



专题：全光网技术与应用

使能全光网的 WSS 技术

马亦然, CLARKE I

(Finisar 公司, 澳大利亚 新南威尔士州 悉尼 2018)

摘要: ROADM 作为全光网最重要的组成部分之一, 可以给光网络带来灵活可变、降低功耗和成本、充分利用网络空闲资源等优势, 近年来开始在骨干网和城域网规模部署。对于组成 ROADM 的重要元器件之一——WSS 的构造原理进行详细阐述和分析, 并介绍未来下一代 WSS 的主要特性和挑战, 最后基于元器件发展的趋势, 给出 ROADM 的发展方向——CDC ROADM 的可行架构。

关键词: WSS; LCoS; CDC ROADM

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019083

All-optical network enabling technologies

MA Yiran, CLARKE I

Finisar Corporation, Sydney 2018, Australia

Abstract: As one of the most important parts of all-optical networks, ROADM brings benefits such as flexibility, low-power consumption, cost and efficient utilization of network resources. Consequently they have been deployed in volume over recent years in backbone and metro networks. The WSS, the key component of the ROADM, was described, followed by a description of the features and challenges of next generation WSS designs. Finally, the CDC ROADM, which was the likely next evolutionary step for the ROADM, was investigated along with the necessary components development.

Key words: WSS, LCoS, CDC ROADM

1 引言

可重构光分插复用器 (ROADM) 可以在光层实现自动路径调度和恢复, 将传统的点到点光链路变为灵活的光网络^[1]。对于运营商来说, ROADM 的价值在于在实现网络灵活性的同时降低建网成本, 因此在全世界得到了广泛部署。

ROADM 带给网络的灵活度主要包括以下 4 种属性 (实际的 ROADM 系统可以是这 4 个属性的灵活组合)。

- 波长无关: 任何端口可以配置任何波长的光收发器。当需要改变波长时, 仅需进行软件配置, 一般与可调波长的光收发器配合工作。

收稿日期: 2019-02-10; 修回日期: 2019-04-12



- 方向无关：任何本地业务可以配置发送至任何方向，或者任何方向的业务都可以配置到本地下路，改变方向仅需进行软件配置。
- 竞争无关：同一个波长的不同业务可能在同一个本地节点上路到不同方向传出，或者不同方向的同一个波长的不同业务可能在同一个本地节点下路，这时就会产生波长冲突。竞争无关的特性可以使同样波长的多个业务在同一个本地节点上下路，可以简化网络的设计，提高端口利用率。
- 灵活栅格（flex-grid）：传统上任何上下路通道都需要满足 ITU-T G.694.1 中规定的中心波长和通道间隔。但是随着 200 Gbit/s 和 400 Gbit/s 系统的到来，新的调制格式和信号波特率需要通道间隔可以更灵活地调整以实现更优的频谱效率。灵活栅格的特性可以使运营商通过软件将通道中心波长和间隔以 6.25 GHz 的整数倍为步长任意配置。

基于上述 4 种特性的组合，方向无关 ROADM（D-ROADM）和方向、波长无关 ROADM（CD-ROADM）均在全球得到了广泛部署。最近几年随着线路侧引入 200 Gbit/s 和 400 Gbit/s，灵活栅格也成为了 ROADM 系统的硬性要求。值得一提的是，波长选择开关（WSS）是目前所有商用 ROADM 系统的核心元器件。WSS 主要包含一个切换通道的阵列，可以使光的不同波长在物理上不需要进入不同的端口就进行发散。有几种技术可以实现 WSS 的核心功能，例如微机电系统（MEMS）、液晶（LC）和硅基液晶（LCoS）。由于 LCoS 具有支持灵活栅格、驱动电压低和支持端口数量多等优势，占据了 WSS 市场的绝大部分。本文将详细解读基于 LCoS 技术的 WSS，然后分析下一代集成度更高性能更佳的 WSS 产品具有的特性和面临的挑战。

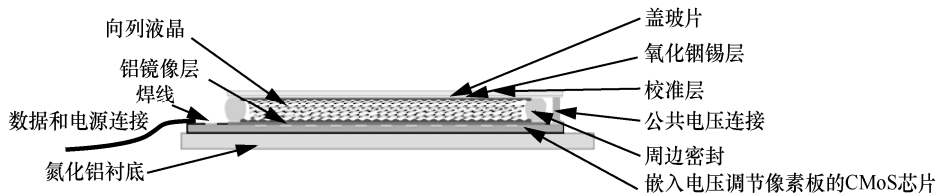
方向、波长、竞争均无关的 ROADM（CDC-ROADM）可以将任意波长从任意端口下路

