

利用太赫兹通信实现未压缩的高清和 4K 视频传输

邱钟维

太赫兹(terahertz, THz)波是位于毫米波和远红外光波之间的电磁波,太赫兹波处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,它是人类最后一个尚未完全认知利用的频段。在后 5G 时代和 6G 时代,太赫兹将会成为主要的通信频段^[1]。太赫兹通信与传统的无线通信技术相比具有数据传输速率高、穿透性好、安全性高等方面的优势,日本、德国以及美国对太赫兹通信相关技术的研究已经取得了一定研究成果。日本 NTT 公司实现了在 300GHz 波段进行高达 24 Gbps 数据传输速率,其速率是最新的 USB 线连接技术的 5 倍还要高^[2]。

1. 背景

目前,互联网应用数据流量呈指数级增长,预计到 2021 年将达到每月 278 艾字节以上。同样,商业市场中不断增长的无线通信数据速率预计在未来 10 年内将达到 100Gbps。为了满足带宽需求,使用更高的载波频率是一种可行解决方案。目前,采用毫米波进行通信是高速无线应用的直接解决方案,但是毫米波可提供的数据传输速率仍比预期需求低两个数量级。太赫兹波极大的连续频谱带宽有助于满足超高速传输速率的需求^[3],因此太赫兹被认为是后 5G 时代和 6G 时代的前沿通信技术。美国在 5G 领域未能取得先机,因此美国联邦通讯委员会决定,将开放“太赫兹波”频谱供实验使用,让工程师着手下一代无线网络的研发工作。近期 6G 无线峰会将于芬兰举行,该会议将讨论 6G 时代太赫兹标准以及太赫兹未来的应用场景。目前太赫兹频段还没有一个明确的定义范围,近日美国开放的太赫兹频段为 95GHz 到 3THz,国际电信联盟和亚太电信组织将太赫兹的起始频段定义在 100GHz,而部分研究机构将太赫兹的起始频段定义为 300GHz。不管对太赫兹波起始频段的定义如何,可以预见的是太赫兹通信的频率将会比现

有通信系统的频率高的多。

无压缩高清视频的无线传输在教育、娱乐、远程医疗、安防和视频会议等应用中具有重要意义，太赫兹通信的应用将会极大推动无压缩高清视频的发展。据报道，到 2020 年高清视频技术的市场价值将达到 1021 亿美元。高清视频的无线流媒体技术已经应用于生物力学分析、无人机、无人地面车辆和远程医疗。在生物力学应用场景中，通过将未压缩的视频内容无线传输到远程工作站，可以实时执行运动分析，例如对运动员的实况运动分析。在远程医疗应用场景中，从远程位置（例如救护车）向医院传输高清视频，可以提前对病人进行病理诊断。在无人机/无人车应用场景中，无人机/无人车可以实时将周围的环境信息传给远程驾驶员，使得驾驶能够更加的安全平稳。此外，高清视频的无线传输在安防、视频广播和监控方面也有巨大的作用。日本广播公司将在 2020 年举办的奥运会中采用太赫兹设备对 8K 视频进行传输。综上所述，高清视频的传输可以为学术界和工业中的各种重要应用提供有力的支持，采用太赫兹通信能够为高清视频的无线传输提供有力保障。

2. 太赫兹超高清视频传输系统原理

目前国内外都有利用太赫兹通信传输无压缩视频的实验，目前生成太赫兹波的方式主要有两种：基于电子器件采用倍频器生成和基于光学器件利用频率差生成。Kathirvel Nallappan 等人在 2017 年基于光学器件搭建了太赫兹无线通信系统用于无压缩视频的传输实验，通信系统的原理图如图 1 所示，实物图如图 2 所示，其产生原理是将注入的两个激光束中的一个利用强度调制器进行加强，将加强的激光束用掺铒光纤放大器（EDFA）进行放大；然后使用一个 3dB 耦合器（Coupler）将两个激光进行耦合，耦合完成后注入光混合器以产生太赫兹波。接收器采用零偏置肖特基二极管（ZBD）用于检测并直接解调输入的太赫兹信号。使用偏置器（Bias-Tee）对解调的基带信号中存在的直流信号（DC）进行滤波，并使用低噪声放大器（LNA）进行放大，以进行进一步的信号处理。每个模块具体的功能如下：

