

# 直调与外调型微波光子链路线性度的实验研究

陈华, 邹喜华\*, 于歌, 卢冰

西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 611756

**摘要** 理论研究了直接调制与外调制模式下的微波光子链路的线性度,以直调激光器为核心器件的直接调制型短距离微波光子链路具有明显优势。着重开展实验研究,采集和分析两种调制模式下的信号,获得关键性能参数,包括链路损耗、线性动态范围(CDR)和无杂散动态范围(SFDR)。比较了不同长度光纤传输下的动态范围,发现直接调制型微波光子链路过 10 km 光纤传输后性能显著下降。此外,纳入直调激光器线宽、啁啾因素,实验研究了不同长度光纤下色散的影响。结果显示,直接调制型短距离微波光子链路具有高线性度的优势。

**关键词** 光通信;微波光子链路;线性度;直调激光器;外调制

**中图分类号** TN913.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201845.1106002

## Experimental Study on Linearity of Microwave Photonic Link with Direct Modulation or External Modulation

Chen Hua, Zou Xihua\*, Yu Ge, Lu Bing

Center for Information Photonics and Communications, School of Information Science and Technology,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China

**Abstract** The linearity of microwave photonic link with direct modulation mode or external modulation mode is theoretically studied. The direct modulation short-range microwave photonic link, which is used direct modulation laser as the core device, has obvious advantages in linearity. Then the experiments are carried out to obtain key performance parameters through analysis of acquired signals under the two modulation modes, including the link loss, compression dynamic range (CDR) and spurious free dynamic range (SFDR). The dynamic ranges of fiber links with different lengths are compared, and the performance of the microwave photonic link with direct modulation drops significantly after the 10-km optical fiber transmission. In addition, considering the linewidth and chirp of directly modulated laser, dispersion effects for fiber links with different lengths are studied experimentally. The result shows that the microwave photonic link with direct modulation has high linearity for short-distance transmission.

**Key words** optical communications; microwave photonic link; linearity; directly modulated laser; external modulation

**OCIS codes** 060.4510; 060.4080; 060.4370

## 1 引言

融合微波和光波的微波光子技术可以实现微波信号的高速处理和宽带传输<sup>[1]</sup>。作为微波光子技术的主干方向,微波光子链路具有大带宽、小体积、小质量、低损耗、抗电磁干扰等显著优势,这些优势使其在越来越多的领域中得到了广泛应用,如雷达、智能交通、遥感探测等<sup>[2-3]</sup>。根据发射端对微波信号的

不同调制方式,微波光子链路的基本模式分为两种:直接调制与外调制。针对两种调制模式下微波光子链路的性能研究历来是学者们的关注热点。1987年,Stephens等<sup>[4]</sup>测量了直调链路的性能参数,理论分析了外调链路的相关参数。Cox等<sup>[5]</sup>于1990年推导了直调链路和外调链路的小信号模型,定义参数增量调制效率,用于比较两种模式链路的性能。2012年,Cseh等<sup>[6]</sup>分别进行了基于分布反

