

实现 125.52 Gbit/s PDM-QPSK 信号在光载无线系统中的实时传输

魏怡, 王凯辉, 张宇, 余建军*

复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 光载无线通信(RoF)系统结合了光纤和无线通信的优势,具有大带宽、低损耗、灵活移动等特性,在未来超5G/6G通信网络中有广阔的发展前景。这里实现了传输速率超过100 Gbit/s的偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)信号在基于商用光传送网(OTN)实时处理的RoF系统中的有效传输。分别实验演示了频率为22 GHz、传输速率为125.52 Gbit/s的PDM-QPSK信号在20 km+25 km两跨光纤和频率为60 GHz、传输速率为125.52 Gbit/s的PDM-QPSK信号在20 km+25 km两跨光纤和1 cm无线链路中的传输。结果显示启用开销为15%的软判决前向纠错(SD-FEC)编码可以实现无差错传输。另外,提出在实时处理的RoF系统中采用集成的双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)进行偏振调制的新方法, RoF系统降低了系统复杂度,在未来移动数据通信网络中有很大的应用价值。

关键词 光通信; 实时处理; 光载无线通信; 双极化马赫-曾德尔调制器; 偏振复用正交相移键控

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1506003

Real-Time Transmission of 125.52 Gbit/s PDM-QPSK Signal in Radio-Over-Fiber System

Wei Yi, Wang Kaihui, Zhang Yu, Yu Jianjun*

Key Laboratory of EMW Information, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract A radio-over-fiber (RoF) system combines the advantages of fiber and wireless communication, has the characteristics of large bandwidth, low loss, and flexible mobility, and has broad development prospects in the future beyond 5G/6G communication networks. In this paper, we have realized the effective transmission of polarization-division-multiplexing quadrature-phase-shift-keying (PDM-QPSK) signals with a transmission rate more than 100 Gbit/s in the RoF system based on commercial optical transport network (OTN) real-time processing. Specifically, we respectively demonstrate the transmission of PDM-QPSK signals with a frequency of 22 GHz and a transmission rate of 125.52 Gbit/s in 20 km+25 km two-span fiber and PDM-QPSK signals in 20 km+25 km two-span fiber and 1 cm wireless links with a frequency of 60 GHz and a transmission rate of 125.52 Gbit/s. The results show that if soft-decision forward-error-correction (SD-FEC) coding with a 15% overhead is enabled, error-free transmission can be realized. In addition, we propose a new method for polarization modulation by an integrated dual-polarization Mach-Zehnder modulator (DP-MZM) in the real-time processing. The RoF system reduces system complexity, which has great application value in future mobile data communication networks.

Key words optical communications; real-time processing; radio-over-fiber communication; dual-polarization Mach-Zehnder modulator; polarization-division-multiplexing quadrature-phase-shift-keying

1 引言

光载无线通信(RoF)系统结合了光纤传输容量

大、距离远和无线传输无缝覆盖的优点,是未来宽带移动数据通信的有力解决方案之一^[1-5],可用于需要漫游连接的环境中,如会议中心、机场、酒店,以及最终的家

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2022-01-28; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61935005,61527801,61675048,61720106015,61835002,61805043,6212780022)

通信作者: *jianjun@fudan.edu.cn

庭和小型办公室^[6-7]。为了实现高速 RoF 系统,需要开发无线链路以匹配光纤链路的大传输容量,同时保持比特率和调制格式的透明度。无线毫米波通信系统能够达到 Gbit/s 级的传输容量,并且已在通信领域被深入研究^[8-10]。此外,基于集成光子学技术实现的高速毫米波信号生成、调制和检测有效地促进了无线和光纤网络的无缝集成。在 RoF 系统中引入偏振复用和相干检测技术,可以提高系统传输容量和接收机灵敏度^[11-14]。受电子设备带宽的限制,目前基于实时处理的系统传输容量明显低于离线处理的系统。近几年传输速率超 100 Gbit/s 的毫米波信号在 RoF 系统中的传输被广泛报道^[15-19]。基于高阶正交幅度调制(QAM)、各种多维复用技术和先进的数字信号处理(DSP)技术的 RoF 系统,在 D 波段的传输速率已经超过 1 Tbit/s^[20]。文献[21]实验演示了 V 波段(57 GHz)和 W 波段(91 GHz)传输速率为 24.08 Gbit/s 的正交频分复用(OFDM)16QAM 信号在基于实时接收处理的 OFDM RoF 系统中的传输,但传输速率较低。文献[22]实现了超 100 Gbit/s 的偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)信号在基于实时相干外差检测的 RoF 系统中的传输,但该系统中采用了两个马赫-曾德尔调制器(MZM)的并联方式进行信号调制,且只验证了 24 GHz 频段信号性能。

