扫描二维码

与作者交流

OSID:

一种多带非相干光子太赫兹通信系统中的SSBI 抑制技术^{*}

雷明政1,方苗苗1.2,朱敏1.2**,蔡沅成1.2,张教1.2,华炳昌1,田亮1

(1.网络通信与安全紫金山实验室,江苏南京211111;2.东南大学移动通信国家重点实验室,江苏南京210096)

- 【摘 要】 光子太赫兹通信具有大带宽、低传输损耗等优势,故成为6G超高速无线通信的研究热点。由于极低的用户端复杂性 和成本,基于非相干的包络检波太赫兹接收技术备受关注。提出了一种多带非相干光子太赫兹通信系统。通过多带 自适应调制,实现高性能太赫兹点对多点覆盖传输;此外,通过光域自适应滤波,抑制非相干包络检波时多带之间 的信号-信号拍频串扰,实现每个子带信号的低算法复杂度和低功耗接收。实验中,根据系统的传输响应,3个子带 分别使用5.75 G Baud 64QAM、16QAM和4QAM的自适应调制方式;再通过自适应单边带光滤波,接收端仅使用最 小均方均衡算法即成功实现了300 GHz频段多带太赫兹信号的2 m无线传输。
- 【关键词】 光子太赫兹通信;包络检波;自适应调制;自适应光滤波;信号-信号拍频串扰

doi:10.3969/j.issn.1006-1010.20230405-0002 中图分类号: TN929.5

文献标志码: A 文章编号: 1006-1010(2023)05-0038-08

引用格式: 雷明政,方苗苗,朱敏,等. 一种多带非相干光子太赫兹通信系统中的SSBI抑制技术[J]. 移动通信, 2023,47(5): 38-45.

LEI Mingzheng, FANG Miaomiao, ZHU Min, et al. SSBI Mitigation Technique for Multiband Incoherent Photonics-Assisted Terahertz Communication System[J]. Mobile Communications, 2023,47(5): 38-45.

SSBI Mitigation Technique for Multiband Incoherent Photonics-Assisted Terahertz Communication System

LEI Mingzheng¹, FANG Miaomiao^{1,2}, ZHU Min^{1,2}, CAI Yuancheng^{1,2}, ZHANG Jiao^{1,2}, HUA Bingchang¹, TIAN Liang¹

(1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] Photonic terahertz (THz) communication has emerged as a prominent research area in 6G ultra-high-speed wireless communication, owing to its remarkable benefits of large bandwidth and low transmission loss. The incoherent envelope detection-based THz reception technology has garnered attention for its low user-side complexity and cost-effectiveness. This paper presents a novel multi-band incoherent photonic THz communication system that achieves high-performance THz point-to-multipoint coverage transmission via multi-band adaptive modulation. Moreover, optical domain adaptive filtering is incorporated to mitigate the signal-to-signal beat interference (SSBI) between multiple bands during incoherent envelope detection, facilitating low algorithmic complexity and low power consumption reception for each sub-band signal. In the experiment, adaptive modulation schemes of 5.75 GBaud 64QAM, 16QAM, and 4QAM are applied to three sub-bands, respectively, based on the system's transmission response. By leveraging adaptive single-sideband optical filtering and employing the minimum mean square equalization algorithm, successful wireless transmission of multi-band THz signals in the 300 GHz frequency range is accomplished over a distance of 2 meters.

[Keywords] photonics-assisted terahertz (THz) communication; envelope detection; adaptive modulation; adaptive optical filtering; signal-to-signal beat interference (SSBI)

0 引言

随着 5G"万物互联"的快速发展,"万物智联"的

收稿日期: 2023-04-05

*基金项目:国家自然科学基金(62201393,62271135);国家重点研发项目(2022YFB2903800);鹏城实验室重点项目(PCL2021A01-2) **通信作者 6G 移动通信网络发展潮流来势汹汹,预计智能交通、 智能工厂等新兴产业的不断兴起和蓬勃发展,势必会带 来网络数据的指数级增长,通信带宽、容量及接入需求 将会急剧增长^[1]。有研究表明,6G将要提供较于5G的 100倍的接入访问速度和1000倍的容量。在支持数据爆 炸性增长的带宽容量和速率需求上,太赫兹通信凭借更 多的频谱资源,有着广泛的应用前景。而且,由于太赫 兹波段特性,太赫兹系统更易于小型化集成和部署^[2]。

