

基于锁模光学频率梳的高速数据传输*

刘琪华^{1) #} 梅佳雪^{1) #} 王金栋^{2) †} 张福民^{1) ‡} 曲兴华¹⁾

1) (天津大学, 精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072)

2) (重庆大学, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2023年8月25日收到; 2023年10月21日收到修改稿)

大数据时代网络数据流量的爆炸式增长给通信系统的容量和数据传输速率带来极大的挑战. 本文基于锁模光学频率梳的宽光谱范围和高相位相干性提出了一种高频正交幅度调制信号生成方法, 通过电光调制器对光学频率梳进行幅度相位整形并下变频至射频域, 生成携带编码信息的高速、高阶、低相位噪声的调制信号, 再结合锁模光学频率梳窄线宽、多波长的特性, 仅使用单个激光器即可实现基于波分复用技术的大规模并行高速通信. 仿真验证了该方案的可行性, 随后在100 m的自由空间光链路中使用光子微波信号进行16 V正交幅度调制通信实验, 实现了误码率低于 10^{-6} 的14 Gbit/s数据传输.

关键词: 锁模光学频率梳, 微波光子学, 空间光通信, 正交幅度调制

PACS: 42.55.-f, 42.60.Fc, 42.79.Sz, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.73.20231384

1 引言

随着物联网、直播、视频会议、高清电视等新兴技术的蓬勃发展, 传统的微波射频通信已无法满足人们对日益增长的通信容量和传输速率的需求. 近年来, 光通信以其带宽大、速率高、功耗低、重量轻、保密性好、抗干扰能力强的优势^[1,2]得到工业和科学界的广泛关注, 在应急通信、本地网接入、卫星通信、军事通信等领域有着广阔的应用前景.

稳定的微波信号源是高质量光通信的基础, 传统的基于多级倍频电路的电生微波信号方法需要锁相环或调制器等电子器件, 结构复杂且成本较高, 信号的频率和带宽难以提升, 并且抗电磁干扰能力差. 结合微波和光子学新兴发展起来的微波光子技术可以克服传统电生微波技术的瓶颈, 以创纪录的低相位噪声水平为超宽带电子信号处理和频

率合成提供变革性的能力^[3-5], 在空间光通信、雷达和深空探测与导航等领域引起广泛关注.

然而, 许多基于光子学的微波信号生成方法缺乏宽带可调谐性^[6-8], 并且需要在噪声水平、系统复杂度和信号频率之间权衡. 光学频率梳的出现为研究系统结构简单、可调谐性强、频率稳定度高的微波信号源提供了新的思路. 光学频率梳作为多波长光源, 在频域上由一系列离散的等间隔分布的光学模式组成, 故而可以代替传统光外差法的多个独立激光器, 在简化系统结构的同时维持其宽带可调谐能力. 将光学频率梳的频率锁定至超稳激光上, 可使其重复频率具有超稳激光的短期稳定度以满足生成超稳微波信号的条件^[9]. 在微波频率合成的基础上, 随着微波光子学的发展, 光学频率梳也被广泛用于任意波形合成的研究^[10]. Wang等^[11]使用重复频率不同的两个相干光学频率梳进行波形傅里叶合成, 对光学频率梳的梳齿进行单独的幅度和

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0705701) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: jdwang@cqu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

相位控制, 并映射至双光学频率梳相干形成的射频频率梳中, 实现了包括可调高斯形、三角形、正方形和类似“UVA”形状的射频信号合成. Tan 等^[12]通过强度调制器控制光学频率梳的 81 根梳齿, 经色散器件赋予不同梳齿时间延后后经可编程波形整形器控制, 得到占空比从 10%—90% 可调谐的方波、斜率比从 0.2—1.0 可调谐的锯齿波以及瞬时频率达到亚 GHz 范围的对称凹二次啁啾波形.

此外, 光学频率梳的多个光学模式可以替代现行波分复用系统中的激光器阵列, 仅用一个激光器实现大规模并行信息传输^[13-16]. 然而目前基于光学频率梳的波分复用通信系统多使用传统的电生微波信号源, 没有充分发挥光学频率梳在宽带任意波形合成方面的优势. 为实现更高数据率的信息传输, 本文设计了一种基于锁模光学频率梳的大规模并行高速光通信系统, 仅需要单个光源即可同时实现高码率信息传输与大规模并行通信. 使用电光调制器调整锁模光学频率梳每个光学模式的幅度和相位并自相干映射至射频域, 经窄带滤波器进行频率筛选获得携带编码信息的高阶高速调制信号. 使用窄带布拉格光栅滤波器与光纤法布里珀罗腔提取出光学频率梳的单个光学模式作为通信载波, 锁定至铷原子钟的光学频率梳拥有着极低的线宽和良好的频率稳定度以支持高阶高速的信息传输. 对基于锁模光学频率梳的高速宽带正交幅度调制 (QAM) 信号的光子合成进行仿真分析, 并实验验证了其在自由空间光链路中的信息传输能力.