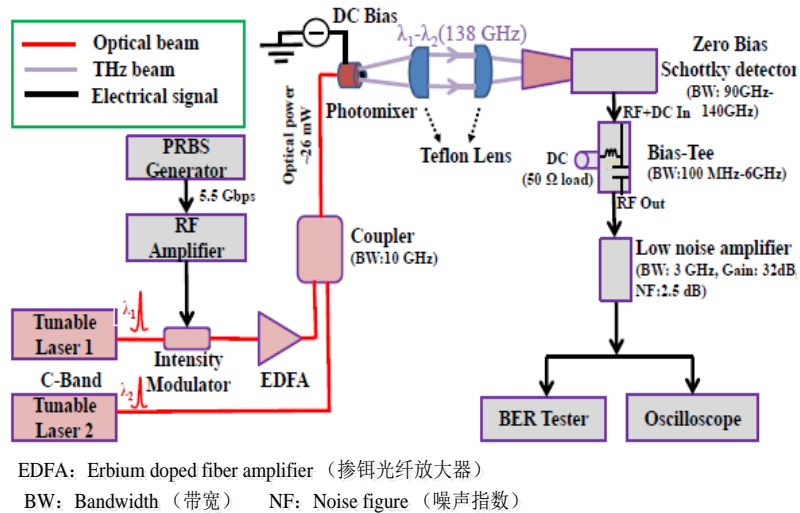


图 1 太赫兹通信系统原理图

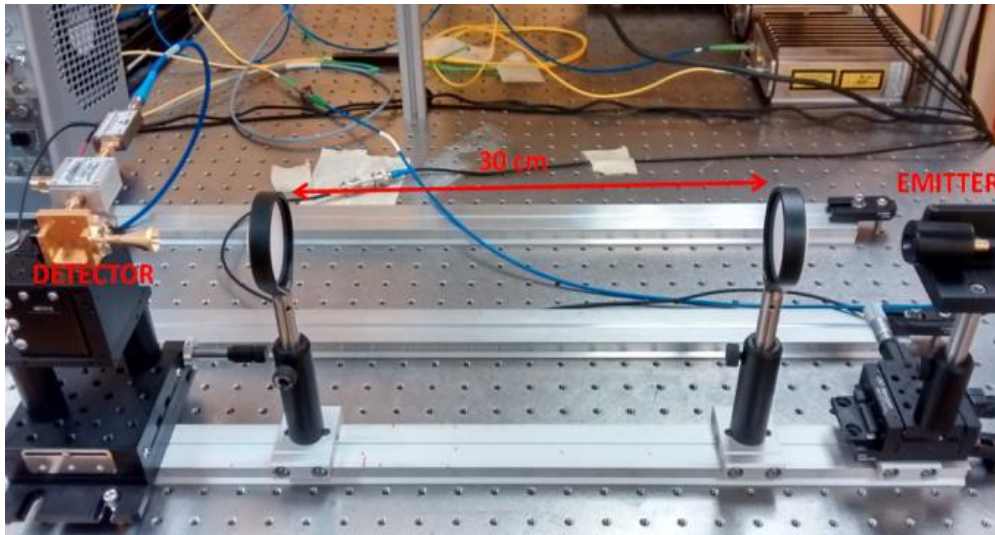


图 2 太赫兹通信系统实物图

(1) 激光源

让两个可调谐分布式反馈 (DFB) 激光二极管工作在 C 波段，使其驱动太赫兹发射器。每个二极管的输出功率约为 30mW。两个二极管都安装在一个紧凑的激光头中，输出光束通过偏振保持 (PM) 单模光纤传输；激光器的波长被校准，使输出激光束保持在太赫兹频率，使用现场可编程门阵列 (FPGA) 的控制模块进行对激光源进行控制。

(2) 数据调制器

一个激光器使用外部电光 Mach-Zehnder 调制器进行强度调制，调制方

式采用幅移键控调制 (ASK)。调制的方法是将传输到 Mach-Zehnder 调制器的输入信号一分为二, 将其中一个射频信号通过基板改变其折射率, 然后将两个输出信号产生相消干涉从而完成信号的调制。调制器的工作偏置点由调制器驱动单元 (Thorlabs-MX10A) 控制, 该单元也用作射频信号放大器和光衰减器。调制器被锁定到具有正斜率的正交偏置点, 调制器监视连续抖动的幅度以检测和校正偏置电压中的任何漂移。抖动的频率和幅度分别设定为 3KHz 和 600mVpp。太赫兹通信系统的系统特征在于发送不归零 (NRZ) 伪随机二进制序列数据, 该数据由集成在测试设备 (Anritsu-MP2100B) 中的脉冲模式发生器 (PPG) 单元产生。通过电光调制器后的射频信号输出功率约为 200 μ W, 使用可变光衰减器固定为 110 μ W 的常数, 以避免实验过程中出现任何功率波动, 使用 EDFA 放大器 (Calmar laser-AMP-PM-18) 将信号进一步放大至 13mW。

(3) 太赫兹波发射器

将调制后的激光束输出至光电混合器以生成太赫兹波。光混合器具有硅透镜 (厚度为 6.05 mm \pm 0.1mm, 直径为 10.0 \pm 0.1 mm), 可对输出的太赫兹光束进行预先校准。光混合器的增益由天线和硅透镜的结构共同完成, 在载波频率分别为 100GHz 和 140GHz 时, 增益分别为 17dBi 和 19dBi。太赫控制模块还起直流电压源的作用, 以电动方式驱动光电混合器。光混合器输出太赫兹波的功率如图 3 所示, 数据测试时使用校准的 Golay 单元 (一种太赫兹光源探测器) 测量, 从测试数据可以看出, 太赫兹波源的输出功率分布并不均匀, 并且当波源频率在 200GHz 以下时, 输出功率较高。

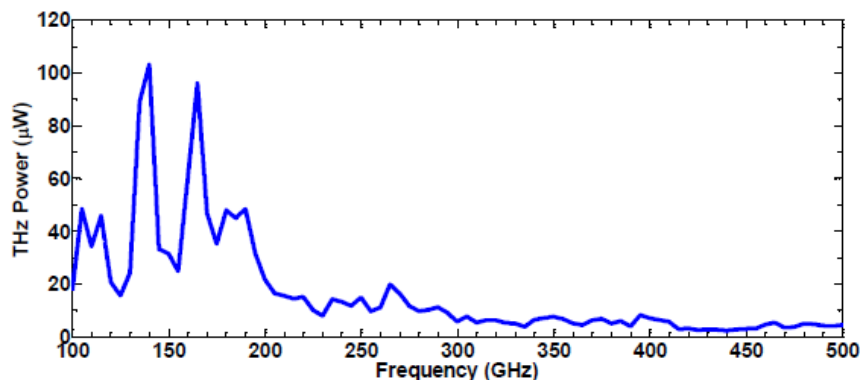


图 3 光混合器输出功率

(4) 太赫兹波检测和解调

使用带有喇叭天线的肖特基二极管 (ZBD) 用于检测和解调输入的太赫兹信号, 太赫兹载波频率的由太赫兹发射器的输出功率和肖特基二极管的响应度的乘积确定, 使用两个工作范围低于 200GHz 的肖特基二极管探测器 (弗吉尼亚二极管 WR8.0ZBD-F 和 WR6.5ZBD-F), 两个探测器的响应度数据如图 4 所示。通过将图 3 的太赫兹功率与图 4 对应频率的响应度相乘, 得到了发射器的输出电压, 如图 5 所示, 数据表明发射器输出频率为 138GHz 的太赫兹信号时, 太赫兹波检测器能探测到最大的信号幅度。在 ZBD 下面连接了偏置器以阻止直流电的通过, 并且仅让 100MHz 至 6GHz 的交流信号进入下一阶段。在 ZBD 后连接了一个高增益的低噪声放大器用于放大解调的基带信号, 噪声系数和低噪声放大器的带宽分别为 2.5dB 和 3GHz。

