

文章编号: 2095-4980(2016)06-0829-05

W 波段高速远距离无线实时通信

秦超逸, 许育铭, 王哈达, 余建军

(复旦大学 信息科学与工程学院 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 由于高频和宽频带的特性, W 波段毫米波可支持高速率、远距离无线传输, 在未来无线通信中是一项很有前景的技术。为研究 W 波段毫米波的无线传输特性, 建立了 W 波段无线信道模型, 进行链路分析, 并基于光子毫米波技术进行了实验研究。结果显示, 可以成功搭建 1.485 Gb/s, 90 GHz 的 W 波段实时通信系统, 并成功实现了高清无压缩视频无线传输 265 m。迄今为止, 这是高清视频信号在 W 波段实时无线传输的最远距离。

关键词: 无线通信; 毫米波; W 波段; 实时传输

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0829

W-Band high speed long distance wireless real-time communication

QIN Chaoyi, XU Yuming, WANG Hada, YU Jianjun

(Education Ministry Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science, Information Science and Engineering School, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: W-band millimeter wave can support high speed wireless, long distance transmission due to the characteristics of high frequency and wide bandwidth. It is a very promising technique in future wireless communication. To investigate the wireless transmission characteristics of W-band millimeter wave, the model of W-band wireless channel is analyzed, and millimeter wave based on photonic beating technique is generated through experiment in this paper. The results show that the 90 GHz W-band real-time communication system with bit rate of 1.485 Gb/s is set up, and uncompressed High-Definition video(HD video) data is successfully transmitted over 265 m. This is the longest distance using W-band millimeter wave to deliver a live uncompressed HD-video wireless signal so far.

Keywords: wireless communication; millimeter wave; W-band; real-time transmission

当今社会, 人们对宽带通信的依赖达到前所未有的程度。根据 Cisco 公司发布的视觉网络指数(Visual Networking Index, VNI)报告, 从 2014 年到 2019 年, 年 IP 流量将增至 3 倍, 达到创纪录的 2 ZB^[1]。届时, 将有更多的互联网用户, 更多的接入设备, 更快的宽带速度, 以及更多的全新信息业务。信息的爆炸式增长对现有的基础网络提出挑战。当比特率增加时, 所需要的频带宽度也会随之增加。W 波段毫米波由于其自身的高频特性和具有相当宽的频带, 有着对超高速信号的承载能力, 在未来移动通信领域极具竞争力。此外, 观察毫米波的大气损耗曲线, 可以发现 W 波段的毫米波(80 GHz~100 GHz)恰好有衰减很小的大气窗口, 这也正是 W 波段毫米波在未来的自由空间通信所具有的巨大潜力^[2]。然而, 用现有的带宽和速率有限的电子器件很难直接产生 W 波段毫米波。因此利用光子拍频技术来产生高频率的毫米波是一种非常有前景的方式^[3-7], 而这也是实现光与无线融合中的一项关键技术^[8]。基于光子技术的 W 波段毫米波通信方面的研究已大量开展。复旦大学课题组报道了载频为 85.5 GHz 的 20 Gb/s 的偏振复用-正交相移键控(Polarization Division Multiplexing-Quadrature Phase Shift Keying, PDM-QPSK)无线信号成功传输 1.7 km 的实验^[4], 这是 W 波段迄今为止最远的离线处理无线传输。然而, 实时的系统却少有提及^[3-10]。在此前报道的实时系统中, V 波段和 W 波段速率为 1.485 Gb/s 的实时系统均将高清视频信号以无线的方式传输了 3 m^[6], 但如此短的距离远远不能满足未来无线通信中各种业务和应用的需求。本文主要介绍了基于 W 波段光子毫米波生成技术的实时通信实验, 采用了高性能电子器件和高增益天线, 基于光子毫米波技术搭建了实时视频演示系统, 成功实现速率为 1.485 Gb/s 的高清无压缩视频信号的室内 3.9 m 和户外

收稿日期: 2015-10-13; 修回日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61325002; No.61527801)

120 m, 265 m 传输。视频信号经 3.9 m 和 120 m 传输后, 电视画面清晰流畅; 经 265 m 传输后, 质量有所下降, 但画面整体流畅且比较稳定。尽管本文只阐述了用 W 波段无线技术来传输高清视频信号, 但作者相信极具潜力的 W 波段无线通信在未来的通信中能发挥其巨大优势, 满足人们对各种速率、各种信息业务的需求。

1 信道模型

自由空间传播模型可用于预测视距(Line-Of-Sight, LOS)传输中接收信号的强度。令 d (单位: m)表示发射天线与接收天线之间的距离。当使用各向同性的理想天线时, 设发射天线的增益为 G_t , 接收天线的增益为 G_r , 则根据 Friis 公式^[1], 距离为 d 的接收信号功率为:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 L d^2} \quad (1)$$