本文通过实验搭建了基于商用光传送网(OTN)设备实时进行发送和接收 DSP 的 RoF 系统,在该系统

中采用了集成的双极化马赫-曾德尔调制器(DP-MZM)用于调制偏振信号,分别实现了频率为 22 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s(净比特传输速率为 109.1 Gbit/s)的 PDM-QPSK 在 20 km 和 25 km 两跨光纤上的传输,以及频率为 60 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s(净比特传输速率为 109.1 Gbit/s)的 PDM-QPSK 在 20 km 光纤、1 cm 无线链路和 25 km 光纤上的传输,当启用了开销为 15% 的软判决前向纠错(SD-FEC)时,均可以实现无差错传输。

2 系统原理

图 1(a)~(c)分别给出了上变频、DP-MZM 和 TOF 之后的毫米波信号频谱示意图。图 1(d)展示了 PDM-QPSK 无线毫米波信号基于 DP-MZM 的光子解调原理。PDM-QPSK 调制的无线毫米波信号经由远程外差拍频技术产生。在发送端中央局(TX CO)处,一个波长为 λ_1 的连续波长(CW)光波首先被发送数据进行外部调制,生成 PDM-QPSK 光基带信号。在发送端基站(TX BS)处,将经光纤传输后的 PDM-QPSK 调制的光基带信号与一个波长为 λ_2 的 CW 光波进行外差拍频,从而通过上变频得到 PDM-QPSK 调制的无线毫米波信号。生成的无线毫米波信号的载波频率 $f_{RF} = c|1/\lambda_1 - 1/\lambda_2|$ (c 代表光速),该信号随后经由一个位于同一天线极化方向的 2×2 多输入多输出(MIMO)无线链路传输。