2 实验原理

光学频率梳在时域上表现为一系列等时间间隔的脉冲序列, 在频域上表现为一系列等频率间隔的纵模序列^[17,18]. 第 n 个纵模序列的频率 f_n 可以表示为

$$f_n = f_{\text{ceo}} + n f_{\text{rep}} \quad (n \in N^+), \quad (1)$$

其中, f_{ceo} 为载波包络偏移频率, f_{rep} 为光学频率梳的重复频率.

光学频率梳不同模式之间互相拍频产生的自拍频信号同样具有梳状频谱, 如图 1 所示, 相邻的光学模式互相干涉产生射频频率梳的第 1 根梳齿, 其频率为光学频率梳重复频率 f_{rep} ; 频率间隔为 $n f_{\text{rep}}$ 的光学模式互相干涉产生射频频率梳的第

n 根梳齿, 对应射频频率为 $n f_{\text{rep}} \cdot f_{\text{ceo}}$ 和 f_{rep} 锁定至高精密铷原子钟后获得极高的频率稳定性, 同时光学频率梳拥有宽光谱范围和良好的相位相干性, 这使得光学频率梳自拍频得到的射频信号在高频率下依然拥有极低的相位噪声水平.

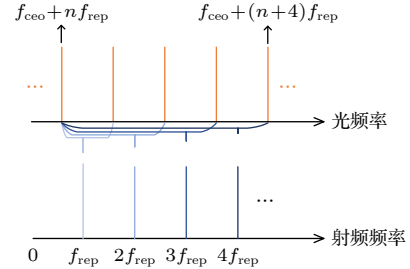


图 1 射频频率梳生成原理

Fig. 1. Principle of radio frequency comb generation.

充分利用锁模光学频率梳的上述优势设计了基于锁模光学频率梳的大规模并行高速光通信系统, 其结构及在自由空间光通信中的应用如图 2 所示. 图 2(a) 以 16 QAM 为例展示了光子微波信号调制过程, 通过强度调制器对光学频率梳进行幅度控制并自相干映射至射频域, 经窄带滤波器筛选后作为基带信号调制载波光源, 根据编码需求通过电延迟线控制 I 路和 Q 路调制信号之间的相位关系并使用相位调制器进行相位编码, 移相器用于控制调相信号的相位及增加调制深度. 图 2(b) 展示了相干接收原理, 信号光经掺铒光纤放大器放大后使用可调谐布拉格光栅滤波器消除掺铒光纤放大器引入的自发辐射噪声, 最后通过 90° 混频器进行相干解调.

图 2(c) 展示了基于波分复用技术的大规模并行数据传输系统结构, 光学频率梳的多个光学模式提供了多个信息传输通道, 每个通道分别携带不同的编码信息, 而后经复用器合束并由掺铒光纤放大器放大, 通过准直镜发射至空间链路进行信息传输, 在接收端使用卡塞格林望远镜接收光信号, 解复用后与相应的本振光进行相干解调, 本振光同样可通过光学频率梳提供, 结合激光传输与锁定技术还可以实现接收端与发射端光学频率梳的频率锁定以省略数字信号处理过程中对频率偏移的补偿. 然而当光学频率梳的重复频率较小时, 现有的波分复用器难以获得光学频率梳中的单个光学频率, 基于此图 2(d) 展示了一种载波光源提取方法, 首先结合光纤法布里珀罗腔与窄带布拉格光栅滤波器