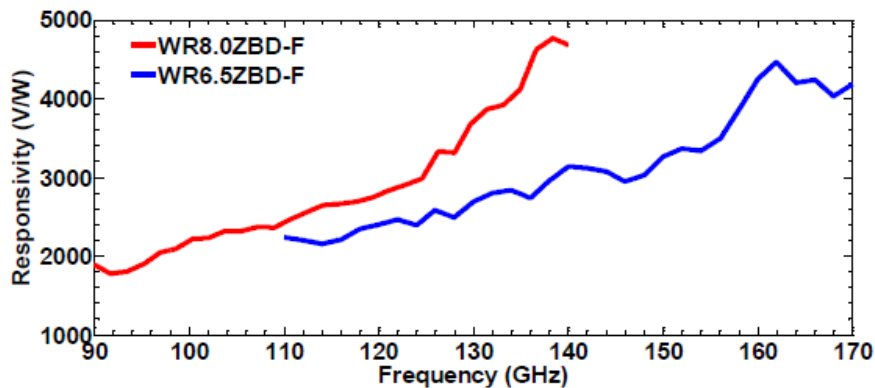


图 4 太赫兹系统响应度

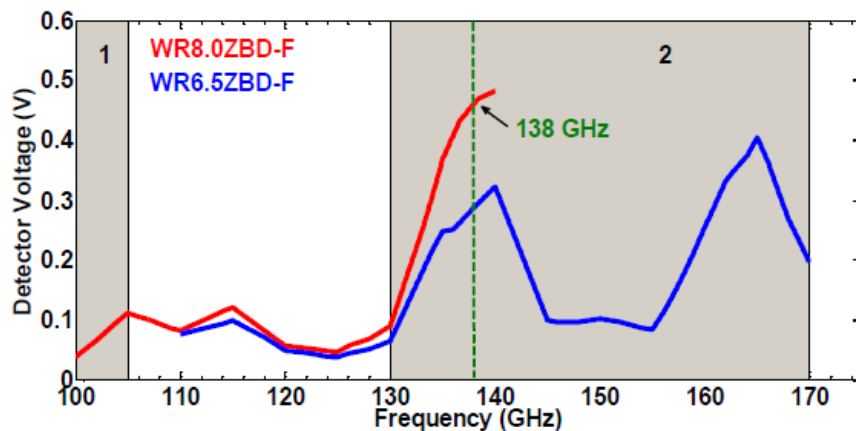


图 5 太赫兹系统电压

(5) 通信系统特性表征

使用比特率为 5.5Gbps 且长度为 2 的 31 次方减 1 的单端不归零(NRZ)伪随机二进制序列数据数据作为测试信号来表征太赫兹通信系统，测试信号的峰值幅度设定为 0.4Vpp。使用光谱分析仪测量 138GHz 频率间隔的太赫兹信号在通过可调谐分布式反馈调制之前和之后的光谱，光谱分辨率为 0.03nm，测试结果如图 6 所示。从图中可以观察到了较大的功率损耗 (>10dB)，这因为使用了光学调制器而导致的。为了解决这个问题，实验者使用了调制器驱动器单元，以便对恒定输出功率或者恒定衰减模式进行选择。为了避免不稳定的功率波动，实验者采用了恒定输出功率模式。

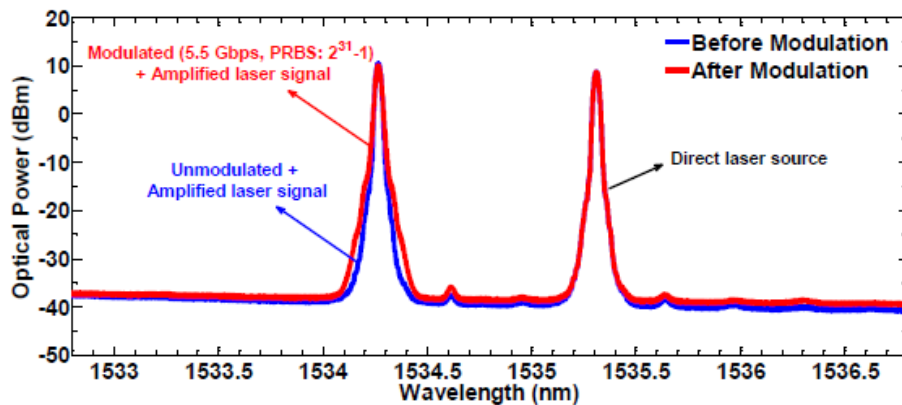


图 6 波长与功率关系图

图 6 中的蓝色曲线指的是未调制的放大的激光信号，红色曲线指的是调制的放大激光信号，当在光混合器中混合相等功率的调制激光束和直接激光束后，可以观察到更高的太赫兹波振幅。当 PRBS 数据打开时，激光束则被调制，可以观察到与未调制激光束相比，调制激光信号的带宽有所增加。在通过使用光谱分析仪测量激光信号的峰值幅度和本底噪声之后，实现了大于 40dB 的信噪比以及注入太赫兹光混合器的总光输入功率为 26 mW。

在接收器侧，工作在带宽为 100MHz-6GHz 的偏置器作为带通滤波器，以及阻止传递到下一级的直流电压，从而提高传输性能。偏置器的电路由一个电容器和一个与三个外部端口并联的电感组成。为了确定偏置器对信号质量的影响，在有无偏置器的情况下，使用高速示波器记录下传输的眼图，如图所示，其中 a 图未使用偏置器，b 图使用了偏置器。由图可知与