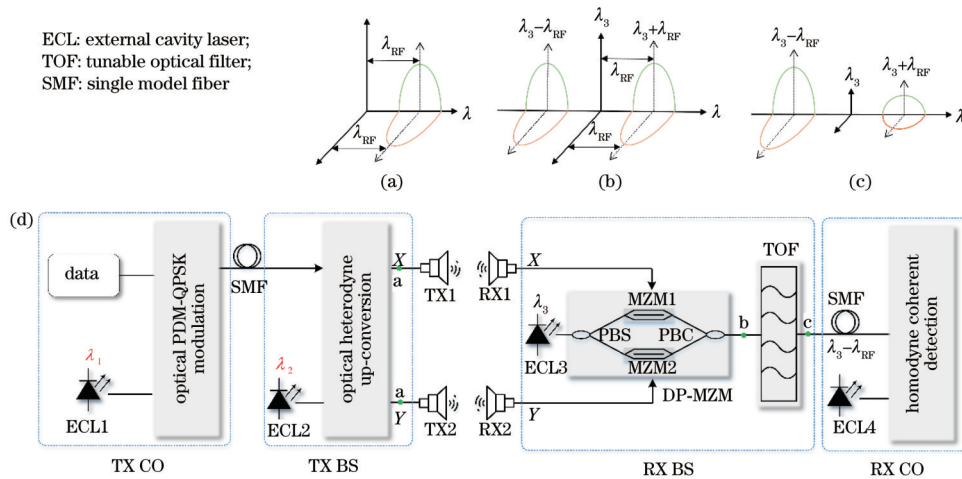


图 1 基于 DP-MZM 的光子解调原理图以及各阶段毫米波信号频谱。(a) 上变频后的无线毫米波信号频谱示意图;(b) 经过 DP-MZM 后的毫米波信号光谱示意图;(c) 经过 TOF 之后的毫米波信号光谱示意图;(d) 基于 DP-MZM 的光子解调原理
Fig. 1 Schematic diagrams of photon demodulation based on DP-MZM and spectra of different stages. (a) Diagram of frequency spectrum of wireless millimeter wave signal after up-conversion; (b) diagram of millimeter wave signal spectrum after DP-MZM; (c) diagram of millimeter wave signal spectrum after TOF; (d) schematic diagram of photon demodulation

在接收端基站(RX BS)处,一个波长为 λ_3 的 CW 光波入射一个 DP-MZM。在该 DP-MZM 中, CW 光波首先经由一个偏振分束器(PBS)被均分成两个支流,每个支流经由一个 MZM 且频率为 f_{RF} 的无线毫米波信号的 X 偏振或 Y 偏振分量进行外部调制。最后由偏振合束器(PBC)重组两个已调的信号并将其输出。

DP-MZM 采用推挽操作并被直流偏置在空点,以实现对外部毫米波信号的电场调制。以一个偏振分量的外部调制为例,推导如下。

假定波长为 λ_3 的 CW 光波可以表示为

$$E_{in}(t) = E_c \cos(2\pi f_c t), \quad (1)$$

式中: E_c 和 f_c 分别表示波长为 λ_3 的 CW 光波的幅度和

频率; t 表示时间。假定在 MZM 的输入端, 载波频率为 f_{RF} 的信号可以表示为

$$S_{RF} = V_{RF}s(t)\cos(2\pi f_{RF}t), \quad (2)$$

式中: $s(t)$ 表示传送的信号; V_{RF} 表示频率为 f_{RF} 的毫米波信号的幅度。因此, 工作在光载波抑制(OCS)点的推挽 MZM 的输出可以表示为

$$E_{MZM}(t) = E_c \cos(2\pi f_c t) \cos\left[\frac{\pi}{2} + \beta_{MZM}s(t)\cos(2\pi f_{RF}t)\right] = -2E_c s(t) \cos(2\pi f_c t) \left\{ \sum_{n=0}^{+\infty} J_{2n+1}(\beta_{MZM}) \sin[(2n+1)(2\pi f_{RF}t)] \right\}, \quad (3)$$

式中: $\beta_{MZM} = \pi(V_{RF}/V_\pi)$ (V_π 是 MZM 的半波电压), 用来表征 MZM 的调制指数; J_n 表征阶数为 n 的第一类贝塞尔函数。当 β_{MZM} 足够小时, MZM 输出中的高阶分量 ($n \geq 1$) 可以忽略, 式 (3) 可以近似为

$$E_{MZM}(t) \approx 2E_c s(t) J_1(\beta_{MZM}) \cos(2\pi f_c t) \cos\left(2\pi f_{RF}t + \frac{\pi}{2}\right) = E_c s(t) \left\{ J_1(\beta_{MZM}) \cos\left[2\pi(f_c - f_{RF})t - \frac{\pi}{2}\right] + J_1(\beta_{MZM}) \cos\left[2\pi(f_c + f_{RF})t + \frac{\pi}{2}\right] \right\}. \quad (4)$$

从式 (4) 中可以看出 MZM 的输出理论上只包含两个均在幅度上携带发送数据的载波频率为 $f_c \pm f_{RF}$ (对应载波波长为 $\lambda_3 \pm \lambda_{RF}$, 其中 λ_{RF} 表示无线毫米波信号波长) 的一阶分量。而在实际中, DP-MZM 调制之后生成的 OCS 信号通常包含两个载波波长为 $\lambda_3 \pm \lambda_{RF}$ 的 PDM-QPSK 调制的边带和一个幅度较小且波长为 λ_3 的中心光载波, 这是因为 MZM 有限的消光比不能够完全抑制中心光载波。接下来, 载波波长为 $\lambda_3 + \lambda_{RF}$ 的上边带和中心光载波被一个 TOF 抑制掉, 于是一个载波波长为 $\lambda_3 - \lambda_{RF}$ 的 PDM-QPSK 调制的等效光基带信号经由光纤传输被送入到接收端中央局 (RX CO) 处。