收稿日期:2018-03-15;修回日期:2018-06-04;录用日期:2018-06-22

基金项目:国家863计划(2015AA016903)、国家自然科学基金(61378008)、四川省国际科技合作重大项目

\* E-mail: zouxihua@swjtu.edu.cn

馈激光器(DFB)和垂直腔面发射激光器(VCSEL)的直调链路的对比研究、基于马赫-曾德尔调制器(MZM)和半导体光放大器(SOA)的外调链路的对比研究。2015年, Khwandah等<sup>[7]</sup>利用矢量调制格式的信号对两种模式链路进行了仿真,通过比较误差矢量幅度证明了外调链路的优势。2018年, Kim等<sup>[8]</sup>利用直调激光器和电吸收调制激光器设计了光载无线(ROF)通信系统;直调激光器的啁啾和光纤色散之间的相互作用引起复合二阶失真,而外调模式的性能主要受到电吸收调制激光器相对较差的线性度和低输出功率的限制。另外,国内外学者们还分别研究两种模式以优化链路性能,如提出性能更好的直调激光器和外调制器。2017年, Zheng等<sup>[9]</sup>实验证明了一种放大反馈的DFB,其调制带宽高达19 GHz,并且基于该DFB的背靠背(BTB)链路的无杂散动态范围(SFDR)测量值为 $102.8 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ ; Jin等<sup>[10]</sup>提出了一种利用MZM内部量子阱结构非线性的线性化量子阱MZM,基于该MZM的BTB链路的SFDR测量值可以达到 $117 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 。上述研究中的外调制器若无明确说明都采用的是MZM,本文则采用可以实现零啁啾特性的推挽式MZM<sup>[11]</sup>。本文结合理论与实验对两种模式链路进行研究,在对直调和外调型微波光子链路作理论研究时忽略光纤、光电探测器(PD)等的非线性影响,主要考虑发射端的非线性失真和光纤的色散特性,因此实验过程主要是针对不同模式下发射端的性能进行研究,其他条件尽可能保持一致。实验测量了两种模式链路在不同长度光纤传输下的性能参数与频率响应。通过实验测量动态范围与光纤色散,研究两种模式链路的线性度。

## 2 基本原理

典型的微波光子链路由发射端、传输链路、接收端等部分组成。根据发射端调制方式的不同,微波光子链路主要有两类:直接调制型和外调制型微波

种模式下的微波光子链路都采用广泛的强度调制直接探测(IMDD)。

在直调链路中,将数字或模拟信号直接作为激光器驱动电流(如控制半导体激光器的注入电流),从而使激光器的输出光强度得到调制。调制的光信号经过光纤传输后,由PD转换得到电信号。通常,半导体激光器的输出光功率-注入电流( $PI$ )的特性曲线是非线性的<sup>[12]</sup>,如图1(a)所示。该曲线可以理想地描述为

$$P_{\text{out}_D} = \begin{cases} 0, & I(t) < I_{\text{th}} \\ s_{\text{LD}} [I(t) - I_{\text{th}}], & I_{\text{th}} \leq I(t) \leq I_{\text{sat}} \\ s_{\text{LD}} (I_{\text{sat}} - I_{\text{th}}), & I(t) > I_{\text{sat}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I(t) = I_{\text{bias}} + I_{\text{sig}}(t)$ 为直调激光器的注入电流, $I_{\text{bias}}$ 为直流偏置电流, $I_{\text{sig}}(t) = A(t) \cos \omega_m t$ 为调制电流, $\omega_m = 2\pi f_m$ , $A(t)$ 、 $\omega_m$ 、 $f_m$ 分别为调制电流的包络幅值、角频率、频率; $I_{\text{th}}$ 为阈值电流; $I_{\text{sat}}$ 为饱和电流; $s_{\text{LD}}$ 为注入电流与激光器的输出光功率呈线性关系时的斜率。只有施加 $I_{\text{bias}}$ 使激光器工作在PI曲线的线性区,才能显著提高调制效率和线性度。但是,当注入电流小于 $I_{\text{th}}$ 或者大于 $I_{\text{sat}}$ 时,输出光功率不再与注入电流呈线性关系,即形成非线性失真。根据(1)式,其中的线性部分可以表示为

$$P_{\text{out}_D} = s_{\text{LD}} [I_{\text{bias}} - I_{\text{th}} + I_{\text{sig}}(t)] = P_{\text{bias}} + s_{\text{LD}} A(t) \cos \omega_m t, \quad (2)$$

式中: $P_{\text{bias}} = s_{\text{LD}} (I_{\text{bias}} - I_{\text{th}})$ 为平均功率。

不同于直接调制,外调链路需要借助一个独立的调制器。目前使用较多的调制器是MZM。在外调发射端,非线性失真主要来源于MZM,其传输函数可以表示为

$$P_{\text{out}_E} = \frac{P_i}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{\pi V(t)}{V_\pi} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: $P_{\text{out}_E}$ 和 $P_i$ 分别为MZM的输出、输入光功率; $V_\pi$ 为MZM的半波电压; $V(t)$ 为调制器臂上的偏置电压, $V(t) = V_{\text{bias}} + V_{\text{sig}}(t)$ , $V_{\text{bias}}$ 为直流偏置电