没有使用偏置器的眼图相比，使用偏置器测量的眼图有更高的眼幅度，眼幅度增加约为 18%。

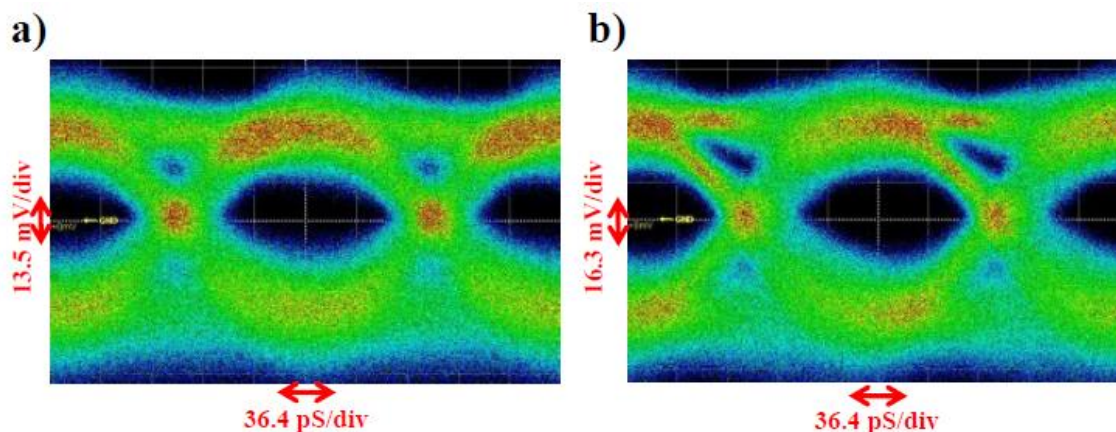


图 7 信号通过 LNA 后的眼图

3. 太赫兹通信系统性能评估

实验中使用误码率 (BER) 测试仪 (Anritsu-MP2100B) 表征太赫兹通信系统的系统性能。首先将误码率设置为光混频器偏置电压的函数，该混频器偏置电压是定义发射的 THz 功率的关键参数，单次测试的时长计算公式为： $\text{measurement duration} = 1 / (\text{target BER} * \text{bit rate}) \approx 182 \text{sec}$ 。通过将链路距离固定为 100cm，照明光功率调为 26mW，判定阈值为 0mV，通过改变光混频器的直流偏置电压，在低噪声放大器输出后测量 BER，测试结果如图所示。从图 8 观测到，与遗漏错误（数字 1 被误认为是数字 0）相比，插入错误（数字 0 被误认为是数字 1）对总 BER 的贡献更大。这是由于接收信号中眼图的垂直不对称性造成的。眼图中的垂直不对称性源于光学调制本身的问题。

接下来，将 BER 表征为若干通信链路参数的函数，例如链路距离，以及探测器天线与信号传播方向的角度偏差。因此，在第一个实验中，实验者将链路距离 100 厘米和光混合器直流偏置电压固定为 -1.9V，然后通过改变 ZBD 探测器天线相对于发射器天线定义的信号传播方向的对准角来测