式中: P_t 为发射功率, 单位: W; λ 为发射信号波长, 单位: m; L ($L \geq 1$) 为与传播环境无关的系统损耗系数。观察式(1), 可以发现 d 很小时该等式并不成立, 因此需对该模型进行修正。引入参考距离为 d_0 来改写式(1)。通常, 信号在 W 波段传输时, d_0 取 1 m 即可满足远场条件。在 $d > d_0$ 时, 有

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2 L} \cdot \frac{d_0^2}{d^2} = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (2)$$

同时, 引入随环境而改变的路径损耗指数 n , 可将上述模型修正为更精确的“对数-距离”路径损耗模型。

$$PL_{LD}(d)[\text{dB}] = PL_F(d_0) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3)$$

由于系统并不是在真空中传播, 所以需要考虑大气损耗。然而在 W 波段的大气损耗因子 $L_a = 0.5 \text{ dB/km}$ ^[2], 因此可以忽略由大气带来的损耗。图 1 显示在不同天线增益的情况下, 自由空间的路径损耗随距离而变化的曲线图, 其中载波频率 $f_c = 90 \text{ GHz}$, 系统损耗系数 $L = 1$ 。

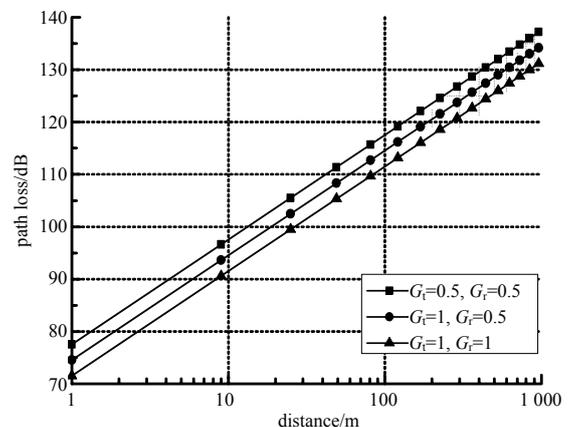


Fig.1 Free-space path loss model
图 1 自由空间路径损耗模型

2 实验系统介绍

W 波段远距离实时通信系统实验装置见图 2。

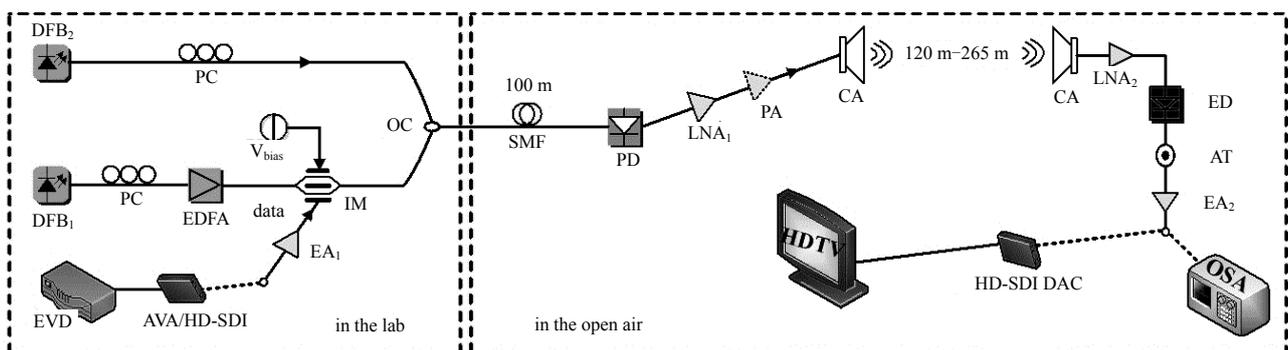


Fig.2 Experimental setup of the W band long distance real time transmission system
图 2 W 波段远距离实时通信系统实验装置图

在发射端, 用 2 束激光拍频的方法来产生毫米波。调节分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB), 使得 2 束激光的频差为 90 GHz, 见图 3。之后, 激光通过了偏振控制器(Polarization Controller, PC)以保持其偏振状态。由于在实验中需要传输视频信号, 故利用增强型多媒体盘片系统(Enhanced Versatile Disk, EVD)和模拟视音频转高清-串行数字输入转换器(Analog Video and Audio to High Definition-Serial Digital Input Converter, AVA/HD-SDI Converter), 将视频数据转换成速率为 1.485 Gb/s 的开关控制(On-Off Keying, OOK)信号。利用电放大器(Electrical Amplifier, EA)将此信号放大后, 送入强度调制器(Intensity Modulator, IM)调制到第 1 束激光 L_1 上, 再用 3 dB 光耦合器(Optical Coupler, OC)将已调信号与第 2 束激光 L_2 进行拍频, 得到中心频率为 $f_1 \pm f_2$ 的