传统太赫兹通信系统采用纯电子技术实现,由于电子 器件发展限制等原因,全电子太赫兹通信系统存在信号频 率和带宽受限、室内部署困难等电子瓶颈问题^[3-4]。为另 辟新径继续提升通信性能,光子辅助太赫兹通信系统开始 成为人们的研究热点;其关键的光学外差信号产生技术展 现了信号频率可灵活调谐、结构简单、低成本等优越特性, 且由于光纤的低传输损耗及非视距传播,延长了无线通信 的距离,便利了室内部署,有着广阔的前景^[5-6]。

在光子太赫兹通信系统中,通过光本振进行外差上 变频可以提高光电转换灵敏度,且增强与 PON (Passive Optical Networks,无源光网络)的兼容性^[7];但另一方 面也会由于采用自由运行的激光器,不可避免地面临高 相位噪声的危害,这也是商业落实光子太赫兹通信的一 大难题^[8]。采用 OFC (Optical Frequency Comb,光频梳) 代替自由运行激光器的方法,虽能根本上避免相位噪声 问题,但 OFC 对结构工艺设计的极高要求,也急剧增加 了发射机的复杂性和系统实现难度^[9-10]。低成本、可灵活 调谐的自由运行激光器显然占据了独特的系统实现优势, 受到光子太赫兹通信系统设计的欢迎^[11]。

在太赫兹信号接收端,根据信号检测方式的不同,分 为相干接收和非相干接收。相干接收系统由于固定采用相 干混频进行下变频,太赫兹本地振荡器必不可少,结构较 为复杂;而且,由于光子太赫兹发射端激光器线宽和频偏 的影响,产生的太赫兹信号会引入附加的严重相位噪声, 使接收端 DSP(Digital Signal Processing,数字信号处理) 解调变得更加繁琐^[12-13]。而非相干接收系统,通过接收信 号的自混频方式实现信号下变频,减少了太赫兹本地振荡 器等器件需求,系统结构得以简化;同时,自混频大大减 少了光外差拍频产生的相位噪声,降低了信号恢复的 DSP 复杂性和成本,比相干探测系统更具发展潜力^[14]。但是, 非相干包络检测也带来一个关键的问题—SSBI(Signal-Signal Beat Interference,信号-信号拍频串扰)。

从消除非相干太赫兹包络检波引入的 SSBI 的角度来说, 对接收的信号在数字域进行均衡和非相干包络检测是两种行 之有效的办法。前者通过采用 Volterra 算法或 KK 算法虽能 很好地恢复信号,得到不错的通信性能,但由于 UE(User Equipment,用户端)DSP 解调处理流程繁琐、功耗高、系 统实现较为复杂,难以实现低成本大规模部署^[15-18]。

结合上述分析,结合未来点对多点通信需求,并针 对 SSBI 问题,本文提出了一种多带非相干光子太赫兹通 信系统(本文的非相干是针对接收端来说)。通过采用 FDM(Frequency-Division Multiplexing,频分复用)方 式进行多副载波自适应调制,增大信息容量,实现点对 多点的通信资源调度分配,以适用于多类终端用户场景。 此外,通过光域自适应滤波,抑制非相干包络检波时多 带之间的 SSBI,实现每个节点目标信号的低算法复杂度 和低功耗接收,有利于太赫兹接收终端的大规模部署。

1 多带非相干太赫兹通信系统关键技术

本文提出的太赫兹通信系统在发射端采用了结构简单 的光外差上变频,在接收端采用了对发射端激光器相位噪声 不敏感的非相干包络检波。以往报道的包络检波太赫兹通信 系统,大多仅采用单一的调制信号格式^[19-27]。虽实现了良好 性能的点对点通信,但应用场景单一,并不能满足未来网络 通信的多场景发展要求。本文采用了一种多带自适应调制机 制,既迎合了集中分布式的未来多样化终端发展需求,实现 点对多点的范围覆盖,又提升了频谱资源的利用效率,增大 系统容量,节约软硬件资源。此外,针对点对多点太赫兹包 络检波,本文提出了一种光域自适应 SSB 滤波机理,抑制 多带之间的 SSBI,简化了 DSP 信号解调流程,大大降低了 系统功耗和复杂度,更利于技术的商业化落实和普及。

