

太赫兹高速无线通信系统研究

南京大学 沈之宇，庄嘉鑫，刘方舟

(南京大学电子科学与工程学院 江苏省南京市 210023)

涂学凑 高级工程师 陈健 教授

摘要: 太赫兹通信是当下通信领域研究的热门，在多个领域都有巨大的应用前景。灵敏低温超导太赫兹探测器的技术日趋成熟，在此基础上实现的太赫兹通信系统架构主要分为直接调制型和二次变频（外差接收）型两种。直接调制型系统的调制方式以二进制数字振幅键控调制为主，二次变频型系统的第一级调制方式多样，最为典型的是正交调制和二进制数字频移键控调制。以上述三种架构为基础搭建起太赫兹高速无线通信系统具有较强的可实现性以及较高的稳定性，但同时也存在各自相应的问题。

Abstract: Terahertz communication is a popular research in the field of communication nowadays, and has great application prospects in several fields. The technology of sensitive low-temperature superconducting terahertz detectors is becoming more and more mature, and the architecture of terahertz communication systems realized on this basis is mainly divided into two types: direct modulation type and secondary frequency conversion (outlier reception) type. The modulation method of the direct modulation system is mainly binary digital amplitude keying modulation, while the first stage modulation method of the secondary frequency conversion system is various, the most typical ones are quadrature modulation and binary digital frequency shift keying modulation. Based on the above three architectures, the terahertz high-speed wireless communication system has strong implementability and high stability, but also has its own problems.

关键词: 太赫兹通信 二进制数字振幅键控调制 正交调制 二进制数字频移键控调制

引言

随着无线通信应用的快速发展，全球范围内对高速业务的需求迅速增长，而与此同时，目前可用的频谱资源又十分有限，开发新的频谱资源日益迫切。目前为止，太赫兹频段(0.1THz~10THz)的频谱资源尚未被全面开发，具有极大的应用潜力。^[1] 因此，发展太赫兹通信对于满足超高速无线通信需求十分重要。

太赫兹通信面临着传输速度提升困难、传输距离增加受限、系统实用化进程慢等问题，如何解决这些问题，成为发展太赫兹通信的国际难题。迫切需要在太赫兹通信芯片、核心器件、信号处理方法和通信系统等方面实现关键技术的创新和突破。

国家级大学生创新创业训练计划支持项目（202110284033Z）

作者简介: 沈之宇（2000-），男，江苏苏州，微电子科学与工程，2019级；庄嘉鑫（2000-），男，福建泉州，通信工程，2019级；刘方舟（2001-），女，江苏常州，集成电路设计与集成系统，2019级

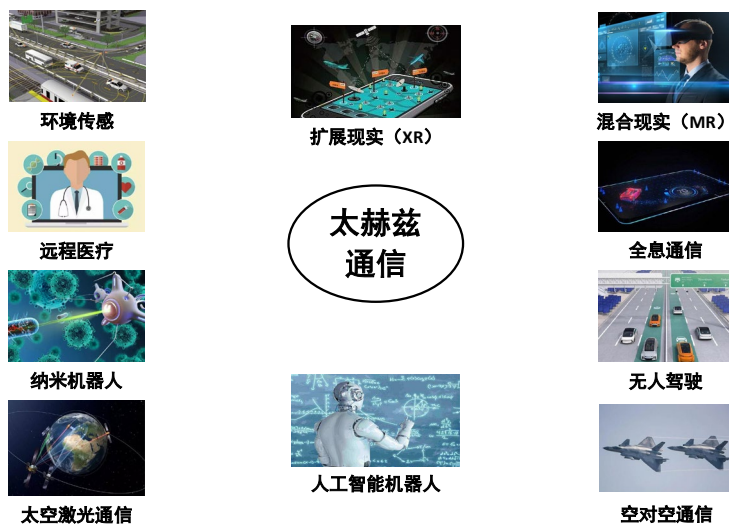


图 1 太赫兹无线通信应用场景

本文着眼于太赫兹信号的解调接收，采用多种不同的调制解调方式，在灵敏低温超导太赫兹探测器的技术基础上，对太赫兹无线通讯实验平台的搭建展开研究，以 220GHz 太赫兹信号为载波实现中短距离信号传输，进一步掌握太赫兹无线通讯的高灵敏收发技术，实现太赫兹通信从模块到系统的自主可控。

一、基于 OOK 调制方式的系统架构

数字信号的调制方式种类繁多，最基本的数字调制方式包括 ASK、FSK、PSK 等。其中，ASK 调制（二进制振幅键控调制）因为其调制和解调电路结构简单而受到广泛使用。OOK 调制则是 ASK 调制方式中最为简单的一种，其载波的幅度只有两种变化状态，分别对应二进制信息“0”或“1”^[2]，电路结构最为简单，易于实现。