以及将任意波长从任意端口上路到任意方向，可以显著降低网络规划的难度。基于新一代的高性能 WSS 和多播光开关（MCS），在本文最后提出一种新颖的不需要放大器阵列和滤波器的 CDC-ROADM 的实现方法。

2 基于 LCoS 的 WSS

基于 LCoS 的 WSS 深刻地影响了 ROADM 系统的设计。过去基于 MEMS 的 WSS 需要提前定义好每个通道的间隔（例如 100 GHz 或者 50 GHz），之后无法进行改变。但是 LCoS 上的百万级别的像素可以任意改变每个通道的间隔，在超 100 Gbit/s 时代充分利用了频率资源提高频谱效率，开启了灵活栅格的年代。

WSS 的核心是被称为 Fréedericksz LCoS 单元的核心元器件，如图 1 所示。配置电压的像素板在控制硅片的顶层。这些板子给几百万像素中的每一个像素提供一个可编程控制的电压，用来产生一个可编程控制的主要偏振方向的相位延迟（另一个偏振方向一般不使用）。物理上，相位延迟是由高度极化的液晶分子产生的。光学上，可以把每个液晶分子看作一根微型导线，导线上有一个电子可以在导线的长度上自由移动。当像素板没有充电时，这些液晶分子都平放并由校准层（alignment layer）固定，并与光波垂直，平行于光波的振荡电场。液晶分子中准自由状态的电子和光波的电场强烈的相互作用，暂时存储了能量从而减缓了波的传送。当在嵌入电压调节像素板的 CMoS 芯片（CMoS chip with embedded voltage setting pixel plates）和顶层玻璃上的氧化铟锡层（ITO layer）之间加上电压时，每个液晶分子的两端被向相反方向拉拽。当电压增加时，液晶分子会越来越和光波的方向对齐（图 1 中的垂直方向），并越来越垂直于光波的电场，导致液晶分子和光波之间的互相作用越来越弱，所以光波会传送得更快。

图1 Fréedericksz LCoS 单元^[2]

利用整个 LCoS 上的几百万乃至更多的像素，可以控制入射光波在整个平面上的相对相位，并且可以制造出成角度的虚拟镜，进行更复杂的相位编程。在图 2 中可以看到基于 LCoS 的 WSS 是如何利用这些特性来实现自身功能的。具有不同波长通道并且通道间隔不一的光信号从光纤阵列 (fiber array) 的顶端输入。衍射光栅 (diffraction grating) 将光信号按照不同频率分成“彩虹”一般覆盖到 LCoS 上。编程将不同的成角度的虚拟镜分配给 LCoS 的不同区域，使其可以微微改变不同频率的反射角。衍射光栅随后将这些虚拟镜反射回的不同频率的光重新整合，再经透镜阵列 (lens array) 聚焦后传回光纤阵列。哪些频率的信号传回哪根光纤是由编程后的虚拟镜决定的。并且在反射的过程中，还可以编程改变每个频率信号的通道间隔，实现了超 100 Gbit/s 所需要的灵活栅格。

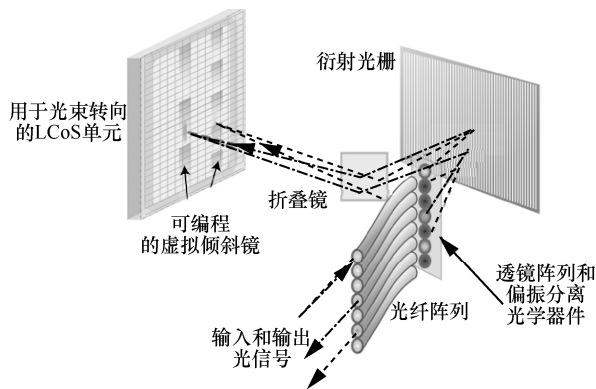


图2 基于 LCoS 的 WSS 基本结构

从 2006 年开始商用以来，基于 LCoS 的 WSS 一直保持着迅速发展。初期的产品可以支持 4 个 (1×4) 或者 9 个光纤端口 (1×9)。现在 20 端口 (1×20) 甚至 40 端口 (1×40) 的 WSS 也可以实现。

让两个 WSS 共享其中的光学器件可以实现双 WSS (dual WSS)，这大大降低了 R&S (route and select) 系统^[3]的成本。

3 下一代 WSS 的特点和挑战

最初同样的 WSS 被用于各种不同的应用，而现在 WSS 针对不同的应用场景会采用不同的设计。对于用于骨干网和城域核心的高端 WSS，大端口数高性能的需求继续主导。但是对于 5G 前传回传和城域边缘应用的 WSS，则必须做到简洁、低成本以及保证恶劣环境下的适应性。这种对于不同应用场景的 WSS 采用不同的设计将成为未来的趋势。