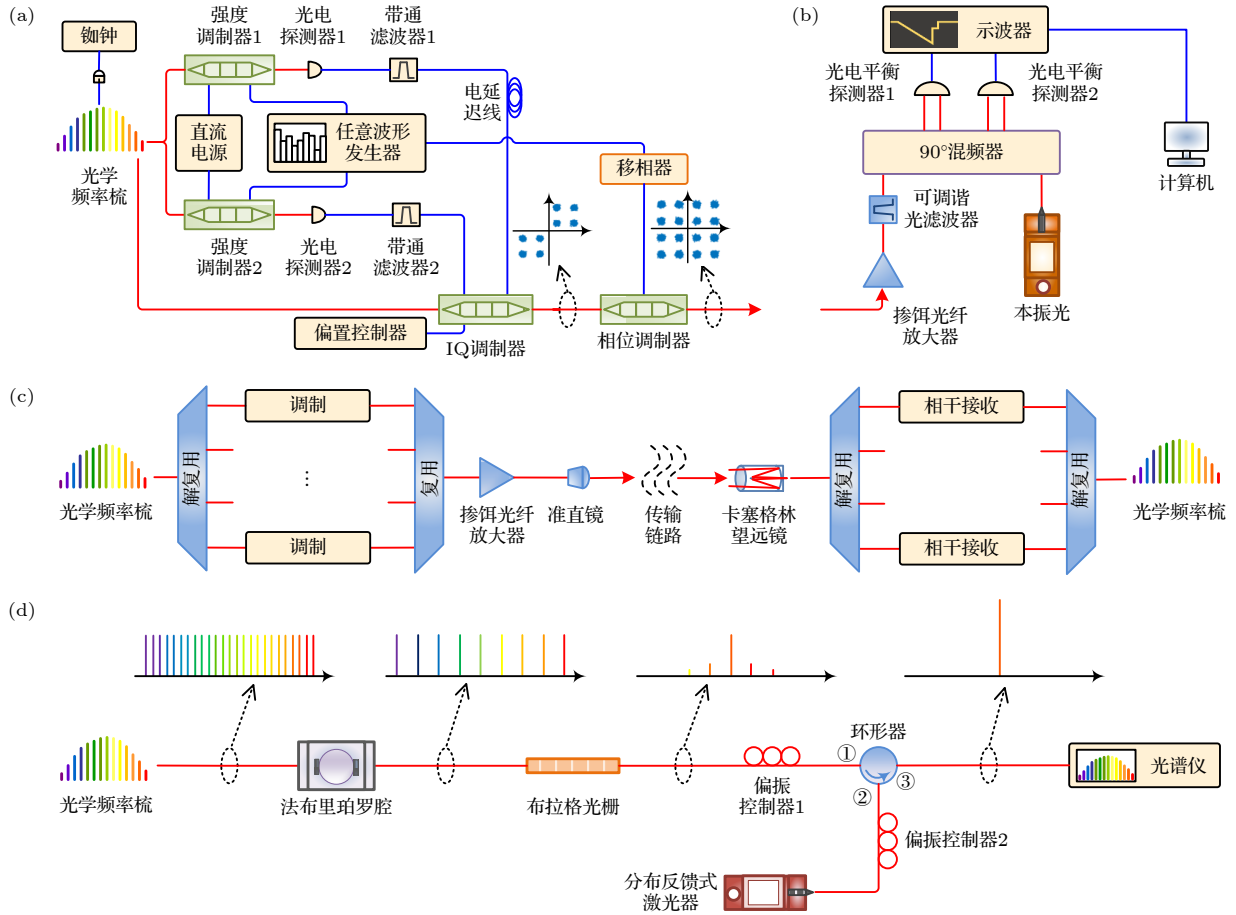


图 2 基于锁模光学频率梳的大规模并行高速光通信原理 (a) 光子微波信号调制; (b) 光相干接收; (c) 基于光学频率梳的大规模并行数据传输; (d) 载波光源提取

Fig. 2. Principle of massively parallel high-speed optical communication system based on mode-locked optical frequency comb: (a) Photonic microwave signal modulation; (b) optical coherent reception; (c) massively parallel data transmission based on optical frequency comb; (d) carrier light source extraction.

从光谱中提取出单个光学模式, 然后通过输入电流调谐分布反馈式激光器, 从而通过二极管的受激发射实现注入锁定以放大中心主模作为同相/正交调制器 (IQ 调制器) 的通信载波^[19,20].

3 数值模拟与分析

对基于光学频率梳的高速宽带正交幅度调制信号合成进行仿真与分析, 考虑到光电探测器带宽, 射频频率梳的频率范围从光学频率梳的重复频率 250 MHz 开始, 以重复频率为间隔叠加至 2.5 GHz, 其时域波形如图 3(a) 所示. 使用基于 Kaiser 窗函数的双向滤波器实现对射频频率梳的零相移滤波, 提取 0.75 GHz 的射频频率梳齿, 其时域波形如图 3(b) 所示.

以 16 QAM 调制格式为例进行数值模拟, 为了便于查看时域波形变化, 选择 25 MBaud 的伪随

机码信源并进行格雷编码, 然后使用不同的格雷编码基带信号对光学频率梳进行强度与相位调制. 在不使用滤波器的情况下相干解调出的信号时域波形如图 4(a) 所示, 可以看到信源编码特征显著, 其对应的频谱如图 4(b) 中蓝色线所示, 频谱中梳状间隔在数值上与锁模光学频率梳的重复频率一致, 同时每个梳齿均携带格雷编码信息. 需要注意的是, 在实际实验中光学频率梳自拍频产生的射频频率梳的不同模式之间功率并不相等, 图 4(b) 中为了各个频率模式及其携带的信息能够得到清晰呈现而进行了强度平衡. 随后使用基于 Kaiser 滤波的双向滤波器实现零相移滤波, 图 4(b) 中的橙色与紫色线分别对应滤波器中心频率为 0.25 GHz 和 1.5 GHz 时滤波后信号的频谱, 图 4(c) 和图 4(d) 分别展示了相对应的信号时域波形, 分别等效于具有 2 Gbit/s 和 12 Gbit/s 的 16 QAM 通信, 插图

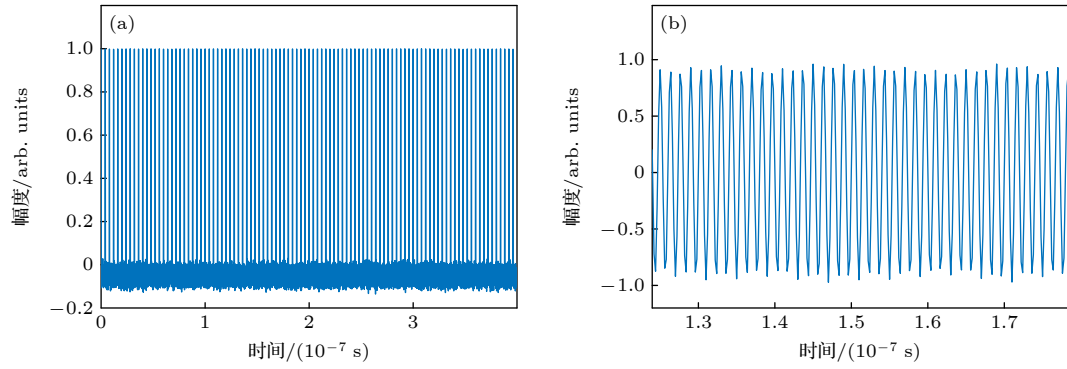


图 3 光学频率梳自拍频生成射频信号 (a) 射频频率梳时域波形; (b) 窄带滤波后的时域波形

Fig. 3. RF signal generated by the self-beat of optical frequency comb: (a) Time domain waveform of RF comb; (b) time domain waveform after narrowband filtered.

