

文章编号: 2095-4980(2024)12-1356-08

D 波段超外差高速无线通信系统

李振北, 鲁 斌, 关欢欢, 吴 静, 张 健*, 于秋则*

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 太赫兹通信是 6G 时代无线移动通信重要发展方向之一, 具有大带宽、低延时的特点, 适用于高速无线回传、卫星通信等多种应用场景。本文设计了一款基于中频频率合成的 D 波段(110~170 GHz)无线通信系统, 通过合成 n 路带宽为 2 GHz 的中频频率, 实现总带宽为 $(n \times 2)$ GHz 的 D 波段宽带无线通信, 从而实现超过 100 Gbps 的传输速率。为验证系统可行性, 对所设计的 n 路通信系统进行了 $1/n$ 缩比验证, 结果表明, 利用 2 GHz 的 D 波段信道带宽, 可实现最高 128 正交幅度调制(QAM)下 11.2 Gbps 的空中传输速率以及 9.4 Gbps 业务传输速率, 证明了仅使用一套 D 波段射频前端的 n 路中频频率合成系统架构能够低成本地实现 D 波段宽带高速无线通信。

关键词: 太赫兹通信系统; 超外差架构; 无线回传; 128 正交幅度调制

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024248

D-band superheterodyne high-speed wireless communication system

LI Zhenbei, LU Bin, GUAN Huanhuan, WU Jing, ZHANG Jian*, YU Qiuze*

(School of Electronic and Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: Terahertz communication is one of the important development directions for wireless mobile communication in the 6G era, characterized by large bandwidth and low latency, suitable for various application scenarios such as high-speed wireless backhaul and satellite communication. This paper designs a D-band (110~170 GHz) wireless communication system based on intermediate frequency synthesis, achieving D-band broadband wireless communication with a total bandwidth of $(n \times 2)$ GHz by synthesizing n intermediate frequencies with a bandwidth of 2 GHz each, thereby achieving a transmission rate of over 100 Gbps. To verify the feasibility of the system, a $1/n$ scale-down verification was conducted on the designed n -path communication system. The results show that using a 2 GHz D-band channel bandwidth, a maximum of 11.2 Gbps air interface transmission rate and 9.4 Gbps service transmission rate can be achieved with 128-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), proving that the n -path intermediate frequency synthesis system architecture using only one set of D-band RF front ends can achieve low-cost D-band broadband high-speed wireless communication.

Keywords: terahertz communication system; superheterodyne architecture; wireless backhaul; 128 Quadrature Amplitude Modulation

随着全球 5G 基站从广泛覆盖向深度覆盖迈进, 传统光纤方案在一些偏远山区、江河湖海以及城市特殊场景中遇到了诸如光纤资源短缺、部署时间紧迫、成本高昂等诸多挑战。微波和毫米波技术不断创新, 凭借其远距离传输、大容量承载、快速部署、强抗损性以及低成本等优势, 逐渐成为 5G 时代突破光纤限制、实现基站回传的重要利器。这些技术不仅有效解决了传统光纤方案的不足, 还极大地推动了 5G 网络的快速、广泛部署, 在各种复杂环境下也能确保 5G 网络的高效覆盖和稳定运行^[1-8]。市场研究机构 Dell'Oro Group 的报告指出, 2021 年—2025 年, 预计包括光纤/铜缆和无线系统在内的移动回传传输市场收入将达 250 亿美元, 其中微波传输市场累计收入预计将超 160 亿美元。再加上以马斯克的“星链计划”为代表的卫星互联网的迅猛发展, 更是为高速无线回传带来巨大的需求。2023 年, 工业和信息化部正式将 E 波段(71~76 GHz&81~86 GHz)调入到我国微波通信的授权频段, 成为推动我国无线回传走入毫米波时代的标志性里程碑。以华为、中兴为代表的产业界也纷纷推出了各

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-09-18

*通信作者: 张 健 email:zhangjian@whu.edu.cn; 于秋则 email:yuheny007@whu.edu.cn

自的 E 波段产品，成功地以 2 GHz 带宽、高阶调制和极化的方式实现 20 Gbps 以上的传输速率。中国太赫兹高速无线通信关键技术已取得了重要突破，与世界技术水平基本同步。进一步大力发展太赫兹高速通信技术，对于中国引领国际高速无线通信技术发展和未来移动通信标准化进程具有重要的战略意义^[9]。

为实现 6G 时代 TB 级数据速率甚至更大的带宽，只能探索更高的频率，尤其是超过 100 GHz 的频率范围。已经确定的新频段包括 D 波段(110~170 GHz)、G 波段(140~220 GHz)以及 H/J 波段(220~330 GHz)。发展新一代商业可行的、更高传输速率的太赫兹回传系统成为当前研究的热点，而 D 波段正被基站基础设施供应商所关注，具有极高的应用前景。2016 年，I Ando 等^[10]设计了一款速率达 60 Gbps 的通信系统，工作频段为 120 GHz；2020 年，A HAMA-NI 等^[11]采用 45 nm CMOS 技术实现了 84.48 Gbps、64QAM 调制的 D 波段集成本振的接收前端；2023 年，F STRÖMBECK 等^[12]提出一种基于聚合物微波光纤传输的超 100 Gbps 传输速率的 D 波段通信链路；同年，张敦等^[13]成功演示了基于强度调制直接检测的 1.485 GBaud、350 GHz 太赫兹有线实时传输视频实验。