1.1 点对多点太赫兹通信技术

随着通信技术的发展,各用户场景的智能移动终端 设备数量及数据需求趋于多样化,特别是当下多媒体通 过直播进行信息实时传播方式的兴起,在充分利用频谱 资源且满足多用户场景的通信容量需求方面,实现点对 多点的信号自适应调制通信技术的发展成为当务之急。

本文通过采用 FDM 方式实现点对多点的通信资源调度 分配,以适用于多类终端用户场景。但是,由于光纤色散影 响,在基于包络检波的多带光子太赫兹系统中,包络检波下 变频后所得频率越高的信号频带受光纤色散的影响越大,这 限制了多带太赫兹信号的传输距离及不同频带可接受的调制 阶数^[28-30]。对于包络检波下变频后所得频率越低的频带,可 应用越高的数据密度,采用更高阶调制格式,这些信号所占 据的频段被称作通信系统的"强"通道;与之相反,所得频 率越高的频带,可采用的调制阶数越低,这些信号所占据的 频段称作为"弱"通道。如果所有信号频段采用统一的调制 格式,则不同频带必须一致采用可接受的最小阶调制,"强" 通道不能极致发挥其容量优势,整个系统的容量受最"弱"

> 移动通信 | 39 2023年5月第5期 | 39

效率。由此,根据用户需求以及每个信号频带的通道响应情况,自适应调整各频带的通信调制阶数。由低到高的数据密度(低阶调制信号到高阶调制信号)对应应用于信噪比由弱 到强的通道,提高下行通道的数据容量和频谱效率,同时亦 实现了太赫兹点对多点的覆盖通信。

图1展示了一种自适应点对多点太赫兹通信的多用户应 用场景。由信号发射中心发射多带中频通信信号,进入光纤 进行分布式传输:结合系统传输响应,并针对多种不同的用 户场景所需的目标信号进行相应地光域信号处理,然后在远 端天线单元通过外差上变频将多带中频信号上变频至不同的 太赫兹频段,最后在用户端对接收到的太赫兹信号进行包络 检波处理及目标信号的数据解调。根据目标需求,对不同的 信号频带可自适应地分配不同的调制格式。终端设备数量较 多、数据需求大的用户场景需要高阶的调制格式,而随着数 据密度需求的降低,调制信号阶数要求随之递减。如:对于 大型体育馆,人员基数大,实时直播需求高,移动通信终端 设备多,网上冲浪活跃度高,分配64QAM乃至更高阶的信号; 对于学生平板跟学的智慧教室、学校等用户,全天所需网络 数据量较高且设备较密集,可分配 16QAM 信号或者更高阶 信号;对于活动放松的休闲公园,人少且极少上网,数据需 求低且设备分散,分配 4QAM 信号。采用这种自适应调制 并对应多种用户场景的系统结构,多带太赫兹通信系统可以 用更少的软硬件资源增大系统传输容量,增强通信性能鲁棒 性,提升动态网络灵活性。

1.2 SSBI抑制技术

ED(Envelope Detector,包络检波器)是非相干探测系统中用于进行太赫兹信号下变频的常用电器件,由

非线性器件和LPF(Low-Pass Filter,低通滤波器)组成, 其中非线性器件实现信号相乘,完成信号的频谱搬移, 再通过LPF滤除非线性器件输出的高频分量,整体作用 相当于一个输出为LPF的平方律检波器^[14]。通常SSBI 项将与目标信号有极大的频谱重叠,严重影响接收信号 的质量,且决定了较高的DSP解调复杂度。

设置保护间隔是已有工作中最常见的消除 SSBI 的方 法,但效果的好坏与频谱资源的利用恰成反比,想要更 好地消除 SSBI, 就必须设置更大的保护间隔, 造成频谱 资源的浪费,故仅通过大保护间隔消除 SSBI 在频谱资源 紧张的当下并不可取;而通过接收端 DSP 算法设计,利 用 KK 或 Volterra 等非线性算法消除 SSBI,则会导致接 收端 DSP 复杂性和功耗飙升。本系统采用一种设置较小 保护间隔与 SSB 自适应光滤波相结合的方法抑制多带太 赫兹系统中的 SSBI。CO(Central Office,中央单元)的 DSP 模块产生单边带的虚载波和多带中频信号。并对虚 载波与相邻的信号频带之间,以及频带相互之间插入合适 的保护间隔: DSP 产生的数字信号经过 D/A (Digital-to-Analog Conversion, 数模转换)后通过电光映射后转换 成 SSB 光信号,并送入光纤传输到 RAU (Radio Access Unit, 射频接入单元); 在每个 RAU 应用一个光 SSB 滤 波器来自适应筛选信号的光谱范围,将目标频带信号自 适应保持在接收频谱范围内的最外侧位置,并通过光外 差上变频产生太赫兹信号;在用户接收端,经过无线传 输的太赫兹信号通过 ED 下变频至中频频率,再经过 A/D (模数转换, Analog-to-Digital Conversion)转换后进行 DSP 离线处理。其中,经过 ED 平方律探测后,引入的 目标信号处理光纤链路 多种用户应用场景



