

基于偏振复用 IRZ-DPSK 信号的数据中心光互连

王希杰, 卢 畅, 黄桂杏, 王尧尧, 李星傲, 李 航

(杭州电子科技大学, 杭州 310000)

摘要:随着互联网行业的高速发展,数据中心光互连的扩展成为必然趋势,数据中心波长资源不足将成为限制数据中心发展的重要因素。提出了一种波长重用无源光互连方案,将 2 个信号调制在同一光载波上,通过光正交调制技术使信号实现无误码传输。同时,采用偏振复用技术,将数据中心光互连所需波长数目减少为原来的 1/4,由此提高波长资源的利用率。

关键词:波长重用;偏振复用;无源光互连;数据中心;正交调制

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)08-0059-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Data centers optical interconnection based on polarization multiplexed IRZ-DPSK signal

WANG Xijie, LU Yang, HUANG Guixing, WANG Yaoyao, LI Xing'ao, LI Hang

(Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the rapid development of the internet industry, the expansion of data centers optical interconnection has become an inevitable trend. Insufficient wavelength resources in data centers will become an important factor restricting the development of data centers. this paper proposes a wavelength reuse passive optical interconnection scheme, two signals are modulated on the same optical carrier, and the optical orthogonal modulation technique is used to achieve error-free signal transmission. At the same time, polarization multiplexing technology is used to reduce the number of wavelengths required for data centers optical interconnection to 1/4, thereby improving the utilization of wavelength resources.

Key words: wavelength reuse; polarization multiplexing; passive optical interconnection; data centers; quadrature modulation

0 引言

随着云应用程序的日益普及,数据中心必须处理的流量正在大幅度增加^[1]。数据中心网络上的流量可以分成 3 种类型:机架内流量、机架间流量以及数据中心外部流量^[2]。研究发现,机架内流量与内部总流量的比例在 20%~80%之间,这表明在数据中心机架内的通信带宽需求将非常高^[3]。目前,大多数服务器采用 1 Gb/s 或 10 Gb/s 的接口用于通信^[4],将来可能会使用更高速率的接口(如每台服务器都采用 40 Gb/s 或 100 Gb/s),

这对于传统电信号传输方案是巨大的挑战,而电交换机不足以支持高速率的交互。对于数据中心互连的另一大挑战是用户数量的大幅度增长,同时进行信息交互的服务器数量也在不断增加,这将对数据中心的连接传输扩展性有更高的要求。为了解决这些问题,近年来已经提出了几种光互连数据中心方案^[5]。在光互连方案中,由于低成本和低功耗的特性,无源光互连(POI)备受青睐^[6],其通常使用耦合器实现服务器之间的互连。POI 方案通过配备波长可调发射器和接收设备来达到匹配路由的功能,将信息送达到每个服务器中^[7]。

基于耦合器的 POI 方案为每个通信链路分配波长信道,总可用波长信道限制了同时工作通信信道的最大数量。随着数据中心规模的不断扩大,同一个机架内将要包含越来越多的服务器,也需要更多的可用波长通道^[8]。为了能够实现机架内无差别互连,支持更多的波长信道,每个服务器需配备更高精度的接收装置和发射装置,导致费用昂贵。另外,如果一个机架内

收稿日期:2019-11-19。

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y201840747)资助。

作者简介:王希杰(1996—),男,硕士生,现就读于杭州电子科技大学通信工程学院电子与通信工程专业,主要从事数据中心光互连方案的研究。在校期间,以第一负责人身份申请浙江省教育厅一般项目 1 项;获 13 届研究生电子设计大赛华东赛区三等奖以及 2019 年数学建模国家二等奖。



的服务器数量太大,则当前可用的波长资源将耗尽。因此,本文提出一种基于耦合器的数据中心光互联方案,可有效地减少总可用波长信道对同时工作信道最大数量的限制,且可减少 POI 所需的波长信道。