量 BER，测试数据如图 9 所示。

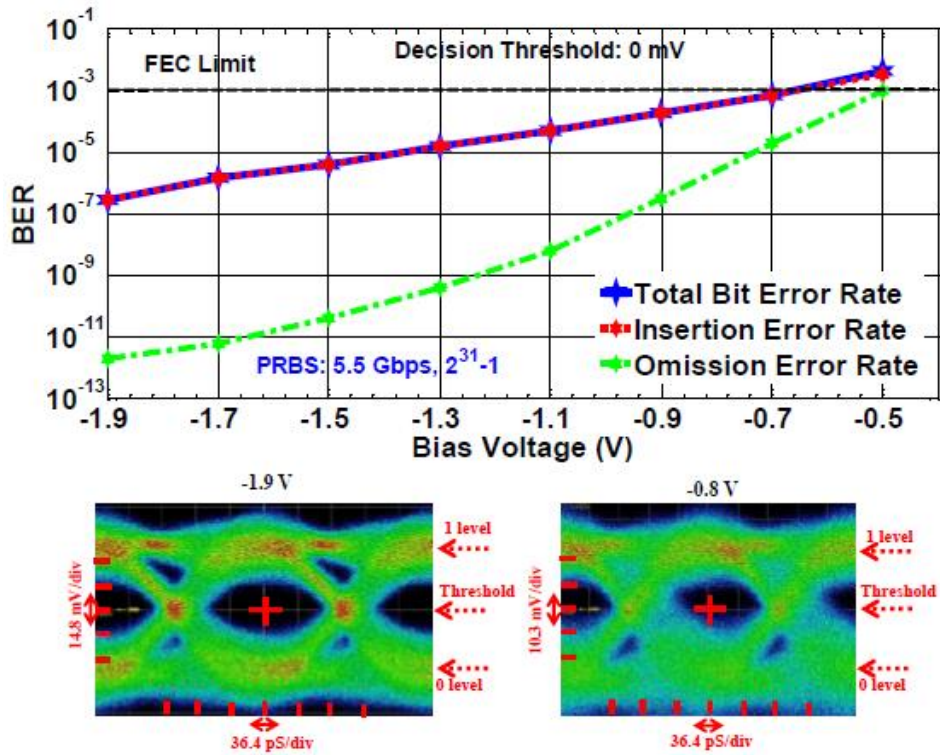


图 8 传输 5.5 Gbps 比特率的误码率测试

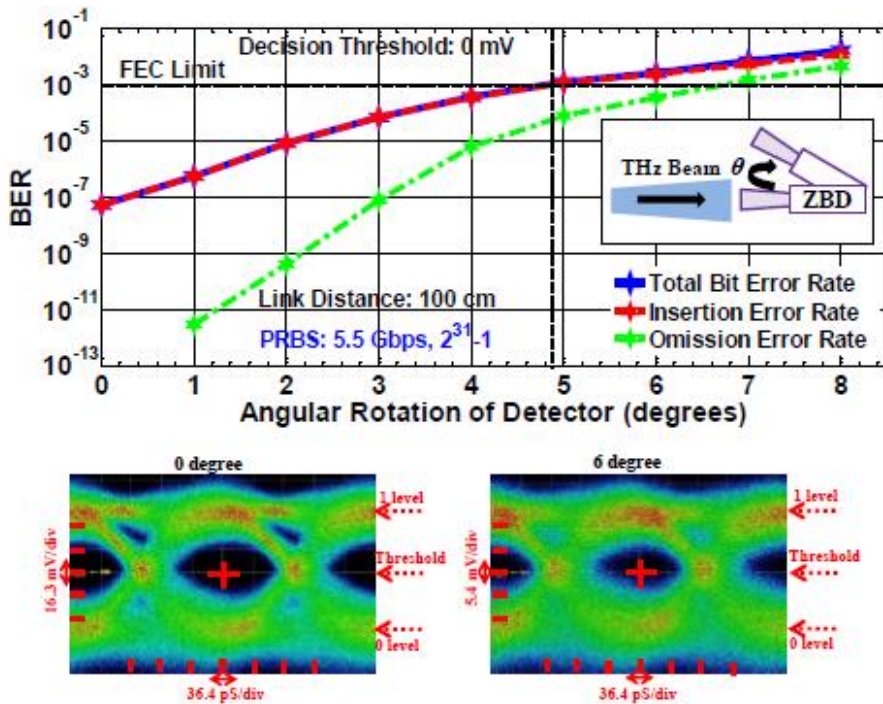


图 9 改变接收机角度的误码率测试

从数据可知，发现误码率主要是由于在垂直方向上眼图不对称引起的插入误差。根据这些测量结果，可以发现为了保持前向纠错的极限内，探测器必须在主光束传播方向的 4.8 度范围内。

在第二个实验中，误码率被表征为链路距离的函数。在评估链路距离的影响时，探测器天线的偏置电压和角度偏差分别设置为 -1.9V 和 0 度。首先，将判决阈值固定为 0mV，并在几个链路距离处测量误码率。当对系统安装并对准光学平台时，测量仅限于 175 厘米长的链路。测量的误码率如图 10 所示，从测试数据可以发现即使在 175cm 链路长度，总误差也低于前向纠错的极限值。由于眼图中的垂直不对称性，插入误差再次远高于遗漏误差。可以通过调整判定阈值来解决这种不对称性，以便均衡插入和遗漏误差，这导致了较低的误码率。从测试的数据中可以看出，误码率随着测试距离的增加明显的上升了，主要的原因是太赫兹波的散射以及功率损耗造成的，为了解决距离带来的误码率的问题，实验者给出的建议是：在输出端使用半径更大的准直透镜或者增加太赫兹波的频率。

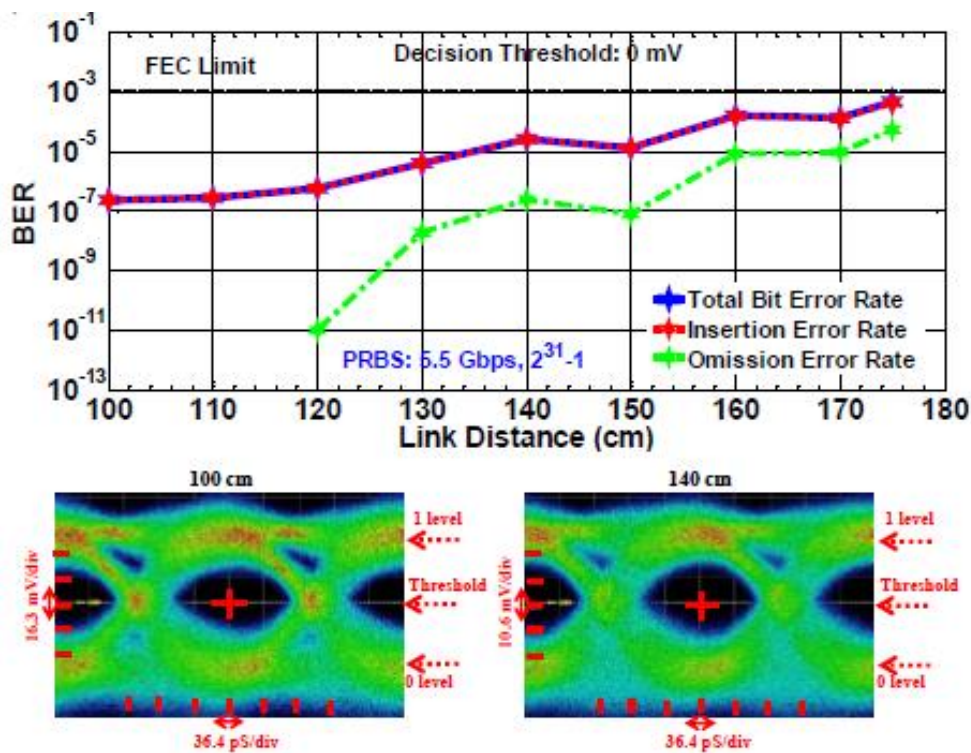


图 10 改变通信链路距离的误码率测试

在实验中，链路距离和数据速率相对较低，这是由于光混频器的低输出功率造成的。但是，构建长链路太赫兹通信系统的方法是相同的。通过用高功率光混合器替换低功率光混合器，可以容易地达到 100 米的传输距离，并且距离主要受到需要大型收集光学器件的光束发散的限制（例如大碟形天线）。增加的链路距离将足以覆盖微小区内的终端用户。在接收电子设备中，通过使用宽带宽（~15GHz）和低噪声系数（<3dB）的高增益放大器（>30dB），使用基本 ASK 调制可以达到高达 10Gbps 的数据速率。通过用高带宽相位调制器替换强度调制器并采用更高阶调制方案，数据速率可以容易地提高到几十 Gbps。由于 DFB 激光器可以很容易地调谐，因此可以在 50 GHz 到 3 THz 的宽频率范围内（使用发射器和接收器上的天线集成光混频器）表征室内无线信道。此外，通过使用广泛可调的太赫兹通信系统，可以通过实验研究各种太赫兹传感器和太赫兹成像算法。如上所述，对太赫兹通信系统的优化可以解决学术界和工业界的几种应用问题。