移动運信 2023年5月第5期

40

SSBI将从直流项分布到目标信号频带附近的频率,对接 收信号的质量影响较小,也简化了后续的 DSP 处理。

为了更能直观明了地理解,以S₁、S₂为目标信号,结 合图示及公式进行简要说明。以接收单边带频分复用双副 载波太赫兹信号为例,对应的平方率包络检测公式如下:

$$|C + S_1 + S_2|^2 = (C + S_1 + S_2) \cdot (C + S_1 + S_2)^*$$

= |C|² + |S_1|² + |S_2|² + 2 Re{S_1 \cdot S_2} + 2 Re{C \cdot (S_1 + S_2)}
(1)

C 表示接收太赫兹信号的电虚载波, $S_1 和 S_2 分别表示距$ $离电虚载波由近及远的频带信号 1 和频带信号 2, <math>|\bullet|^2$ 表 示平方律检测算子, $(\bullet)^*$ 表示信号的共轭, Re(•)表示信 号实部。从公式推导最后结果来看, 每项依次为直流项、 频带信号 1 自身拍频干扰(SSBI1)、频带信号 2 自身拍 频干扰(SSBI2)、频带信号 1 和 2 相互间拍频干扰(SSBI3) 以及两个目标的期望信号。直流项一般可以通过电路的 直流模块或者 DSP 轻松去除。

从式(1)及图2可以看到,SSBI3与目标信号1在频 域重叠,严重影响信号1的性能;但是目标信号2不受 SSBI影响。当用光SSB带通滤波器自适应地以目标信号 *S*₁为通带最右侧的频带信号,接收到的太赫兹信号进入 ED进行信号下变频时,如式(2)所示: $|C + S_1|^2 = (C + S_1) \cdot (C + S_1)^*$ = |C|² + |S_1|² + 2 Re{C \cdot S_1} (2)

结合式 (2) 及图 2 可以看到,经过光 SSB 带通滤波器,并设置合适的保护间隔后,完美消除了 SSBI3 对目标信号 1 的影响,因而,可通过简单的离线 DSP 解调即可良好地恢复出目标信号 *S*₁。当以 *S*₂,*S*₃,...,*S*_n为目标信号时,亦可采用保护间隔结合自适应光 SSB 滤波技术消除 SSBI,提升通信性能并降低接收端 DSP 复杂性。

2 多带非相干光子太赫兹通信实验验证及结果

图 3 是本文所提出的多带非相干光子太赫兹通信系统的实验装置。该系统主要分为三个模块: CO、RAU和UE。CO产生自适应调制 SSB 光信号,实现电信号到光信号的线性映射,并将光信号送入单模光纤; RAU 接收光纤传输的信号,进行自适应光滤波,并实现光信号到太赫兹的转换和无线发射; UE 接收太赫兹无线信号,进行包络检波,最后实现离线 DSP 解调。

2.1 实验装置

在 CO,通过 DSP 在数字域产生了一个虚载波,并使用 FDM 方式,距离虚载波由近及远产生了三个频带的单边带 中频信号。根据系统的传输响应,三个中频信号分别设置



为 5.75 G Buad 的 64QAM、16QAM 和 4QAM; 虚载波与相 邻频带之间的保护间隔为 6.35 GHz,频带与频带之间的保护 间隔分为 1.5 GHz 和 2.5 GHz 两种情况:产生的数字信号通 过 AWG (Arbitrary Waveform Generator,任意波形发生器) 以 92 GSa/s 的采样率上采样完成 D/A, 生成一个由电虚载 波和三频带中频信号组合的模拟信号,并驱动 IQ 调制器调 制来自可调谐 ECL1(External Cavity Laser,外腔激光器) 的发射功率为 14.5 dBm 的 193.5 THz 光载波;经过载波抑 制 SSB 调制, 电信号线性映射为单边带光信号, 并经过 EDFA1(Erbium-doped fiber amplifiers, 掺铒光纤放大器)放大, 用于补偿电光调制的损耗。值得注意的是,在放大之前,使 用了 PC1(Polarization Controller,偏振控制器)进行光偏振 态对准, 以最大化 EDFA1 (Erbium-doped fiber amplifiers, 掺饵光纤放大器)的放大效率。