在接收端 RX CO 处, 基于零差式相干探测和基带 DSP 将发送数据从 PDM-QPSK 调制的等效光基带信号中恢复出来。接收端 RX CO 中所用本振光 (LO) 的工作波长为 $\lambda_3 - \lambda_{RF}$ 。值得注意的是, 接收端 RX BS 处的 TOF 也可以滤除载波波长为 $\lambda_3 - \lambda_{RF}$ 的下边带和中心光载波, 这种情况下生成的等效光基带信号以及

接收端 RX CO 中所用 LO 的载波波长均为 $\lambda_3 + \lambda_{RF}$ 。

3 实验设置及结果分析

3.1 实验设置

图 2 (a) 展示了在 RoF 系统中传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号的实时传输实验装置。在发送端 TX CO 处, 采用商用 OTN 设备输出 31.38 GBaud PDM-QPSK 光基带信号, 频率为 193.5 THz, 输出光功率为 0 dBm。然后 PDM-QPSK 光基带信号在经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 的放大后通过 20 km SMF-28 传输, EDFA 增益大于 37 dB。在发送端 TX BS 处, 外腔激光器 ECL1 产生频率为 193.44 THz 的光载波信号, 将其作为 LO, 与经过 20 km SMF-28 传输的 PDM-QPSK 光信号一起送入 QPSK 光混频器。该混频器由两个 PBS 和两个 90° 光混频器组成, 用于在光域中实现接收光信号和 LO 的偏振分集和相位分集。由于本实验中采用的外差相干

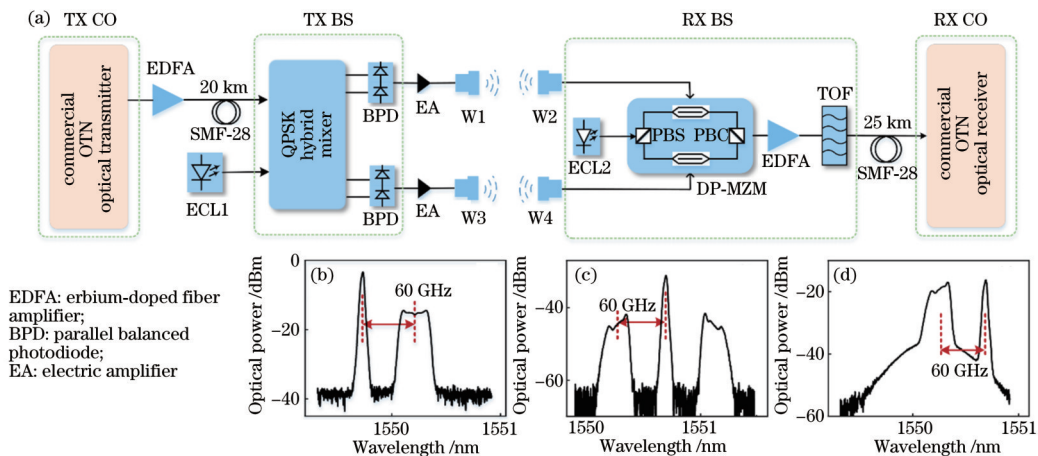


图 2 在 RoF 网络中实时传输 125.52 Gbit/s PDM-QPSK 信号的实验设置图及信号光谱图 (分辨率为 0.02 nm)。(a) 实验设置图; 经过 (b) QPSK 光混频器、(c) DP-MZM 和 (d) 可调谐滤波器滤波后的信号光谱图

Fig. 2 Experimental setup for real-time delivery of 125.52 Gbit/s PDM-QPSK signals in RoF network and signal spectra with 0.02 nm resolution. (a) Experimental setup; signal spectra after (b) QPSK hybrid mixer, (c) DP-MZM, and (d) filtering of tunable filter