现有的太赫兹通信系统，更多的是用于科学研究，大多采用低阶调制方式或光电混合模式实现短距离无线通信，在商业发展技术的前后兼容和低成本、高鲁棒性方面欠缺考虑。现有的国际电信联盟(ITU)的电信级分配带宽通常以 250 MHz 为单元子信道，通过多路复用的方式实现最大 2 GHz 的信道带宽。鉴于此，本文设计了一种基于通用标准基带平台的中频频率合成的太赫兹高速无线通信系统，采用 n 路中频频率合成的方法，可实现 D 波段载频； $(n \times 2)$ GHz 可用带宽下，最高实现 128QAM 的调制阶数，最高传输速率超过 100 Gbps。此外，本文针对 8 路中频频率合成、16 GHz 可用带宽的方案进行设计，并对其进行缩比实验验证：利用 1 路子基带平台，在 D 波段载频，2 GHz 带宽范围内实现了最高 11.2 Gbps 空口传输速率以及 9.4 Gbps 业务传输速率，实现最高 128QAM 调制阶数。

已有的太赫兹通信系统大多采用单路中频。首先，器件的选择需要超宽带以满足太赫兹射频前端的需求，这带来了巨大的成本提升；其次，基带系统也需要 100 Gbps 以上的基带平台，成本将呈几何倍数抬升。本文采用多路中频合成的系统架构，将太赫兹频段进行拆分，通过低成本方案搭建了切实可行的 100 Gbps 太赫兹通信系统，并进行了缩比验证，具有较大的商业应用前景，为更高带宽下的太赫兹通信系统提供了实验基础，同时可以满足基于国产太赫兹芯片的射频前端快速迭代的需求。

1 系统架构

D 波段系统架构如图 1 所示，系统由单一宽带 D 波段太赫兹前端收发模块、 n 个最大带宽为 2 GHz，最高实现 1 024QAM 调制的子基带平台组成的 100 Gbps 基带平台以及 n 个中频链路组成。系统整体采用超外差架构，通过 2 次上/下变频的方式，显著提高了信道选择性和系统灵敏度；通过灵活选择合适的中频频率，可更容易滤除干扰信号；同时通过对系统链路预算的合理分配，将增益合理分配到各级放大器和射频、中频、基带 3 个频带上，保证了系统的稳定性和灵敏度。