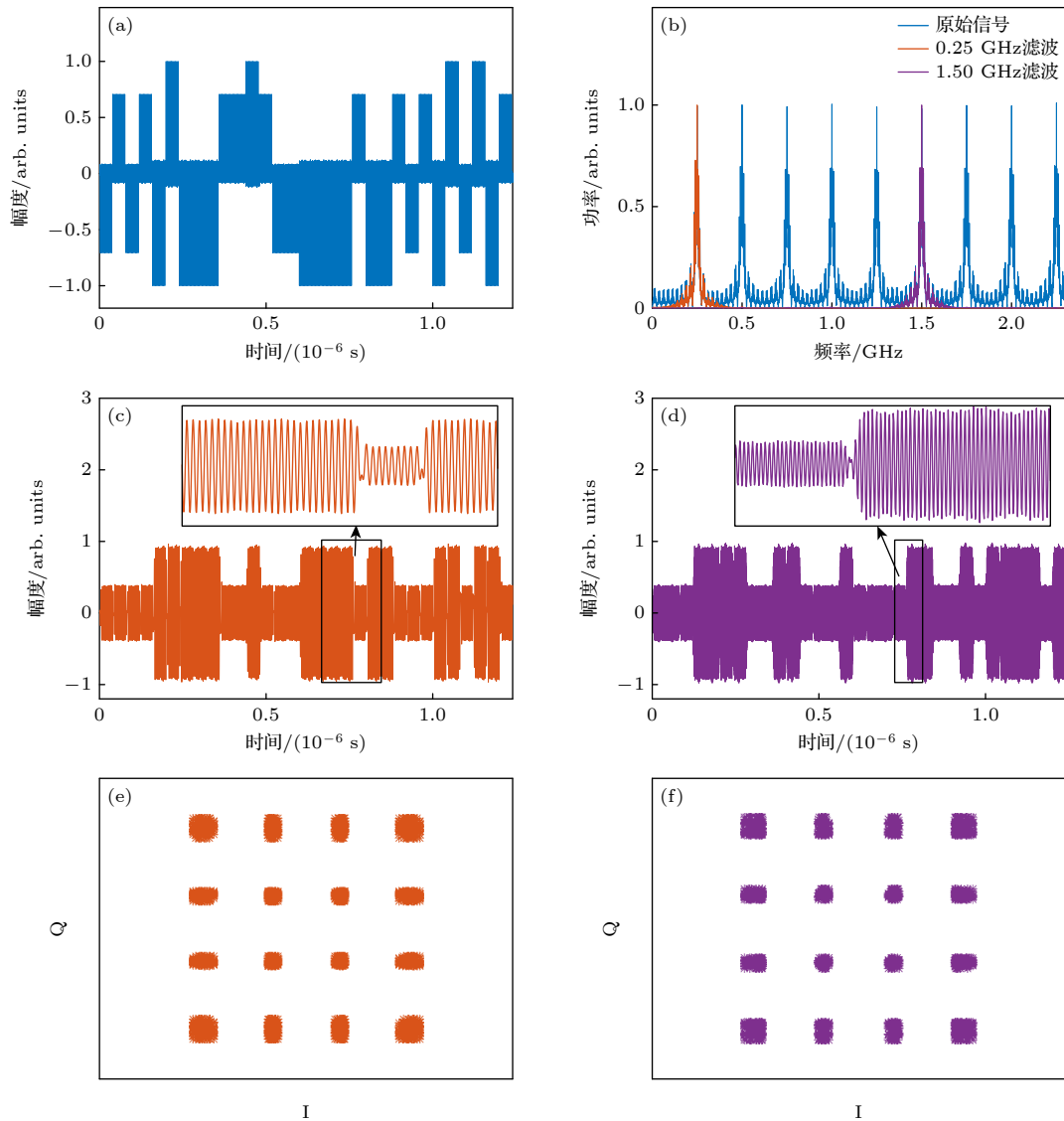


图 4 16 QAM 光子微波信号生成过程 (a) 编码信号时域; (b) 编码信号频域及带通滤波效果; (c) 2 Gbit/s 的 16 QAM 信号时域波形; (d) 12 Gbit/s 的 16 QAM 信号时域波形; (e) 2 Gbit/s 的 16 QAM 星座图; (f) 12 Gbit/s 的 16 QAM 星座图

Fig. 4. Process of the generation of 16 QAM microwave photonic signal: (a) Time-domain of encoded signal; (b) frequency-domain of encoded signal and the results after band-pass filtering; (c) waveform of 2 Gbit/s 16 QAM signal; (d) waveform of 12 Gbit/s 16 QAM signal; (e) constellation diagram of 2 Gbit/s 16 QAM; (f) constellation diagram of 12 Gbit/s 16 QAM.