（一）系统框架设计

基于 OOK 调制方式的太赫兹无线通信系统如图 2 所示。该系统主要分为信号发射端和信号接收端两个部分。

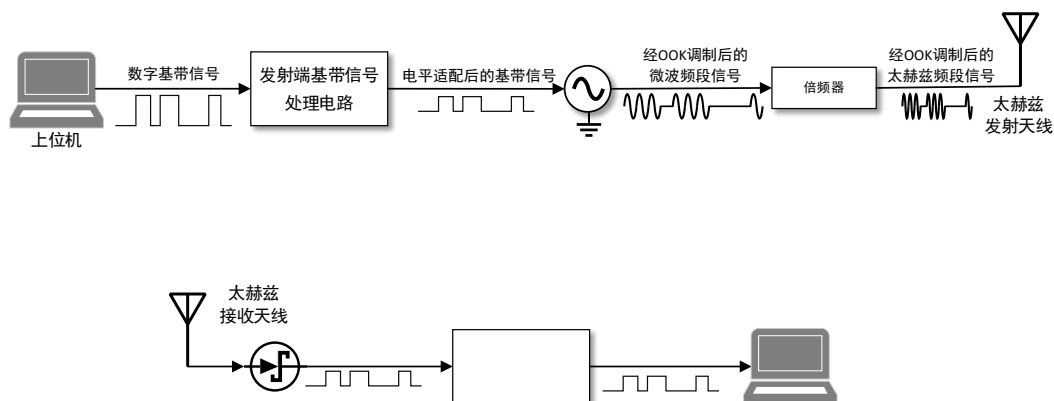


图 2 基于 OOK 调制方式的太赫兹无线通信系统框图

信号发射端由上位机、发射端基带信号处理电路、微波信号发生器、倍频器和太赫兹发射天线组成。信号接收端包括太赫兹接收天线、接收端基带信号处理电路、下位机等三个主要部分。

（二） 系统工作原理

由于采用了 OOK 调制方式，该系统工作原理较为简单，即发射端对数字基带信号直接进行二进制振幅键控调制，接收端对已调信号进行包络检波，恢复基带信号。

1. 信号发射端工作原理

在信号发射端，首先利用 MATLAB 软件将需要传输的信息编成二进制码流基带信号，其高电平表示数字信号 1，低电平表示数字信号 0，通过电脑的 USB 接口串行输出。上位机程序结构如图 3 发送端框图所示。

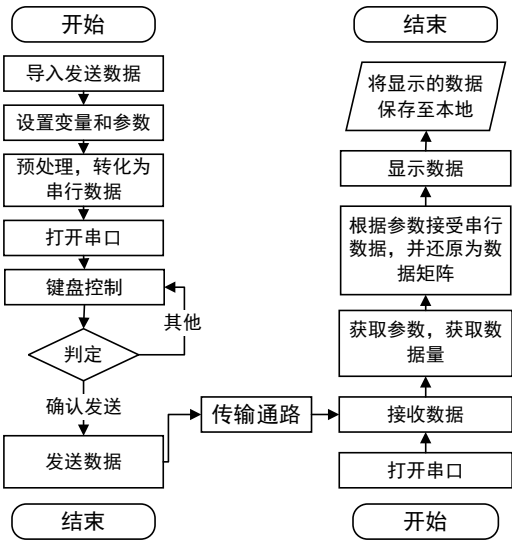


图 3 发射端/接收端图片信息处理程序框图

上位机 USB 接口的串行基带信号输出至发射端基带信号处理电路。该电路结构如图 4 所示，主要由 USB-串口转换电路和电平转换电路组成，其主要功能是将上位机输出的差分 TTL 电平转化为幅值小于 1V 的单端信号，且匹配输出阻抗为 50Ω 。

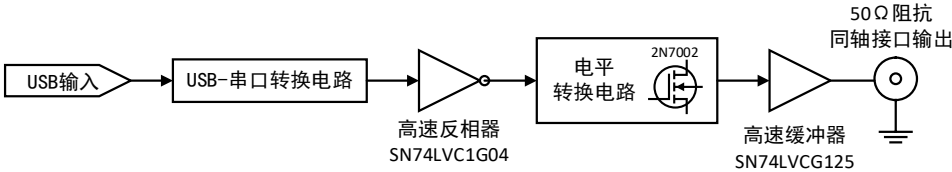


图 4 发射端基带信号处理电路结构框图

处理后的基带信号输出至微波信号发生器外部信号调制接口。由微波信号发生器生成载波信号，由于实验采用微波信号倍频的方式产生太赫兹信号，因此微波信号发生器设置为倍频输出模式，输出频率设置为 220GHz，倍频数设置为 18 倍，与外接倍频器参数一致。微波信号发生器输出的微波信号与接入的经过处理的基带信号进行 OOK 调制，调制后的信号从信号源输出至倍频器，经过 18 倍频后输出至太赫兹发射天线。太赫兹发射天线内置的功率放大器将调制后的太赫兹波进行放大，随后将信号发射。