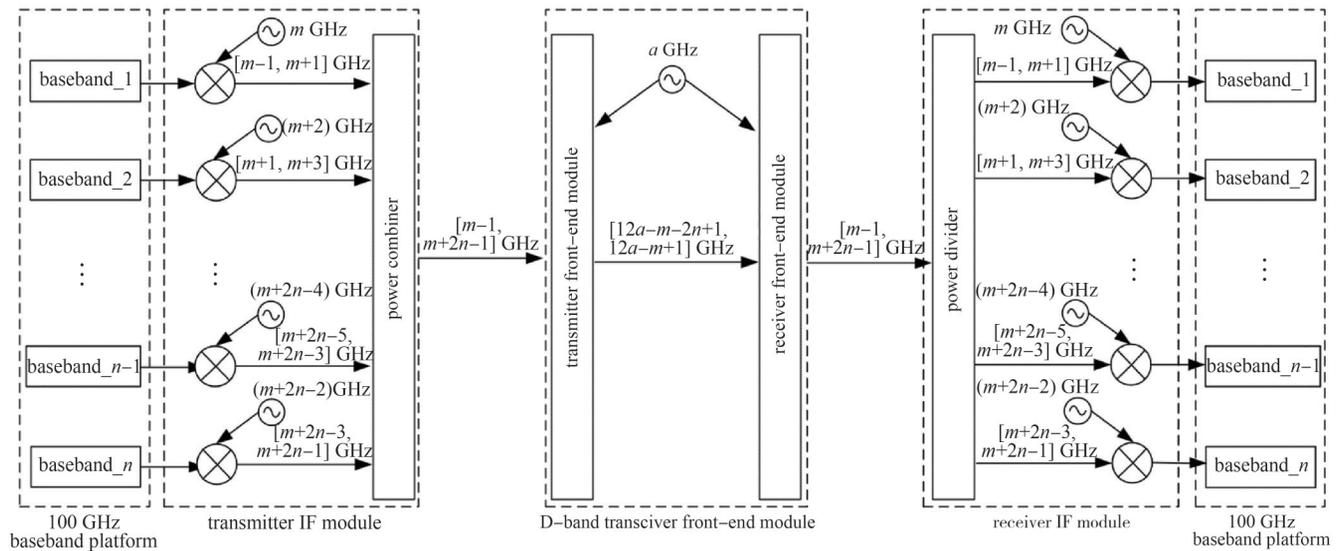


Fig.1 Architecture of D-band wireless communication system
图 1 D 波段无线通信系统架构

对于发射端, 首先使用 n 个带宽为 2 GHz 的子基带平台共同组成 100 Gbps 基带平台, 经过 n 个初始频率为 m GHz, 间隔为 2 GHz 的本振频率 $\{m \text{ GHz}, (m+2) \text{ GHz}, \dots, (m+2n-2) \text{ GHz}\}$ 分别对其进行第 1 次上变频, 得到 n 路带宽为 2 GHz 的调制信号; 然后通过功率合成模块得到总带宽为 $(n \times 2)$ GHz 的宽带调制信号, 将其作为第 2 次变频的中频信号, 与发射射频前端的频率为 a GHz 的本振信号进行第 2 次上变频, 得到带宽为 $(n \times 2)$ GHz, 频率范围为 $(12a-m-2n+1) \sim (12a-m+1)$ GHz 的射频信号, 射频信号经天线发射出去。需要注意的是, 由于 D 波段本振链路采用 6 倍频结构, 且混频器采用二次谐波混频, 因此实际的本振频率为 $(a \times 12)$ GHz。

在接收端通过相同的方式进行 2 次下变频: 首先将 $(12a-m-2n+1) \sim (12a-m+1)$ GHz 的射频信号经接收射频前端模块进行第 1 次下变频, 得到 $(n \times 2)$ GHz 宽带中频信号; 然后经功率分配模块将其以 2 GHz 为间隔分配到 n 个接收中频模块中进行第 2 次下变频, 其频率分别为 $[m-1, m+1]$ GHz、 $[m+1, m+3]$ GHz、 \dots 、 $[m+2n-3, m+2n-1]$ GHz, 对于每个接收中频模块, 采用频率间隔为 2 GHz 的 n 个本振频率分别对其进行下变频, 得到 n 路带宽为 2 GHz 的中频信号, 分别进入 n 个子基带平台进行解调。通过这样的频率分配方式, 能够最大化利用射频带宽及超外差架构的优势。

考虑到通道间的隔离问题, 对于一般情况, 由于基带平台的带宽范围为 50 MHz~2 GHz, 一方面可将其限制到 2 GHz 以下使用, 从而获得足够的频带间隙用于设计带通滤波器; 另一方面可将子链路的带宽设置大于 2 GHz, 同样可以获得合适的频带间隙。而对于本文系统, 基带带宽在 2 GHz 时, 实际符号速率为 1 595 MBaud, 即实际占用带宽为 1 595 MHz, 可将剩余的带宽间隙用于设计滤波器, 从而最大化利用射频带宽^[14]; 同时也可以通过加入有源开关, 配合滤波器实现多通道通信^[15]。

2 子系统设计与实现

对图 1 的系统模型进行拆解, 基于系统复杂度、系统容量以及系统成本的多重考虑, 对其中一路中频进行系统级验证。其中, 第 1 次变频的本振频率 m 选择为 9 GHz, 第 2 次变频的本振频率 a 选择为 12.625 GHz, 即太赫兹本振频率为 151.5 GHz, 射频频率为 141.5~143.5 GHz。

太赫兹频段选择课题组自研的 6 倍频器芯片以及 D 波段收发混频器芯片, 均支持宽带应用; D 波段低噪声放大器以及功率放大器选用国产商用芯片, 其带宽可覆盖整个 D 波段; 中频部分同样选择宽带中频混频器; 基带使用课题组自研的基带平台。

