

文章编号: 2095-4980(2014)05-0712-04

## 宽带 E 波段无线传输系统

张自然, 许育铭, 肖江南, 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:** 本实验采用 74 GHz 本振源与一对矩形喇叭天线实现了非归零开关键控(NRZ-OOK)信号在室内环境下的传输。在实验中还研究了不同传输距离和速率对系统性能的影响。结果表明误码率性能随着距离和速率的增加而下降, 使用前向纠错编码(FEC)的 5 Gbit/s 和 6 Gbit/s 信号可以在 3.6 m 内实现无误码传输, 而 7 Gbit/s 信号只能在 2.4 m 内实现无误码传输。

**关键词:** 无线通信; 毫米波通信; E 波段; 矩形喇叭天线

**中图分类号:** TN928

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201405.0712

## E-band wireless broadband transmission system

ZHANG Zi-ran, XU Yu-ming, XIAO Jiang-nan, YU Jian-jun

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

**Abstract:** The Non-Return-to-Zero On-Off Keying (NRZ-OOK) signal transmission is demonstrated indoors with a 74 GHz local oscillator and a pair of rectangular horn antenna. The BER performance of the system is researched with various transmission distances and bit rates. The results show that the performance decreases with the increasing of distance and bit rate. Error free transmission can be realized within 3.6 m for 5 Gbit/s and 6 Gbit/s signals with Forward Error Code(FEC), while just 2.4 m transmission can be realized for 7 Gbit/s signal.

**Key words:** wireless communication; millimeter-wave communication; E-band; rectangular horn antenna

随着科技信息技术的发展, 视频点播、高清电视、视频游戏等高速率业务的出现, 人们对无线通信的带宽要求越来越大。然而目前的 4G 和 WiFi 无线通信系统已经无法满足人们对移动通信速率的需求, 对下一代高速无线通信技术的需求显得十分迫切。无线电频谱的低端频率—微波频段—已趋饱和, 而且微波通信受载波频率限制, 无法提供超过 G 比特级的数据传输速率。毫米波由于其波长短、频带宽, 可以有效地解决高速宽带无线接入面临的许多问题, 是未来无线通信发展的主要方向之一<sup>[1-3]</sup>。

毫米波通信可分为 V(60 GHz), E(70/80 GHz), W(75 GHz~110 GHz)波段以及超过 100 GHz 的太赫兹通信。由于 V 波段具有 7 GHz 的不用许可的工作带宽, 吸引了较多研究者的兴趣。通过光纤无线融合系统, 以及数字信号处理技术的应用, 已在 V 波段实现了 G 比特级乃至数十 G 比特级的通信实验<sup>[4-7]</sup>。文献[8-9]对 V 波段信道传输特性进行了一定的研究。相对来说对 E 波段无线通信的研究较少, 多集中于器件研究方面<sup>[9-10]</sup>, 但也有不少成果发表<sup>[11-13]</sup>。W 波段具有更大的带宽, 因而实现了百 G 比特甚至数百 G 比特的信号传输<sup>[14-16]</sup>。太赫兹波段因其良好的方向性, 多用于长距离无线传输。日本 NTT 在 120 GHz 载频上实现了 10 Gbit/s 信号 5.8 km 的无线传输实验<sup>[17]</sup>。国内, 中国工程物理研究院电子工程研究所采用“16QAM 高速矢量调制+谐波混频+放大”的高速通信技术, 完成了 140 GHz 10 Gbit/s 信号无线实时传输 500 m 的实验<sup>[18]</sup>。V 波段正处于大气吸收峰内, 受大气衰减影响较大, 而 W 波段和太赫兹波段则受器件带宽限制。因此, E 波段是较为理想的无线通信频段。本文建立了 E 波段 74 GHz 无线通信系统, 并对系统性能与距离的关系进行研究, 同时改变信号速率, 观察不同速率信号的误码率性能。

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61325002, 61250018, 61177071); 上海市科委资助项目(12510705600, 13JC1400700, 12dz1143000)