经过 EDFA1 放大的单边带光信号随后经过 20 km SMF(单模光纤, Single-Mode Fiber) 传输至 RAU; 考虑到 SMF 的非线性效应, EDFA1 的输出功率固定在 5 dBm。在 RAU, 接收到的光信号注入输出功率固定 在 6 dBm 的 EDFA2, 以补偿 SMF 的传输损耗。随后采 用 TOF (Tunable Optical Filter, 可调谐光滤波器),以 4QAM、16QAM、64QAM分别作为目标信号,并根据目 标信号中心频率、带宽及保护间隔, 合理设置 TOF 的中 心波长及3 dB 通带带宽, 使调制后信号的光载波和目标 信号频带分别位于 TOF 的通带内两侧,来模拟自适应光 滤波,为太赫兹接收端包络检波实现 SSBI 的抑制提前做 好准备。需要指出的是, SSBI 的抑制与发射波形的调制 阶数无关,只与发射波形的频率、带宽和保护间隔有关; 而且, TOF 的滚降系数越大, SSBI 抑制更加理想, 信号频 带排列可以更紧凑,频谱效率更高。由于实验设备有限, 实验时这里先后对这三种调制格式分别进行了信号滤波处 理,以模拟点对多点传输。在频带保护间隔为 2.5 GHz 条

第47卷

总第513期

通过调谐 TOF 的中心波长和 3 dB 带宽, 使光载波和目标 信号频带分别位于 TOF 的通带内两侧,对应的滤波效果如 图 4 (a) 所示。ECL2 产生功率为 10 dBm 的 193.790 THz 光波,作为光本振信号,用于实现光外差太赫兹上变频。 光本振经过 PC2 进行偏振态调谐后,直接与滤波后的 SSB 光信号通过 3 dB OC (Optical Coupler, 光耦合器) 进行耦合。图4(b)展示了目标信号为64QAM的耦合信 号光谱。各耦合信号分别顺序进入 EDFA3 进行整体功率 补偿,并通过 VOA (Variable Optical Attenuator, 可调谐 光衰减器)来测试下行通信的光纤链路功率裕度,并用以 判断接收光功率对通信性能的影响。VOA 输出的光信号 进入 UTC-PD (Uni-Travelling-Carrier Photodiode, 单行 载流子光电探测器)进行光本振与 SSB 光信号间的外差 拍频,完成 CO 所发射中频信号的上变频,产生中心频率 约为 290 GHz 的多带无线信号。实验中,发射天线和接 收天线均采用增益为 26 dBi 的喇叭天线。实验分为天线 B2B(Back-to-Back,背靠背)和2m无线距离两种情况。

2.2 实验结果

实验中,在 B2B 情况下测试了信号之间的频带保护 间隔对通信性能的影响。在测试中,通过调节 VOA, 分别测试了 RAU 中 ROP (Received Optical Power, 接 收光功率)变化对不同频段太赫兹信号性能的影响。通 信性能采用 20% SD-FEC (Soft Decision-Forward Error Correction, 软判决 - 前向纠错) 阈值 2×10⁻³ 和 7% HD-FEC (Hard Decision-FEC, 硬判决-前向纠错)阈值 3.8×10⁻³ 作为通信性能指标 BER 的衡量标准。另外,在 上述测试基础上,继续验证了在2.5 GHz频带保护间隔下, 2m无线传输损耗对通信性能的影响。对所有的实验测试, UTC-PD 的最大输入光功率被限制为 12 dBm, 以免光功 率过高损坏器件。实验具体结果具体分析如下。