用于骨干网和城域核心的核心 WSS 需要具备更多的端口数，以满足日益复杂的网络需求。核心 WSS 也需要不断地降低自身的插损，提高整体传输链路的性能，这一点对于后面提到的 CDC-ROADM 架构至关重要。但是相比当前商用的 WSS 很难在尺寸上降低太多，因为器件的厚度是由支持大端口数而必须堆叠的光纤数量来决定的。另外 WSS 也需要基本的长度和宽度来充分地分隔开不同频率的光信号。WSS 所支持的频率的最小间隔在某种程度上也是由衍射光栅到 LCoS 之间的光路距离决定的。如果牺牲最小频率间隔来进一步降低尺寸，将导致传输中不同频率光信号的间隔增大，造成宝贵的频谱资源的浪费。

另外对于核心 WSS，前面提到的灵活栅格也是必不可少的。灵活栅格可以将不同频率信号之间的间隔灵活调整为 6.25 GHz 的任意整数倍。下一代单载波 400 Gbit/s 传输系统将会采用 64 GBaud



左右的波特率以及每个偏振 4 bit/符号的调制格式。考虑到一些用于保护的余量, 75 GHz 是比较理想的波道间隔。在刚结束的 OFC2019 会议上, 基于超高速 100 GBaud 波特率的系统也走上了舞台。未来灵活栅格一定会取代以往基于 50 GHz 的固定栅格系统。

运营商未来对于 30 端口乃至 40 端口的 WSS 的需求日益明确。简单计算可以得知, 40 根 250 μm 直径的光纤堆叠在一起需要最少 10 mm 的高度供 WSS 进行封装和保温处理。LCoS 也需要一定程度地隔离以保持大致恒定的工作温度, 而无需大量增加功耗来实现, 这样就带来了一些额外的尺寸增加。通过紧密地排列光纤, 可以节省一些尺寸, 但是需要相应的光学上的改进与之配合, 否则这样紧密排列光纤会增加端口之间的串扰。已经看到了一个趋势, 更薄的 WSS 需要更大的功耗进行加热, 甚至某些时候功耗会翻倍, 这也是需要考虑的因素之一。

与核心 WSS 相反的是用于 5G 前传回传以及城域边缘的 WSS, 这类 WSS 通常只需要承载很少的通道数, 例如 16 通道, 这样通道间隔可以大大增加, 例如 100 GHz 甚至 200 GHz。这样 WSS 只需要很低的分辨率, 会大大简化设计和降低成本, 而成本正是 5G 和城域边缘这类规模巨大的应用中最重要指标。除了光学设计会大幅简化之外, 一些其他的设计上这类边缘 WSS 反而更具挑战性, 例如工作温度。由于网络边缘的节点通常处在条件不好的机房, 无法实现全时的温度控制, 边缘 WSS 需要具备更广的工作温度范围。出于散热和降低功耗的考虑, 边缘 WSS 的尺寸也可以略微提高, 所用的材料也需要慎重选择, 核心 WSS 所用的完全气密封装和昂贵的光学元件都不适用于边缘 WSS。总之一切以满足需求下的最低成本为优先考虑。

4 CDC-ROADM

CDC-ROADM (波长无关、方向无关、竞争

无关) 可以将任意波长从任何方向调度到本地下路, 也可以将本地上路的任何波长调度到任何方向, 因此可以极大地降低运营商网络规划的复杂度。目前现网的部署以 CD-ROADM 为主, 是因为传统上基于现有的多播光开关 (MCS) 的 CDC-ROADM 需要放大器阵列来补偿 MCS 带来的上下路巨大的插损以及需要光滤波器来过滤掉上路时多个光源带来的噪声累积。这些额外的器件会带来额外的成本和功耗增加。现在有一种新型器件——CDC WSS 被认为在成熟以后可以用作 CDC-ROADM 的上下路器件^[4-5], 来取代 MCS, 但是作为一个不成熟的技术, 其可行性还有待进一步验证。