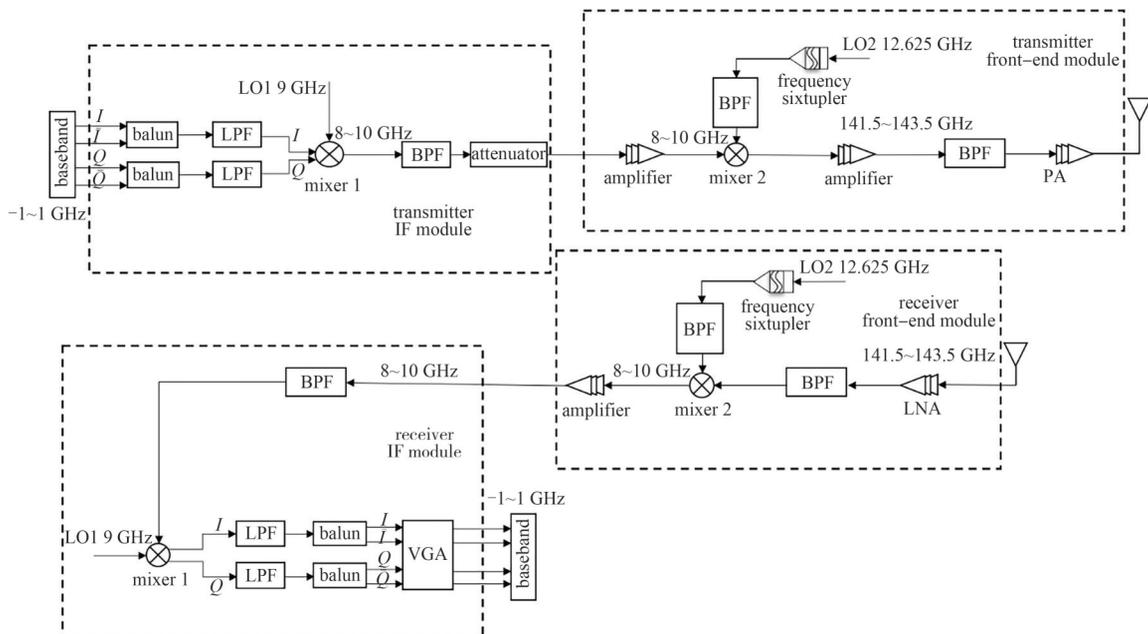


Fig.2 Block diagram of D-band sub-system

图 2 D 波段子系统原理框图

子系统进行缩比实验的 D 波段通信系统的原理框图如图 2 所示。发射中频部分: 基带提供 4 路正交差分的 0~1 GHz 调制信号, 在发射中频板上经 2 个巴伦转换为 2 路 I/Q 正交信号, 并经过低通滤波器后进入第一级混频器进行第 1 次上变频, 第 1 次变频的混频器本振频率设定为 9 GHz, 因此射频端将得到 8~10 GHz 的第 1 次变频之后

的调制信号。经过带通滤波器及数控衰减器之后输入到发射前端模块进行第 2 次变频。

在 D 波段发射前端模块中，经过第 1 次上变频得到的 8~10 GHz 信号首先经过一级功率放大，并通过次谐波混频器与本振信号叠加，得到 141.5~143.5 GHz 射频信号。其中，中频功率放大器芯片可在 6~28 GHz 频率范围内提供 23.5 dB 增益，输出 1 dB 压缩点为 17.5 dBm；12.625 GHz 的本振信号首先经过一个自研的 6 倍频器芯片进行倍频，得到频率为 75.75 GHz 信号，经过带通滤波器后作为本振输入。得到的射频信号经过两级功率放大器放大，最高发射功率可达 15 dBm。

为进一步减小倍频器各次谐波对发射信号的影响，在 6 倍频器芯片后加入一款带通滤波器，提高输出本振信号的频谱纯度。课题组自研的太赫兹谐波混频器的射频频率范围为 110~170 GHz，本振频率范围为 55~85 GHz，变频损耗典型值为 14 dB，既可作为上变频器件将中频信号上变频到射频信号，也可作为下变频器件将射频信号下变频为中频信号使用。混频器采用 WIN pp10-10 工艺，当作为上变频混频器使用时，晶体管栅极为本振输入，漏极为中频输入和射频输出，源极接地；当作为下变频混频器使用时，晶体管栅极作为本振输入，漏极为射频输入和中频输出，源极接地。功率放大器芯片的工作频率范围为 110~150 GHz，增益典型值为 19 dB，饱和输出功率典型值为 15 dBm。通过次谐波混频器工作原理可知，151.5 GHz 本振信号和 8~10 GHz 中频信号混频后，会产生 141.5~143.5 GHz 和 159.5~161.5 GHz 两个边带信号，若不进行边带抑制，解调后将极大影响调制信号的信噪比。因此在两级功率放大器中间设计了腔体式带通滤波器，滤除上边带信号及不可避免的本振功率泄露，同时保留下边带信号 141.5~143.5 GHz。其滤波效果如图 3 所示，通带范围为 125~145 GHz，插入损耗低于 0.2 dB，对 151.5 GHz 本振信号抑制制度高达 27.74 dBc，对上边带信号抑制效果大于 38 dB，回波损耗优于 15 dB。

对于射频前端接收机，噪声系数直接影响接收机的接收效果，因此系统选用国产商用 D 波段低噪声放大器芯片，可以在 110~170 GHz 提供 18 dB 增益以及典型值为 3.5 dB 的噪声系数。之后通过与发射模块中相同的腔体式带通滤波器及下变频混频器，将 141.5~143.5 GHz 的射频信号下变频至 8~10 GHz，其中下变频混频器的本振链路与发射模块采用相同的倍频器芯片。考虑到接收到的功率较低，因此同样采用了中频功率放大芯片进行功率放大。经过中频放大的信号在接收中频板上进行第 2 次下变频：先通过带通滤波器滤除杂散信号，后经第二级混频器与 9 GHz 本振信号进行混频，得到 2 路 0~1 GHz 正交 I/Q 信号，通过低通滤波滤除高频杂散，并通过巴伦将其转为正交差分 4 路中频信号后，通过自动增益放大器输入到基带进行最终解调。

自动增益放大器选用的控制信号来自基带的电压反馈，可根据反馈电压值的不同提供 -3~18 dB 的增益调节范围，调节输入到基带的中频信号功率，配合基带实现最优接收功率输入，从而实现高灵敏度解调。

D 波段射频前端发射和接收模块如图 4 所示，其中中频和本振采用亚微型版 A (Sub Miniature version A, SMA) 连接，射频端为 WR6 波导口。