光信号。其中, IM 的半功率带宽约为 36 GHz, 半波电压为 2.8 V@1 GHz, 插入损耗为 5 dB。光信号经过一段单模光纤(Single Mode Fiber-28, SMF-28, 色散系数为 17 ps/km/nm)传输, 没有进行色散补偿而直接被送入 W 波段光电二极管(Photo Diode, PD)进行光电转换。其中, 信号的差频分量将被转化为电毫米波信号; 和频分量由于频率太高, 超过 PD 的检测范围而被滤除。毫米波信号被 1 个增益为 32 dB、饱和功率为 4 dBm 的 W 波段低噪声放大器 LNA₁(Low Noise Amplifier, LNA)放大后, 经过增益为 45 dBi、半波束宽度为 0.8° 的卡塞格伦天线(Cassegrain Antenna, CA)发射。当天线之间的距离大于 40 m 时, 还在发射天线前加了一个饱和功率为 20 dBm 的功率放大器(Power Amplifier, PA)对信号再次放大。

在接收端, 信号由性能相同的卡塞格伦天线接收。经与发射端相同性能的 LNA₂ 放大后, 信号由包络检波器(Envelope Detector, ED)解调。解调后的信号首先经过 1 个半功率衰减器(Attenuator, AT)衰减, 再经过 1 个电放大器 EA₂ 放大。信号先要进行衰减, 是为了满足 EA₂ 所要求的一个合适的输入功率。最后, 信号经过 HD-SDI DAC 转化为模拟信号, 被送入高清电视。至此, 系统完成了 W 波段信号的无线传输。

此外, 接收信号除了可以通过 HD-SDI DAC 转换为电视信号以外, 还可以直接送入 Agilent E4407B 频谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)或示波器(Oscilloscope, OSC)。值得注意的是, 由于频谱仪能观察到的频率范围有限, 因此信号在被送入频谱仪之前, 经过了 1 个 W 波段谐波混频器 11970W 进行下变频至中频。

3 实验结果与讨论

这套实时通信系统的发送和接收的卡塞格伦天线均是由高度、方向可调的三脚架支撑。为实现最佳的通信性能, 接收天线需要严格地对准发送天线, 而这可以通过使用三脚架上的瞄准镜来实现。

先进行室内 3.9 m 的无线传输实验。发射端 PD 的输入光功率为 1.5 dBm。发射天线发出的无线信号经 3.9 m 传输后到达接收天线。在接收端, 由光谱仪观测到解调前的信号功率为 -49.27 dBm, 中心频率为 89.4 GHz, 其电谱见图 4。扣除由 Agilent 11970W 混频器产生的 40.6 dB 转换损耗后, 经 LNA₂ 放大后信号的实际功率为 -8.67 dBm。经包络检波和放大后, 信号的眼图见图 5。将该信号送入 HD SDI DAC 转换为视频信号, 可以在电视上看到清晰流畅的实时画面。

再进行远距离传输实验。实验照片见图 6。本次长距离户外传输实验是在复旦大学校园里完成。需要说明的是, 光信号是在实验室中产生和调制的。为了进行户外传输, 调制后的光信号经过了一段长度超过 100 m 的 SMF-28 光纤(色散系数为 17 ps/km/nm)传输后, 没有经过色散补偿, 直接被送入 PD 进行检测。

在图 6 中标注了本次实验的传输路径和对应的传输距离。图 6(a)显示的是位于 0 m 处的发射机, 图中由箭头引出的线条即为单模光纤 SMF-28。图 6(b)和图 6(c)分别是 120 m 和 265 m 处接收机的照片。当信号传输 120 m 后, 电视画面很流畅, 几乎无抖动, 清晰度与传 3.9 m 时差不多; 当距离增大到 265 m 时, 清晰度不如以前。这是因为

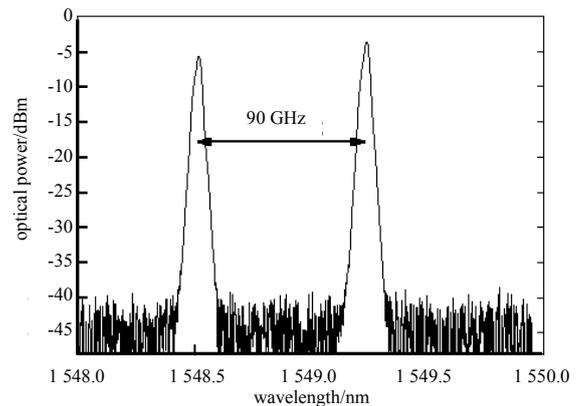


Fig.3 Optical spectra of the two beams of laser with 90 GHz frequency spacing

图 3 频差为 90 GHz 的 2 束激光光谱

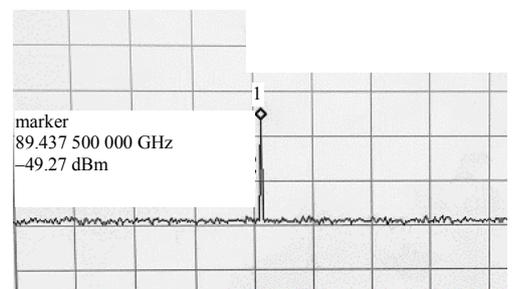


Fig.4 Electric spectra of the signal transmitted over 3.9 m before being envelope-detected