1 方案介绍

本文提出的 N 个服务器的波长共享方案如图 1 所示。一个机架中的服务器每 4 个分成 1 组(如服务器 1~服务器 4 为 1 组),每组中的每 2 个服务器为 1 对(如服务器 1、服务器 2 为 1 对,服务器 3、服务器 4 为 1 对)。 $N/2$ 个激光器为每一对服务器提供波长,每一组的 4 个服务器共享同一个波长通道。同一对中 2 个服务器共享 1 个光载波,同一对中不同服务器的信号以不同的调制方式搭载到同一束光载波上,每对服务器中的其中一个服务器信号采用差分相移键控(DPSK)调制,另一个服务器采用开关键控(OOK)调制。由于同一对中 2 个服务器共享 1 个光学载体,则 2 台服务器将其信号以不同的调制方式调制到光学载波上的方案可证明波长共享方案的可行性^[9]。

图 1 中,光学载波在服务器 1 中进行 DPSK 调制,然后在服务器 2 中进行 OOK 调制。OOK 信号采用翻转归零(IRZ)码,因为每个 IRZ 位的尾部始终为高电平,这种恒定尾部电平特性可以携带相位信息而不牺牲 OOK 信号自身的消光比。在每一组服务器中,每一对服务器输出端口设置偏振状态,使得每一组中每一对服务器输出载波处于正交偏振状态。

N 个服务器通过 $(N+1) \times (N+1)$ 个耦合器互连,耦合器的 $N/2$ 个输入端口分别连接到 $N/2$ 对服务器,耦合器的 N 个输出端口分别连接到 N 个服务器,额外端口用于机架间通信。耦合器将所有输入 IRZ/DPSK 信

号都广播到所有服务器,每个服务器调整可调谐滤波器和检偏器(PBS)的角度以选择所需波长,然后选择正确的解调以恢复所需信号。

在本方案中, N 个服务器之间的通信仅使用 $N/4$ 个波长资源,与传统的 POI 方案相比,大大减少了波长通道资源。

2 仿真及结果分析

本文采用 Optisystem 软件对所提出的方案进行仿真,仿真参数设置如下:使用一个 64×64 的耦合器与 60 个服务器互连,服务器分为 30 对,每对服务器共享 1 个光载波;每 2 对服务器分为 1 组,每一组服务器采用相同波长的光载波,同一组中的 2 个光载波采用不同的偏振角度;仿真中使用的信号是伪随机二进制序列(PRBS),OOK 信号(采用 IRZ 格式)和 DPSK 信号都是外部调制的,比特率设置为 10 Gb/s。

IRZ-DPSK 的性能与 OOK 调制和 DPSK 调制之间的时间延时、IRZ 信号的占空比和接收功率有关。本文采用控制变量法测出最佳信号参数(包括延时和 IRZ 占空比)以及偏振态偏移对信号的影响。

2.1 延时和占空比对 DPSK/IRZ 信号的影响

本文在 DPSK 调制和 OOK 调制之间使用可调谐延迟线来找到最佳延时,IRZ 信号的占空比设定为 0.5, DPSK 信号的接收功率为 -19 dBm, DPSK/IRZ 信号调制时间延时和误码率之间的关系如图 2 所示,结合从 Optisystem 软件上观察的解调 DPSK 信号眼图可以知道,当延时为 0.1 bit 周期时, DPSK 信号误码率最低,眼睛张开幅度最大,所以 DPSK 信号与 IRZ 信号的最佳调制延时为 0.1 bit 周期。

本文将 2 个信号间的延时设置为最佳值 0.1 bit

周期,调整 IRZ 信号的占空比以找到最佳占空比,结果如图 3 所示。结合图 3 和从 Optisystem 软件上观察的不同 IRZ 占空比下 DPSK/IRZ 信号的眼图可以知道,当 IRZ 信号占空比小于 0.4 时, DPSK 信号误码率趋于稳定, DPSK 信号眼图无明显变化,眼睛张开幅度趋于平衡稳定,而 IRZ 信号误码率随着占空比的增加而明显降低,眼图中眼睛张开幅度增大;当 IRZ 信号占空比大