## 1 实验系统结构

采用一对矩形喇叭天线进行通信的 74 GHz 无线传输系统结构如图 1 所示。图中非归零开关控(NRZ-OOK)为非归零码开关控信号(幅度为峰峰值 0.5 V, 伪随机码长度  $2^{15}-1$ ), mixer 为 E 波段混频器(变换损耗为 8 dB), 喇叭天线(Horn Antenna, HA)是增益为 25 dBi 矩形喇叭天线, 低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)是增益为 28 dB 的低噪声放大器, detector 为振幅包络检波器, PA(Power Amplifier, 功率放大器)是增益为 25 dB, 输出幅度为 4 V(峰峰值)的功率放大器。毫米波本振源(mm-wave local oscillator)产生的正弦波(频率 74 GHz, 输出功率 16 dBm)作为无线载波, 采用混频器(mixer)作为振幅调制器调制信号。基带信号是由信号发生器(signal generator)产生的 NRZ-OOK 信号, 是一种振幅调制信号。调制有信号的载波经过矩形喇叭天线发射到大气中。在接收端将另一个矩形喇叭天线接收下来的信号由低噪声放大器(LNA)放大。由于在发送端采用振幅调制方式, 只需要通过包络检波器就可以完成信号解调过程。解调后的信号还需要经过功率放大器进行二级放大, 最后由误码分析仪(error analyzer)将接收到的信号和信号发生器产生的信号进行对比, 分析信号性能。

系统实验装置照片如图 2 所示, 图 2(a)为发射机模块, 图 2(b)为接收机模块。实验中采用本振源为 74 GHz 的毫米波信号源, 采用 Agilent 公司的 E4407B 频谱分析仪测量解调后的信号频谱, 采用 Agilent 公司的 70843C 误码分析仪分析信号的误码性能, 同时 NRZ-OOK 信号也由误码分析仪的码型发生模块提供。

## 2 实验结果

由信号发生器分别产生 5 Gbit/s, 6 Gbit/s 和 7 Gbit/s 的 NRZ-OOK 信号, 经过混频器加载到 74 GHz 的载波上, 通过一对矩形喇叭天线和无线信道传输后, 由包络检波器将信号解调。载波及信号频谱如图 3 所示, 图 3(a)为载波频谱, 图 3(b),(c)为加载 OOK 信号的载波频谱, (d),(e),(f)分别为解调后 5 Gbit/s, 6 Gbit/s 和 7 Gbit/s 的信号频谱。同时观察无线传输距离对信号强度的影响。根据 Friis 传输公式, 无线传输路径损耗为:

$$P_L = 20\lg(f) + 20\lg(d) + 32.4 \quad (1)$$

式中:  $P_L$  为传输损耗;  $f$  为载波频率, 单位为 MHz;  $d$  为传输距离, 单位为 km。与传输距离相关项为  $20\lg(d)$ , 在本文中仅观察此项对信号强度的影响。在实验中测量了 6 Gbit/s 信号在传输 1.8 m, 2.4 m, 3 m, 3.6 m 和 4.2 m 距离后的信号频谱强度。以 1.8 m 信号强度为基准, 信号强度随距离变化如图 4 所示。可以看出实验值与理论值误差不超过 1 dB。

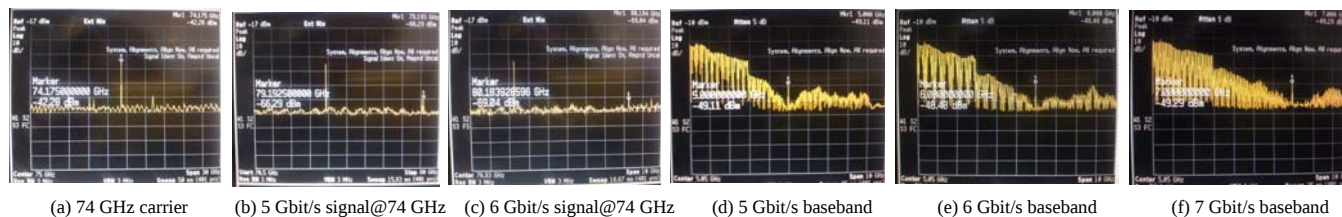


Fig.3 Spectra of several signals

图 3 不同信号的频谱

本实验还研究了无线传输距离和误码率的关系, 在不同距离进行 5 Gbit/s, 6 Gbit/s 和 7 Gbit/s 信号传输并测量误码率, 实验结果如图 5 所示。图中虚线为 FEC 无误码门限  $3.8 \times 10^{-3}$ 。经过 1.8 m 无线传输后, 5 Gbit/s 和