4. 使用太赫兹通信传输未压缩的高清和 4K 视频

前文详细介绍了太赫兹通信系统的搭建，接下来详细介绍专业 4K 摄像机与搭建的太赫兹通信系统的集成，然后分别以每秒 60 帧（fps）和 30 fps 的速度传输未压缩的高清 4K 视频。在实验中使用具有广角镜头（Olympus M. Zuiko Digital ED 12-40mm f / 2.8 PRO 镜头）的 4K 相机（Blackmagic studio 相机）。4K 摄像机的标准输出是一个未压缩的视频，具有 10 位色深和 4: 2: 2 的色度子采样。SDI（串行数字接口）电缆的峰值输出电压为 800 mVpp。在图 11（a）展示了当使用来自摄像头的电输出时 4K 相机与太赫兹发射器的集成架构，图 11（b）为摄像机为光学输出时与太赫兹发射器的集成架构，图 12 为接收端视频成像系统架构图。为了匹配接收端的处理速度，使用了 PCIE3.0 接口作为桥接固态硬盘的传输通道。

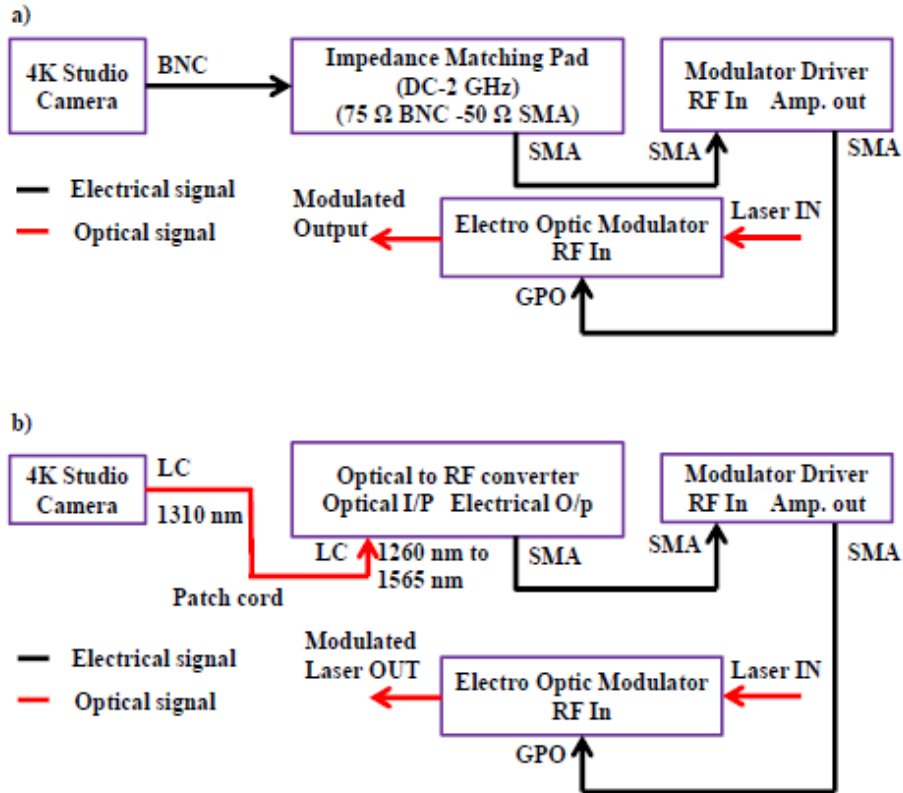


图 11 太赫兹视频发射机架构图

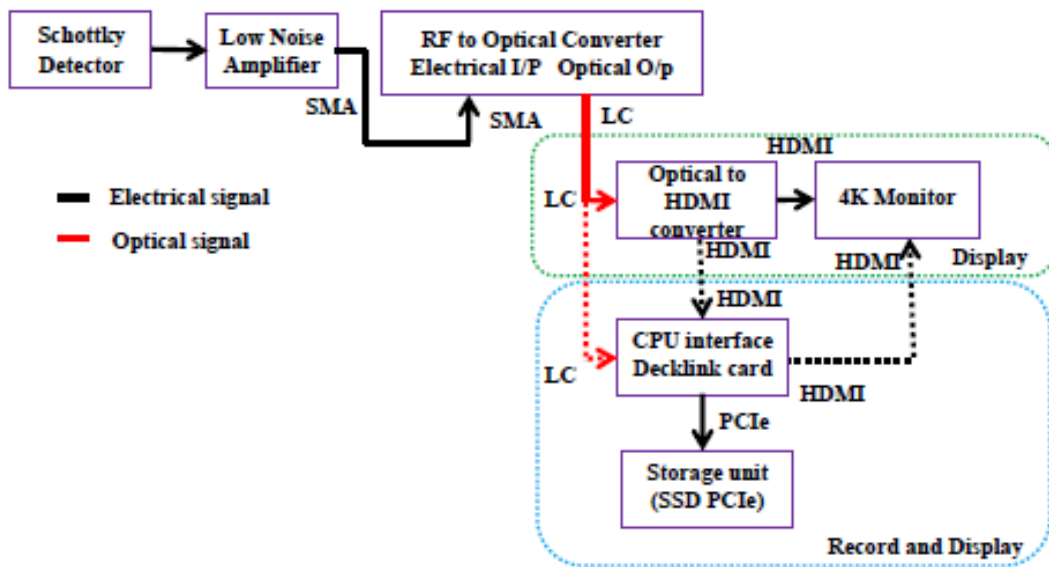


图 12 太赫兹视频接收机架构图

在视频传输实验之前，使用 PRBS 数据再次进行 BER 测量，以便比较电信号到光学信号转换之后的总 BER 是否与转换之前测量的总 BER 相似。BER 测量在不同的链路距离处进行，结果如图 13 所示。从数据可知，将

