泵浦源，还要满足一些条件，这就引出了中间接入迟滞时间和瞬态效应抑制问题。

瞬态效应在所有的光网络中都存在，主要是由于普通的网络操作，比如上下波长信道引起的，意外的光纤折断、网络重新路由和重配置等也会引起瞬态效应。瞬态效应需要适当管理以免误码率突增，甚至严重的时候损坏接收机。

通常瞬态效应会有上升和下降时间，一般在毫秒量级，这个时间通常比标准的 DCF-DCM 的实际反应时间要短。所以，要把瞬态效应的影响降到最小，每一级的放大器都需要在瞬态效应进入该级放大器的时候独立地做出反应，所以每一级都需要独立的泵浦和控制环路。

FBG-DCM 的反应时间几乎不存在，这个特点让 MSA 设计者可以使用一个控制环路就可以控制整个放大器。

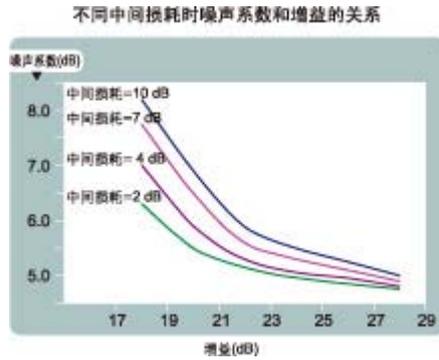


图 3. 减少中间损耗即可显著改进中间接入放大器的结构。

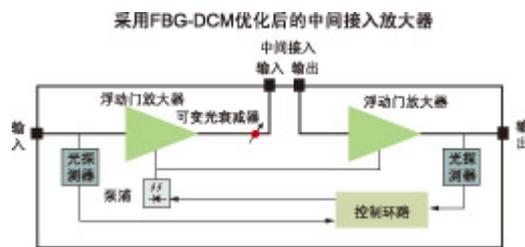


图 4. 使用 FBG-DCM，中间接入放大器可以简化成很少的器件和很简单的电路。

综合上述考虑，图 4 是使用 FBG 进行色散管理的优化 MSA。这款设计的优势在于器件数量明显减少（单泵浦、单可变光衰减器、减少了探测器和无源光器件）、电路显著简化（单控制环路取代两个分立的控制环路）。这将降低 30% 的成本。和传统的 MSA 结构相比，管脚数量减少 50%。如果把 FBG 的环形器集成到放大器中，还能进一步降低成本。如图 5 所示。

管脚的减少可以大幅降低系统成本，因为现在一块单板上可以集成更多的器件了。例如，MSA 和 FBG-DCM 可以集成在同一个线卡上或者两个放大器可以集成在同一个封装里面，然后装在一个线卡上。这在 ROADM 系统中尤其有用，因为 ROADM 系统要求放大器的各级东、西分开。

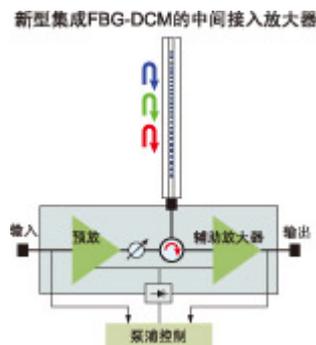


图 5. 把 FBG-DCM 的环形器集成到放大器中，中间接入放大器可以进一步改进。

图 6 是两个典型的 ROADM 系统，一个使用 FBG-DCM，另一个使用 DCF-DCM，可以看出采用了 FBG-DCM 只需要两块放大器线卡，而使用 DCF-DCM 则需要四块线卡。

通用构架策略

通过使用基于 FBG 的色散补偿，除了前面讨论的 FBG-DCM 优化的 MSA 外还有几种方式提高光传输的经济性。对于一个给定的光传输链路，如何降低成本和拓扑有关，不过有一些简单和直观的例子可以使经济性的提高立刻突现出来。

利用低插损的特性，几百公里的单模光纤色散补偿可以在一个节点实现，从而使点到点网络的经济性得到很大提高。

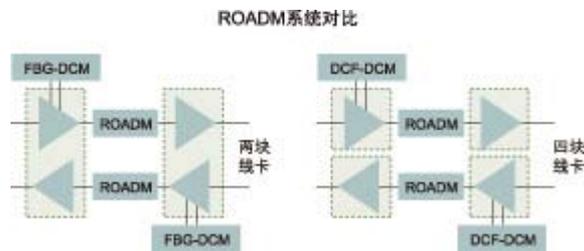


图 6. 使用 FBG-DCM 使 ROADM 的线卡数量减少一半。

低损耗和容许大功率让网络设计者可以把补偿器直接放在转发器侧的合波器之后或者辅助放大器之后。而对于 DCF-DCM，如果靠转发器太近，损耗过高会限制色散补偿能力，如果直接放在辅助放大器后面又会引入非线性效益。

对于需要分布式色散补偿的网络，比如最典型的例子是当每个节点对信号的保真度都要求很高的时候，通常会使用 MSA 或者针对节点的 DCM。如前面所说，MSA 数量的减少在有些网络中是节省成本的最有吸引力的策略。如果这个策略在网络中广泛应用，和放大器相关的费用可以节省高达 40%。

即使在没有使用 MSA 的网络，插损相关的成本节省也是很可观的。光是使用输出功率较小的放大器，对标准的 80km 传输距离来说，成本的差价就可以达到 20%。

基于 FBG 的色散管理技术为通信行业网络成本和性能的优化提供了空前的机会。在成本问题，尤其是未来的 40G 和 100G 网络的成本问题日益受到关注的今天，人们的目光已经被这项独特而开创性的技术所吸引。世界各地正在部署的上千个不同类型的网络都可证明这一点。