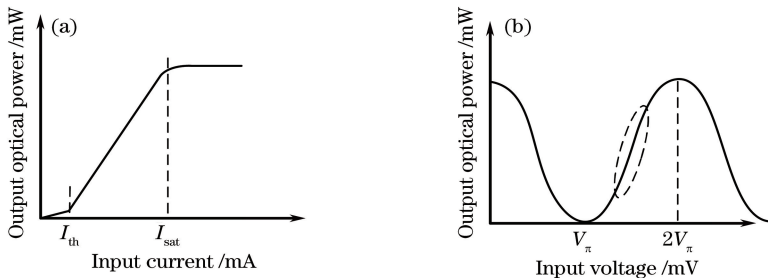


图1 两种调制器的传输函数。(a)直调激光器的PI曲线;(b)MZM的传输函数

Fig. 1 Transfer functions of two modulators. (a) PI curve of the directly modulated laser; (b) transfer function of MZM

压,  $V_{\text{sig}}(t)$  为调制电压,  $V_{\text{sig}}(t) = B(t) \cos \omega_m t$ ,  $B(t)$  和  $\omega_m$  分别为调制电压的包络幅值和角频率。如图 1(b) 所示, 当  $V_{\text{bias}} = k \cdot V_{\pi}/2$  ( $k = 1, 3, 5, \dots$ ) 时, 调制器的直流偏置电压位于正交偏置点, 具有最佳的线性调制且在理论上没有偶次谐波失真, 其输出功率为

$$P_{\text{out,E}} = \frac{P_i}{2} \left\{ 1 + \sin \left[ \frac{\pi}{V_{\pi}} B(t) \cos \omega_m t \right] \right\} = \frac{P_i}{2} \left\{ 1 + \frac{\pi}{V_{\pi}} B(t) \cos \omega_m t - \frac{\left[ \frac{\pi}{V_{\pi}} B(t) \right]^3}{3!} \cos^3 \omega_m t + \frac{\left[ \frac{\pi}{V_{\pi}} B(t) \right]^5}{5!} \cos^5 \omega_m t - \dots \right\}, \quad (4)$$

式中:  $\cos^3 \omega_m t = (\cos 3\omega_m t + 3\cos \omega_m t)/4$ ;  $\cos^5 \omega_m t = (\cos 5\omega_m t + 5\cos 3\omega_m t + 10\cos \omega_m t)/16$ 。

在链路的接收端, 调制的光信号  $P_{\text{out}}$  经过平方率探测直接得到输出电流

$$I_{\text{out}} = TR_{\text{PD}} P_{\text{out}}, \quad (5)$$

式中:  $T$  为包括链路中各器件的插入损耗、传输损耗等的链路总损耗;  $R_{\text{PD}}$  为 PD 的响应度。

由(2)式和(4)式可知, 经过直接调制与外调制两种模式产生的光信号中都有新的频率分量生成, 并且可以观察得到直调链路的线性度更佳。此外, 对于单信道系统, 当光纤的输入功率较小时, 可以忽略光纤的非线性效应, 只考虑光纤的色散特性<sup>[13]</sup>。直调激光器的注入电流的变化会引起有源区载流子密度的起伏进而导致折射率改变, 使得光信号的中

心波长发生一定偏移, 造成频率啁啾。所以一般而言, 直调激光器的线宽、啁啾等性能比外调链路中使用的半导体激光器更差。因此, 色散特性也会是影响直调链路的一个重要因素。

### 3 实验结果

为了验证发射端的非线性失真和光纤色散的影响, 本课题组开展了相关的实验研究。首先, 搭建不同长度光纤传输下的直调和外调型微波光子链路, 测量链路的性能参数; 然后通过测量链路的频率响应得到两种模式下不同长度光纤对信号产生的影响, 该影响以色散为主。直调与外调型微波光子链路的基本原理框图分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 实验装置如图 2(c) 所示, 其中 LD 为激光器, DM laser 为直调激光器, RFA 为射频放大器, OSC 为实时示波器, AWG 为任意波形发生器。在直调链路中, 直流电压源(DCS)、微波信号输入(RF<sub>in</sub>)模块分别提供直流偏置电流和调制电流, 一起作为直调激光器的注入电流。直调激光器的输出光信号经过可调谐光衰减器(VOA)进入光纤, 最后连接到 PD 进行光电转换得到微波输出信号。在外调链路中, 激光器的输出光信号作为光载波经过偏振控制器(PC)进入 MZM, 将 DCS、RF<sub>in</sub> 模块分别提供的直流偏置电压和调制电压共同施加到 MZM, 完成光信号调制。MZM 的输出调制光信号经过 VOA 进入光纤最后接入 PD, 转换成微波信号。