检测不需要光相位分集,因此只用到了偏振分集,经过偏振分集后的信号光谱图如图 2(b)所示。接着由两个平衡光电二极管(BPD)分别对两个偏振方向的光信号进行光电探测,产生传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 微波信号。这两路微波信号分别经过电放大器(EA)后进入无线链路,EA 的 3 dB 带宽为 60 GHz,增益为 22 dB。无线传输采用了 2×2 MIMO 无线链路。经过电放大器后的两路 PDM-QPSK 信号分别经由 V 波段传输波导 W1 和 W3 发送。受实验条件的限制,本实验中未采用天线进行无线传输。

在接收端 RX BS 处,经 1 cm 无线传输的 PDM-QPSK 微波信号由波导 W2 和 W4 接收,用于驱动一个 DP-MZM。该调制器集成了一个 PBS、一个 PBC、两个 MZM 和每个极化方向的内置监视器光电二极管。调制器的半波电压为 1.75 V,最大插入损耗为 14.5 dB。外腔激光器 ECL2 发出频率为 193.44 THz 的连续光波,并输入 DP-MZM。调整 DP-MZM 的直流偏置电压使其工作在 OCS 模式,经 DP-MZM 调制后的信号光谱如图 2(c)所示,包含一个被抑制的中心光载波和两个 PDM-QPSK 一阶边带信号。经 EDFA 放大后由 0.6 nm TOF 滤除上边带,图 2(d)为经过 TOF 滤除上边带信号后的光谱图,由于滤波器带宽不足,中心载波并未被完全滤除。经过滤波后的 PDM-QPSK 信号再经过第二段 25 km SMF-28 传输,最后进入接收端 RX CO,由实时处理的 OTN 设备接收。图 2 中的光谱图都是在 0.02 nm 分辨率下测量得到的。

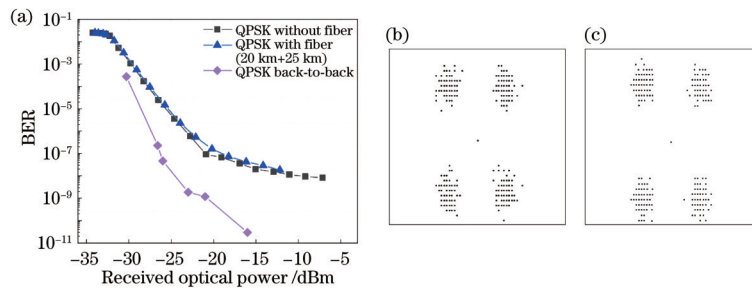


图 3 22 GHz PDM-QPSK 信号实验测试结果。(a) PDM-QPSK 信号的误码率与接收光功率的关系曲线;经实时相干接收机处理后 (b) X 偏振、(c) Y 偏振的 PDM-QPSK 信号星座图

Fig. 3 Experimental test results of 22 GHz PDM-QPSK signal. (a) Relation between BER of PDM-QPSK signal and received optical power; (b) X-polarization and (c) Y-polarization PDM-QPSK signal constellations processed by real-time coherent receiver

图 4 所示为 RoF 系统中频率为 60 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号经过 20 km + 25 km 两跨光纤和 1 cm 2×2 MIMO 无线传输时的情况。图 4(a) 给出了频率为 60 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号在该 RoF 系统中实时传输时,信号误码率与接收光功率的关系曲线。实验结果显示,随着接收信号光功率的增大,误码率逐渐降低。从图中可以看出,频率为 60 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号在该 RoF 系统中的整体误码率偏大,经过 1 cm 无线传输后,系统误码率性能主要受到无线信号的衰减损耗以及无线发送和接