移动进信 42 2023年5月第5期

(1) SSBI 抑制

在背靠背无线接收端,接收到的太赫兹无线信号通过 ED 实现信号下变频, 生成带有 SSBI 的中频信号。在 2.5 GHz 频带保护间隔条件下,分别以 4OAM、16OAM、64OAM 为目标信号的接收频谱如图 5 所示。由于所使用光滤波 器的滚降系数有限,考虑实际传输响应,对目标信号边 带进行自适应光滤波时,保留了部分外侧相邻边带,以 减少光滤波对目标信号的损伤。包络检波后的信号再被 送入 LNA (Low Noise Amplifier, 低噪声放大器),补 偿光-太赫兹转换以及太赫兹传输损耗,并用实时示波器 以128 GSa/s的采样速率进行信号的数字化处理和采集。 由于包络检波的非相干太赫兹检测方式对外差拍频的两 束激光器的相位噪声不敏感,所以解调过程无需使用频 偏估计和载波相位恢复等均衡过程。从图5可以看到, 光自适应滤波前, SSBI 与目标信号频谱严重混叠, 目标 信号 64QAM 和 16QAM 与其频带内的 SSBI 功率比分别 为 5.52 dB 和 10.65 dB, SSBI 将严重影响目标信号的通 信质量。光自适应滤波后,SSBI位于目标信号频谱的左侧, 目标信号 64QAM 和 16QAM 与其频带内的 SSBI 功率比 分别降为 21.38 dB 和 22.34 dB, SSBI 对目标信号的通信 质量影响较小。为了进一步衡量自适应光滤波对 SSBI 的 抑制效果,给出了自适应光滤波前后目标信号 64OAM 和 16QAM 的星座图及其对应的误码率,如图 6 所示。光 自适应滤波前,目标信号 64QAM 和 16QAM 的星座点 呈现出混沌状态,误码率分别为4.52×10⁻²和3.39×10⁻²。

若要进一步提升系统的性能,则需要使用 Volterra 或 KK 等 SSBI 抑制算法。光自适应滤波后,目标信号 64QAM 和 16QAM 的星座点清晰可见,误码率分别降至 3.17×10⁻³ 和 3.28×10⁻⁴。因而,不再需要采用 SSBI 抑制算法,这也 使得接收端的 DSP 变得更加简单,功耗更低。

(2) 1.5 GHz 和 2.5 GHz 信号频带保护间隔多带太 赫兹传输

图 7 左侧展示了在 B2B 条件下,分别采用 1.5 GHz 和 2.5 GHz 信号频带保护间隔, 4QAM、16QAM、64QAM 三 个目标信号的通信性能。测试中, ROP 从 6 dBm 以 1 dB 为 步长逐渐增加到 12 dBm。如图可见,当频带保护间隔分别 为 1.5 GHz 和 2.5 GHz 时, 接收信号 BER 均随 ROP 的递增 而降低,即在正常接收光功率范围内,随着 ROP 增大可以 提升太赫兹信号的传送质量;而且,相同频带的目标信号在保 护间隔为 2.5 GHz 的 BER 整体低于 1.5 GHz 时的 BER,这是 因为保护间隔的增加为自适应光SSB滤波提供了更宽的裕度, 减少了光滤波对目标信号的损伤。当 ROP 大于等于 9 dBm 时,所有解调信号 BER 全部低于 2×10⁻² 的 SD-FEC 阈值, 且 ROP 在 12 dBm 左右,都可达到 3.8×10⁻³的 HD-FEC 阈值; 其中, OAM4、OAM16的误码率均远低于 HD-FEC, 整体 通信性能良好。这里还发现,频带间隔为 2.5 GHz 的三种调 制信号的 BER 曲线,在 ROP 较小时高阶 QAM 信号的 BER 较小,这是由于高阶 QAM 信号频带距离虚载波近,相干性 好,且器件在低频时传输响应更好,这也是可以利用信号自



秒动通信 2023年5月第5期 43 适应调制、提升通信容量和频谱利用率的关键。但是,低阶 QAM 信号 BER 曲线的整体改善速率明显优于高阶 QAM 信号,当 ROP 大于等于 8 dBm 时,BER 由大到小分别对应高阶到低阶 QAM 信号。这是由于低阶 QAM 信号欧式距离本身较大,增大 ROP 可以大幅改善信噪比,降低 BER;高阶 QAM 欧氏距离本身较小,增大 ROP 虽然可以改善信噪比,提升通信性能,但存在阈值;频带保护间隔 1.5 GHz 的BER 曲线变化亦如是。图 7 右侧展示了在两种频带保护间隔距离下,最小 BER (ROP 为 12 dBm)所对应的各信号解调星座图。可以看到,QAM4、QAM16 信号星座点聚拢; QAM64 在频带保护间隔 1.5 GHz 时星座点与 2.5 GHz 时比较发散,但 BER 均在 HD-FEC 附近,通信性能良好,系统的总传输速率达 69 Gbit/s。通过使用更优性能的光滤波器,或者使用预均衡技术抵消光滤波对目标信号的损伤,可以实现更优的太赫兹通信性能,进一步减小频带之间的保护间隔。