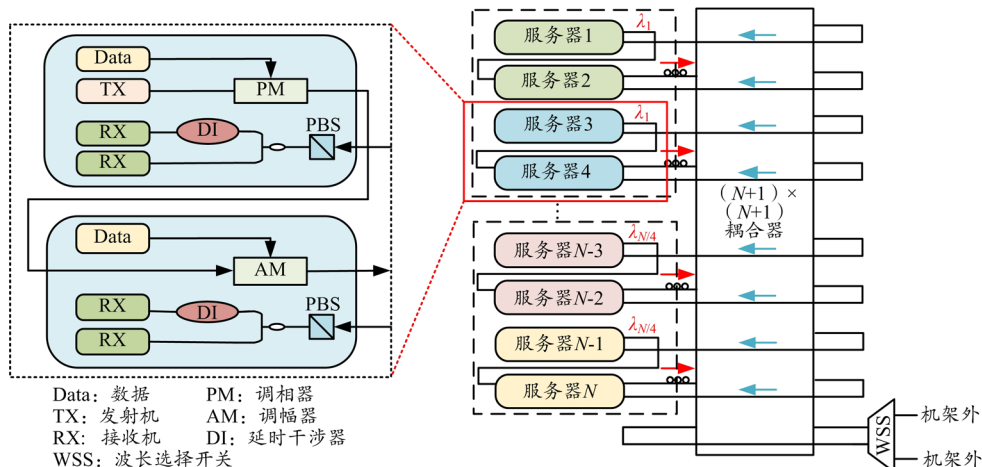


图 1 数据中心机架内互联方案结构与每组节点内部结构示意图

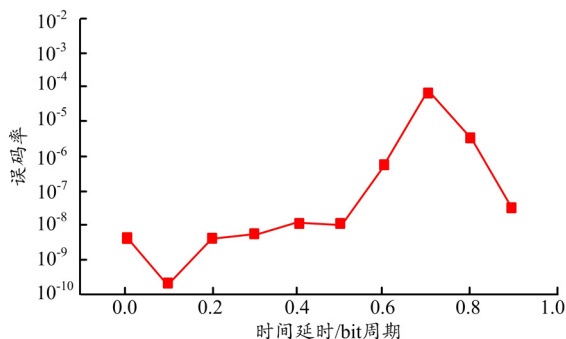


图2 不同延时下 DPSK 信号的误码率

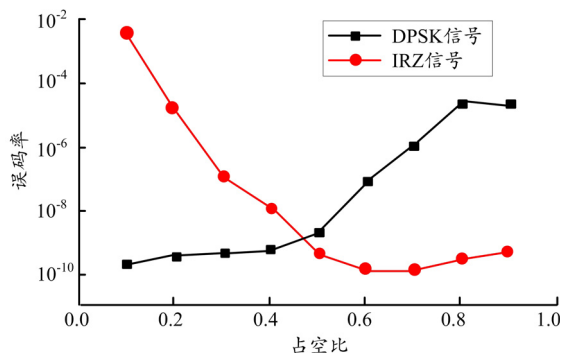


图3 不同 IRZ 占空比下 DPSK/IRZ 信号的误码率

于等于 0.5 时,DPSK 信号误码率逐步上升,DPSK 信号解调后的眼图逐渐恶劣,眼睛张开幅度减小,而 IRZ 信号误码率趋于稳定,眼图张开幅度较大;当 IRZ 信号占空比在 0.8 及以上时,DPSK 信号误码率较差易导致信号失真,而 IRZ 信号性能表现良好。

综上所述,IRZ 信号占空比越小,DPSK 信号质量越好,但 IRZ 信号质量越差。减小 IRZ 信号占空比虽然可以为 DPSK 信号带来更优的质量,但是对于 IRZ 信号而言,需要更加精准的采样,这会带来更大的额外代价。所以,权衡 DPSK 传输性能与 IRZ 信号采样性能,IRZ 信号的最佳占空比为 0.5。

2.2 偏振对 DPSK/IRZ 信号的影响

以上讨论了 2 个影响误码率的因素,分别找到了 2 个因素的最佳参数,以获取到最小的误码率。另外,由于本文利用了偏振复用技术,光在光纤传输过程中会产生线偏,所以需要考虑偏振对信号传输的影响。仿真中采用偏振器改变偏振状态来模拟光在光纤中传输时偏振态的变化,光偏振角度与 PBS 角度之差(即偏振角度之差)与误码率之间的关系如图 4 所示,此时信号的接收功率为 -19.2 dBm。另外,从 Optisystem 软件上观察到偏振角度之差为 -5° 与 0° 时,DPSK 眼图变化不大,而 IRZ 眼图张开幅度明显降低,则结