中为局部放大后的效果, 其中幅度与相位整形效果显著. 对解调信号进行幅相跳变波形恢复与时钟采样, 得到的星座图分别如图 4(e) 和图 4(f) 所示.

4 实验验证及分析

图 5(a) 与图 5(b) 分别展示了实验装置与实验环境, 图 5(b) 中的走廊长约 50 m, 在走廊尽头放置角锥棱镜用于反射光信号以提供 100 m 长度的空间链路. 实验使用的锁模光学频率梳 (FC1500-250-ULN) 锁定至外部铷原子钟基准来提供稳定可靠的性能, 光谱范围在 1500—1600 nm, 横跨通信的 C+L 波段, 稳定度为 1×10^{-16} @1 s. 光学频率梳的重复频率在锁定至 250 MHz 的同时保持波动小于 0.01 Hz, 光电探测器与平衡探测器均具有 20 GHz 带宽, 用于探测高频的光子微波信号. 任意波形发生器 (AFG31000) 提供强度调制器和相位调制器的基带信号, 其灵活的相移功能使得相位调制时不需要添加额外的移相器. IQ 调制器 (MXIQER.LN-30) 具有 20 GHz 以上的调制带宽并通过偏振控制器 (MBC-IQ-LAB) 来维持三个偏置电压的稳定. 此外, 受实验条件限制, 本验证实验在图 2 的基础上增加了射频功率放大器来放大光子微波信号, 同时仅进行了单路的光子微波信号调制, 经功分复用器分为两路后通过电延时线消除信号相关性, 而后分别作为 I 路和 Q 路基带信号对载波光进行正交幅度调制, 该方案的编码自由度略低于图 2(a) 中展示的方案, 但不影响其对于光子微波信号调制的验证效果.

载波光的线宽是影响其数据传输能力的重要因素, 线宽越窄则该光源支持高阶通信的能力越强. 实验使用的 Menlo 光学频率梳的测试报告显示, 该激光器输出的光线宽可以达到 1 Hz 以下 (受限于分析仪的分辨率带宽), 图 2(d) 展示了基于二极管受激辐射注入锁定的锁模光学频率梳单光学模式放大提取方法, 研究证明该方法可以在保持原有光学模式窄线宽和低相位噪声特点的同时将光功率放大 40—50 dB^[19,21]. 当分别使用光学频率梳梳齿和与其光学性质相近的单频激光作为载波光源进行通信实验时, 前者不会比后者展示出明显更大的光信噪比损耗^[13], 在发射端输出信号光信噪比一定的状态下这两个实验系统展现出十分相近的误码率, 故而使用单频激光进行的数据传输实验结果可以反映使用光学频率梳梳齿作为载波时的数据传输效果, 足以用于概念验证. 然而锁定至铷原子钟后的光学频率梳具有显著的线宽窄和频率稳定度高的优点, 与其光学性质相近的光源不易获得, 受条件限制, 在概念验证实验中发射端载波光源和接收端本振光源来自线宽小于 100 kHz 的 NKT 单频激光器, 其数据传输能力逊色于光学频率梳的梳齿, 故而当将光源改为光学频率梳时可以实现比本实验中更好的数据传输效果.

使用不同中心频率的带通滤波器提取光子微波信号并进行信息传输实验, 在射频滤波器中心频率为 250 MHz 时得到的 16 QAM 光子微波信号的通信速率为 2 Gbit/s, 其局部编码效果如图 6(a) 所示, 可清晰看到在电光调制器控制下信号的强度与相位发生变化, 对应的频谱如图 6(b) 所示.

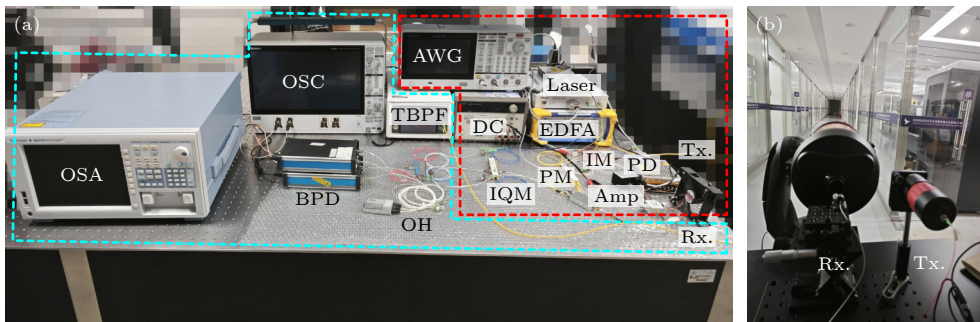


图 5 自由空间光通信实验 (a) 实验装置. OSA, 光谱分析仪; OSC, 示波器; BPD, 平衡探测器; OH, 光混频器; AWG, 任意波形发生器; TBPF, 可调谐带通滤波器; DC, 直流电源; IQM, 同相/正交调制器; EDFA, 掺铒光纤放大器; IM, 强度调制器; PM, 相位调制器; PD, 光探测器; Amp, 功率放大器; Tx., 发射器; Rx., 接收器. (b) 实验环境

Fig. 5. Free space optical communication experiment: (a) Experimental installation. OSA, optical spectrum analyzer; OSC, oscilloscope; BPD, balance photodetector; OH, optical hybrid; AWG, arbitrary waveform generator; TBPF, tunable bandpass filter; DC, direct current; IQM, in-phase/quadrature modulator; EDFA, erbium doped fiber amplifier; IM, intensity modulator; PM, phase modulator; PD, photodetector; Amp, amplifier; Tx., transmitter; Rx., receiver. (b) experimental scenario.