上述经 OOK 调制方式调制后的太赫兹波，其特征为频率在太赫兹频段的正弦信号与零电平交替出现，正弦信号承载数字信号 1，零电平承载数字信号 0，其时域表达式大致为^[2]：

$$e_{OOK}(t) = \begin{cases} A \cos \omega_c t, & \text{以概率 } P \text{ 发送 "1"} \\ 0, & \text{以概率 } 1 - P \text{ 发送 "0"} \end{cases}$$

2. 信号接收端工作原理

信号接收端的电路结构同样较为简单，太赫兹接收天线从空气中接收来自发射端的调制后的太赫兹信号，利用太赫兹包络检波器，通过包络检波直接解调出正电压表示数字信号 0、负电压表示数字信号 1 的低幅值基带信号输出至接收端基带信号处理电路，其电路结构如图 5 所示。

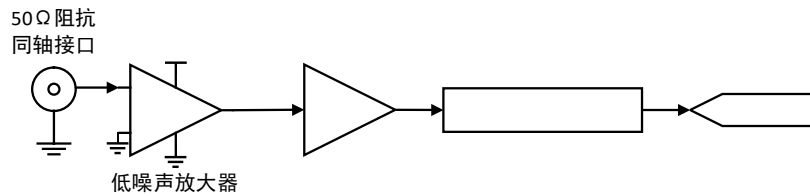


图 5 接收端基带信号处理电路结构框图

接收端基带信号处理电路将解调出的低幅值基带信号转换为差分 TTL 电平串行信号由 USB 接口输出至下位机。在下位机上，同样利用 MATLAB 软件将二进制码流基带信号恢复成发送端所发送的信息。上位机程序结构如图 3 接收端框图所示。

（三）采用 OOK 调制方式的系统的优缺点

首先，系统采用 OOK 调制与包络检波的方式对基带信号进行调制和解调，利用低温超导太赫兹器件的优势极大地简化了调制与解调部分的电路复杂度，进一步减小了发射前端和模拟前端电路设计的难度。

其次，采用全电子学方式，整个系统不需要激光器驱动，电路组成也比较简单，便于后期对该系统的优化与改进，进行更高速率、更特殊的信号的传输实验。

但是，由于 OOK 调制为一种直接调制方式，基带信号直接接入模拟电路系统中进行处理，模拟系统的带宽有限，而基带信号带宽在理论上为无限大^[3]，因此将基带信号直接输入系统必然会导致信息的丢失。对于这一问题较好的解决方式是在基带信号输入模拟系统之前对其进行编码，使其码元分布均匀，缩小其频带宽度，比如使用 Xilinx 公司的 Vivado 软件提供的卷积编码器 IP 核对 FPGA 进行编程^[4]，使其采用 CRC 编码等方式对基带信号进行编码。

二、基于二次变频收发方式的系统架构

针对 OOK 调制等直接调制方式基带信号与模拟系统带宽不匹配的问题，可以考虑采用二次变频的收发方式来降低误码率^[5]。对于本实验的系统，一种合理的系统架构为首先对数字基带信号进行数字调制，即第一次上变频，此时数字信号转化为模拟信号，随后对该模拟信号进行 AM 调制，即第二次上变频，最后通过天线发送信号。接收端接收到信号后首先对其进行包络检波，可视为第一次下变频，检出的模拟信号再经过数字解调得到数字基带信号，即第二次下变频。

（一）采用 I/Q 正交调制和 AM 调制解调的二次变频收发系统

由于第一次变频时数字调制的方式较多，故可以采用多种不同的架构来搭建系统。其中最为广泛使用的是 I/Q 正交数字调制方式为基础的架构^[6]，众多致力于射频解决方案的半导体公司如美国的 ADI 公司（Analog Device, Inc）、Quara 公司等都对该方案有着较高的评价。