图 4 无线传输 3.9 m 后, 包络检波前的信号电谱

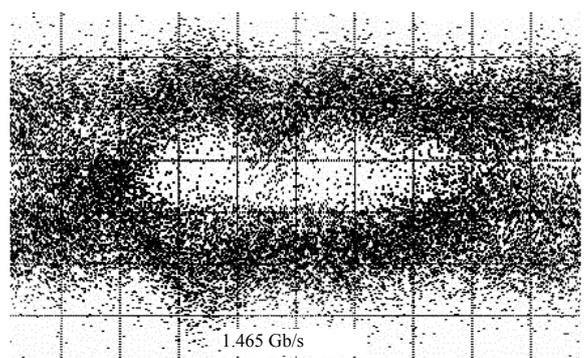


Fig.5 Eye-diagram of the signal transmitted over 3.9 m before being envelope-detected

图 5 无线传输 3.9 m 后, 包络检波前的信号眼图

在传输过程中, 信号衰减更大。根据式(3), 此时的信号功率强度会比只传输 3.9 m 弱至少 36.6 dB(当 n 取 2 时)。同时, 信号受多径效应、噪声影响更大。但整体而言, 画面仍比较清晰。在收发天线间有行人经过形成阻挡时, 信号质量会更进一步恶化, 直接影响画质。



(a) transmitter at 0 m (b) receiver at 120 m (c) receiver at 265 m

Fig.6 Photographs of high speed wireless signal long distance real-time communication experiment at W-band
图 6 W 波段高速无线信号长距离实时通信实验照片

4 结论

本文主要介绍了基于 W 波段光子毫米波生成技术的实时通信实验, 成功搭建了实时视频演示系统。本系统采用光子毫米波技术生成频率为 90 GHz 的毫米波, 成功实现了速率为 1.485 Gb/s 的高清无压缩视频信号室内 3.9 m 和户外 120 m, 265 m 传输。视频信号经 3.9 m 和 120 m 传输后, 电视画面清晰流畅; 经 265 m 传输后, 质量有所下降, 但整体画面仍比较流畅稳定。据作者所知, 这是首次实现了高清无压缩视频信号在 W 波段以如此远距离的高速实时传输实验。以后将考虑多维多阶调制并加入数字信号处理算法弥补衰减, 去除噪声, 消除干扰, 进一步提升通信系统的速率, 提高接收信号的质量, 增加信号的传输距离。对于 W 波段无线传输来说, 它在未来高速无线网络和大数据应用领域有着相当可观的前景。

参考文献:

- [1] Cisco System, Inc. Cisco visual networking index:global mobile data traffic forecast update 2014–2019[Z]. White Paper, 2015.
- [2] WELLS J. Faster than fiber:the future of multi-G/s wireless[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009,10(3):104–112.
- [3] YU Jianjun,LI Xinying,CHI Nan. Faster than fiber:over 100-Gb/s signal delivery in fiber wireless integration system[J]. Optics Express, 2013,21(19):22885–22904.
- [4] XIAO Jiangnan,YU Jianjun,LI Xinying,et al. 20-Gb/s PDM-QPSK signal delivery over 1.7-km wireless distance at W-Band[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Los Angeles,California:[s.n.], 2015:1–3.
- [5] XIAO Jiangnan,YU Jianjun,LI Xinying,et al. 40-Gb/s PDM-QPSK signal transmission over 160-m wireless distance at W-band[J]. Optics Letters, 2015,40(6):998–1001.
- [6] LIN Cheng,LIU Cheng,ZE Dong,et al. Real-time dual-band wireless videos in millimeter-wave radio-over-fiber system[J]. Optical Fiber Technology, 2013,19(6):529–532.
- [7] 许育铭,张自然,肖江南,等. W 波段的毫米波通信[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):554–558. (XU Yuming, ZHANG Ziran,XIAO Jiangnan, et al. W-band millimeter wave communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):554–558.)
- [8] 施剑阳,李欣颖,王源泉,等. W 波段大容量光纤无线融合系统的关键技术[J]. 光通信研究, 2014(4):67–70. (SHI Jianyang, LI Xinying,WANG Yuanquan,et al. Key technologies of W-band high-capacity fiber-wireless integration system[J]. Study on Optical Communications, 2014(4):67–70.)

(下转第 847 页)