

# 基于单个光调制器的有线和单边带无线服务

李韦萍<sup>1,2</sup>, 孔淼<sup>1,2</sup>, 王演祎<sup>1,2</sup>, 余建军<sup>1,2</sup>

(1. 复旦大学通信科学与工程系, 上海 200433; 2. 复旦大学上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200433)

**摘要:** 为了在混合型传输网络中为用户提供更加灵活而便利的服务, 提出了一种采用单个光调制器同时提供有线和单边带无线服务的系统。通过结合双极化二进制相移键控调制器、相位调节器等器件的应用, 直接产生有线和单边带无线信号, 抑制色散引起的走离效应, 并成功实现 10 Gbit/s 有线信号和承载于 40 GHz 毫米波上的 5 Gbit/s 单边带无线信号在 65 km 单模光纤中的有效传输。实验结果表明, 偏振复用技术和光副载波复用等技术的应用使信号在传输速率和性能上有了更大的提升, 并将在未来宽带通信网中发挥重要作用。

**关键词:** 双极化二进制相移键控调制器; 单边带; 偏振复用技术; 光副载波复用技术

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2020202

## Wired and single sideband wireless service based on a single optical modulator

LI Weiping<sup>1,2</sup>, KONG Miao<sup>1,2</sup>, WANG Yanyi<sup>1,2</sup>, YU Jianjun<sup>1,2</sup>

1. Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

2. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

**Abstract:** In order to provide more flexible and convenient service for users in the hybrid transmission network, a novel system using a single optical modulator to provide wired and single side band (SSB) wireless signal was proposed. By combining the application of dual-polarization binary phase shift keying modulator (DP-BPSK), phase shifter and other devices, wired and SSB wireless signals were directly generated to suppress the walk-off effect caused by dispersion, and the effective transmission of 5 Gbit/s SSB wireless signal carried on 40 GHz millimeter wave and 10 Gbit/s wired signal over 65 km single-mode fiber (SMF) were successfully achieved. The experiments show that the application of polarization multiplexing technology and optical subcarrier multiplexing technology can make the signal have a greater improvement in transmission rate and performance, and play an important role in the future broadband communication network.

**Key words:** DP-BPSK modulator, single side band, polarization multiplexing technology, optical subcarrier multiplexing technology

## 1 引言

未来宽带通信网络发展的方向是为用户提供及时、灵活和高速可靠的信息服务, 在此过程中无

线通信和光纤通信扮演着重要的角色, 并且两者可以实现互补。光纤通信带宽容量大, 但灵活性不足。无线通信理论上可实现广域无缝覆盖, 但容易受到各种干扰的影响, 且当前的无线频谱资源非常有

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61935005, No.61922025, No.61527801, No.61675048, No.61835002, No.61805043); 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流基金资助项目 (No.61720106015)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61935005, No.61922025, No.61527801, No.61675048, No.61835002, No.61805043), The Fund for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (No.61720106015)

限。为了满足各种新兴业务的快速发展, 光纤-无线通信 (RoF, radio over fiber) 平衡了光纤和无线通信技术并将二者有效结合<sup>[1-15]</sup>, 可以满足未来宽带通信网络对灵活性和大带宽的需求。

RoF 系统中, 有线和无线混合型的传输网络可以为用户提供更加灵活便利的服务, 因此混合型的传输网络一直是 RoF 系统研究的热点之一<sup>[5-10]</sup>。Martinez 等<sup>[5]</sup>提出了一种解决方案, 通过调节双驱动马赫曾德尔调制器 (DD-MZM, dual-driver Mach-Zehnder modulator) 两臂上的相位来产生幅度不同的基带信号以及射频信号, 然而这种方法只适用于相同的有线和无线数据, 不能独立传输不同的有线和无线数据。Bakaul 等<sup>[6]</sup>在密集型光波复用系统中使用复合激光源以及阵列波导光栅同时提供 2 种服务, 然而系统结构复杂, 限制了操作的灵活性和集成的便捷性。Jia 等<sup>[7]</sup>提出了一种仅使用单个 DD-MZM 的方案, 有线信号和无线信号分别驱动 DD-MZM 的两臂, 在无线链路调制中使用光副载波复用技术, 而在中心载波上调制有线信号进行基带传输。该方案系统简单且灵活性高, 然而无线链路调制产生的双边带在光纤传输过程中会受到走离效应的影响, 使传输距离受到限制; 其次有线信号和无线信号的混合传输在光电探测器 (PD, photodetector) 中导致相互串扰的问题。在使用级联或者并行马赫曾德尔调制器 (MZM, Mach-Zehnder modulators) 的系统方法中<sup>[8-10]</sup>, 虽然可以同时提供有线和无线服务, 但是系统的传输速率最高仅为 1.25 Gbit/s, 且系统采用了多个重要的电光设备, 集成度较差。