基于 I/Q 正交调制和 AM 调制解调的二次变频收发系统架构如图 6 所示。

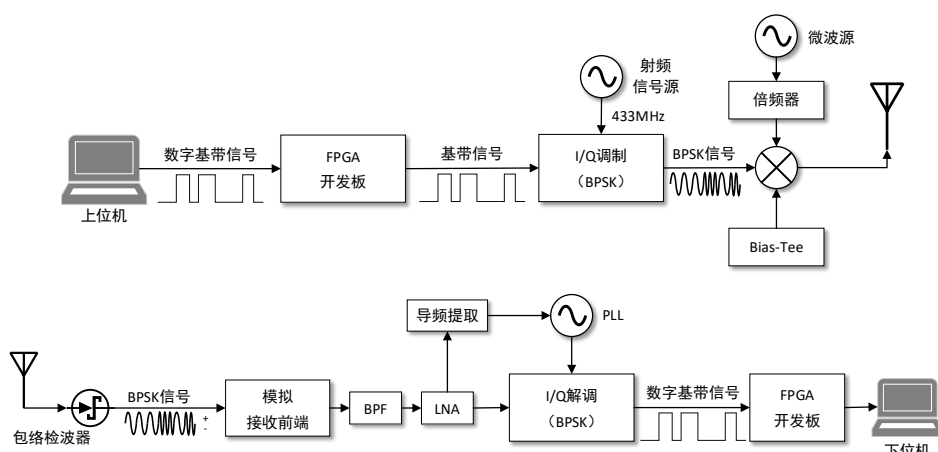


图 6 基于 I/Q 正交调制和 AM 调制的二次变频太赫兹无线通信系统框图

在信号发射端，同样地，利用 MATLAB 软件将需要传输的信息编成二进制码流基带信号，通过电脑的 USB 接口串行输出。上位机程序结构同样如图 3 发送端框图所示。随后信号送入 FPGA 进行转存，该转存的作用是方便后续增加基带信号编码环节。

处理后的基带信号送入 I/Q 调制模块。本实验采用 433MHz 射频信号作为正交调制的载波，载波由射频信号源产生。I/Q 调制模块输出信号带宽被限制在 433MHz 附近，且调制电路输出阻抗为 50Ω ，因此可以直接接入太赫兹混频器进行 AM 调制，第二次变频的本征太赫兹信号同样由微波信号倍频得到。

信号接收端太赫兹接收天线从空气中接收来自发射端的调制后的太赫兹信号，利用太赫兹包络检波器，通过包络检波直接解调出正电压表示数字信号 0、负电压表示数字信号 1 的低幅值基带信号输出至模拟接收前端，该模拟前端主要功能为对信号进行滤波和放大，提高后续 I/Q 解调准确率。随后信号输入 I/Q 解调模块解调得到数字基带信号送入 FPGA 开发板，最后通过串口-USB 转换传输至下位机。在下位机上，同样利用 MATLAB 软件将二进制码流基带信号恢复成发送端所发送的信息。上位机程序结构如图 3 接收端框图所示。

值得一提的是，在进行 I/Q 解调时，本征信号并非直接由信号源产生，为了保持载波同步，需要对信号进行导频提取，这会给系统的搭建增加不少困难。

（二）采用 2FSK 调制和 AM 调制解调的二次变频收发系统

为了简化调制和解调系统的复杂度，可以考虑将 I/Q 正交调制替换为 2FSK 调制，这样在解调时可以直接采用现有的解调芯片，而不需要再进行复杂的导频提取。该方案的系统构架如图 7 所示

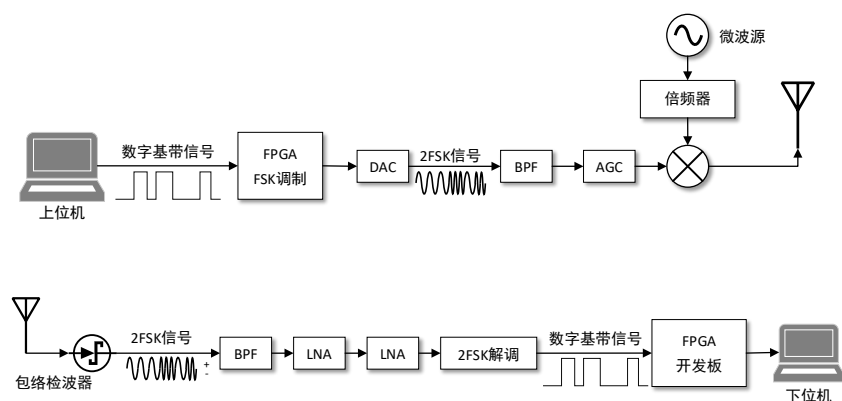


图 7 基于 2FSK 调制和 AM 调制的二次变频太赫兹无线通信系统框图

系统整体架构与以 I/Q 正交解调为基础的系统架构类似，不同之处仅有两点：

- (1) 该系统的第一次变频，即 FSK 调制由 FPGA 完成，随后再通过 DAC 输出至模拟系统中。
- (2) 在解调时，采用一块芯片直接进行 FSK 解调的方式，不再进行导频提取和下混频。