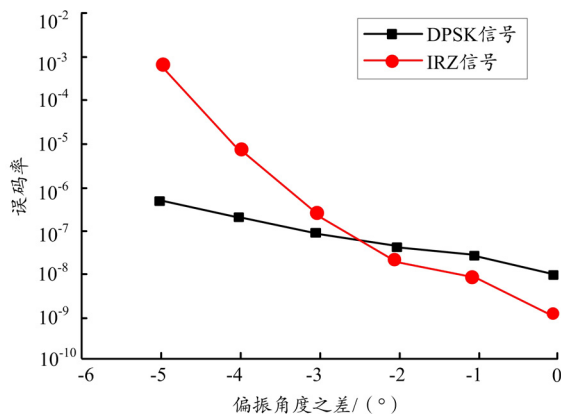


图4 不同偏振角度之差下 DPSK/IRZ 信号的误码率

合图 4 可知,偏振角度之差对 IRZ 信号有着较大的影响,而对 DPSK 信号的影响较小。但是,由于本方案应用于数据中心机架间互连,在数据中心机架中,服务器与服务器之间往往采用长度不足 100 m 的光纤连接,较短的光纤将不会产生线偏振,则信号不会发生偏振态改变,因此 IRZ 信号传输性能不会受到偏振态的影响。

当 DPSK/IRZ 信号偏振角度非正交时,其中一路信号会对另一路信号造成较大的影响。为了探测这种影响,本文模拟了 DPSK/IRZ 信号偏振角度非正交的情况,得到的偏振角度之差对信号误码率的影响曲线图如图 5 所示(由于此时 DPSK 信号不受影响,因此其变化在图 5 中未画出)。可以看出,IRZ 受 DPSK 信号影响很大,当 DPSK/IRZ 信号的偏振角度之差从 90° 改变至 89° 时,IRZ 信号误码率由 4.983×10^{-9} 恶化到 2.587×10^{-8} ,从 Optisystem 软件上也观察到 IRZ 眼图张开幅度大幅降低。由于采用的起偏器偏振误差很小,偏振角度之差将保持在 90° ,DPSK/IRZ 信号偏振角度非正交对信号传输性能所造成的影响微乎其微,所以本方案仍然适用于数据中心光互连中。

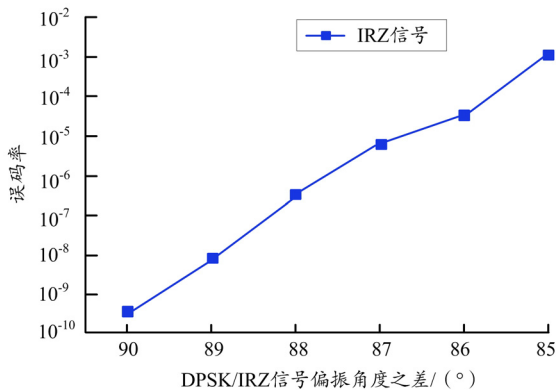


图5 DPSK/IRZ 信号非正交偏振对误码率的影响

2.3 DPSK/IRZ 信号误码率与接收功率的关系

在最佳延时和最佳占空比下, 本文测试 DPSK/IRZ 信号的误码率与接收功率的关系, 结果如图 6 所示。在没有前向纠错(FEC)的情况下, DPSK 信号的接收灵敏度(通常取误码率为 10^{-9} 处的接收功率值作为接收机灵敏度)的值为 -19.6 dBm; IRZ 信号的接收灵敏度的值为 -19.2 dBm。

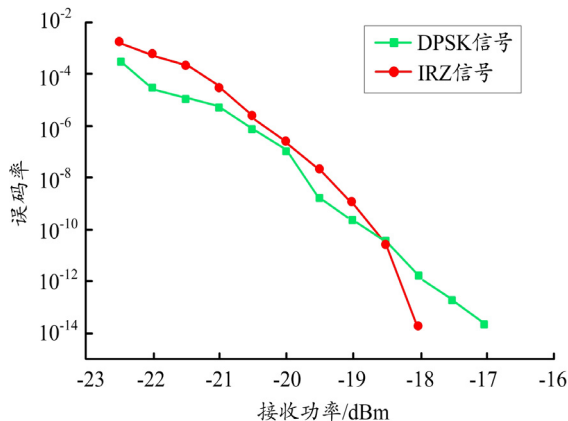


图 6 DPSK/IRZ 信号的误码率与接收功率的关系

信号的接收功率可以由信号发射功率减去链路损耗得到。在本文所提的方案中, IRZ 信号和 DPSK 信号的总链路损耗 L 可用式(1)表示:

$$L = L_{PM} + L_{AM} + L_{VZ} + L_{CN} \quad (1)$$

其中, L_{PM} 是相位调制器的损耗, L_{AM} 是幅度调制器的损耗, L_{VZ} 是偏振器和检偏器的总损耗, L_{CN} 是 $(N+1) \times (N+1)$ 耦合器的损耗。由于光纤很短, 光在光纤中的传输损耗可忽略。