电信号转换为光信号以进行视频传输实验的误差可以忽略不计。

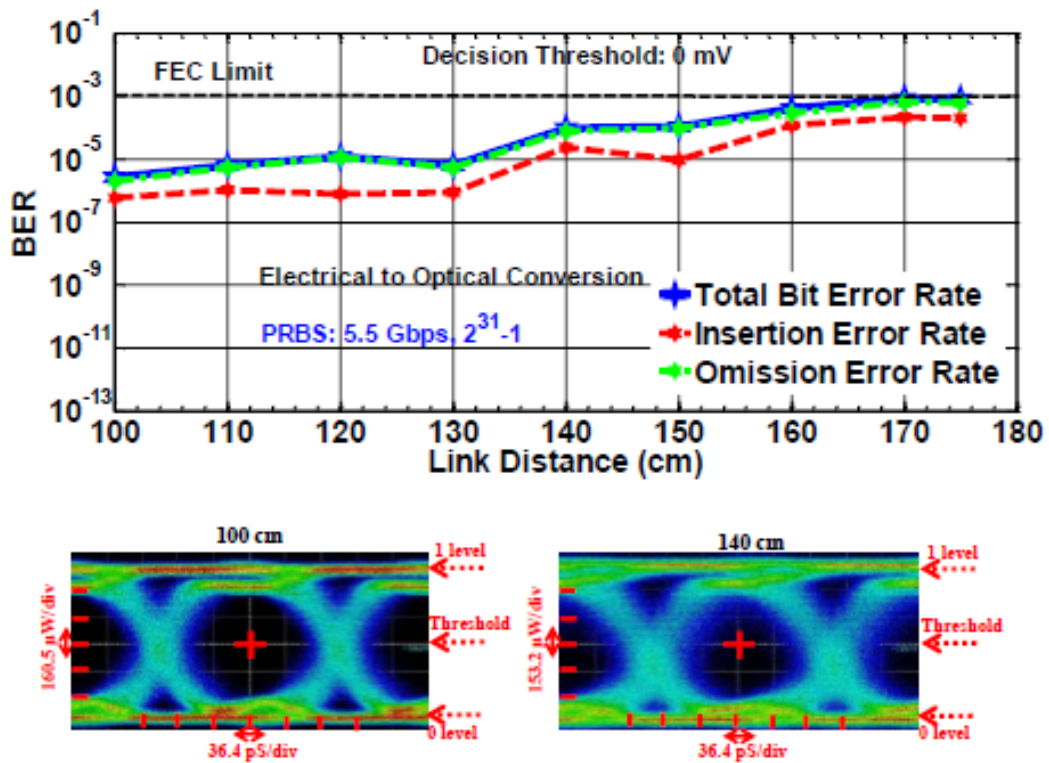


图 13 不同传输信号在不同链路距离下的误码率

在进行视频传输时，采用了未压缩的 HD (1920×1080, 60fps) 和 4K (3840×2160, 30fps) 视频，通过太赫兹通信系统以 138 GHz 的载波频率单独传输。HD 和 4K 视频的相应数据速率分别为 2.97 Gbps 和 5.94 Gbps。为便于分析，接收的视频被记录为图像数据（数字图像交换格式）。接收视频流的时间为 30 分钟。实验者通过分析黑帧来判断视频传输的同步误差。

尽管除了黑色帧之外视频的清晰度不会在视觉上降级，但是可以应用黑帧来验证所接收视频的质量。黑帧是用于测量由于同步分组中的错误而导致的无线流视频传输性能的工具。数字视频的定时同步由十六进制模式下视频结束 (EAV) 和活动视频开始 (SAV) 序列提供，在同步分组中的任何错误都会导致黑帧。在对黑帧检测时，检测时长为 30 分钟，通信链路的距离为 30 厘米。在 30 分钟内高清视频一共传输了 10800 帧图像，4K 视频一共传输了 54000 帧图像。测试结果如图 14 所示。我们看到，与高清视频相比，由于在测量持续时间内，

由于太赫兹通信系统的微小不稳定性，4K 视频传输的黑帧的可能性更高。

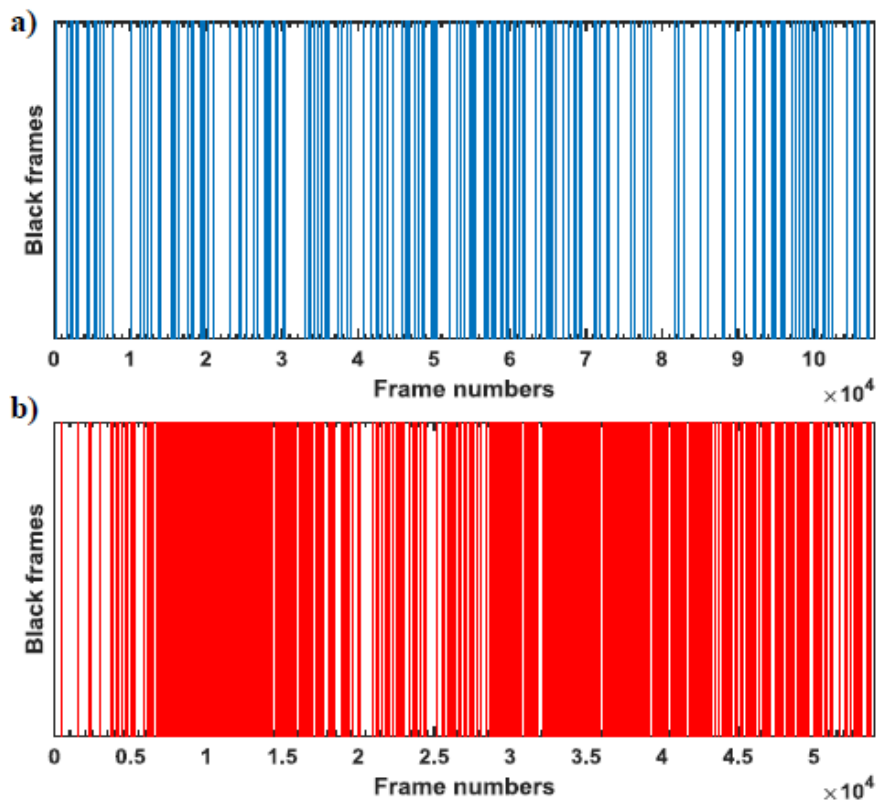


图 14 高清视频和 4K 视频的黑帧测试

实验者通过增加无线链路距离进行了类似的实验，并计算了 HD 和 4K 视频的黑帧百分比，如图 15 所示。从数据看到，当传输距离为 30cm 时，高清视频的黑帧率小于 0.5%，4K 视频黑帧率小于 5%。通过增加链路距离，对于高清视频而言，黑帧的百分比几乎是恒定的，但是对于 4K 视频而言，黑帧率是随着距离增加而增加。这表明由于高误码率，4K 视频的定时同步分组中的错误概率更高。

