

基于改进的标记率调制的光标签交换

李雪蒙*, 卢旸, 钱哲楷, 张天恒, 翟彦蓉, 毕美华

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310016

摘要 光标签交换(OLS)对基于分组的光交换是一种有吸引力的解决方案。标记比率调制(MRM)的方法是将标签信息叠加到载荷信息上。为了提高有效比特率,对标记比率调制进行了改进,将原来的四脉冲位置调制(4PPM)码改为一个新的5b8b码,使编码效率提高到了62.5%。同时,将偏振复用(PDM)与MRM结合使用,使比特率提高了一倍。标签接收器通过低速接收器直接接收来自偏振复用的标签信号,不需要使用偏振解复用,从而降低了成本。改进后的MRM在保持了MRM优点的同时,载荷的有效比特率比4PPM码的MRM提高了250%。仿真结果验证了改进的基于MRM的OLS的可行性。

关键词 光通信; 光标签交换; 标记比率调制; 高编码效率; 偏振复用

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221846

1 引言

网络和数据中心中基于分组的流量和数据交换的快速增长对光分组交换的要求越来越高。传统的电交换采用光-电-光的交换形式,存在严重的电子瓶颈和功耗过大的问题,难以满足交换网络的增长需求。光交换技术将信息交换从电域转移到光域,提高了交换速率,具有高速、透明、低成本、大带宽和低功耗等优点^[1-3]。

在分组交换中,数据被打包成光数据包,包的标签与被打包的数据(载荷)一起传输。通常,标签和载荷是在网络层(如IP协议)或数据链路层(如以太网)中组合在一起的。每个节点都必须接收整个数据包,包括标签和载荷,即使大多数节点(中间节点)只需要标签信息来转发数据包。在每个节点都接收载荷是一种浪费,特别是在传输速率高于10 Gbit/s的光纤网络中。在光标签交换(OLS)技术中,网络交换中的中间节点仅接收处理用标签信号承载路由的信息,而有效载荷在光域保持传输无需进行光-电-光转换,也就是分组的有效载荷信号实现了全光交换^[4]。

OLS技术是光分组交换的有效解决方案^[5-7]。OLS将标签与载荷分离,以便在中间节点中只读取标签,而无需检测载荷^[6-7]。在每个节点中,光数据包的部分功率先被抽出到低速接收器中,用于标签检测。如果数据包与节点具有相同的目标地址,则数据包被发送到载荷接收器中。否则,数据包无需通过任何其

他层,直接转发。OLS将数据包的开销降至最低,并简化了网络控制和管理。因此,OLS提高了网络的效率、可扩展性和吞吐量,特别是在具有大量中间节点的网络中^[7]。

文献[7]中提出、总结和比较了许多OLS技术。广泛应用的技术是通过正交调制将标签信息叠加到载荷上,如频移键控(FSK)^[8-9]、相移键控(PSK)^[10-11]和极化键控(PolSK)^[12-13]。由于FSK、PSK和PolSK都是非振幅调制的,故它们不会对移幅键控(ASK)的载荷信号产生串扰。由于振幅变化,故ASK信号会对叠加的FSK/PSK/PolSK信号产生串扰。标签信号和载荷信号一起传输,不需要额外的时隙或波长通道。

本文提出了标记比率调制(MRM),其中标签信号和载荷信号仅通过一个ASK调制器同时调制^[14]。载荷信号应采用低标记比率码型。调制标签信号的标记比率(反转载荷信号)将其叠加到载荷上。MRM降低了操作复杂性、调制损耗和设备成本,它可以与波长/相位/偏振复用一起应用。

2 基于改进MRM的OLS

对MRM进行了改进,增加了有效比特率。方案[14]中的低标记率码型为四脉冲位置调制(4PPM),其编码效率仅为50%,载荷信号的有效传输速率降低到了原来的一半。改进的OLS中载荷选择了一种新的低标记比率码型5b8b码,其编码效率可达到62.5%。此外,将MRM与偏振复用相结合可使比特

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2022-11-28; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-06