L_{PM} 和 L_{AM} 的典型值分别为 3 dB (调制器型号为 MPX-LN 或 MPZ-LN) 和 3 dB (调制器型号为 MZDD-LN), $L_{CN} = 3 \times \log_2 N$ (其中 N 为耦合器端口总数), L_{VZ} 的典型值为 2.16 dB。考虑到商用发射机的输出功率可达到 6 dBm, 而测得 IRZ 信号接收灵敏度为 -19.2 dBm, 链路能承受的最大损耗为 25 dB。因此, 最大耦合器端口总数可以达到 64, 利用 FEC 技术或光放大器可以进一步增加该值。

对于 60 台服务器的传统机架, 需要 60 个波长。如果通道间隔为 0.8 nm (ITU-T 标准), 则总范围将达到 48 nm, 超出了光谱 C 波段。显然, 互连规模将受到限制。而本文提出的基于偏振复用 IRZ-DPSK 信号的数据中心光互连方案只需要 15 个波长, 在同样波长

间隔的情况下将所用光谱宽度减小到 12 nm, 使大规模互连成为可能。

3 结束语

本文介绍了一种基于偏振复用 IRZ-DPSK 信号的数据中心光互连方案, 此方案应用于数据中心机架内服务器互连。将机架内每 4 个服务器归为 1 组, 每一组中的 2 对服务器 (每对中 2 个服务器) 采用相同波长的激光发射器, 同一对中 2 个服务器的信号分别采用 IRZ 编码格式与 DPSK 调制格式调制到光载波上, 所有信号都实现了无误码传输。本方案将机架内节点互连所需波长减少为原来的 1/4, 从而节省了波长资源, 并放宽了每台服务器中可调谐发送和接收器的带宽间距要求。

参考文献:

- [1] YE T, LEE T T, GE M, et al. Modular AWG-based Interconnection for Large-Scale Data Center Networks[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2018, 6(3): 785-799.
- [2] KACHRIS C, TOMKOS I. A Survey on Optical Interconnects for Data Centers [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(4): 1021-1036.
- [3] RA Y, RHEE J K K, BANG J, et al. Photonic-Frame-Based TCP proxy architecture in optically interconnected data center networks [J]. Computer Networks, 2018, 147: 14-26.
- [4] CHENG Y, FIORANI M, LIN R, et al. POTORI: A Passive Optical Top-of-Rack Interconnect Architecture for Data Centers [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(5): 401-411.
- [5] GONG Y, LU Y, HONG X, et al. Passive Optical Interconnects at Top of the Rack for Data Center Networks[J]. optics express, 2014, 23(6): 78-83.
- [6] HAMMADI A, EL-GORASHI T E H, ELMIRGHANI J M H. High performance AWGR PONs in data centre networks [C]//International Conference on Transparent Optical Networks, July 5-9, 2015, Budapest, USA. Piscataway: IEEE, 2015: 1-5.
- [7] CHENG Yuxin, FIORANI M, WOSINSKA L, et al. Reliable and Cost Efficient Passive Optical Interconnects for Data Centers [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(11): 1913-1916.
- [8] ALANI R A T, EL-GORASHI T E H, ELMIRGHANI J M H. Virtual Machines Embedding for Cloud PON AWGR and Server Based Data Centres [C]// International Conference on Transparent Optical Networks, July 9-13, 2019, Angers, France. Piscataway: IEEE, 2019: 1-5.
- [9] WANG X, LU Y, BI M, et al. Data center optical interconnection based on IRZ-DPSK signal [C]//Asia Communications and Photonics Conference, October 26-29, 2018, Hangzhou, China. Piscataway: IEEE, 2018: 1-3.

欢迎投稿, 欢迎订阅!