(3) B2B 和 2 m 太赫兹无线传输

图 8 左侧展示了在信号频带保护间隔为 2.5 GHz 条件下, 4QAM、16QAM、64QAM 三个目标信号的通信性能。测试中, ROP 从 6 dBm 以 1 dB 的步长逐渐增加到 12 dBm。如图可见, 在 B2B 和 2 m 无线距离两种测试条件下,接收信号 BER 均 随 ROP 的递增而降低;而且,相同频带的目标信号在 B2B 传 输时的 BER 整体低于 2 m 无线传输时的 BER,这是由于无线 链路的传输使接收的太赫兹无线信号产生了功率和非线性损 耗,降低了接收信号的质量。当 BER 满足 20% SD-FEC 时, 与 B2B 传输相比,2 m 的无线传输距离造成了约 2 dBm 的光 功率消耗。当 ROP 为 12 dBm 时,各信号 BER 都可达到 3.8×10³ 的 HD-FEC 阈值,其中 QAM4、QAM16 的 BER 均远低于 HD-FEC。图 8 右侧展示了在两种传输距离下最小 BER (ROP 为 12 dBm)所对应的各信号解调星座图。无线传输 2 m 时 各信号的星座点与 B2B 时相比较发散,但 BER 均小于 HD- FEC;整体来看信号点聚集,通信性能比较好。从测试的结果 也可以看到,通过多带自适应调制和 SSB 光滤波,可以满足 不同速率和不同无线距离等多需求场景的点对多点覆盖传输。

3 结束语

6G 移动通信突出的超宽带、超高速发展需求带来大带宽、易重构的超灵活光子太赫兹通信技术发展浪潮,但低复杂度包络检波太赫兹引入的 SSBI 严重影响接收信号质量。基于此,本文提出了一种多带非相干光子太赫兹通信系统中的 SSBI 抑制技术,具体阐述了应用于点对多点应用场景的自适应调制和自适应光滤波原理,用以解决多用频带资源分配调度问题,在频谱资源有限的条件下,提升通信容量和频谱效率,并降低用户接收复杂度和功耗。通过实验验证了该原理的可行性,在 7% HD-FEC 条件下实现了 300 GHz 频段多带太赫兹信号的 2 m 无线传输。

参考文献:

- [1] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景, 挑战与关键 技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019,49(8): 963-987.
- [2] 杨鸿儒,李宏光.太赫兹波通信技术研究进展[J].应用光学, 2018,39(1):12-21.
- [3] 赵明,余建军.太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J].太 赫兹科学与电子信息学报,2018,16(6):931-937.
- [4] 姜航,姚远.高速长距离太赫兹通信系统研究现状与难点综述
 [J].无线电通信技术,2019,45(6):634-637.
- [5] 朱敏,张教,华炳昌,等.面向 6G 的太赫兹光纤一体融合通信系统:架构、关键技术与验证[J].中国科学:信息科学, 2023,53(1):191-210.
- [6] Shams H, Fice M J, Gonzalez-Guerrero L, et al. Sub-THz wireless over fiber for frequency band 220–280 GHz[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016,34(20): 4786-4793.
- [7] 李赟,李正璇,黄新刚,等.基于相位调制本振的相干检测系统 [J].光学学报,2021,41(20):2006001.
- [8] Seeds A J, Shams H, Fice M J, et al. Terahertz photonics for wireless communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015,33(3): 579-587.



[9] Shams H, Shao T, Fice M J, et al. 100 Gb/s multicarrier THz wireless

图7 信号频带间隔1.5 GHz和2.5 GHz对应的BER曲线(左侧)和对应各信号最小BER解调星座图(右侧)

44 移动通信



图8 无线传输距离为0(B2B)和2m的BER变化曲线(左侧)和对应各信号最小BER解调星座图(右侧)

transmission system with high frequency stability based on a gainswitched laser comb source[J]. IEEE Photonics Journal, 2015,7(3): 1-11.