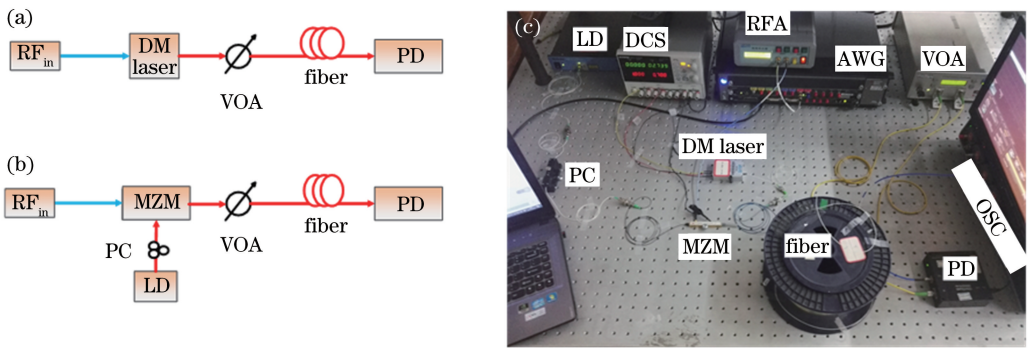


图 2 两种调制模式的理论框图和实验装置。(a)直接调制基本原理框图;(b)外调制基本原理框图;(c)实验装置  
Fig. 2 Theoretical diagram and experimental device for two modulation modes. (a) Schematic of direct modulation; (b) schematic of external modulation; (c) experimental setup

#### 3.1 链路关键参数测量

为比较直调与外调链路的线性度, 首先测量了两种模式下的不同长度光纤传输的微波光子链路的关键性能参数, 包括链路损耗、线性动态范围

(CDR)和 SFDR。这些参数与链路的线性度性能密切相关, 因此通过比较性能参数可以对两者之间的线性度有一个直观的比较。

在实验中, 为了比较两种模式的微波光子链路,

将直调链路中激光器的中心波长为 1550.08 nm、调制带宽为 10 GHz 的直调激光器的直流偏置电流设置为线性度较好的位置 (55 mA), 其输出功率约为 10.4 dBm; 将外调链路中激光器的中心波长、输出功率分别设置为 1550.08 nm 和 10.4 dBm; 设置调制带宽为 20 GHz 的 MZM 的直流偏置电压, 使其位于正交偏置点。并且通过 VOA 的调谐设置两种模式链路在相关场景下的功率: BTB 链路中, PD 的输入功率为 0 dBm; 光纤链路中, 光纤的入射功率为 1 dBm。另外, 由于光纤的非线性效应主要是由光纤纤芯中的功率密度过大引起的, 在实验中光纤的入射功率都设置为 1 dBm, 所以针对光纤主要考虑损耗和色散特性。

在微波光子链路中, 输入单音调制微波信号 (如图 2 所示, AWG 提供 10 GHz 的微波信号), 测量计算直调链路和外调链路的链路损耗。在外调链路中, 测得 PC 和 MZM 的插入损耗约为 7 dB, 根据上文的实验设置, 外调链路中 VOA 的衰减量要比直调链路的小 7 dB。在搭建的实验结构中, 两种模式链路的链路噪声底  $P_{out}$  都约为 -145 dBm (频谱分析仪分辨率带宽设置为 1 Hz)。图 3 为两种模式 BTB 链路的链路损耗比较, 图中 DML 代表直调链路, EML 代表外调链路, 横坐标为输入微波信号的功率, 纵坐标为 PD 探测得到的输出微波信号的基频功率, 计算得到直调和外调链路的链路损耗的测量值分别为 29 dB 和 21 dB。直调链路的链路损耗大于外调链路, 但是考虑到外调链路中 PC 和 MZM 的插入损耗约为 7 dB, 直调链路的链路损耗应小于外调链路。同时观察图 3 可见, 随着输入射频信号的功率增大, 外调链路先出现了功率饱和现象。参考图 3 中的插图, 两种模式链路在测量范围内都出现了 1 dB 的压缩点。外调链路的 1 dB 压缩点出现在输入微波功率为 8 dBm 处, 直调链路的 1 dB 压缩点出现在 14 dBm 处。根据 CDR 的定义<sup>[14]</sup>, 外调、直调链路的 CDR 分别为 132 dB 和 130.5 dB。