(三) 基于二次变频的收发系统优劣性讨论

相较于直接调制的方案，二次变频能够基带信号与模拟系统带宽不匹配的问题，提高通信有效性，但同时也会增加系统复杂度。

同时，不同的数字调制方式对二次变频为基础的收发系统的搭建带来不同的影响。本文所讨论的两种系统架构优劣势明显：

以 I/Q 正交调制解调为第一级变频的系统具有更广泛的应用，一方面，该方案各结构均有成熟的模块化产品可供选择，系统稳定性相对高，另一方面，该方案占用带宽较窄，符合现代通信系统发展趋势。

而以 2FSK 调制为第一级变频的系统虽然不具备上述优势，但其系统结构简单，可实现性高，更适合实验室作为验证方案来检验太赫兹器件的性能。

三、 实验测试与数据

(一) 实验相关太赫兹器件

在陈述实验具体细节前，首先简要介绍本实验所选用的太赫兹器件，本文所述的所有通信系统都是在这些器件的基础上搭建完成。

1. 太赫兹包络检波器

本实验选用美国 VDI（Virginia Diode, Inc）公司的 ZBD（Zero Bias Detector）作为接收端太赫兹包络检波器，其实物如图 8(a) 所示。

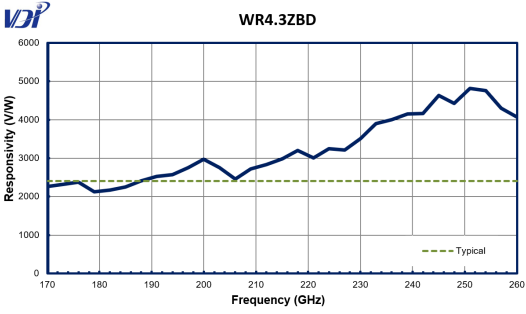


(a) 检波器实物图

WR4.3ZBD/WR4.3ZBD-F Specifications		
Part Number	WR4.3ZBD	WR4.3ZBD-F
RF Frequency (GHz)	170-260	
RF Input Flange	WR-4.3 (UG-387/U-M)	
Typical Responsivity (V/W)	2400	1900
Typical NEP (pW/√Hz)	11	1.3
Maximum Available Response Rate (GHz)	~36	

Notes:
1. Typical Responsivity assumes the ZBD is operated in the linear region, before saturation. Responsivity may be reduced toward band edges.
2. Maximum Available Response Rate applies to the bare ZBD housing. Additional components such as ESD protection, bias tees, and amplifiers may further limit the response rate.
3. See ZBD Product Manual for more information.

(b) 检波器参数



(c) 检波器频响曲线

图 8 实验所用太赫兹包络检波器相关信息

由图 8(b) 和图 8(c) 可知，该检波器最佳工作频率范围为 170GHz~260GHz，实验所选取的 220GHz 频率恰好在它的工作范围中心附近，较为理想。

2. 太赫兹上变频混频器

实验所搭建二次变频通信系统发射端第二级混频采用指导教师课题组与其他课题组共同研发的太赫兹二次谐波混频器，其实物如图 9 所示。



图 9 实验所用太赫兹二次谐波混频器实物图

二次谐波混频器早在 20 世纪 70 年代就已出现。由于制造工艺的限制，报道的混频器大多数工作在 300GHz 以下^[7]。本研究所采用的二次谐波混频器采用基于反向并联肖特基二极管对的结构。肖特基二极管具有噪声小，频带宽，工作稳定，结构简单，截止频率高的特点。反向并联二极管对通过抑制部分混频产物以减小变频损耗，通过减小本振噪声通带以降低噪声系数，并具有抗反向峰值电压能力的固有特性^[8]。该混频器的工作频率范围中心同样在 220GHz 附近，与本研究相契合。

3. 太赫兹信号源

实验中的太赫兹信号由微波信号源、信号源太赫兹扩展模块以及太赫兹倍频器组合产生。选用美国是德科技（Keysight Technology）公司的微波信号源与 VDI 公司的太赫兹扩展模块和太赫兹倍频器。