针对上述问题, 本文提出了一种使用双极化二进制相移键控 (DP-BPSK, dual-polarization binary phase shift keying) 调制器, 同时提供有线和单边带 (SSB, single side band) 无线服务的 RoF 系统, 并通过实验验证了该系统的可行性, 成功实现了 10 Gbit/s 的有线信号和承载于 40 GHz 毫米波上的 5 Gbit/s 单边带 (SSB, single side band) 无线信号在 65 km 单模光纤 (SMF, single-mode fiber) 中的有效传输。本文通过工作在推免模式下的子调制器以及相位调节器 (PS, phase shifter) 可直接生成 SSB 信号, 抑制走离效应<sup>[11]</sup>, 增强系统的抗色散能力, 在远距离传输中更有优势。偏振复用技术的应用使无线和有线信号分别在 2 个完全正交的偏振方向上传输, 避免了在 PD 中的串扰。相比于其他方案, 系统简单, 集成度高, 在传输速率和性能上有了较大的

提升, 将在未来宽带通信网中发挥重要作用。

## 2 有线和 SSB 无线信号融合传输的 RoF 系统原理

图 1 展示了本文提出的基于 DP-BPSK 调制器同时提供有线和 SSB 无线服务的系统原理与偏振光频谱。该系统的关键器件为 DP-BPSK 调制器, 其主要由一个偏振分束器 (PBS, polarization beam splitter)、2 个子 DD-MZM (DD-MZM<sub>1</sub> 和 DD-MZM<sub>2</sub>) 以及一个偏振合束器 (PBC, polarization beam coupler) 组成。该调制器为集成光器件, 具有结构紧凑、可调参量多等特点, 在 RoF 系统中得到了广泛使用。

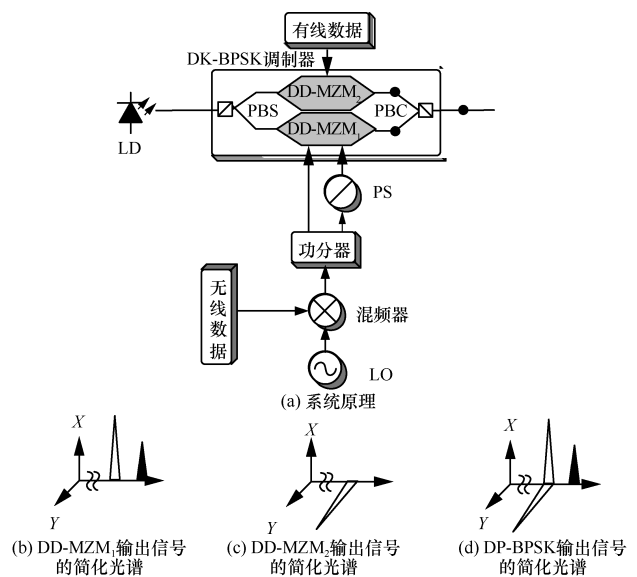


图 1 系统原理与偏振光频谱

系统的工作原理如下。激光器 (LD, laser diode) 发出的光波注入 DP-BPSK 调制器, PBS 将输入光波分成 2 个相互正交的偏振方向 ( $X$ 、 $Y$ ) 后分别进入 2 个子调制器。在  $X$  偏振方向上, DD-MZM<sub>1</sub> 进行无线链路的调制传输, 在  $Y$  偏振方向上, DD-MZM<sub>2</sub> 进行有线链路的调制传输。