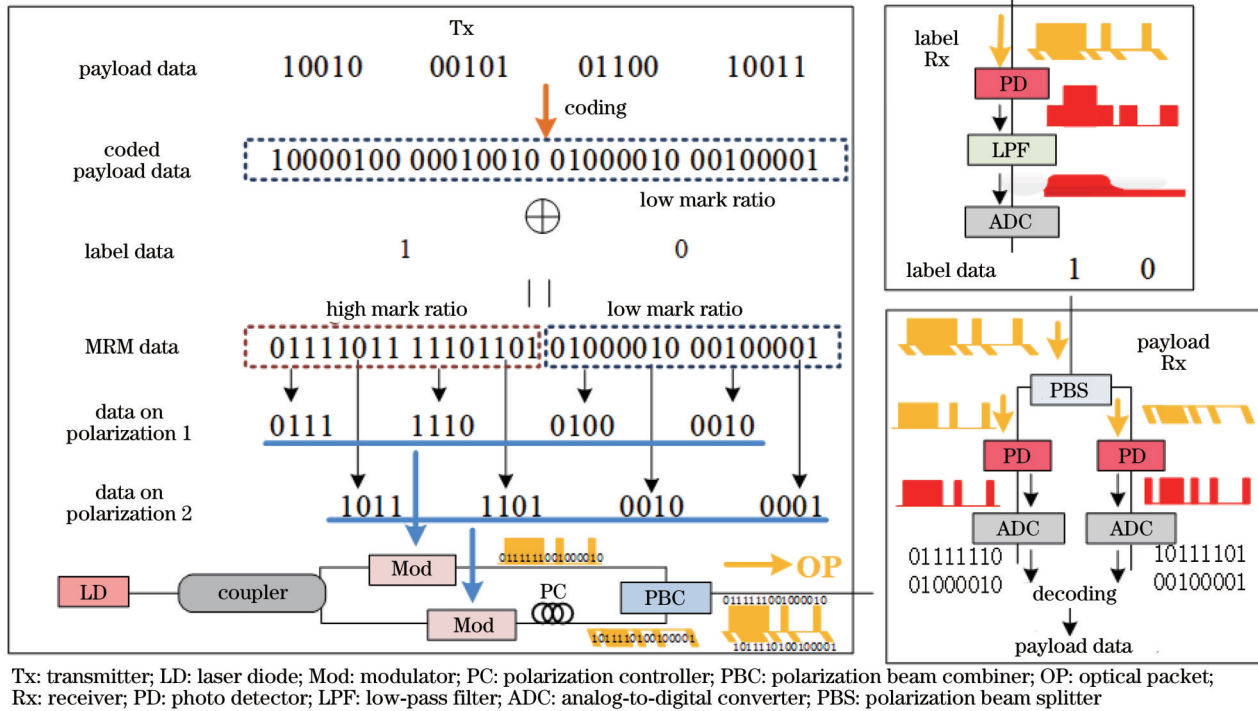
基金项目: 杭州电子科技大学研究生科研创新基金(GK228810299135)

通信作者: *1029857651@qq.com

率提高一倍。载荷的有效比特率为传输速率的 125% (62.5%×2)。低速标签接收器接收无需偏振分束器 (PBS)。载荷接收器使用 PBS 分离不同偏振的信号,再接收和解码这两个信号。与以前 4PPM 码的 MRM 相比^[14],载荷的有效比特率提高到了 250%,同时保持了 MRM 的所有优点。

提出的基于调制改进 MRM 的 OLS 如图 1 所示。在发射机中,载荷信号为低标记比率码。为了提高编码效率,将码型从文献[14]中的 4PPM 码更改为新的 5b8b 码,它将原始 5 bit 单元映射到一个 8 bit 单元中。每个 8 bit 单元只有一个或两个标记,因此有 36 个可能的单元,舍弃掉了其中的 4 个单元分别是“10001000”、

“01000100”、“00100010”和“00010001”。此时,编码效率提高到了 62.5%,比以前的码型(50%)高 25%。编码后,标记比率小于 25%。然后,将编码的载荷数据通过异或操作与低速标签数据相结合。在异或运算后,当标签位分别为“1”或“0”时,8 bit 单元相应地具有高或低标记比率。标签数据通过调整标记比率进行叠加。接着,数据被分为两个序列,进行偏振复用。每个 8 bit 单元中的前 4 bit 分配给一个序列,最后的 4 bit 分配到另一个序列中。这两个序列被 ASK 调制到两个光载波上成为了两个光信号。这两个光信号被偏振复用作为一个光包进行传输。传统的时域编码变为时域和偏振域联合编码。



Tx: transmitter; LD: laser diode; Mod: modulator; PC: polarization controller; PBC: polarization beam combiner; OP: optical packet; Rx: receiver; PD: photo detector; LPF: low-pass filter; ADC: analog-to-digital converter; PBS: polarization beam splitter