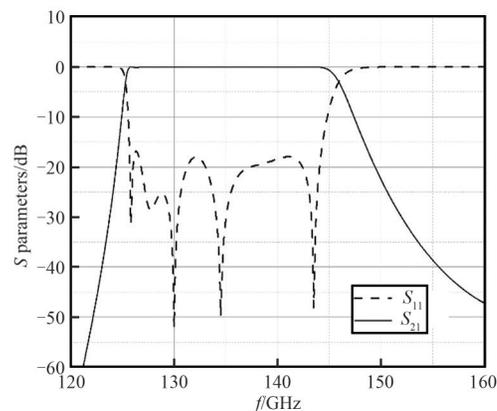


Fig.3 Simulation results of D-band band pass filter
图 3 D 波段带通滤波器仿真结果



(a) transmitter



(b) receiver

Fig.4 Photograph of D-band module
图 4 D 波段射频前端模块

射频前端模块的测试结果如图 5 所示。保持本振频率为 12.625 GHz 不变，扫描中频频率从 8 GHz 至 24 GHz，得到发射模块的测试结果：在 127.5~143.5 GHz 频率范围内，发射模块增益为 27~34 dB，典型值为 30 dB；饱和输出功率为 13~16.7 dBm，典型值为 15 dBm。测量接收模块时，同样保持本振频率为 12.625 GHz，扫描射频频率从 127.5 GHz 到 143.5 GHz，得到中频输出功率为 8~24 GHz，接收模块的增益为 39~44.4 dB，典型值为 42 dB。收发模块的测试结果与链路预算结果相吻合，均满足高线性度射频通信系统对射频前端的要求，为下一步的系统级测试提供参考。

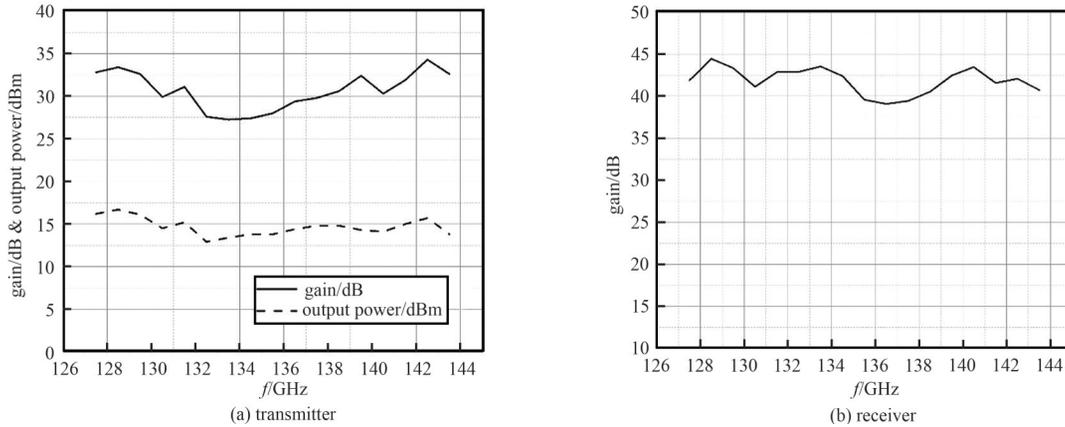


Fig.5 Measurement results of D-band module
图 5 D 波段射频前端模块测试结果

3 系统测试

完成模块设计及测试后，将中射频部分与基带进行系统级调试。其中，基带信号处理平台(图 6 所示)基于课题组自研的 2 GHz 带宽基带平台，具备全双工发送/接收数字基带信号处理能力，同时支持从二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)到 1 024QAM 的调制方式，可广泛用于基站回传、卫星网络、无人机、高空平台、深空探测以及音视频回传等领域。通信系统测试环境如图 7 所示，4 路基带正交差分信号通过 SMA 与发射中频板连接，基带调制信号在发射中频板上进行第 1 次上变频；上方的本振模块分别为 2 次变频提供 9 GHz 和 12.625 GHz 的本振信号；发射射频前端模块对发射中频板生成的 8~10 GHz 信号进行第 2 次上变频，并经过滤波及放大电路得到 141.5~143.5 GHz 的射频信号。系统接收端是发射端的下变频过程，射频信号经过 2 次下变频得到 1 GHz 带宽的中频信号后经接收端基带信号处理平台进行解调。室内通信系统测试实验中，在射频接收端和发射端均采用工作频率为 110~170 GHz 的 WR-6 标准增益喇叭天线，增益为 25 dBi，通过调整发射端中频功率进而调整发射功率，满足不同调制下的线性度要求。