无线链路端的工作过程如下。本地振荡器 (LO, local oscillator) 产生所需的无线频段电载波, 混频器将基带无线信号和电载波进行混频以实现无线信号的副载波调制, 信号经过功分器后分为两路, 其中一路经 PS 进行相位调节, 最终两路射频信号保持  $90^\circ$  的相位差驱动 DD-MZM<sub>1</sub>。DD-MZM<sub>1</sub> 双臂驱动, 工作在推免模式下对信号进行强度调制, 设置直流偏置电压差为  $\frac{V_\pi}{2}$ , 同时保持两路射频信号的相位差为

90°, 可在  $X$  偏振方向上产生载波和正一阶边带, 简化的光频谱如图 1(b)所示。

有线链路端的工作过程如下。DD-MZM<sub>2</sub> 单臂驱动, 在正交点上偏置,  $Y$  偏振方向上实现光载波调制基带有线信号, 简化的光频谱如图 1(c)所示。调制后的无线和有线信号通过 PBC 耦合输出, 输出信号的简化频谱如图 1(d)所示。

这样, 利用一个 DP-BPSK 调制器实现了有线和单边带无线信号的融合传输, 而且无线信号和有线信号加载在 2 个相互正交的光偏振方向上, 因此在光电探测器中没有任何的串扰。

LD 产生的光载波为

$$E_{in}(t) = E_0 e^{j\omega t}$$

其中,  $E_0$  表示光载波的振幅,  $\omega$  表示角频率。

基带数据信号为

$$D(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k g(t - kT_D)$$

其中,  $a_k$  为第  $k$  个符号的电平值 (0 或 1),  $T_D$  为码元周期,  $g(t)$  为信号的码元波形<sup>[16]</sup>。驱动 DD-MZM<sub>1</sub> 的两路射频信号分别为

$$v_1(t) = V_{RF}(t)D(t) = V_{RF} \cos \omega_{RF} t \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k g(t - kT_D) \quad (1)$$

$$v_2(t) = V_{RF}(t)D(t) = V_{RF} \cos(\omega_{RF} t + \theta) \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k g(t - kT_D) \quad (2)$$

其中,  $V_{RF}$ 、 $\omega_{RF}$ 、 $\theta$  分别为射频的电压幅度、频率以及它们之间的相位差。

假设 DD-MZM<sub>1</sub> 双臂工作时消光比无穷大, 两臂平衡度为 1, DD-MZM<sub>1</sub> 的输出光信号为<sup>[17-18]</sup>

$$E_x(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left( \frac{1}{2} E_{in} e^{j\phi_1} + \frac{1}{2} E_{in} e^{j\phi_2} \right) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{in} \cos\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) e^{j\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_1 + \Delta\phi_1 = \phi_1 + \pi \frac{v_1(t)}{V_\pi} \\ \phi_2 &= \phi_2 + \Delta\phi_2 = \phi_2 + \pi \frac{v_2(t)}{V_\pi} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $V_\pi$  为半波电压,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为 2 个直流偏置所引起的相移,  $\Delta\phi_1$  和  $\Delta\phi_2$  分别为信号  $v_1(t)$  和  $v_2(t)$  所引起的相位变化值,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为两调制臂上光信号的总相移。

结合式(1)和式(2), 为更直观地展现频率分量, 在表达式中省略  $D(t)$ , 则 DD-MZM<sub>1</sub> 的输出光信号为

$$E_x(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_{in} e^{j\phi_2} \left[ e^{j\Delta\phi + j\beta_1 \cos(\omega_{RF} t)} + e^{j\beta_1 \cos(\omega_{RF} t + \theta)} \right] \quad (5)$$

其中,  $\beta_1 = \frac{\pi V_{RF}}{V_\pi}$  为 DD-MZM<sub>1</sub> 的调制指数,  $\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2|$  为直流偏置带来的相位差。

SSB 调制下 (本文实验中抑制负一阶边带), 设置直流偏置电压差为  $\frac{V_\pi}{2}$ , 使  $\Delta\phi = \frac{(2k+1)\pi}{2}$ , 调节 PS 使  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , 并利用贝塞尔方程展开式<sup>[19]</sup>处理, 小信号情况下忽略高阶分量。

$$E_x(t) \approx \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left[ J_0(\beta_1) e^{j\omega t + j\frac{\pi}{4}} - J_1(\beta_1) e^{j(\omega + \omega_{RF})t} \right] \quad (6)$$