图 1 基于改进 MRM 的 OLS 的传输和接收

Fig. 1 Transmission and reception of OLS based on modified MRM

当光数据包到达节点时,部分功率进入低速接收器接收标签信息。偏振复用的光信号通过光电探测器后被直接转换为电信号,无需偏振分束器。这种电信号是不同偏振的两个光信号的幅度总和。由于两个光信号的每 4 位来自同一个 8 bit 单元,故它们都是高标记比率或低标记比率。因为码型“10001000”、“01000100”、“00100010”和“00010001”被舍弃,所以这两个信号的总和在高标记比率段将为“1”或“2”,在低标记比率段将为“0”或“1”。低速接收器的有限接收带宽起到了低通滤波器的作用,它将抹平载荷信号快速的幅度变化。高标记比率段和低标记比率段分别被转换为高电平和低电平。因此,与标签信号相对应的附加的 MRM 信号在滤波后成为了 ASK 信号,并可通过模数转换器转换为数据。标签接收器只是一种不包含

偏振分束器的低速接收机,因此成本很低。

当数据包的地址与节点相同时,数据包被发送到载荷接收器中。在载荷接收器中,首先利用偏振分束器对两个偏振上的两个光信号进行分离。然后,将两个光信号检测出来,并进行模数转换。最后,将转换后的两个数据进行合并,并进行解码操作以恢复出原始载荷数据。虽然 MRM 会反转编码的载荷数据的某些 8 bit 单元,但是不会造成载荷数据的误判。解码正确则可以恢复正确的载荷数据。

3 系统仿真与性能评估

为了证明所提的改进 MRM 的可行性,利用 OptiSystem 进行了仿真演示。仿真设置如图 2 所示。将伪随机二进制序列 (PRBS) 作为原始的载荷数据进

行 5b8b 编码。编码数据在每个 8 bit 单元中有一个或两个标记。然后,通过异或操作将编码数据与另一个 PRBS(作为标签数据)组合。标签数据的比特率分别设置为编码的载荷数据的比特率的 1/8、1/16、1/32 和 1/64,故异或操作中每个标签比特分别覆盖 8、16、32 和 64 个编码载荷位。在异或运算之后,MRM 数据被分为两个序列。如前所述,将每个 8 bit 单元中的前 4 bit 放入一个序列,最后的 4 bit 放入另一个序列中。将这两个序列加载到 OptiSystem 中的两个信号生成器中。将信号生成器的传输速率均设置为 40 Gbit/s,因此编码的载荷数据的总比特率为 80 Gbit/s。标签数据的比特率分别为 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s。将上升沿和下降沿的时间设置为整个比特周期的 5% 利用马赫-曾德尔调制器(MZM)将生成的信号调制到两个 1550 nm 的光载波上。设置调制深度为 14 dB。

这两个光信号经过偏振复用后通过 50 km 的单模光纤(SMF),再通过色散补偿光纤(DCF)。利用一个可变光衰减器(VOA)来测量误码率(BER)。在传输过程中,利用耦合器将信号分为两路:上路用于载荷数据接收,光信号经偏振分束器(PBS)解复用,再利用两个光电探测器(PD)进行检测;下路用于接收标签数据,利用 PD 直接检测光信号,不需要偏振解复用。为了模拟接收机的接收带宽限制,每个 PD 后面都有一个低通滤波器(LPF)。将载荷信号接收支路中 LPF 的截止频率设置为 30 GHz(信号比特率的 75%)。将标签信号接收支路中 LPF 的截止频率设置为对应标签信号比特率的 50%(分别为 5.000、2.500、1.250、0.625 GHz)。上路的接收信号是 MRM 信号,可将其解码为原始载荷数据。下路的接收信号是 MRM 信号的叠加,与标签数据对应。

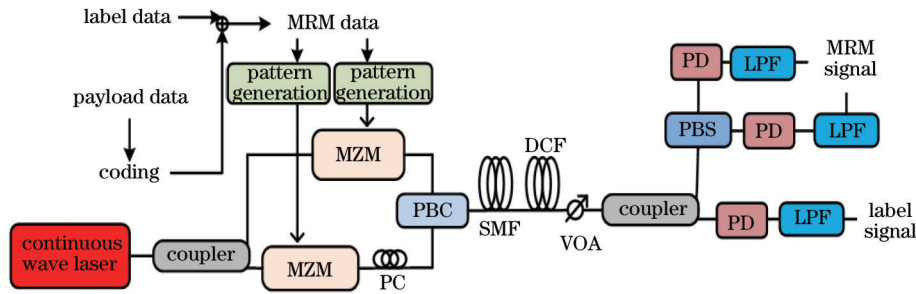


图 2 仿真结构

Fig. 2 Simulation setup

MRM 信号的波形如图 3 所示。高标记比率部分和低标记比率部分很明显。在高标记比率部分,两个 PDM 信号不会同时为“0”,故幅度为“1”或“2”。在低标记比率部分,两个 PDM 信号不会同时为“1”,故幅

度为“0”或“1”。在低通滤波器之后,高标记比率部分和低标记比率部分会被分别转换为高电平和低电平。标记比率差会被转换为幅度差。相应标签数据的标记比率信息会被转换为 ASK 信号。