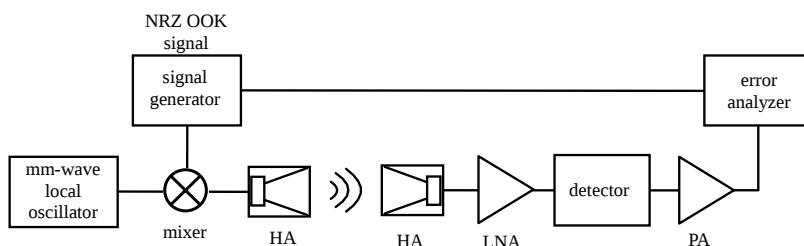


Fig.1 Schematic of 74 GHz wireless communication systems

图 1 74 GHz 无线通信系统结构图

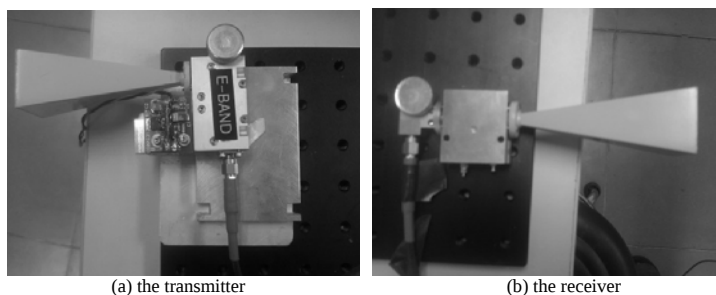


Fig.2 Photos of transceivers

图 2 发射机和接收机照片

6 Gbit/s 的信号误码率小于  $1 \times 10^{-9}$ , 7 Gbit/s 信号的误码率只有  $1 \times 10^{-8}$ 。随着传输距离的增加, 接收端收到的信号功率不断降低, 系统的误码率性能也不断恶化。其中, 5 Gbit/s 和 6 Gbit/s 信号性能较为接近, 优于 7 Gbit/s 信号。7 Gbit/s 在 1.8 m~2.4 m 的距离上, 性能急剧下降, 而在 2.4 m 之后, 误码率较为稳定, 趋近于  $10^{-2}$ 。在无线传输距离达到 4.2 m 后, 5 Gbit/s 和 6 Gbit/s 信号的误码率都几乎达到  $10^{-2}$ , 已经超过了 FEC 误码纠正界限。在使用 FEC 的情况下, 5 Gbit/s 和 6 Gbit/s 信号可以实现 3.6 m 无误码传输, 7 Gbit/s 信号在无误码的情况下仅能传输 2.4 m。

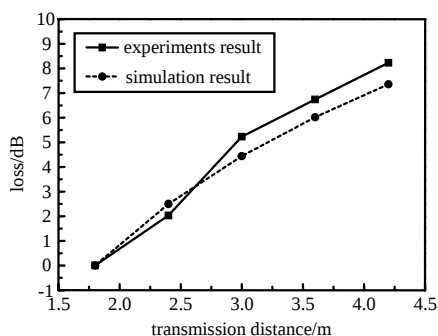


Fig.4 Transmission losses versus transmission distances  
图 4 传输损耗-传输距离曲线图

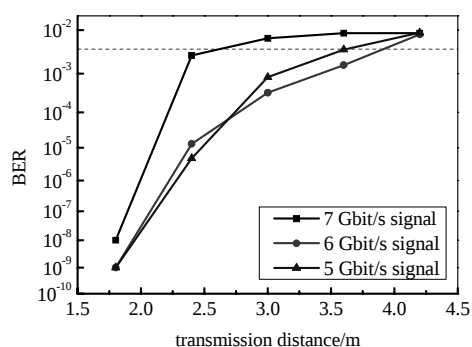


Fig.5 BER versus transmission distance  
图 5 误码率与传输距离的曲线图

### 3 结论

本实验建立了 74 GHz 的无线传输系统, 在系统上传输不同速率的 NRZ-OOK 信号并分析其性能, 同时改变无线传输距离, 观察性能变化。在误码率不大于  $1 \times 10^{-9}$  的情况下, 实现了 6 Gbit/s 信号传输 1.8 m。在误码率不超过 FEC 门限的情况下, 5 Gbit/s 和 6 Gbit/s 信号能传输 3.6 m, 7 Gbit/s 信号仅能传输 2.4 m。在传输距离达到 4.2 m 后, 信号误码率都接近于  $10^{-2}$ , 传输数据可靠性无法保证。