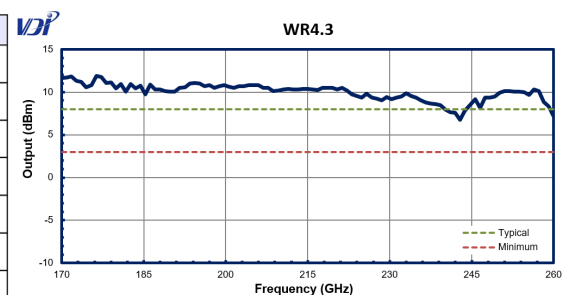
信号源扩展模块 SGX (Signal Generator Extensions) 实物图及相关数据如图 10 所示。扩展模块起到对信号第一级倍频的作用，倍频范围为 6~18，本研究所选用的倍频数为 9。



(a) 信号源与扩展模块实物图

WR4.3SGX-M Specifications	
RF Frequency Band (GHz)	170-260
RF Output Flange (UG-387/U-M)	WR-4.3
Output Power (Typical/Minimum, dBm)	8 / 3
Multiplication Factors (Low/High)	18 / 6
Low Frequency RF Input (GHz)	9.44-14.44
High Frequency RF Input (GHz)	28.33-43.33
Typical Dimensions (LxWxH, in)	5x3.5x1.5

(b) 扩展模块参数



(c) 扩展模块频响曲线

图 10 实验所用信号源及其太赫兹扩展模块相关信息

太赫兹倍频器 (Frequency Multipliers) 实物图及相关数据如图 11 所示。该倍频器的倍频数为 2，与前一级信号源扩展模块的 9 倍频相结合可以起到对信号源信号 18 倍频的作用，此时信号源只需输出 20GHz 不到的信号即可最终获得 220GHz 太赫兹载波信号，完全符合本研究实验条件。

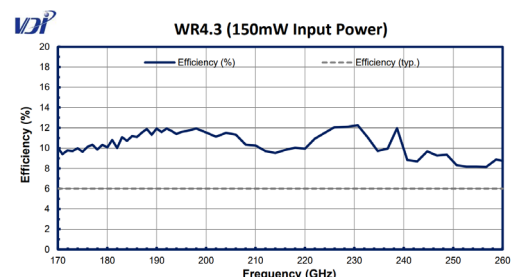


(a) 倍频器实物图

WR4.3X2 Specifications	
RF Output Frequency (GHz)	170-260
Output Flange	WR-4.3 UG-387/U-M
Input Flange	WR-8.6 UG-387/U-M
RF Input Power (mW)	30-150
Typical Efficiency (%)*	6

*Efficiency assumes appropriate RF input power is applied to frequency doubler

(b) 倍频器参数



(c) 倍频器频响曲线

图 11 实验所用太赫兹倍频器相关信息

（二） 基于 OOK 调制的收发系统实验测试

1. 系统基本测试参数

在实际实验中，我们以 OOK 调制方式为基础，搭建起了一套完整的太赫兹信号传输系统，完成了上位机与下位机之间的一段随机数据的传输。太赫兹发射天线和太赫兹接收天线间距离约为 0.5m，即通信距离为 0.5m。下面给出通信速率计算方法：

对待发送数据的编码基于串口通信协议，即 10bit 二进制串行码流表示 1byte 数据。采用 115200 的串口通信波特率，即系统每秒钟传输 115200bit 的二进制码，换算为字节数即为

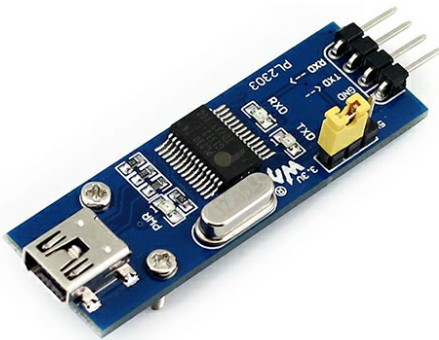
$$115200\text{bit}/[10\left(\text{bit}/\text{byte}\right)]=11520\text{byte}$$

因此可以算得该通信系统的通信速率为：

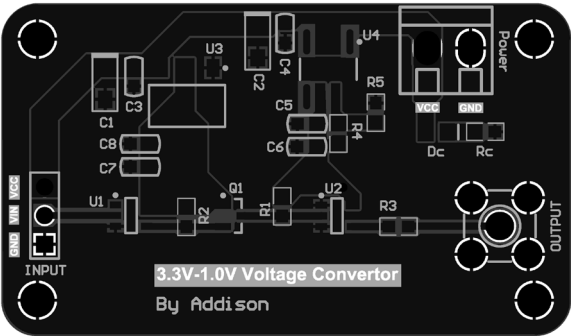
$$11520\text{byte}/1\text{s}=11.52\text{KB/s}。$$