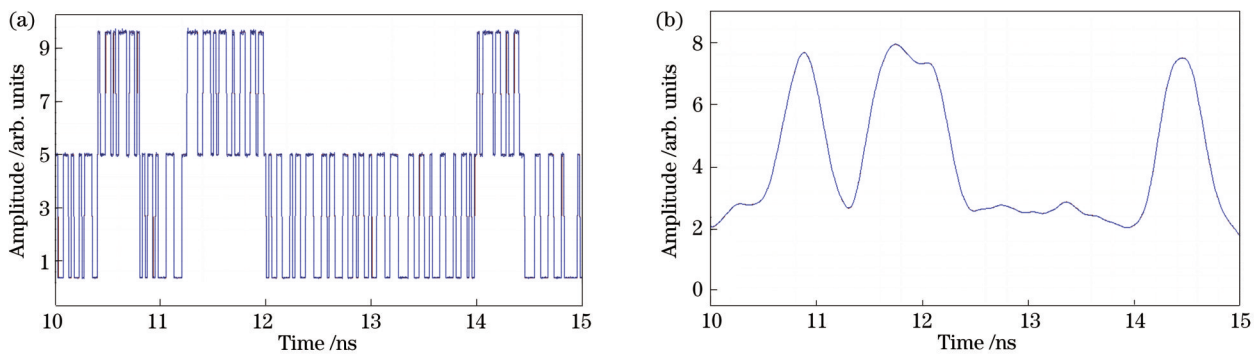


图 3 标签接收路的 MRM 信号在 LPF 之前和之后的信号波形。(a) LPF 之前;(b) LPF 之后

Fig. 3 Waveforms of MRM signal before and after LPF in label receiving branch. (a) Before LPF; (b) after LPF

测试的眼图如图 4 所示。恢复的标签信号的眼图如第一行所示。当比特率比较低时,恢复的标签信号表现出更好的性能,说明它受到来自编码的载荷信号的干扰较小,这是因为较低截止频率的低通滤波会彻底地去除编码的载荷信号。第二行和第三行是接收到的在两个偏振上的 MRM 信号的眼图。可以发

现,两个偏振的信号表现出相同的性能,即不同比特率下性能几乎相同。这是因为 MRM 是在数字域中操作的,不会降低信号的质量,即编码的载荷信号不会受到叠加标签信号串扰的影响。

测试了比特率为 40 Gbit/s 的 MRM 信号(对应载荷数据)与比特率为 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s 标