其中, 等式右侧第一项表示光载波, 第二项表示正一阶边带。

如果信号的调制方式选择为双边带 (DSB, double side band), 则 DD-MZM<sub>1</sub> 的输出光信号为

$$E_x(t) \approx \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \cdot \left[ J_0(\beta_1) e^{j\omega t + j\frac{\pi}{4}} - J_1(\beta_1) e^{j(\omega + \omega_{RF})t} - J_{-1}(\beta_1) e^{j(\omega - \omega_{RF})t} \right] \quad (7)$$

其中,  $\omega + \omega_{RF}$  和  $\omega - \omega_{RF}$  分别为上下 2 个边带的频率, 在光纤中传输时由于光纤色度色散的影响, 不同的频率分量传输速度不同, 将会产生不同的时延。由频率为  $\omega + \omega_{RF}$  的光边带和频率为  $\omega - \omega_{RF}$  的光边带所承载的信号码元边沿会逐渐走离而错开, 2 个信号的同步传输遭到破坏, 造成误码率和符号间干扰增加, 影响系统的可靠性。而通过调节直流偏置电压和射频信号相位差, 直接产生的 SSB 调制只有一个光边带承载基带数据就可以避免这个问题。

在  $Y$  偏振方向上, DD-MZM<sub>2</sub> 单臂工作, 基带信号直接加载到光载波上, DD-MZM<sub>2</sub> 的输出为

$$E_y(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{j\omega t + \beta_2 + \phi_3} \quad (8)$$

其中,  $\beta_2 = \frac{\pi V_{BB}}{V_\pi}$  代表 DD-MZM<sub>2</sub> 的调制指数,  $V_{BB}$  为基带信号电压幅度,  $\phi_3$  为调制臂上所加直流偏置带来的相位改变。

结合式(6)和式(8), DP-BPSK 调制器的输出为

$$\mathbf{E}_{out}(t) = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \begin{bmatrix} J_0(\beta_1) e^{j\omega t + j\frac{\pi}{4}} - J_1(\beta_1) e^{j(\omega + \omega_{RF})t} e^{j\omega t + \beta_2 + \phi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3 实验装置及结果

基于 DP-BPSK 调制器同时提供有线和 SSB 无线服务的实验系统装置如图 2 所示。分布反馈式激光器 (DFB-LD, distributed feedback laser diode) 输出光载波注入 DP-BPSK 调制器 (型号 FTM7981EDA), 该调制器半波电压为 3.5 V, 插入损耗为 6 dB, 3 dB 带宽为 30 GHz。

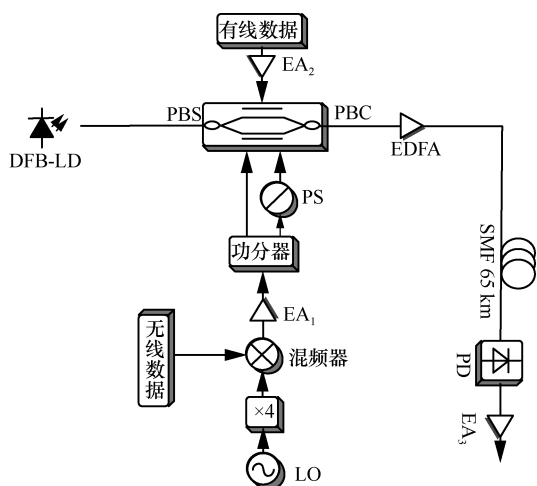


图 2 实验系统装置

无线链路的具体工作过程如下。LO 发射 10 GHz 的正弦波，通过倍频器转换为 40 GHz 的电毫米波。信号发生器输出一串伪随机基带二进制序列作为无线信号，字长为  $2^{23} - 1$ ，峰峰值为  $0.5 V_{pp}$ ，速率为 5 Gbit/s。然后 5 Gbit/s 的无线信号与电毫米波在混频器中进行混频，接着被增益为 30 dB、频率工作范围为 0~50 GHz 的 EA<sub>1</sub> 放大。放大后的信号经过功分器和 PS，最终以 90° 的相位差来驱动 DD-MZM<sub>1</sub>。

有线链路的具体工作过程如下。信号发生器输出一串伪随机基带二进制序列，速率为 10 Gbit/s，其余数据特征与无线链路相同。有线信号被增益为 30 dB、频率工作范围为 0~40 GHz 的 EA<sub>2</sub> 放大后直接驱动 DD-MZM<sub>2</sub>。