3.2 结果分析

首先,图 3 所示为 RoF 系统中传输频率为 22 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号,在只经过两跨光纤未经过无线传输时的情况。图 3(a)画出了在 RoF 系统中实时传输频率为 22 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号时信号误码率(BER)与接收光功率的关系曲线,分别给出了三种传输情形:1)信号在该 RoF 系统中实时传输,但没有经过前后两跨光纤传输;2)信号在该 RoF 系统中实时传输,且经过发射机后的 20 km 光纤和接收机前的 25 km 光纤的传输;3)实时相干发射机和实时相干接收机直接相连(即背靠背)。从实验结果可以看出,随着接收光功率的增大,信号误码率逐渐减小。与背靠背传输相比,RoF 系统引入了较大的功率惩罚,这主要是受系统中的主要光器件的非线性效应影响,如激光器线宽、相干接收引入的频偏、BPD 的饱和效应、光调制器的滤波效应等。信号经过 20 km + 25 km 两跨光纤传输后误码率变化不大,引入的最大功率代价约为 1.5 dB,这也进一步说明短距离传输中光纤损耗的影响远小于系统本身的影响。图 3(b)为频率为 22 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号在经过 20 km + 25 km 两跨光纤传输且接收信号光功率为 -12.2 dBm 时,在 X 偏振方向恢复后的信号星座图。图 3(c)为频率为 22 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的信号在经过 20 km + 25 km 两跨光纤传输且接收信号光功率为 -12.2 dBm 时 Y 偏振方向恢复后的信号星座图。

收波导中心点位置偏差等因素的影响。但在经过开销为 15% 的前向纠错编码后,传输误码率均为零,这是由于采用的 OTN 实时处理接收机是默认在经过 15% 的前向纠错编码后可以实现无差错传输的,且本文给出的实验结果都是在未经过 15% 的前向纠错编码时的信号误码率,当最终经过 15% 的前向纠错编码后信号的误码率均为零,可以实现无差错传输。另外,测试了载波频率在 60 GHz 附近变化时,传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号的传输性能。图 4 (b)给出了当 RoF 系统载波频率在 59~61 GHz 之间变化时 PDM-QPSK 信号的误码情况,从实验结果来看,

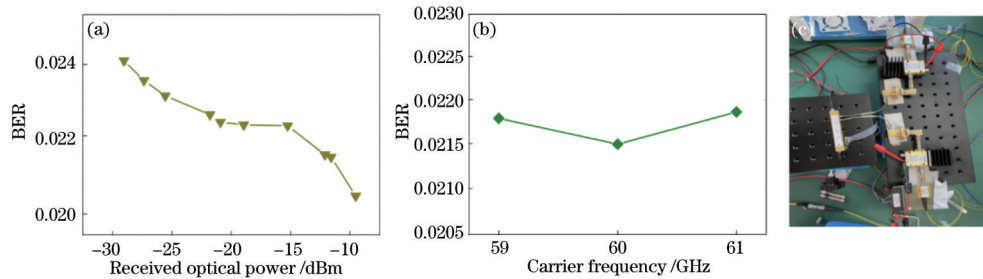


图 4 60 GHz PDM-QPSK 信号实验测试结果。(a) PDM-QPSK 信号 BER 与接收功率的关系曲线;(b) PDM-QPSK 信号 BER 与 RoF 载波频率的关系曲线;(c)无线链路发射和接收端实验图

Fig. 4 Experimental test results of 60 GHz PDM-QPSK signal. (a) Relation between BER of PDM-QPSK signal and received power; (b) relation between BER of PDM-QPSK signal and RoF carrier frequency; (c) experimental diagram of wireless link transmittance and receiving

传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号在 60 GHz 频段附近的传输效果变化不大。

4 结 论

在基于商用 OTN 设备实时处理的 RoF 系统中光调制部分采用集成的 DP-MZM, 简化了采用双 MZM 进行偏振调制的 RoF 系统。具体实验演示了频率为 22 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号在该系统中的传输, 结果显示经过 20 km+25 km 两跨光纤传输前后, 引入的最大功率代价约为 1.5 dB。另外还实现了频率为 60 GHz、传输速率为 125.52 Gbit/s 的 PDM-QPSK 信号在 20 km 光纤、1 cm 无线链路和 25 km 光纤上的传输。在启用开销为 15% 的软判决前向纠错编码后, 两种情况均可以实现无差错传输。但由于在本实验中无线传输采用的是传输波导发射和接收, 且无线接收端未经过大功率放大器的放大, 所以无线传输距离较短, 若无线传输中采用增益天线发送和接收, 并采用大功率放大器进行放大, 则预估的无线传输距离可达到 3 km。