表 1 不同光纤长度传输的两种模式链路的链路损耗和 CDR

Table 1 Link loss and CDR of two modes links with different fiber lengths

Link	DML loss /dB	EML loss /dB	Direct modulation	External modulation
			CDR /dB	CDR /dB
BTB link	29	21	130.5	132
1 km link	31	20	128	132
6 km link	32	22	127	131
10 km link	31	24	124	130

引入不同长度光纤得到两种模式链路的链路损耗和 CDR 的比较结果, 如表 1 所示。直调和外调链路在不同长度光纤传输下的链路损耗稳定, 且直调链路大于外调链路; 外调链路在不同长度光纤传输下的 CDR 稳定, 但直调链路在 10 km 光纤传输下的 CDR 有明显下降, 且直调链路的 CDR 都小于外调链路。若考虑外调链路中的 PC 和 MZM 的插入损耗, 则直调链路在链路损耗和 CDR 上是优于外调链路的。

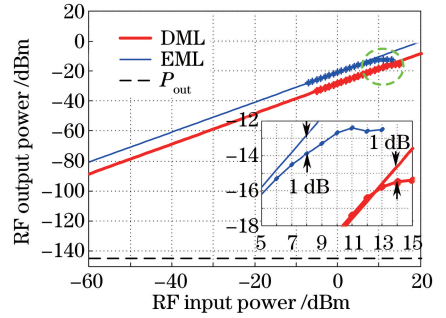


图 3 两种模式 BTB 链路的链路损耗比较。插图为出现功率饱和现象的局部放大

Fig. 3 Comparison of the link losses of the BTB links under the two modes. The inset is an expansion near the power saturation

在微波光子链路中, 输入双音调制微波信号, 与链路损耗测量实验的唯一不同之处在于 AWG 提供 10 GHz 和 10.05 GHz 的双音信号, 测量计算直调链路和外调链路的 SFDR。如图 4 所示, 两种模式下基频 (星号标记) 的小信号功率响应斜率都为 1, SFDR 也就等于三阶互调失真 (IMD3, 三角形标记) 功率为  $P_{out}$  时基频与  $P_{out}$  的功率比值, 即信号的信噪比。由此得到 BTB 场景下的直调链路和外调链路的 SFDR 的测量值分别为  $102 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$  和  $97 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 。引入不同长度光纤得到两种模式链路的 SFDR 的比较情况, 如表 2 所示。外调链路在不同长度光纤传输下的 SFDR 稳定, 但直调链路在 10 km 光纤传输下的 SFDR 有显著下降, 且直调链路的 SFDR 都大于外调链路。



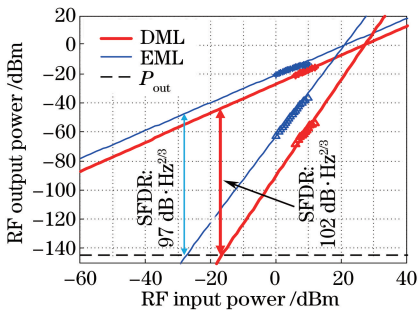


图 4 两种模式 BTB 链路的 SFDR 比较  
Fig. 4 Comparison of SFDR of the BTB links under two modes

综合分析上述三个性能参数的测量比较过程,一致得到:外调链路在不同长度光纤传输下性能稳定;当考虑到外调链路中的 PC 和 MZM 的插入损耗(7 dB)时,直调链路在链路损耗、CDR 以及 SFDR 上都是优于外调链路的。然而在 10 km 光纤传输下,直调链路在 CDR 和 SFDR 上都有明显下降,由此可知短距离直调型微波光子链路在线性度上具有优势。