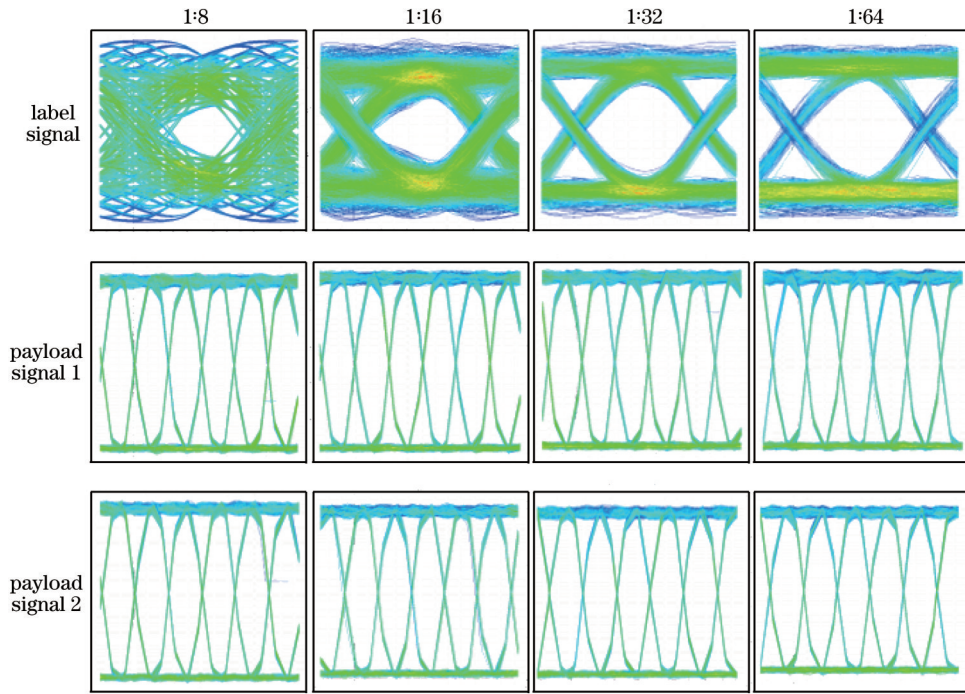


图 4 测试的眼图

Fig. 4 Tested eye diagrams

标签信号叠加后的误码率,如图 5 所示。MRM 信号和标签信号的 BER 曲线分别为实线和虚线。当标签信号的比特率分别为 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s 时,相应的 BER 曲线为带方块的实线、带实心球体的实线、带星形的实线、带三角形的实线、带方块的虚线、带实心球体的虚线、带星形的虚线和带三角形的虚线。由于两个偏振上的 MRM 信号的误码率几乎相同,故图 5 中只显示了一个 MRM 信号。MRM 信号误码率曲线几乎一致。由于更高比特率的标签信号会受到更高编码载荷信号的干扰,因此性能更差。MRM 信号可以在无前向纠错(FEC)编码的情况下实现 10^{-9} 的误码率。接收灵敏度(FEC 门限为 $R_{BE}=10^{-9}$ 时的接收光功率)约为 -17.7 dBm。由于比特率为 10 Gbit/s 和 5 Gbit/s 的标签信号无法到达 10^{-9} 的 BER,因此需要 FEC。考虑到 FEC 门限为 $R_{BE}=10^{-3}$, 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s 标签信号的接收灵敏度分别为 -19.5 dBm、 -22.5 dBm、 -24.7 dBm 和 -26.6 dBm。事实上比特率为 2.50 Gbit/s 和 1.25 Gbit/s 的标签信号不需要 FEC,因为它们的接收灵敏度(-20.8 dBm 和 -23.0 dBm)远低于 MRM 信号。

为了比较改进后的实验效果,分别将改进前的标签和载荷与改进后的误码率进行对比,对比结果如图 6 所示。在图 6(a)中比特率为 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s 的标签信号的接收灵敏度分别为 -19.5 dBm、 -22.5 dBm、 -24.7 dBm、 -26.6 dBm。与 4PPM 信号相比,灵敏度分别提高了 1.7 dBm、2.0 dBm、1.3 dBm、1.2 dBm。在图 6(b)中,载荷的误

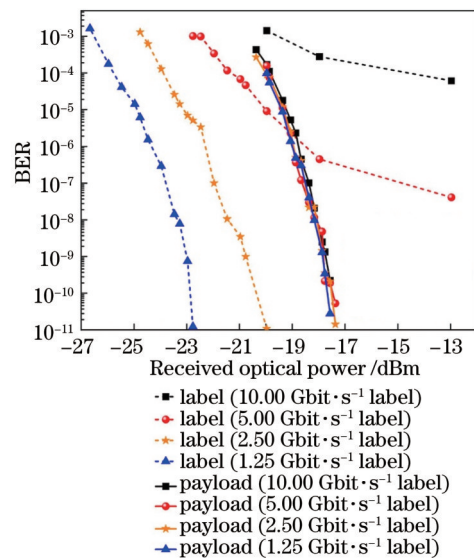


图 5 误码率测试结果

Fig. 5 BER test result

码率变化不大,改进后的 MRM 保持了之前的优点。

4 讨 论

比特率为 10.00 Gbit/s 和 5.00 Gbit/s 的标签信号可以通过 FEC 实现无误码操作。比特率为 2.50 Gbit/s、1.25 Gbit/s 的标签信号和 40 Gbit/s 的 MRM 信号均可实现无误码操作 ($R_{BE}=10^{-9}$),故无需 FEC。比特率为 40.00 Gbit/s 的 MRM 信号的接收灵敏度为 -17.7 dBm,高于叠加标签信号的接收灵敏度。假设每个节点输出的光包在每个偏振上的功率为