### 参考文献:

- [1] Rangan S, Rappaport T S, Erkip E. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3):336-385.
- [2] Pietraski P, Britz D, Roy A, et al. Millimeter wave and terahertz communications: feasibility and challenges[J]. ZTE Communications, 2012, 10(4):3-12.
- [3] Farooq Khan, Jerry Pi. Millimeter wave mobile broadband(MMB): unleashing the 3-300 GHz spectrum[R/OL]. IEEE, 2011[2014-05-20]. <http://wnc2011.ieee-wnc.org/tut/t1.pdf>.
- [4] LI Fan, YU Jian-jun, CAO Zi-zheng, et al. Reducing the peak-to-average power ratio with commanding transform coding in 60 GHz OFDM-ROF systems[J]. Optics Communications, 2012, 4(3):202-209.
- [5] 王文沛, 陈林, 董泽, 等. 40 GHz 光纤无线通信系统中开关键控与正交频分复用信号传输性能的比较[J]. 中国激光, 2010, 37(2):465-470. (WANG Wen-pei, CHEN Lin, DONG Ze, et al. Performance comparison between on-off keying and orthogonal frequency division multiplexing signals with 40 GHz radio-over-fiber systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2):465-470.)
- [6] 董泽, 曹子峥, 陈林, 等. 基于 60 GHz 光毫米波的光纤无线传输系统实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(4):1018-1021. (DONG Ze, CAO Zi-zheng, CHEN Lin, et al. Experimental research on a radio-over-fiber system based on 60 GHz millimeter-wave[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4):1018-1021.)
- [7] ZHANG H, Madhoo U. Statistical modeling of fading and diversity for outdoor 60 GHz channels[C]// International Workshop on mm Wave Communications: from Circuits to Networks(mmCom 2010). Chicago, IL:[s.n.], 2010:45-50.
- [8] Ben-Dor E, Rappaport T S, Qiao Y, et al. Millimeter wave 60 GHz outdoor and vehicle AOA propagation measurements using a broadband channel sounder[C]// 2011 IEEE Global Telecommunications Conference(GLOBECOM 2011). Houston, TX, USA:IEEE, 2011:1-6.
- [9] Fuqan M, Jahn M, Stelzer A, et al. A SiGe-based high-gain power amplifier for E-band communication systems[C]// 2013 European Microwave Integrated Circuits Conference(EuMIC). Nuremberg:[s.n.], 2013:149-152.

- [10] Marcus Gavell, Zirath H, Ferndahl M, et al. A linear 70–95 GHz differential IQ modulator for E-band wireless communication[C]// 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT). Anaheim, CA: IEEE, 2010: 788–791.
- [11] Dyadyuk V, Bunton J, Pathikulangara J, et al. A multi-gigabit mm wave communication system with improved spectral efficiency[J]. IEEE Transactions on MTT, 2007, 55(12): 2813–2821.
- [12] Kang M-S, Kim B-S, Kim K S, et al. 16-QAM-based highly spectral efficiency E-band communication system with bit rate up to 10 Gb/s[J]. ETRI Journal, 2012, 34(5): 649–654.
- [13] LI Xin-ying, YU Jian-jun, DONG Ze, et al. Photonics millimeter-wave generation in the E-band(66–88GHz) and bi-directional transmission[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC) 2013. Anaheim, CA: [s.n.], 2013: 1–3.
- [14] LI Xin-ying, DONG Ze, YU Jian-jun, et al. Fiber-wireless transmission system of 108 Gb/s data over 80 km fiber and 2×2 multiple-input multiple-output wireless links at 100 GHz W-band frequency[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5106–5108.
- [15] ZHANG Jun-wen, YU Jian-jun, CHI Nan, et al. Multi-channel 120 Gb/s data transmission over 2×2 MIMO fiber-wireless link at W-Band[J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2013, 25(8): 780–783.
- [16] LI Xin-ying, YU Jian-jun, ZHANG Jun-wen, et al. A 400 G optical wireless integration delivery system[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18812–18819.
- [17] Hirata A, Kosugi T, Takahashi H, et al. 5.8 km 10 Gbps data transmission over a 120 GHz-band wireless link[C]// 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems. Honolulu, HI: [s.n.], 2010: 1–4.
- [18] 邓贤进, 王成, 林长星, 等. 0.14 THz 超高速无线通信系统实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1430–1432. (DENG Xian-jin, WANG Cheng, LIN Chang-xing, et al. Experimental research on 0.14 THz super high speed wireless communication system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1430–1432.)

#### 作者简介:



张自然(1988–), 男, 南昌市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为光与无线融合, 以及高速无线通信系统.email: 12110720058@fudan.edu.cn.

许育铭(1986–), 男, 福建省漳州市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为高速无线通信及光与无线融合系统.

肖江南(1974–), 男, 湖南省衡阳市人, 博士, 研究方向为光传输系统、光 OFDM、光载无线系统、光传输信号处理及信息编码等.

余建军(1968–), 男, 湖南省益阳市人, 博士, 教授, 主要研究方向为传输系统、光 OFDM、光载无线系统、光传输信号处理及信息编码等, 光传输与接入领域国际知名学者, 被 OSA/IEEE JLT、JON 聘为光无线融合领域的特邀评审.