本文介绍一种新的基于低损耗 WSS 和 MCS 的 CDC-ROADM 架构, 如图 3 所示。图 3 分别代表 8 个方向和 16 个方向的 CDC-ROADM 架构 (只画出了一个方向作为示例)。8 个方向的 CDC-ROADM 的线路侧采用 dual 1×20 WSS。其中的 20 个端口中有 7 个是线路侧端口用于连接其他 7 个方向, 另外 8 个端口作为上下路端口连接 MCS, 最后 5 个端口作为扩展端口用于连接扩展上下路数量的 WSS。对应到 16 个方向的 CDC-ROADM, 线路侧采用 dual 1×34 WSS。其中 15 个线路侧端口, 12 个本地上下路端口连接 MCS 以及 7 个端口用于连接扩展 WSS 以扩展上下路端口数。这样对于 8 和 16 方向的 CDC-ROADM, 直接连接 MCS 的本地上下路数量分别为: $8 \times 8 = 64$ 和 $12 \times 8 = 96$ 。在这里线路侧 WSS 设计的关键是——直接连接 MCS 用于本地上下路的端口插损必须小于 5 dB, 其他端口则小于 6 dB。当本地上下路的需求大于 64 (8 方向 CDC-ROADM) 和 96 (16 方向 CDC-ROADM) 时, 需要启用扩展 WSS。每一个扩展端口可以连接一个 1×20 扩展 WSS, 扩展出新的 160 个上下路端口 (20×8)。因此在扩展端口启用的情况下, 8 方向 CDC-ROADM 可以实现 100% 的 CDC 上下路能力 (对于 96 波系统 768 个

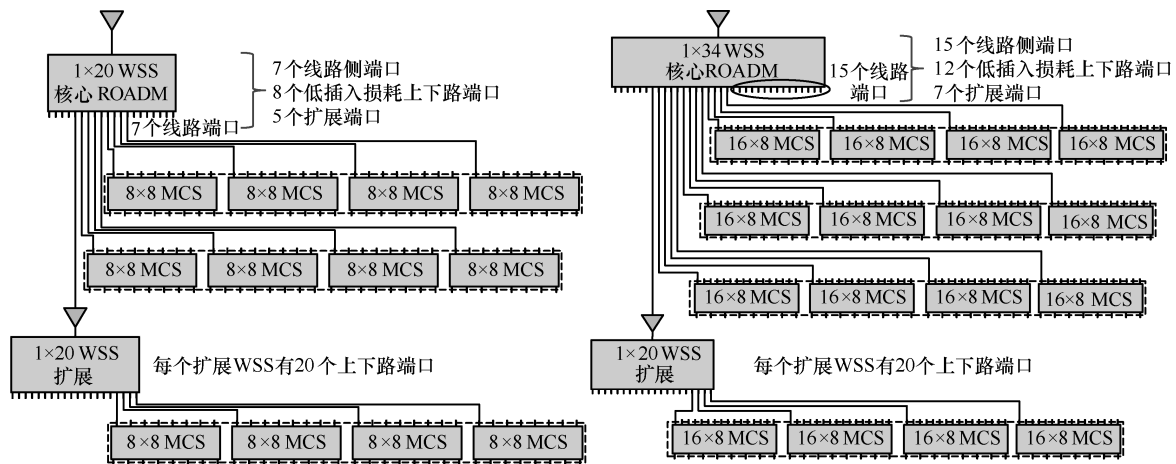


图3 使用低插损 WSS 和 MCS 的 8 方向和 16 方向的 CDC-ROADM

上下路通道), 16 方向 CDC-ROADM 可以实现 79%上下路能力(对于 96 波系统 1 216 个上下路通道)。当 16 方向 ROADM 系统需要更高的上下路能力时, 可以分配更多的直连 MCS 的端口用于连接扩展 WSS, 最高可以实现 100%上下路能力。可以看出此种架构非常灵活, 根据每个节点的上下路数量需求, 可以任意分配直连 MCS 的端口数和连接扩展 WSS 的端口数, 获得性价比最高的设计方案。

对于最新的 MCS 器件, 不管是 8×8 (对应 8 方向 ROADM) 还是 16×8 (对应 16 方向 ROADM), 插损都在 11 dB 以下。MCS 可以直接连接 WSS 的上下路端口来实现 CDC 的功能。PLC 技术可以将 8 个 MCS 封装在一个模块之内, 大量节约了占用槽位和成本。这样 WSS 加上 MCS 的上下路总插损会保持在 16 dB 之内, 因此完全不需要在 WSS 和 MCS 之间, 或者在 MCS 内部添加任何额外的放大器。在核心 WSS 线路侧出入口的放大器(对于任何 ROADM 系统都存在的放大器)足以补偿上下路的所有插损。对于非直连 MCS 而是先连接扩展 WSS 再连接 MCS 的情况, 扩展 WSS 和 MCS 的总插损小于 17 dB, 将由扩展 WSS 和核心 WSS 之间的单个放大器补偿, 而无需像传统 MCS 的 CDC-ROADM 方案那样使用巨大并且昂贵的