2. 系统部分关键电路设计

系统发射端和接收端基带信号均为项目小组自主研发设计，发射端基带信号处理电路各部分如图 12 所示。接收端基带信号处理电路核心部分——TLV3501 高速比较器原理图如图 13 所示。



(a) USB-串口转换电路实物图



(b) 高速反相器及电平转换电路 PCB 板图

图 12 发射端基带信号处理电路各部分展示

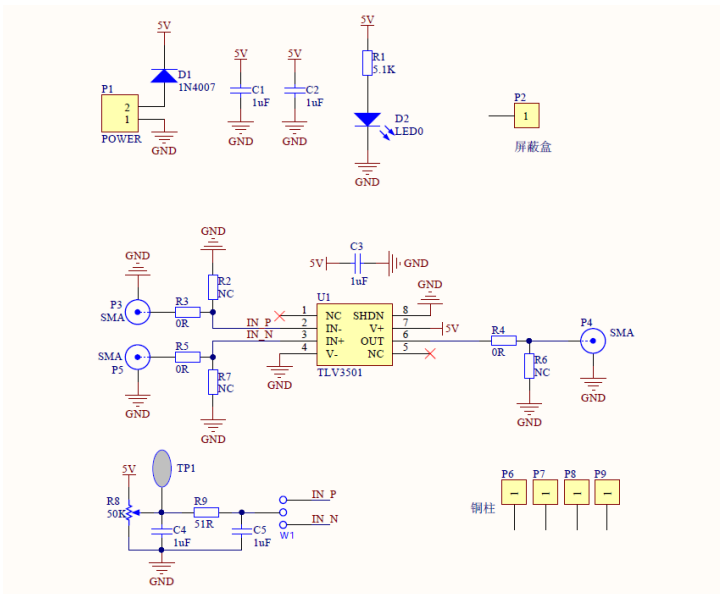


图 13 TLV3051 高速比较器原理图

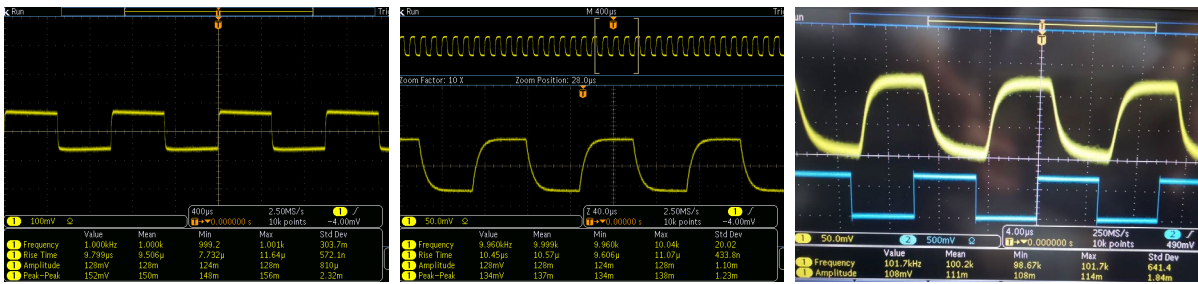
3. 系统测试结果

系统整体测试实物图如图 14 所示。



图 14 系统整体测试实物图

首先在发射端输入方波信号进行测试，测试结果如图 15 所示。由此可见在输入数字基带信号频率达 100kHz 时，接收端仍然能够以较小的失真恢复出发送的信号。



(a) 方波信号频率为 1kHz (b) 方波信号频率为 10kHz (c) 方波信号频率为 100kHz

图 15 输入端接入方波信号时的输出测试结果

随后将方波信号发生器替换为上位机，设置传输波特率为 9600，在接收端接收到的信号如图 16 所示。可以看到，输出端的信号清晰可辨且频率与输入端波特率相符，但由于输入未经编码，故输出误码率太高，不能在下位机较好地恢复出原有信息。