- [10] Shao T, Shams H, Anandarajah P M, et al. Phase noise investigation of multicarrier sub-THz wireless transmission system based on an injection-locked gain-switched lase[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015,5(4): 590-597.
- [11] Mandelli S, Gatto A, Magarini M, et al. Phase noise impact on directly detected optical OFDM transmission in uncompensated links[C]//2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE, 2016: 1-4.
- [12] Zhao D, Xi L, Tang X, et al. Digital pilot aided carrier frequency offset estimation for coherent optical transmission systems[J]. Optics express, 2015,23(19): 24822-24832.
- [13] Balakier K, Thakur M P, van Dijk F, et al. Demonstration of photonic integrated RAU for millimetre-wave gigabit wireless transmissio[C]//2016 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2016: 344-347.
- [14] Gonzalez-Guerrero L, Shams H, Fatadin I, et al. Single sideband signals for phase noise mitigation in wireless THz-over-fibre systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(19): 4527-4534.
- [15] Mecozzi A, Antonelli C, Shtaif M. Kramers–Kronig coherent receiver[J]. Optica, 2016,3(11): 1220-1227.
- [16] Zhu Y, Jiang M, Zhang F. Direct detection of polarization multiplexed single sideband signals with orthogonal offset carriers[J]. Optics Express, 2018,26(12): 15887-15898.
- [17] Liu G N, Zhang L, Zuo T, et al. IM/DD transmission techniques for emerging 5G fronthaul, DCI, and metro applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(2): 560-567.
- [18] Zhong K, Zhou X, Huo J, et al. Digital signal processing for short-reach optical communications: A review of current technologies and future trends[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(2): 377-400.
- [19] Khayatzadeh R, Elwan H H, Poette J, et al. 100 GHz RoF system based on two free running lasers and non-coherent receiver[C]//2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2015: 1-4.
- [20] Chuenchom R, Zou X, Rymanov V, et al. Integrated 110 GHz coherent photonic mixer for CRoF mobile backhaul links[C]//2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). IEEE, 2015: 1-4.
- [21] Lin C T, Wu M F, Ho C H, et al. W-band OFDM Radio-over-Fiber system with power detector for vector signal down-conversion[J]. Optics letters, 2015,40(11): 2477-2480.
- [22] Hermelo M F, Shih P T B, Steeg M, et al. Spectral efficient 64-QAM-OFDM terahertz communication link[J]. Optics express, 2017,25(16): 19360-19370.
- [23] Guerrero L G, Shams H, Fatadin I, et al. Spectrally efficient SSB signals for W-band links enabled by Kramers-Kronig receiver[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). IEEE, 2018: 1-3.

- [24] Harter T, Füllner C, Kemal J N, et al. 110-m THz wireless transmission at 100 Gbit/s using a Kramers-Kronig Schottky barrier diode receiver[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2018: 1-3.
- [25] Harter T, Füllner C, Kemal J N, et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for 16QAM wireless THz transmission at 110 Gbit/s[C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019). IET, 2019: 1-4.
- [26] Harter T, Füllner C, Kemal J N, et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for coherent terahertz communications[J]. Nature Photonics, 2020,14(10): 601-606.
- [27] Zhang L, Qiao M, Wang S, et al. Nonlinearity-aware optoelectronic terahertz discrete multitone signal transmission with a zero-bias diode[J]. Optics Letters, 2020,45(18): 5045-5048.
- [28] Yan J H, Chen Y W, Shen K H, et al. An experimental demonstration for carrier reused bidirectional PON system with adaptive modulation DDO-OFDM downstream and QPSK upstream signals[J]. Optics Express, 2013,21(23): 28154-28166.
- [29] Peng W R. Analysis of laser phase noise effect in direct-detection optical OFDM transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010,28(17): 2526-2536.
- [30] Giacoumidis E, Wei J L, Yang X L, et al. Adaptive-modulationenabled WDM impairment reduction in multichannel optical OFDM transmission systems for next-generation PONs[J]. IEEE Photonics Journal, 2010,2(2): 130-140. ★

作者简介



雷明政:博士,现任紫金山实验室光通信研究 员,兼任东南大学专业硕士校外导师,主要研究 方向为光子学毫米波/太赫兹通信、微波光子雷 达、通信感知一体化。



方苗苗:东南大学微电子学院在读硕士研究生, 研究方向为光子学毫米波/太赫兹通信。



朱敏:东南大学移动通信全国重点实验室副教授,紫金山实验室课题组负责人,主要研究方向为面向6G的超宽带光子太赫兹/毫米波通信技术、基于深度强化学习的光无线网络切片资源优化配置技术。