DD-MZM<sub>1</sub> 双臂驱动工作，设置两臂直流偏置电压差为  $\frac{V}{2}$ ，同时保持两路射频信号的相位差为 90°，可在 X 偏振方向上产生载波和正一阶边带，

边带与载波的间隔为 40 GHz，使用正一阶边带传输 5 Gbit/s 的无线信号。DD-MZM<sub>2</sub> 单臂驱动工作，电压设置在正交偏置点，在 Y 偏振方向上，使用光载波传输 10 Gbit/s 的有线信号。DP-BPSK 调制器耦合输出的偏振复用信号被掺铒光纤放大器 (EDFA, Erbium doped fiber amplifier) 放大后进入 65 km 的 SMF 传输，光信号入射到 3 dB 带宽为 75 GHz 的 PD，并通过外差拍频被转换为电信号。电信号通过频率工作范围为 0~40 GHz 的 EA<sub>3</sub> 进行放大，最后进入 3 dB 带宽为 62 GHz、采样速率为 160 GSa/s 的实时采样示波器 (OSC, oscilloscope) 中。

使用分辨率为 0.01 nm 的光谱分析仪观察 DP-BPSK 调制器耦合输出的有线和 SSB 无线混合信号光谱，如图 3 所示。中央谱峰表征光载波分量，左侧为正一阶边带，右侧为受抑制的负一阶边带，正一阶边带和负一阶边带之间的边带抑制比约为 14 dB。如果优化 DD-MZM<sub>1</sub> 2 个调制臂上输入射频的相位和电功率，则可以进一步增强该抑制能力。

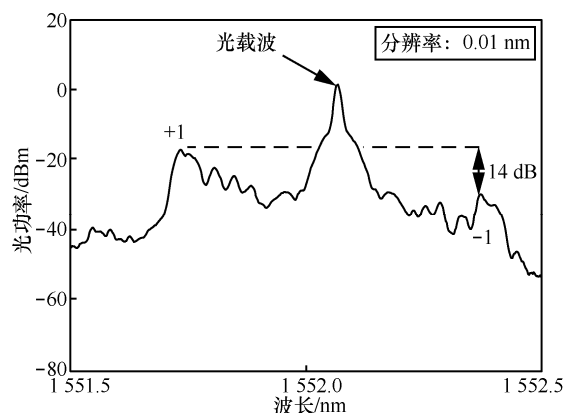


图 3 有线和 SSB 无线混合信号的光谱

图 4 是有线和无线信号经背靠背 (BTB, back to back) 或 65 km SMF 传输后的眼图，眼图仪扫描速率为 20 ps/div，BTB 表征不经光纤传输。可以看出，10 Gbit/s 有线信号经 65 km SMF 传输后的眼图只是稍微闭合，依然保持了良好的性能。而 5 Gbit/s 无线信号、有线和无线混合信号经 65 km SMF 传输后引入了更多噪声，眼图出现模糊。下面，测算有线和无线信号传输后的具体性能表现。

为了验证传输信号的质量，在不同的接收光功率下测量系统的误码率 (BER, bit error rate)。对 BER 进行对数运算，以更加直观地展示 BER 变化趋势。图 5 为 10 Gbit/s 基带有线信号在 BTB 和 65 km SMF 这 2 种传输情况下的 BER 与 PD 输入光功率

的关系。可以看出，在 BTB 传输下，当 PD 的输入光功率高于  $-13$  dBm 左右时，有线信号的 BER 小于硬判决前向纠错 (HD-FEC, hard-decision forward error correction) 的 7% 阈值  $3.8 \times 10^{-3}$ ，随着 PD 输入光功率的逐渐增强，误码率逐渐优化。另外，信号经过 65 km SMF 传输后，几乎没有引入功率代价。