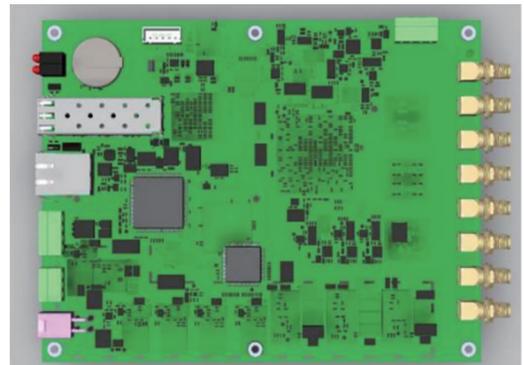


Fig.6 Baseband signal processing platform
图 6 基带信号处理平台

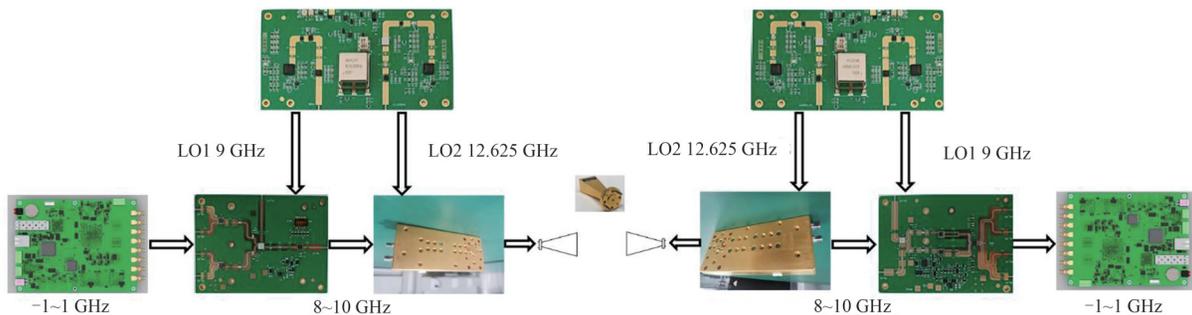


Fig.7 Test environment of the communication system
图 7 通信系统测试环境

通过上文可知，发射射频前端模块最高可输出 15 dBm 的输出功率，但此时放大器已工作在饱和状态，发射信号的信噪比严重恶化，无线传输速率降低。为使系统能够实现高阶调制(如 128QAM)，需让系统在高线性度条

件下工作。因此采用功率回退，将系统发射功率回退 10 dB 至 5 dBm，使放大器工作在远小于 1 dB 压缩点的电平上，功率放大器远离饱和区，从而改善功率放大器的输出三阶交调系数，使其工作在线性区，从而保证接收端信噪比，实现最高速率传输。

自由空间路径损耗为：

$$L_{\text{FPS}} = 20\lg d + 20\lg f + 20\lg \frac{4\pi}{c} - G_{\text{Tx}} - G_{\text{Rx}} \quad (1)$$

式中： L_{FPS} 为自由空间路径损耗(dB)； d 为传输距离(m)； f 为工作频率(Hz)； c 为真空中光速(m/s)； G_{Tx} 和 G_{Rx} 分别为发射和接收端天线增益(dBi)。由式(1)可知，当传输距离为 10 m 时， L_{FPS} 约为 45.4 dB，此时到接收射频前端的功率为 -40.4 dBm，可以满足接收端解调的信噪比。子系统分别在正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、8PSK、16QAM、32QAM、64QAM 以及 128QAM 等不同调制状态下接收端解调的星座图如图 8 所示。可以看到，系统最高可实现 128QAM 调制，其误差矢量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)为 2.8%，此时子系统空口传输速率可达到 11.2 Gbps，业务速率达到 9.4 Gbps，星座图的各个相位清晰可辨；同时室内测试结果显示，在收发均采用增益为 25 dBi 的喇叭天线的情况下，系统通信距离可达 10 m。