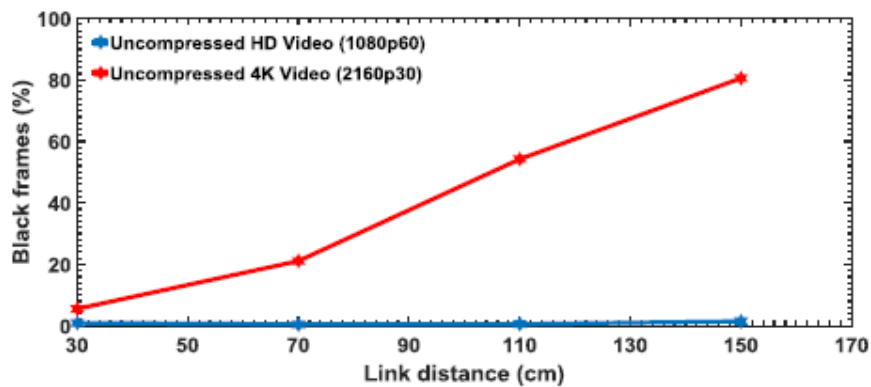


图 15 不同链路距离下的黑帧率测试

5. 结论与展望

在本实验中，实验者设计并评估基于光子学的太赫兹无线通信系统的性能，并且该系统的组成均由市面上可购买的器件组成，为太赫兹通信系统的商业应用提供了可能性。通过以 5.5Gbps 的比特率测量 PRBS 数据的 BER 来评估构建系统的性能。通过优化判决阈值，实现了 1 米的链路距离的无差错数据传输。太赫兹发射机上安装摄像机，太赫兹接收机上安装视频接收机电子设备，成功传输未压缩高清和 4K 视频。分析视频传输的链路质量并测量黑帧的百分比。对数据分析表明，由于增加的链路距离带来的传输错误，所传输的未压缩 4K 视频的黑帧的百分比更高，而未压缩高清视频的图像帧 99% 被成功接收。实验表明现在可以使用太赫兹无线通信系统用于商业的短程高质量视频传输服务。

基于电子器件的太赫兹通信主要实现方式是利用倍频器作为太赫兹波源，Cheng Wang^[5]等人搭建了如图 16 所示的太赫兹通信系统，该系统的载波频率为 0.14THz（属于亚太赫兹频段），实现了 2Gbit/s 的传输速率，传输的距离为 1.5Km。搭建的太赫兹通信系统的实物图如 17 图所示。该系统正确的传输了高清无压缩视频，并且该实验为太赫兹无线通信首次远距离通信实验。

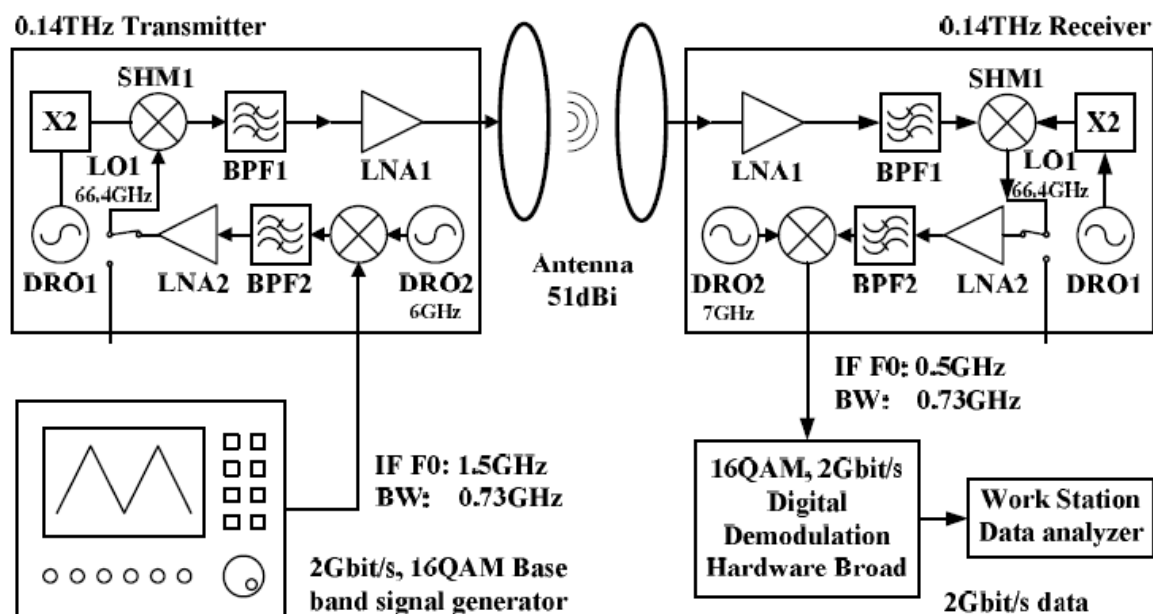


图 16 基于电子器件的太赫兹通信系统



图 17 太赫兹通信系统实物图

随着网络通信的迅速发展，处于低频段的频谱资源已逐渐不能满足人们对于更高速率应用的需求，太赫兹通信逐渐引起人们的关注。太赫兹（0.1THz-10THz）是一种频率范围位于毫米波和红外光波之间的电磁波。太赫兹频段能够提供超高带宽，为支持高速数据传输提供了可能。太赫兹通信能为超高清视频的传输提供可能性，具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 罗雪梅. 后5G时代[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(03): 570.
- [2] Song H J, Ajito K, Muramoto Y, et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications[J]. Electronics Letters, 2012, 48 (15): 953-954.
- [3] 赵明明, 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(06): 931-937.
- [4] Nallappan K , Guerboukha H , Nerguizian, Chah é et al. Live Streaming of the Uncompressed HD and 4K Videos Using Terahertz Wireless Links[J]. 2017.
- [5] Wang C , Lin C , Chen Q , et al. 0.14THz high speed data communication over 1.5 kilometers[C]// International Conference on Infrared. IEEE, 2012.

作者简介：邱钟维，重庆邮电大学硕士研究生，
研究方向：太赫兹通信。