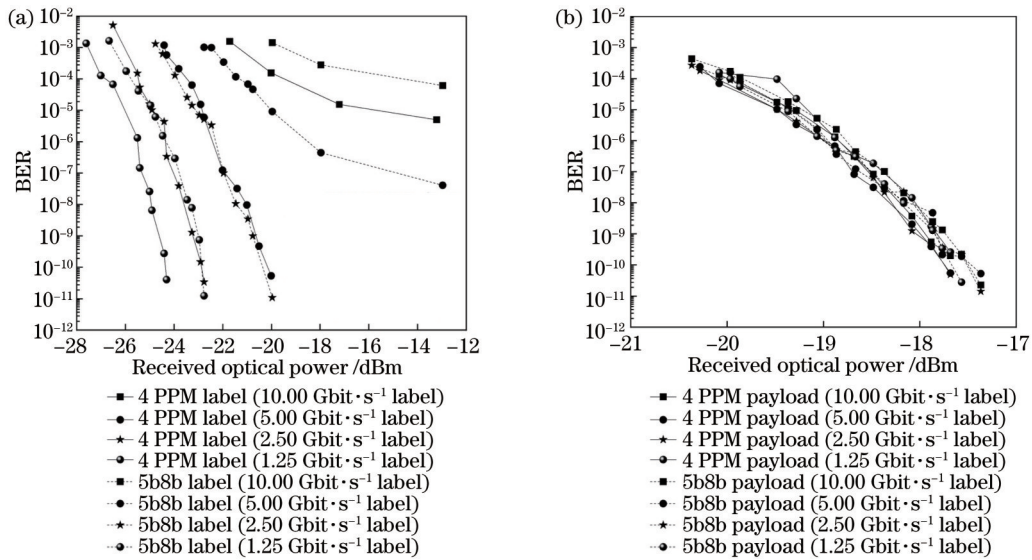


图 6 标签对比和载荷对比。(a)标签对比;(b)载荷对比

Fig. 6 Label comparison and payload comparison. (a) Label comparison; (b) payload comparison

3 dBm(在发射放大器之后),这种接收灵敏度可以在没有在线放大器或前置放大器的情况下提供 20.7 dB 的功率余量。假设光交叉连接器(OXC)的损耗为 5 dB,标签读取的功率分配为 50%(插入损耗为 3 dB),剩余功率余量为 12.7 dB,且支持单模光纤上 63.5 km 的传输。当标签信号的比特率为 2.5 Gbit/s 或 1.25 Gbit/s 时,标签信号的接收灵敏度较低,故可以进一步降低标签读取的功率分配比。更多的功率通过分路器后可以降低发射放大器的放大要求,从而降低放大引起的信噪比(SNR)降低的幅度。测试结果表明,即使没有串联放大器或前置放大器,基于所提的改进 MRM 的 OLS 也是可行的。串联放大器和前置放大器可以进一步提高功率预算。

在仿真中,载荷信号的有效比特率为 50 Gbit/s,标签信号的比特率设置为 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s。载荷数据与标签数据的比特率比率分别为 5、10、20 和 40。正如文献[14]中所讨论的,这种比特率比率远远小于实际中的比率。例如:在以太网和网际互连协议(IP)中,最大比特率比率分别达到 107(1500/14)和 74(1480/20);在同步光网络(SONET)中,比特率比率为 29(87/3);即使在开销过大而受到批评的异步传输模式(ATM)中,比特率比率也有 9.6(48/5)。因此,在实际中,比特率比率更大,基于 MRM 调制的标签信号的性能会更好。

所提的改进 MRM 保持了 MRM 的所有优点,与之前的 MRM^[14]相比,有两个改进:第一个是将 4PPM 更改为新的 5b8b 码;第二个是基于偏振复用的 MRM。MRM 数据被分为偏振复用的两个信号,叠加的标签信号能够直接从两个偏振复用信号中恢复。然而,载荷数据有效比特率大幅提高。在以前的 MRM 中,编码效率是 50%,故载荷数据的有效比特率是发射速率

的 50%。在所提的改进的 MRM 中,编码效率提高到了 62.5%,并采用偏振复用将比特率提高了一倍,故载荷数据的有效比特率可达到发射率的 125%,即有效比特率增加到了过去的 250%。由于应用的 5b8b 码并不复杂,且偏振是一种已经在光传输网络中广泛应用的成熟技术,故所提方案增加的操作复杂度不大。

所提方案中使用的 5b8b 码是精心构建的,载荷数据应编码为低标记比率的 mnb 码型。其中, m 为映射前编码比特数, n 为映射后编码比特数。有三种途径可以提高 mnb 码型的编码效率。第一种是采用所有的标记比率低于 50% 的码型。如果 n 为奇数,则有 2^{n-1} 个可用的 n 位码型,因此 m 可以是 $n-1$, 此时编码效率可达到 $(n-1)/n$ 。然而,标记比率不固定会导致低通滤波后标签信号的幅度产生波动,从而劣化标签信号。第二种方法是使用标记比率接近 50% 的码型。如果 n 为奇数,则有 $C_n^{(n-1)/2}$ 个具有 $(n-1)/2$ 个标记位的 n 位码型,因此 m 可以是 $\text{lb}[C_n^{(n-1)/2}]$, 编码效率可以达到 $C_n^{(n-1)/2}/n$ 。然而,若标记比率接近 50%, 则高标记比率单元和低标记率单元之间的标记数差异变小,这将限制叠加标签信号的消光比(ER)。例如,若标记比率为 $(n-1)/(2n)$, 则高标记比率单元中的标记比率为 $(n+1)/2$, 因此标签信号的 ER 将不超过 $10\lg\left(\frac{n+1}{n-1}\right)$ 。第三种方法是增加单元大小,也就是 n 的值。然而,编码效率随着单元大小的增加很有限,并且增大单元将增加编码和解码的复杂性。在构造了几个码型并比较了它们的性能后,最终选择了 5b8b 码。