表 2 不同光纤长度传输的两种模式链路的 SFDR

Table 2 SFDR of two modes links with different fiber lengths

Link	DML SFDR / (dB · Hz <sup>2/3</sup> )	EML SFDR / (dB · Hz <sup>2/3</sup> )
BTB link	102	97
1 km link	101	99
6 km link	100	98
10 km link	94	99

### 3.2 链路色散影响测量

上述性能参数的比较表明直调链路的线性度更佳,但是外调制中的半导体激光器在线宽、啁啾等方面都优于直调激光器。根据器件参数可知,直调链路中的直调激光器的线宽为 2 MHz,外调链路中的激光器的线宽为 1 kHz;另外,由于微波信号直接加载到直调激光器上,其啁啾一般比激光器严重。因此,在直调链路中,直调激光器的线宽、啁啾会加剧光纤色散,产生更加复杂的失真现象。在这里,针对两种模式链路,使用矢量网络分析仪(VNA, MS4645B)测得 0(即 BTB),1,6,10 km 光纤链路的频率响应。将 VNA 输出的功率为 0 dBm 的扫频信号加在链路发射端上,然后将经 PD 光电转换得到的微波信号输入到 VNA 进行信号分析。

图 5 和图 6 分别给出了直调和外调模式下的 BTB 链路、1 km 光纤、6 km 光纤、10 km 光纤的频率响应。在图 6 中,当只考虑光纤色散时,曲线光滑且其变化趋势符合双边带调制信号下的光纤色散影响规律<sup>[13]</sup>。反之,观察图 5 可见,链路频率响应受光纤长度的影响较大,分析表明这由是光纤色散对直调模式下的调制光信号的影响所致。并且,在图 5(d)中,15~20 GHz 范围内信号出现的增益正是由啁啾对色散的补偿带来的。进一步而言,直调模式下的光纤色散影响曲线的平坦度并不佳,这是受直调激光器参数(如线宽、啁啾等)影响的结果。

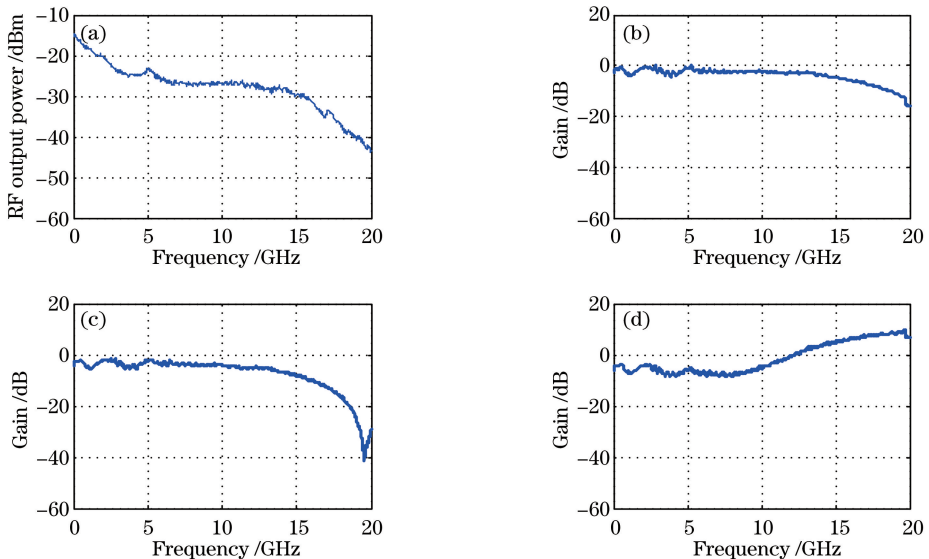


图 5 直调模式下不同光纤长度传输的频率响应。(a) BTB 链路;(b) 1 km 光纤;(c) 6 km 光纤;(d) 10 km 光纤

Fig. 5 Frequency responses under direct modulation with different fiber lengths.