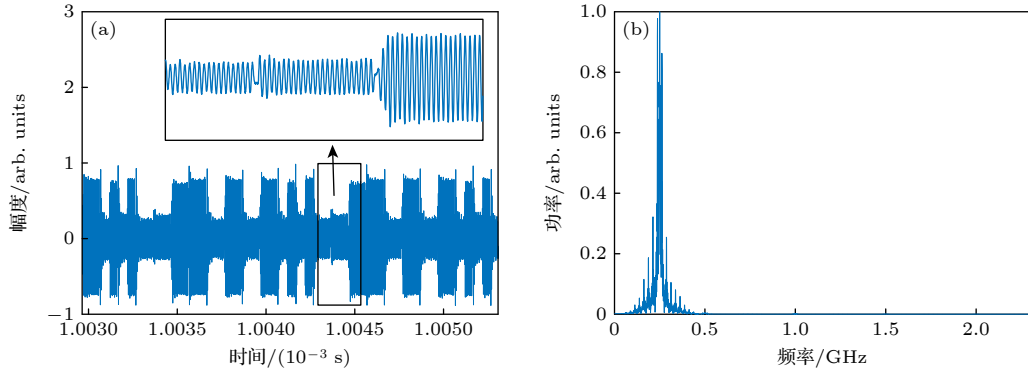


图 6 2 Gbit/s 的 16 QAM 光子微波信号 (a) 时域; (b) 频域

Fig. 6. 16 QAM microwave photonic signal at 2 Gbit/s: (a) Time domain; (b) frequency domain.

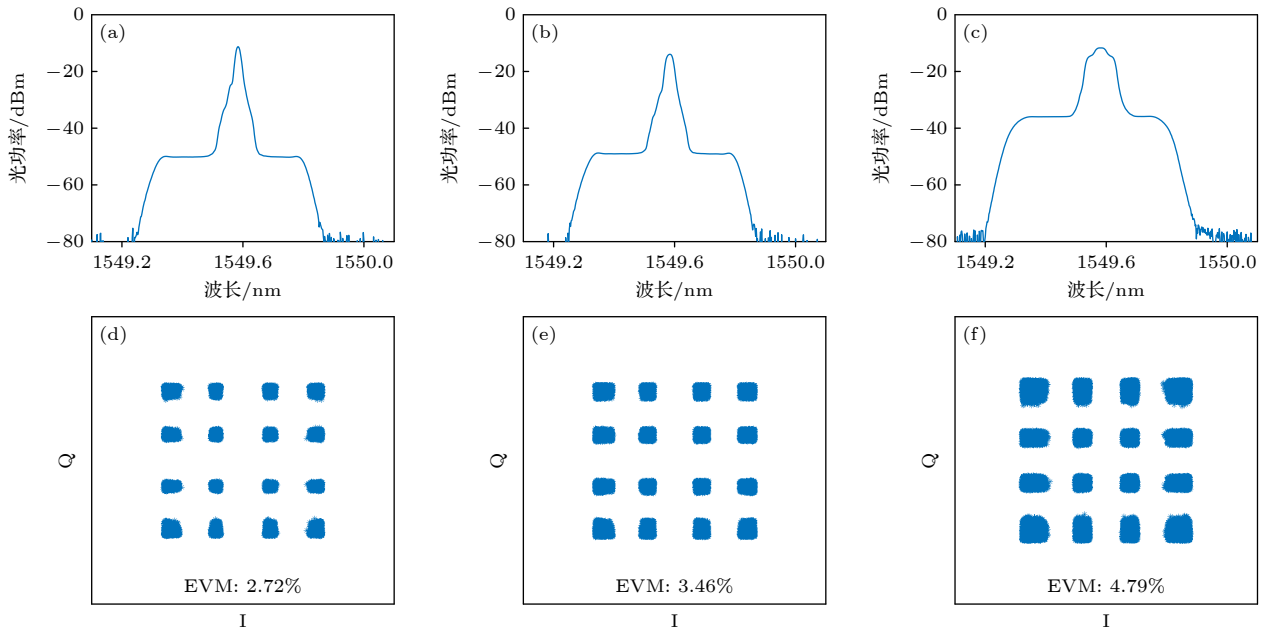


图 7 100 m 自由空间光通信实验结果 (EVM, 误差矢量幅度) (a)—(c) 接收调制光谱; (d)—(f) 星座图. (a), (d) 2 Gbit/s; (b), (e) 6 Gbit/s; (c), (f) 14 Gbit/s

Fig. 7. Experimental results of 100 m free space optical communication (EVM, error vector magnitude): (a)—(c) Received modulation spectrum; (d)—(f) constellation diagram. (a), (d) 2 Gbit/s; (b), (e) 6 Gbit/s; (c), (f) 14 Gbit/s.