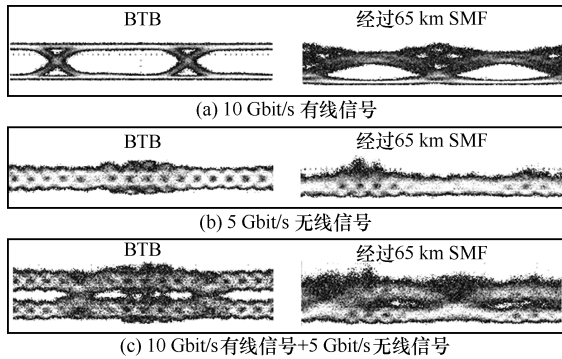


图4 有线和无线信号的眼图

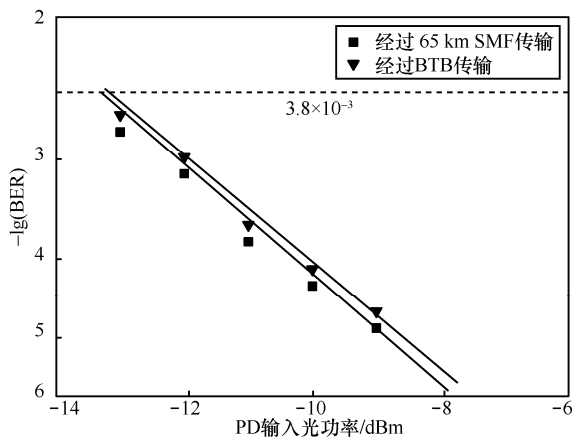


图5 10 Gbit/s 有线信号误码率与 PD 输入光功率的关系

图6为5 Gbit/s无线信号在BTB和65 km SMF这2种传输情况下的BER与PD输入光功率的关系。可以看出，在BTB传输条件下，当PD的输入光功率高于 $-5$  dBm左右时，BER小于HD-FEC阈值 $3.8 \times 10^{-3}$ 。而经过65 km SMF传输之后，功率补偿约为2 dB。主要原因如下：1) 正负边带间的抑制比为14 dB，负一阶边带虽然受到了抑制，但它的存在仍然会和正一阶边带产生走离效应；2) 所得SSB信号载边比(载波和边带的功率比值)较大，大部分光功率在接收端的PD处转换为直流信号，仅有一部分转换为所需的射频信号。这也是下一步研究需要解决的问题。

#### 4 结束语

有线和无线混合型的传输可以满足下一代光

接入网的要求，采用 DP-BPSK 调制器提供有线和 SSB 无线服务的系统方案灵活简单、集成度高。本文理论推导了该调制器的调制过程，并对系统的可行性进行了实验验证。实验中通过调节输入射频信号的相位差、DP-BPSK 调制器上的偏置电压等，实现有线和 SSB 无线信号的产生和传输。利用偏振复用技术，将无线和有线信号加载在 2 个相互正交的光偏振方向上，因此在光电探测器中没有任何的串扰。实验结果显示，10 Gbit/s 有线信号在 65 km SMF 中的有效传输几乎不会引入任何功率代价，而承载于 40 GHz 毫米波上的 5 Gbit/s 单边带无线信号在 65 km SMF 中传输时，其功率代价值仅为 2 dB。对比相关文献可知，本文创新性地利用单个 DP-BPSK 调制器实现有线信号和 SSB 无线信号的产生和传输，并实现的最高传输速率。