5 结 论

针对 OLS 提出了一种改进的 MRM, 将载荷数据

的编码改为新的 5b8b 码,其编码效率提高到了 62.5%。将高速载荷数据编码后与低速标签数据进行异或操作,再将异或后的数据分为两个序列并调制到偏振复用的两个光载波上。利用低速 ASK 接收器恢复标签信号,该接收器将滤除高速编码的载荷信号。标签接收不需要解码或偏振分离,故成本低、操作复杂度低。改进后的 MRM 保持了 MRM 的优点,同时将载荷数据的有效比特率提高到了传输率的 125%,即前值的 250%。

通过仿真验证了基于改进 MRM 的 OLS。将传输比特率设置为 40 Gbit/s,此时有效负载数据的有效比特率可达到 50 Gbit/s。将标签数据的比特率分别设置为 10.00、5.00、2.50、1.25 Gbit/s,修改后的 MRM 中的信号都实现了无误码操作,但具有较高比特率的标签信号会受到较强的干扰。测试结果表明,比特率为 40.00 Gbit/s 的光包(载荷的有效比特率为 50 Gbit/s)即使在没有在线放大器和前置放大器的情况下也能传输近 60 km。仿真结果验证了改进的基于 MRM 的 OLS 的可行性。

参 考 文 献

- [1] 巩小雪,胡婷,张琦涵.色散抑制单边带数字滤波多址-无源光网络系统[J].光学学报,2022,42(14):1406002.
Gong X X, Hu T, Zhang Q H. Dispersion suppressed single sideband digital filtered multiple access-passive optical network systems[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1406002.
- [2] 杨晓雪,胡冰.基于 Ring-Clos 的全光交换架构[J].光学学报,2022,42(16):1606004.
Yang X X, Hu B. All-optical switching architecture based on ring-clos[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1606004.
- [3] 马子洋,吴琼琼,李启华,等.超密集波分复用无源光网络的研究进展[J].激光与光电子学进展,2021,58(5):0500006.
Ma Z Y, Wu Q Q, Li Q H, et al. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500006.
- [4] 李杭.基于码型复用的光标签交换技术[D].杭州:杭州电子科技大学,2021.
Li H. Optical label switching technology based on pattern multiplexing[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.
- [5] Blumenthal D J, Bowers J E, Rau L, et al. Optical signal processing for optical packet switching networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(2): S23-S29.
- [6] Yoo S J B. Energy efficiency in the future Internet: the role of optical packet switching and optical-label switching[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(2): 406-418.
- [7] Lallas E N. A survey on all optical label swapping techniques: comparison and trends[J]. Optical Switching and Networking, 2019, 31: 22-38.
- [8] Zhang J F, Chi N, Holm-Nielsen P V, et al. Performance of Manchester-coded payload in an optical FSK labeling scheme[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(8): 1174-1176.
- [9] Monroy I T, Verdurmen E, Sulur S, et al. Performance of a SOA-MZI wavelength converter for label swapping using combined FSK/IM modulation format[J]. Optical Fiber Technology, 2004, 10(1): 31-49.
- [10] Zhang X, Zhang X L, Wang Y J, et al. A novel orthogonal modulation format of D8PSK/ASK with differential bi-phase encoding and its application in a label switching optical network [J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(2): 129-133.
- [11] Mizote K, Kishikawa H, Goto N, et al. Optical label routing processing for BPSK labels using complex-valued neural network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12): 1867-1876.
- [12] Chen H W, Chen M H, Xie S Z. PolSK label over VSB-CSRZ payload scheme in AOLS network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(6): 1348-1355.
- [13] Xu M, Li Y, Kang T Z, et al. Performance evaluations of hybrid modulation with different optical labels over PDQ in high bit-rate OLS network systems[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26228-26240.
- [14] Lu Y, Li X A, Pang X D, et al. Mark ratio modulation over pulse position modulation[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57: 102201.