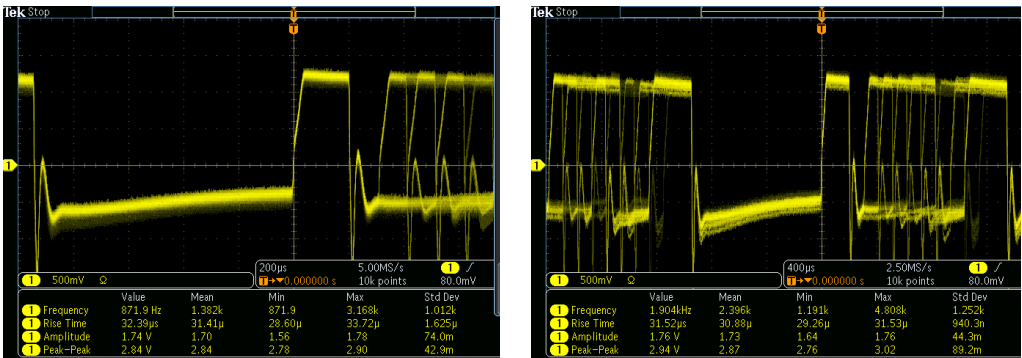
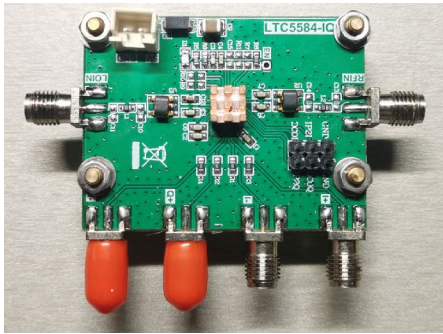


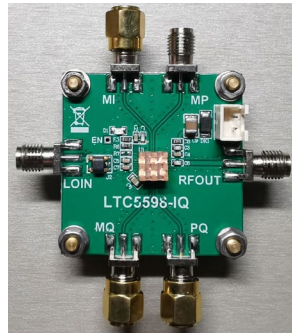
图 16 输入端接入上位机时的输出测试结果

（三） 基于 I/Q 调制和 AM 调制的二次变频收发系统搭建

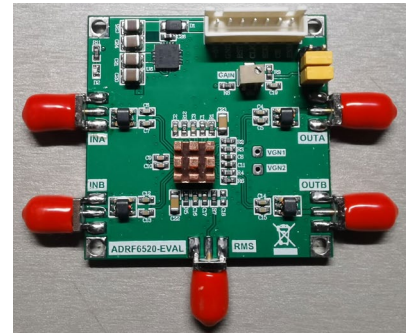
在直接调制系统的基础上，我们尝试搭建了基于 I/Q 调制和 AM 调制的二次变频收发系统，由于系统尚未搭建成功，故只在此展示系统关键模块。如图 17 所示，在该系统中，我们使用了美国 ADI 公司的射频集成芯片实现 I/Q 调制解调和模拟前端滤波放大，分别选用了 LTC5844、TC5598 和 ADRF5620 这三款芯片并为他们设计了外围电路、绘制了 PCB 板图。



(a) LTC5844 I/Q 调制模块



(b) LTC5598 I/Q 调制模块



(c) ADRF5620 射频模拟前端模块

图 17 基于 I/Q 调制和 AM 调制的二次变频收发系统关键模块

四、 总结

本文在灵敏低温超导太赫兹探测器的技术基础上，搭建起了以 220GHz 太赫兹信号为载波的中短距离信号传输系统。其中，以 OOK 调制技术为基础的太赫兹通信系统实现了最基本的信号传输功能，但由于信道带宽等问题未能真正实现完整的通信功能。而以 I/Q 调制和 AM 调制为基础的二次变频系统则有望解决上述问题，尽管该系统尚未完全实现，但本研究对其的深度探究足以证明该方案的可行性。

在后续的研究中，本文作者将继续致力于对基于二次变频技术的太赫兹高速无线通信系统的研究，尝试初步以 2FSK 调制为第一级变频方案实现图片信号传输，在此基础上在将第一级变频方案更改为 I/Q 正交调制，提高通信速率与系统稳定性，实现视频信号的传输，最终展现太赫兹波段在通信领域的巨大应用潜力。

参考文献

- [1] 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, et al. 太赫兹通信技术的研究与展望 [J]. 中国激光, 2009, 36(09): 2213-33.
- [2] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 (第 6 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [3] ZIEMER R E. 通信原理: 调制、编码与噪声: systems, modulation, and noise. 经典译丛 [M]. 电子工业出版社, 2018.
- [4] 蒋美菊. 基于 OOK 调制的太赫兹通信系统基带研究 [D]; 电子科技大学, 2018.
- [5] 廉宇轩, 冯伟, 丁青峰, et al. 基于 AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹探测器的 340 GHz 无线通信接收前端 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(05): 134-41.
- [6] ANALOG DEVICE I. RF, Microwave and Millimeter Wave Products Selection Guide 2021 [M/OL]. 2021[
- [7] 胡海帆, 马旭明, 马喆, et al. 220 GHz 二次谐波混频器集成模块 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 322-8.
- [8] 钱志宇, 梅亮, 钱骏. 330 GHz 高性能二次谐波混频器设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(01): 24-8.