参 考 文 献

- [1] Yu J J. Photonics-assisted millimeter-wave wireless communication[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(6): 17303945.
- [2] Dixit A. Architectures and algorithms for radio-over-fiber networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(5): 535-544.
- [3] Dat P T, Kanno A, Umezawa T, et al. Millimeter- and terahertz-wave radio-over-fiber for 5G and beyond[C]// 2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 10-12, 2017, San Juan, PR, USA. New York: IEEE Press, 2017: 165-166.
- [4] 刘安良, 殷洪玺, 吴宾, 等. 光载无线通信系统射频信号相移特性研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0506003.
Liu A L, Yin H X, Wu B, et al. Phase-shift characteristics of radio frequency signals for radio over fiber transmission systems[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0506003.
- [5] 李韦萍, 孔森, 石俊婷, 等. ROF 系统中基于单个调制器的多射频操作[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1106002.
Li W P, Kong M, Shi J T, et al. Multiple radio frequency operation based on a modulator in a radio-over-fiber system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1106002.
- [6] Wake D, Webster M, Wimpenny G, et al. Radio over fiber for mobile communications[C]//2004 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, October 4-6, 2004, Ogunquit, ME, USA. New York: IEEE Press, 2004: 157-160.
- [7] Nirmalathas A, Wang K, Lim C, et al. Multi-gigabit indoor optical wireless networks: feasibility and challenges [C]//2016 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 11-13, 2016, Newport Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 130-131.
- [8] Yu J J, Jia Z S, Yi L, et al. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 265-267.
- [9] Li X Y, Dong Z, Yu J J, 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.
- [10] Roh W, Seol J Y, Park J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 106-113.
- [11] Chen M, Xiao X, Yu J J, et al. Real-time generation and reception of OFDM signals for X-band RoF uplink with heterodyne detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(1): 51-54.
- [12] Fan S L, Cao C Q, Zeng X D, et al. A RoF system based on polarization multiplexing and carrier suppression to generate frequency eightfold millimeter-wave[J]. Results in Physics, 2019, 12: 1450-1454.
- [13] 李韦萍, 孔森, 余建军. 基于偏振复用光调制器产生 PDM-16QAM 射频信号[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2306002.
Li W P, Kong M, Yu J J. Generation of PDM-16QAM

- radio frequency signal based on a polarization multiplexing optical modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306002.
- [14] Kong M, Zhou W, Ding J J, et al. Simultaneous generation of wired and wireless signals using a DP-MZM in a RoF system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(15): 905-908.
- [15] Fice M J, Rouvalis E, van Dijk F, et al. 146-GHz millimeter-wave radio-over-fiber photonic wireless transmission system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1769-1774.
- [16] Puerta R, Yu J J, Li X Y, et al. Single-carrier dual-polarization 328-Gb/s wireless transmission in a D-band millimeter wave 2×2 MU-MIMO radio-over-fiber system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 587-593.
- [17] Li X Y, Xu Y M, Yu J J. Over 100-Gb/s V-band single-carrier PDM-64QAM fiber-wireless-integration system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 16383037.
- [18] Li X Y, Yu J J. Generation and heterodyne detection of >100 -Gb/s Q-band PDM-64QAM mm-wave signal [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 27-30.
- [19] 余建军. 宽带太赫兹通信技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- Yu J J. *Broadband terahertz communication technologies* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [20] Li X Y, Yu J J, Zhao L, et al. 1-Tb/s photonics-aided vector millimeter-wave signal wireless delivery at D-band [C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 17856314.
- [21] Li X Y, Xiao X, Xu Y M, et al. Real-time demonstration of over 20 Gbit/s V- and W-band wireless transmission capacity in one OFDM-RoF system[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017: 16930150.
- [22] Wang C, Li X Y, Zhao M M, et al. Delivery of 138.88 Gpbs signal in a RoF network with real-time processing based on heterodyne detection[C]//2020 Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 19591838.