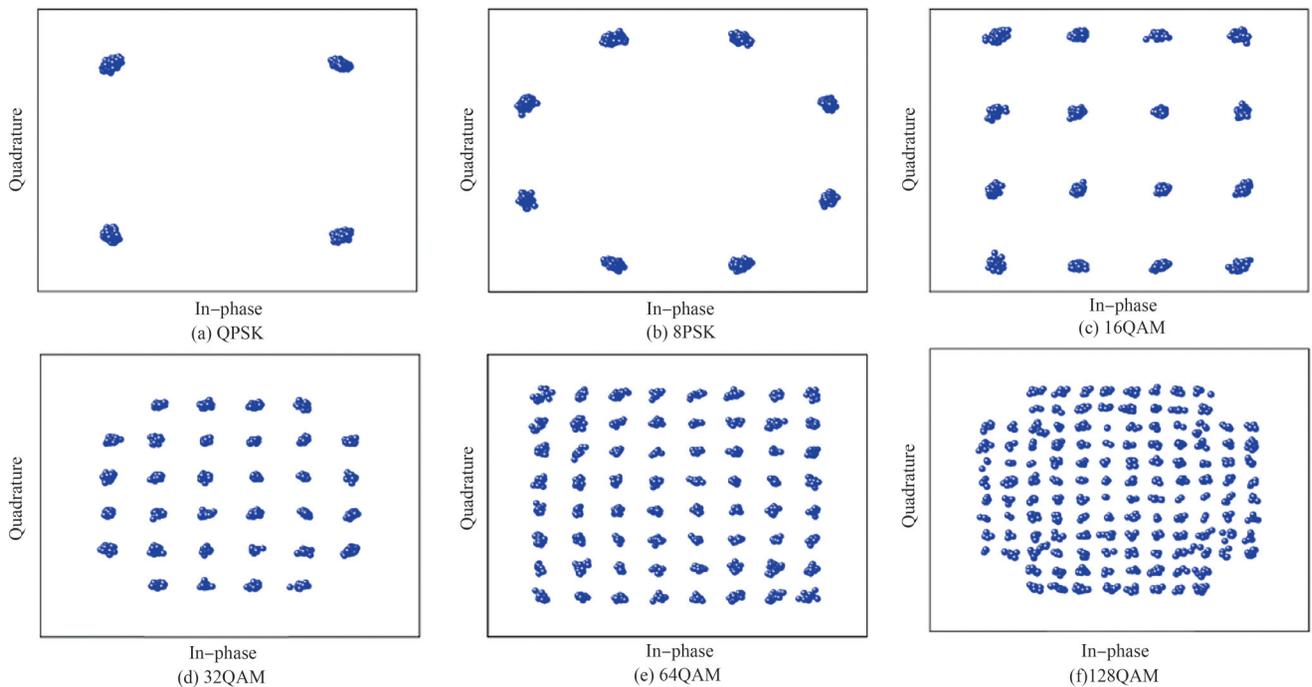


Fig.8 Constellation graphs of different modulations for communication system

图8 不同调制下通信系统星座图

对极限条件下的通信性能进行测试。采用 QPSK 调制方式和 128QAM 调制方式，最大发射功率分别为 11 dBm 和 8 dBm，此时对应的 EVM 分别为 27.5% 和 3.6%，传输速率分别为 2.6 Gbps 和 9.4 Gbps，对应的星座图如图 9 所示。

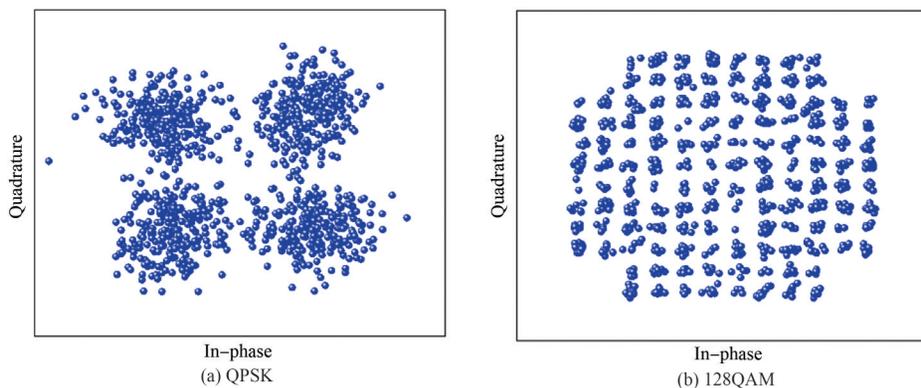


Fig.9 Constellation graphs of QPSK and 128QAM under maximum output power

图9 最大发射功率下 QPSK 和 128QAM 星座图

4 结论

通过 n 路中频频率合成的方式, 本文设计了一款工作频率在 D 波段的宽带通信系统, 工作带宽为 $(n \times 2)$ GHz, 实现超过 100 Gbps 的传输速率以及 128QAM 调制阶数。对其中一路中频进行 $1/n$ 缩比验证, 通过使用自研的太赫兹混频器芯片及商用基带平台, 基于超外差架构设计了中频、射频和本振等多个模块, 成功实现了室内 10 m 距离下最高 128QAM 调制、11.2 Gbps 的空口传输速率以及 9.4 Gbps 业务传输速率。

本系统采用全固态设计, 相较于真空管能够极大减小成本, 更适合规模化应用; 同时相比采用低阶调制实现短距离无线通信的同类文献, 本系统考虑了低成本的商业化基带芯片及信道带宽电信标准都在 2 GHz 以下的情况, 通过中频频率合成, 最大化利用太赫兹宽频带特性, 在太赫兹通信系统小型化、轻量化、商业化等方面具有更为广阔的应用前景。后续的工作将结合本文的实验结果, 对多路合成充分利用 D 波段带宽的方案进行详细验证以实现更远距离、更大带宽的高速无线通信。

参考文献:

- [1] MAIWALD T, LI T, HOTOPAN G R, et al. A review of integrated systems and components for 6G wireless communication in the D-band[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(3): 220–256. doi:10.1109/JPROC.2023.3240127.
- [2] DENG Wei, CHEN Zipeng, JIA Haikun, et al. A D-band joint radar-communication CMOS transceiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2023, 58(2): 411–427. doi:10.1109/JSSC.2022.3185160.
- [3] MAIWALD T, POTSCSKA J, KOLB K, et al. A broadband zero-if down-conversion mixer in 130 nm SiGe BiCMOS for beyond 5G communication systems in D-band[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs, 2021, 68(7): 2277–2281. doi:10.1109/TCSII.2021.3053344.
- [4] TEZERGIL B, ONUR E. Wireless backhaul in 5G and beyond: issues, challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2579–2632. doi:10.1109/COMST.2022.3203578.
- [5] JABER M, LOPEZ-MARTINEZ F J, IMRAN M A, et al. Wireless backhaul: performance modeling and impact on user association for 5G[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 3095–3110. doi:10.1109/TWC.2018.2806456.
- [6] SAHA C, DHILLON H S. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: performance analysis and design insights[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(12): 2669–2684. doi:10.1109/JSAC.2019.2947997.
- [7] SINGYA P K, MAKKI B, D'ERRICO A, et al. Hybrid FSO/THz-based backhaul network for mmWave terrestrial communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(7): 4342–4359. doi:10.1109/TWC.2022.3224331.
- [8] JABER M, IMRAN M A, TAFAZOLLI R, et al. 5G backhaul challenges and emerging research directions: a survey[J]. IEEE Access, 2016(4): 1743–1766. doi:10.1109/ACCESS.2016.2556011.
- [9] 陈智, 张雅鑫, 李少谦. 发展中国太赫兹高速通信技术与应用的思考[J]. 中兴通信技术, 2018, 24(3): 43–47. (CHEN Zhi, ZHANG Yaxin, LI Shaoqian. Thoughts on the development of terahertz high speed communication technology and its application in China[J]. ZTE Communications, 2018, 24(3): 43–47.) doi:10.3969/j.issn.1009-6868.2018.03.008.
- [10] ANDO I, TANIO M, ITO M, et al. Wireless D-band communication up to 60 Gbit/s with 64QAM using GaAs HEMT technology[C]// 2016 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Austin, TX, USA: IEEE, 2016: 193–195. doi:10.1109/RWS.2016.7444402.
- [11] HAMANI A, SILIGARIS A, BARRERA F, et al. A 84.48-Gb/s 64QAM CMOS D-band channel-bonding Tx front-end with integrated multi-LO frequency generation[J]. IEEE Solid-state Circuits Letters, 2020(3): 346–349. doi:10.1109/LSSC.2020.3019579.
- [12] STRÖMBECK F, YAN Y, ZIRATH H. A beyond 100-Gbps polymer microwave fiber communication link at D-band[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers, 2023, 70(7): 3017–3028. doi:10.1109/TCSI.2023.3262725.
- [13] 张教, 童伟东, 朱敏, 等. 太赫兹无线和有线融合通信技术的研究与展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(1): 22–29. (ZHANG Jiao, TONG Weidong, ZHU Min, et al. Research and prospect of terahertz wireless and wired fusion communication technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(1): 22–29.) doi: 10.11805/TKYDA2021430.
- [14] ZHOU Kang, WU Ke. Multi-channel SIW filtering crossover with flexibly specified frequencies and bandwidths[C]// 2020 IEEE USNC-CNC-URSI North American Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 117–118. doi:10.23919/USNC/URSI49741.2020.9321671.
- [15] KOOCHAKZADEH M, ABBASPOUR-TAMIJANI A. A multi-resolution channel-select filter with ultra-wide frequency coverage[C]// 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2008: 431–434. doi: 10.1109/MWSYM.2008.4633195.

作者简介：

李振北(1994-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹通信、毫米波功率放大器 .email:zhenbeili@whu.edu.cn.

鲁 斌(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信系统.

关欢欢(2001-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波电路封装、无线通信系统.

吴 静(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能网络、网络建模与仿真等.

张 健(1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波太赫兹集成电路、高速无线通信系统等.

于秋则(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 AI 图像目标感知技术、合成孔径雷达高精度制导信息处理研究等.

(上接第 1338 页)

- [4] ERMOLOV V,LAMMINEN A,SAARILAHTI J,et al. Wafer level integration of Sub-THz and THz systems[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2024,34(2):187-190. doi:10.1109/LMWT.2023.3341169.
- [5] 刘军,王靖思,宋瑞良,等. 基于共振隧穿二极管的太赫兹技术研究进展[J]. 无线电通信技术, 2024,50(1):58-66. (LIU Jun, WANG Jingsi, SONG Ruiliang, et al. Recent progress of terahertz technology based on resonant tunneling diode[J]. Radio Communications Technology, 2024,50(1):58-66.) doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2024.01.006.
- [6] 靳延平,杨勇,徐新龙. 基于纳米天线阵列非线性光学效应的太赫兹辐射特性研究[J]. 光学学报, 2022,42(15):6-11. (JIN Yanping, YANG Yong, XU Xinlong. Terahertz radiation characteristics based on nonlinear optical effect of nano-antenna array[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(15):6-11.) doi:10.3788/AOS202242.1506001.
- [7] 宋瑞良,汪春霆. 太赫兹倍频器研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(3):364-367. (SONG Ruiliang,WANG Chunting. Research development of CMOS terahertz doublers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(3):364-367.) doi:10.11805/TKYDA201903.0364.
- [8] PARK J H,YANG D Y,CHOI K J,et al. D-band $\times 8$ frequency multiplier using complementary differential frequency doubler[J]. IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, 2023,33(3):311-314. doi:10.1109/LMWC.2022.3216019.
- [9] KUCHARSKI M,EISSA M H,MALIGNAGGI A,et al. D-band frequency quadruplers in BiCMOS technology[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018,53(9):2465-2478. doi:10.1109/JSSC.2018.2843332.
- [10] CARPENTER S,HE Z S,ZIRATH H. Balanced active frequency multipliers in D and G bands using 250 nm InP DHBT technology[C]// 2017 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). Miami,FL,USA:IEEE, 2017:1-4. doi:10.1109/CSICS.2017.8240437.
- [11] ROMSTADT J,ZABEN A,PAPURCU H,et al. A SiGe D-band $\times 12$ frequency multiplier with Gilbert cell-based tripler[C]// 2022 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium(BCICTS). Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2022:195-198. doi:10.1109/BCICTS53451.2022.10051705.
- [12] DOU Jiangling,JIANG Shu,XU Jinping,et al. Design of D-band frequency doubler with compact power combiner[J]. Electronics Letters, 2017,53(7):478-480. doi:10.1049/el.2016.3788.

作者简介：

宋树田(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹通信、大数据 .email:37139566@qq.com.

刘 军(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹电路设计.