放大器阵列。

在以往的 CDC-ROADM 中, 8×16 以及更多端口数的 MCS 除了放大器阵列外, 还需要光收发器在上路时连接滤波器来配合使用, 以过滤掉其他波长的收发器带来的带外噪声。在本文中描述的 CDC-ROADM 架构中, 由于将 MCS 的上下路端口限制到 8 个, 因此大大减少了其他收发器带来的带外噪声, 消除了上路部署额外光滤波器的需求。另外, 相干传输技术的使用也可以通过本振激光器来过滤掉下路时的带外噪声, 消除了下路对于额外光滤波器的需求^[6]。

除了结构简单灵活成本低以及可以支持最高 100% CDC 上下路能力以外, 此种 CDC-ROADM 另一个重要的优势在于可扩展性。成熟的 MCS 技术可以很方便地实现大于 16 个方向的系统需求, 例如 20×8 的 MCS 可以配合 WSS 实现 20 个方向的 CDC-ROADM, 而这是不成熟的 CDC WSS 方案很难做到的。

最后还有一个影响 CDC-ROADM 系统性能的因素就是滤波效应带来的系统代价。由于 WSS 的滤波形状不是完美的矩形, 因此会对信号带来一定的损伤, 这就是滤波代价的来源。当今的光传输系统需要信号经过多个 ROADM 节点的级联, 级联后的通道带宽会进一步下降,



降低系统的 OSNR。反过来说，OSNR 代价也决定了系统在电再生前可以允许经过多少个 ROADM 节点级联。广泛部署的 100 Gbit/s 相干 DP-QPSK 系统已被证明在 50 GHz 通道传输的前提下对 ROADM 级联并不敏感。但是，下一代 200 Gbit/s/400 Gbit/s 系统使用更高的调制格式和更紧凑的通道间隔以提高频谱效率，这时 ROADM 级联带来的滤波 OSNR 代价就变得不可忽略。滤波代价和级联经过的 WSS 数量可以是指数关系，尤其是对于 16QAM 等高阶调制格式。这时基于本文提到的 MCS 的 CDC-ROADM 比起基于 CDC WSS 的 CDC-ROADM（上下路各增加一个 CDC WSS 滤波）就有了滤波代价的优势，尤其是在两者插损相当的情况下。因此，在滤波代价受限的系统中，本文中基于低插损 MCS 和 WSS 的 CDC-ROADM 系统可以级联更多的 ROADM 节点，或者在经过同等数量 ROADM 节点时可以传输更远的距离。

5 结束语

由于 LCoS 可以实现更大端口数以及灵活栅格，基于 LCoS 的 WSS 已经成为了业界主流。本文阐述了基于 LCoS 的 WSS 的基本原理，并且列出了未来 WSS 所需要的一些特性，例如低插入损耗、大端口数以及边缘 WSS 需要的低成本等，并分析了实现这些特性的挑战。最后提出了一种基于低损耗 MCS 和 WSS 的 CDC-ROADM 架构，在不需要复杂的放大器阵列和发送端滤波器的同时，可以实现最高 100% 的 CDC 上下路能力，并且可以扩展到 16 方向以上。

参考文献：

- [1] BRACKETT C. A scalable multiwavelength multihop optical network: a proposal for research on all-optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(5): 736-753.
- [2] FRISKEN S, CLARKE I, POOLE S. Technology and applications of liquid crystal on silicon (LCoS) in telecommunications[J]. Chapter in Book *Optical Fiber Telecommunications*, 2013: 709-742.
- [3] 张成良. 光网络新技术解析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
ZHANG C L. Optical network—new technology and implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [4] COLBOURNE P D. Contentionless twin 8×24 WSS with low insertion loss[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [5] HAN T, PLUMRIDGE J, FRISKEN S. LCoS-based matrix switching for 2×4 WSS for fully flexible channel selection[C]//International Conference on Photonics in Switching, September 11-14, 2012, Ajaccio, France. Piscataway: IEEE Press, 2012.
- [6] MA Y. Novel CDC ROADM architecture utilizing low loss WSS and MCS without necessity of inline amplifier and filter[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2019.

[作者简介]



马亦然（1983—），男，博士，Finisar 公司资深系统架构师，主要研究方向为光网络架构、ROADM、超高速光传输系统及模块、5G 承载光网络等。



CLARKE I, 男，Finisar 公司测试和测量总监，主要研究方向为光学仪器仪表、新型波长选择开关以及光通道监控等。