分别使用中心频率为 0.25, 0.75 和 1.75 GHz 的窄带滤波器获得不同码元速率的光子微波信号进行自由空间光通信实验, 在经过 100 m 的空间光链路传输后, 得到的信号光谱分别如图 7(a)—(c) 所示, 其中噪声阶梯是由 EDFA 的放大受激辐射 (ASE) 噪声引起的. 经过窄带滤波、时钟恢复、波形跳变补偿和正交不平衡补偿的数字信号处理后, 得到的星座图分别如图 7(d)—(f) 所示, 其中误差矢量幅度 (EVM)^[22] 反映测量符号与理想符号之间的误差水平, 参考 TS38.141 规范^[23], 16 QAM 方案下星座点的 EVM 应不大于 13.5%, 三组实验的 EVM 均符合规范要求. 本通信实验在 10^6 bits

的数据传输中显示零误差, 等效于该通信实验误码率小于 10^{-6} .

5 总结

本文结合锁模光学频率梳宽光谱范围、高相位相干性、高稳定性、低重复频率、窄线宽、多波长的特点设计了一种大规模并行高速光通信系统. 光学频率梳可以代替传统波分复用系统中多个独立并行的激光器, 仅靠单光源实现大规模并行光通信, 锁定至铷原子钟的光学频率梳线宽可达到 1 Hz, 使得该载波光源提供的每个独立通道均足以支持

高阶调制信号传输. 提出了一种基于微波光子技术的高速高阶通信信号生成方法, 锁定至铷原子钟的光学频率梳可通过自拍频生成频率为光学频率梳重复频率整数倍的微波信号, 基于此对光学频率梳进行幅度相位整形并下变频至射频域, 经不同中心频率的窄带滤波器筛选后可得到不同码率的基带信号. 仿真验证了该光子微波调制信号在 16 QAM 格式下的通信能力, 并在 100 m 的空间光链路上使用光子微波信号实现了速率为 2, 6 和 14 Gbit/s 的 16 QAM 通信, 误码率均低于 10^{-6} . 演示实验验证了该方案的数据传输能力, 通过增加光信道数量和调制速率的方法可以进一步提高通信容量及速率, 有望通过单个激光器实现大规模并行的高速信息传输, 在星间通信、应急通信和军事通信等领域拥有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] Toyoshima M 2005 *J. Opt. Netw* **4** 300
- [2] Kaushal H, Kaddoum G 2017 *IEEE Commun. Surv. Tutorials* **19** 57
- [3] Yin F F, Yin Z K, Xie X Z, Dai Y T, Xu K 2021 *Opt. Express* **29** 17839
- [4] Durán V, Andrekson P A, Torres-Company V 2016 *Opt. Lett.* **41** 4190
- [5] Ataie V, Esman D, Kuo B P P, Alic N, Radic S 2015 *Science* **350** 1343
- [6] Li W Z, Yao J P 2010 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22** 24
- [7] Chen Y 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 1
- [8] Kittlaus E A, Eliyahu D, Ganji S, Williams S, Matsko A B, Cooper K B, Forouhar S 2021 *Nat. Commun.* **12** 4397
- [9] Diddams S A, Vahala K, Udem T 2020 *Science* **369** 6501
- [10] Cundiff S T, Weiner A M 2010 *Nat. Photonics* **4** 760
- [11] Wang B C, Yang Z J, Sun S M, Yi X 2022 *Photonics Res.* **10** 932
- [12] Tan M X, Xu X Y, Boes A, Corcoran B, Wu J Y, Nguyen T G, Chu S T, Little B E, Morandotti R, Mitchell A, Moss D J 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 6221
- [13] Marin-Palomo P, Kemal J N, Karpov M, Kordts A, Pfeifle J, Pfeiffer M H P, Trocha P, Wolf S, Brasch V, Anderson M H, Rosenberger R, Vijayan K, Freude W, Kippenberg T J, Koos C 2017 *Nature* **546** 274
- [14] Shao W, Wang Y, Jia S W, Xie Z, Gao D R, Wang W, Zhang D Q, Liao P X, Little B E, Chu S T, Zhao W, Zhang W F, Wang W Q, Xie X P 2022 *Photonics Res.* **10** 2802
- [15] Rademacher G, Puttnam B J, Luís R S, Eriksson T A, Fontaine N K, Mazur M, Chen H S, Ryf R, Neilson D T, Sillard P, Achten F, Awaji Y, Furukawa H 2021 *Nat. Commun.* **12** 4238
- [16] Corcoran B, Tan M, Xu X, Boes A, Wu J, Nguyen T G, Chu S T, Little B E, Morandotti R, Mitchell A, Moss D J 2020 *Nat. Commun.* **11** 2568
- [17] Chen J W, Wang J D, Qu X H, Zhang F M 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 190602 (in Chinese) [陈嘉伟, 王金栋, 曲兴华, 张福民 2019 *物理学报* **68** 190602]
- [18] Zhao X Y, Qu X H, Chen J W, Zheng J H, Wang J D, Zhang F M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 090601 (in Chinese) [赵显宇, 曲兴华, 陈嘉伟, 郑继辉, 王金栋, 张福民 2020 *物理学报* **69** 090601]
- [19] Jang H, Kim B S, Chun B J, Kang H J, Jang Y S, Kim Y W, Kim Y J, Kim S W 2019 *Sci. Rep.* **9** 7652
- [20] Kim Y J, Jin J H, Kim Y S, Hyun S W, Kim S W 2008 *Opt. Express* **16** 258
- [21] Kang H J, Yang J, Chun B J, Jang H, Kim B S, Kim Y J, Kim S W 2019 *Nat. Commun.* **10** 4438
- [22] Schmogrow R, Nebendahl B, Winter M, Josten A, Hillerkuss D, Koenig S, Meyer J, Dreschmann M, Huebner M, Koos C, Becker J, Freude W, Leuthold J 2012 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24** 61
- [23] 3GPP. TS 38.141: 5G NR Base Station (BS) RF Conformance Test Methods and Requirements <https://www.ccsa.org.cn/tgpp/> [2023-10-6]