Optical Label Switching Based on Modified Mark Ratio Modulation

Li Xuemeng*, Lu Yang, Qian Zhekai, Zhang Tianheng, Zhai Yanrong, Bi Meihua

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310016, Zhejiang, China

Abstract

Objective Due to the rapid growth of packet-based traffic and data exchange in networks and data centers, the demand for optical packet switching is higher and higher. Traditional electrical switching adopts the form of optical-electric-optical switching, which has serious problems of electronic bottlenecks and high-power consumption and thus can hardly meet the growth demand of switching networks. Optical label switching transfers information exchange from the electrical domain to the optical domain, which improves the exchange rate and boasts high speed, transparency, low costs, large bandwidth, and low power consumption. Optical label switching is an effective solution to optical packet switching. It separates the label from the payload so that only the label is read at intermediate nodes without the need to detect the payload. At each node, part of the power of the optical packet is first extracted to the low-speed receiver for label detection. If the packet has the same destination address as the node, the packet is sent to the payload receiver. Otherwise, the packet is forwarded directly without being handled over any other layers. Optical label switching minimizes the overhead of packets and

simplifies network control and management. As a result, the efficiency, scalability, and throughput are improved, especially in networks with numerous intermediate nodes. It is expected that modified mark ratio modulation can be helpful for optical label switching.

Methods Mark ratio modulation is proposed in the paper. Firstly, the payload data is coded a new 5b8b code with a low mark ratio. Then, the coded payload data is combined with low-speed label data by XOR operation. After that, eight-bit cells are of a high or low mark ratio when the label bit is "one" or "zero", respectively. The label data is superimposed by mark ratio modulation. Subsequently, the mark-ratio-modulated data is divided into two sequences for the following polarization division multiplexing. The first four bits in each eight-bit cell are assigned to one sequence, and the last four bits are assigned to the other one. The two sequences are amplitude shift keying (ASK) modulated onto two optical carriers as two optical signals, which are polarization division multiplexed as an optical packet and transmitted. When an optical packet arrives at a node, part of the power is drawn into a low-speed receiver for label information receiving. The polarization-division-multiplexed optical signals are directly converted to an electrical signal by a photodetector without polarization beam splitting. When the packet has the same address as the node, the packet is sent to the payload receiver. In the payload receiver, the two optical signals on two polarizations are separated by a polarization beam splitter. The two optical signals are detected and analog-to-digital converted. Finally, the converted two sets of data are combined and decoded to recover the original payload data.

Results and Discussions After the low-pass filter, the waveforms of the mark ratio modulation show that the high-mark-ratio sections and low-mark-ratio sections are converted to high levels and low levels, respectively. The mark ratio difference is converted to the amplitude difference. The mark ratio information corresponding to the label data is converted to the ASK signal (Fig. 3). In the first row of tested eye diagrams, the recovered label signal shows better performance when the bit rate ratio is lower as it suffers from lower crosstalk from the coded payload signals. In the second and third rows, the performance of mark-ratio-modulated signals on two polarizations is almost the same under different bit rate ratios. The coded payload signals suffer from no crosstalk from the overlaid label signal (Fig. 4). In addition, the bit error rate (BER) curves of the mark-ratio-modulated signals are almost coincident with different rates on overlaid label signals. The label signal with a higher bit rate shows worse performance due to the higher crosstalk from the coded payload signals (Fig. 5). The receiving sensitivity of the label is improved compared with that of the 4PPM code before the improvement. The BER of the payload does not change much. The modified mark ratio modulation maintains the advantages of 4PPM mark ratio modulation (Fig. 6).

Conclusions Modified mark ratio modulation is proposed for optical label switching. The code for payload data is changed to a novel 5b8b code, whose code efficiency is increased to 62.5%. The high-speed payload data is coded in 5b8b code and combined with low-speed label data by XOR operation. Then, the combined data is divided into two sequences. The two sequences are ASK modulated on two optical carriers that will be polarization-division-multiplexed. The overlaid label signal is recovered directly through a low-speed ASK receiver, which removes the high-speed coded payload signal. Label receiving requires no decoding or polarization separation, which has a low cost and low operation complexity. The modified mark ratio modulation maintains the advantages of mark ratio modulation while increasing the effective bit rate of the payload data to 125% of the transmission rate, 250% of the previous value. Optical label switching based on modified mark ratio modulation is demonstrated by simulation. The transmission bit rate is set to 40 Gbit/s so that the effective bit rate of the payload data reaches 50 Gbit/s. The label data is set to 10.00 Gbit/s, 5.00 Gbit/s, 2.50 Gbit/s, and 1.25 Gbit/s separately. The signals in the modified mark ratio modulation can all achieve error-free operation. The label signal of a higher bit rate suffers from higher crosstalk. The test results show that the optical packet with the bit rate of 40 Gbit/s (the effective bit rate of the payload is 50 Gbit/s) can travel almost 60 km even without in-line amplifying and pre-amplifying. The simulations verify the feasibility of the proposed modified mark ratio modulation-based optical label switching. An experimental demonstration will be given next to verify the proposal.

Key words optical communications; optical label switching; mark ratio modulation; high coding efficiency; polarization division multiplexing