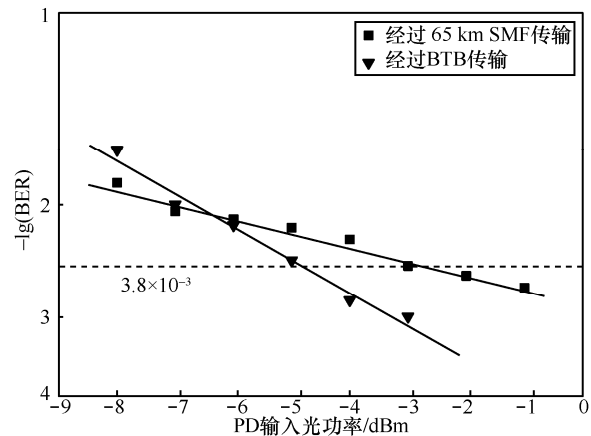


图6 5 Gbit/s 无线信号误码率与 PD 输入光功率的关系

#### 参考文献:

- [1] BOHATA J, ZVANOVEC S, PESEK P, et al. Experimental verification of long-term evolution radio transmissions over dual-polarization combined fiber and free-space optics optical infrastructures[J]. Applied Optics, 2016, 55(8): 2109-2116.
- [2] SU T, ZHENG J Y, WU Z L, et al. Bidirectional multiband radio-over-fiber system based on polarization multiplexing and wavelength reuse[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9772-9776.
- [3] WU B L, ZHU M, ZHANG J W, et al. Multi-service RoF links with colorless upstream transmission based on orthogonal phase-correlated modulation[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18323-18329.
- [4] ZHENG J Y, LU F, XU M, et al. Photonics-assisted microwave mixing and direct detection for dual-polarization and SCM based UDWDM-PON[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington: OSA Publishing, 2015: 56.
- [5] MARTINEZ A, POLO V, MARTI J. Simultaneous baseband and RF optical modulation scheme for feeding wireless and wireline heterogeneous access networks[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 2018-2024.

- [6] BAKAUL M, NIRMALATHAS A, LIM C, et al. Hybrid multiplexing of multiband optical access technologies towards an integrated DWDM network[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21): 2311-2313.
- [7] JIA Z S, YU J J, CHOWDHURY A, et al. Simultaneous generation of independent wired and wireless services using a single modulator in millimeter-wave-band radio-over-fiber systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1691-1693.
- [8] ZHANG L, HU X F, CAO P, et al. Simultaneous generation of independent wired and 60-GHz wireless signals in an integrated WDM-PON-RoF system based on frequency-sextupling and OCS-DPSK modulation[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 14648-14655.
- [9] JI W, CHANG J. Design of WDM-RoF-PON for wireless and wire-line access with source-free ONU's[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(2): 127-133.
- [10] XIANG Y, CHEN C, ZHANG C F, et al. Wired/wireless access integrated RoF-PON with scalable generation of multi-frequency MMWs enabled by polarization multiplexed FWM in SOA[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1218-1225.
- [11] MA J X, YU J, YU C X, et al. Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3244-3256.
- [12] 董泽, 曹子峥, 陈林, 等. 60 GHz 全双工 OFDM-RO 系统的实验研究[J]. 通信学报, 2011, 32(2): 72-76.  
DONG Z, CAO Z Z, CHEN L, et al. Experiment on a full-duplex OFDM radio-over-fiber system with 60 GHz optical millimeter wave[J]. Journal on Communications, 2011, 32(2): 72-76.
- [13] LI W P, LIU J X, ZOU P, et al. Geometrically shaped 16-APSK modulations in Internet of vehicles system based on automotive headlight[C]//Optical Fibers, Fiber-based Devices and Applications. Washington: OSA Publishing, 2019: 4.
- [14] 李韦萍, 孔淼, 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, (2020-07-30) [2020-08-28].  
LI W P, KONG M, SHI J T, et al. Multiple radio frequency operation based on a modulator for RoF system[J]. Chinese Journal of Lasers, (2020-07-30) [2020-08-28].
- [15] 李韦萍, 孔淼, 石俊婷, 等. 基于单个光调制器产生多路无线和有线信号[J]. 光学学报, (2020-07-23) [2020-08-28].  
LI W P, KONG M, SHI J T, et al. Generation of multiple path wireless and wireline signals based on a single optical modulator[J]. Journal of the Optical, (2020-07-23) [2020-08-28].
- [16] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
FAN C X, CAO L N. Principles of communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [17] CARTLEDGE J C, ROLLAND C, LEMERLE S, et al. Theoretical performance of 10 Gbit/s lightwave systems using a III-V semiconductor Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(2): 282-284.
- [18] CARTLEDGE J C. Performance of 10 Gbit/s lightwave systems based on lithium niobate Mach-Zehnder modulators with asymmetric Y-branch waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(9): 1090-1092.
- [19] 叶其孝, 沈永欢. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
YE Q X, SHEN Y H. Handbook of practical mathematics[M]. Beijing: Science Press, 2006.

## [作者简介]



李韦萍 (1994- ), 男, 河南泌阳人, 复旦大学博士生, 主要研究方向为光生毫米波技术、太赫兹通信等。



孔淼 (1995- ), 男, 山东烟台人, 复旦大学博士生, 主要研究方向为高速光纤传输、光生毫米波技术等。



王演祎 (1991- ), 男, 贵州遵义人, 复旦大学博士生, 主要研究方向为矢量毫米波、光载无线等。



余建军 (1968- ), 男, 湖南益阳人, 博士, 复旦大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高速光纤传输、光生毫米波技术、太赫兹通信等。