High-speed data transmission based on mode-locked optical frequency comb*

Liu Qi-Hua^{1) #} Mei Jia-Xue^{1) #} Wang Jin-Dong^{2) †}
Zhang Fu-Min^{1) ‡} Qu Xing-Hua¹⁾

1) (National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems (Ministry of Education), Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(Received 25 August 2023; revised manuscript received 21 October 2023)

Abstract

With the rapid development of emerging technologies such as multimedia services, live broadcasting, video conferencing, and high-definition television, traditional radio frequency communication is unable to meet people's growing demand for communication capacity and transmission rate. In recent years, optical communication has received extensive attention from the industrial and scientific communities due to its advantages of large bandwidth, high speed, low power consumption, light weight, and strong anti-interference ability. As an emerging light source, the optical frequency comb (OFC) has a wide spectral range, multi-wavelength, high stability, and good phase coherence, providing a new idea for studying microwave signals with simple system structure, strong tunability and high frequency stability. At the same time, the multi-optical mode characteristics of OFC are compatible with the current communication system based on wavelength division multiplexing technology. Hundreds of laser arrays in a traditional communication system can be replaced by only one laser, which greatly reduces the power consumption of the system.

Combining the above advantages, in this paper, a large-scale parallel high-speed optical communication system based on mode-locked OFC is proposed. The linewidth of the OFC locked to the rubidium atomic clock can reach 1 Hz, which is sufficient to support the transmission of high-order modulation signals. The electro-optic modulators are used to adjust the amplitude and phase of each optical mode of the mode-locked OFC and self-coherently map to the RF domain. The high-speed high-order modulation signal with coded information is obtained by frequency screening through a narrow-band filter. The communication capability of the microwave photonic modulation signal in the 16 quadrature amplitude modulation (QAM) format is verified by simulation. The 16QAM communication with the rate of 2, 6, and 14 Gbit/s is realized by using the photonic microwave signal on the 100 m space optical link, and the bit error rate (BER) is less than 10^{-6} . The proposed large-scale parallel optical communication system based on mode-locked OFC can achieve high-speed information transmission with a compact system structure, which is suitable for inter-satellite communication, emergency communication, military communication and other fields.

Keywords: mode-locked optical frequency comb, microwave photonics, spatial optical communication, quadrature amplitude modulation

PACS: 42.55.-f, 42.60.Fc, 42.79.Sz, 42.79.Hp

DOI: [10.7498/aps.73.20231384](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231384)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF0705701).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: jdwang@cqu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn



基于锁模光学频率梳的高速数据传输

刘琪华 梅佳雪 王金栋 张福民 曲兴华

High-speed data transmission based on mode-locked optical frequency comb

Liu Qi-Hua Mei Jia-Xue Wang Jin-Dong Zhang Fu-Min Qu Xing-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 044204 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231384

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231384>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光学频率梳的超低噪声微波频率产生

Ultra-low noise microwave frequency generation based on optical frequency comb

物理学报. 2021, 70(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201925>

基于飞秒锁模光纤激光脉冲基频光的差频产生红外光梳

Fiber-type difference frequency generation infrared optical frequency comb based on the femtosecond pulses generated by a mode-locked fiber laser

物理学报. 2018, 67(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172503>

基于载波抑制单边带调制的微波光子本振倍频上转换方法

Microwave photonic frequency up-converter with LO doubling based on carrier suppression single-sideband modulation

物理学报. 2019, 68(13): 134204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190266>

双重复频率锁模Yb:YAG陶瓷激光器

Dual repetition-rate mode-locked Yb: YAG ceramic laser

物理学报. 2018, 67(9): 094206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172345>

基于非简并光学参量放大器产生光学频率梳纠缠态

Generation of continuous variable frequency comb entanglement based on nondegenerate optical parametric amplifier

物理学报. 2020, 69(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200107>

基于双环混频光电振荡器的可调谐微波频率梳产生

Tunable microwave frequency comb generation based on double-loop mixing-frequency optoelectronic oscillator

物理学报. 2018, 67(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181582>