(a) BTB link; (b) 1 km fiber; (c) 6 km fiber; (d) 10 km fiber

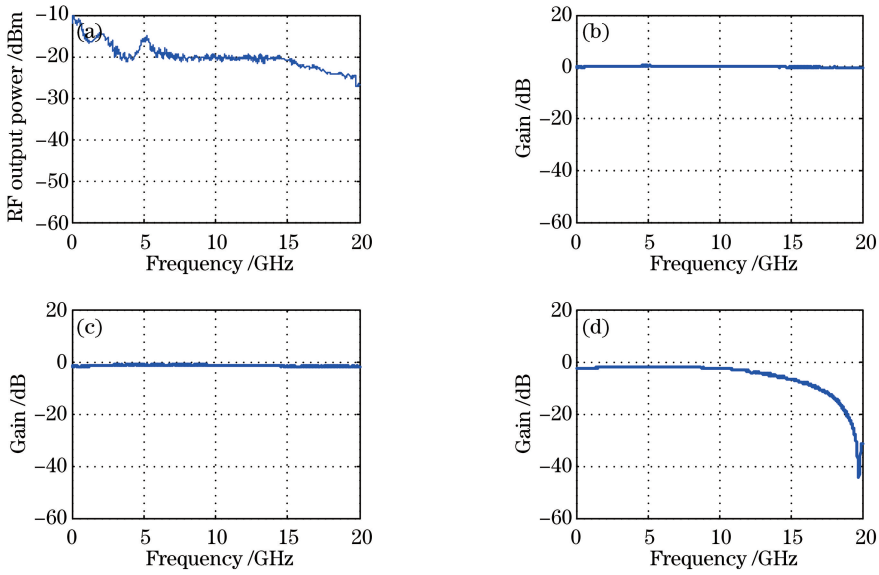


图 6 外调模式下不同光纤长度传输的频率响应。(a) BTB 链路;(b) 1 km 光纤;(c) 6 km 光纤;(d) 10 km 光纤

Fig. 6 Frequency responses under external modulation with different fiber lengths.

(a) BTB link; (b) 1 km fiber; (c) 6 km fiber; (d) 10 km fiber

## 4 结 论

理论和实验研究了直调和外调型微波光子链路的发射端非线性失真,探讨了光纤色散对链路的影响。通过比较两种模式下的关键性能参数(链路损耗、CDR、SFDR)以及比较不同长度光纤传输下的链路频率响应可知,直接调制型短距离微波光子链路在线性度上具有明显优势。此外,直接调制还具有成本低、易实现,且便于光子集成的优点;但其弱点是调制带宽较小,同时激光器的线宽大、啁啾效应大,现已有相关研究对直调激光器的性能加以优化<sup>[15-16]</sup>。

## 参 考 文 献

[1] Yao J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.  
 [2] Minasian R A. Ultra-wide band and adaptive photonic signal processing of microwave signals [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52(1): 1-13.  
 [3] Benítez J, Bolea M, Mora J. Demonstration of multiplexed sensor system combining low coherence interferometry and microwave photonics [J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12182-12187.  
 [4] Stephens W, Joseph T. System characteristics of direct modulated and externally modulated RF fiber-optic links [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(3): 380-387.  
 [5] Cox C H, Betts G E, Johnson L M. An analytic and

experimental comparison of direct and external modulation in analog fiber-optic links [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990, 38(5): 501-509.

[6] Cseh T, Bercei T, Udvary E, *et al.* Optical transmission of OFDM m-QAM RF signals: comparison of direct and external modulations [C] // IEEE International Conference on Transparent Optical Networks, July 2-5, 2012, Coventry, UK. New York: IEEE, 2012: 1-5.  
 [7] Khwandah S A, Cosmas J P, Glover I A, *et al.* Direct and external intensity modulation in OFDM RoF links [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 1-10.  
 [8] Kim B G, Bae S H, Kim H, *et al.* RoF-based mobile fronthaul networks implemented by using DML and EML for 5G wireless communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(14): 2874-2881.  
 [9] Zheng J L, Zhao G W, Zhou Y T, *et al.* Experimental demonstration of amplified feedback DFB laser with modulation bandwidth enhancement based on the reconstruction equivalent chirp technique [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-8.  
 [10] Jin S L, Xu L T, Manzur T, *et al.* Quantum well Mach-Zehnder intensity modulator with enhanced linearity for direct detection RF photonic link [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(17): 3785-3790.  
 [11] Chen H W, Peters J D, Bowers J E. Forty Gb/s

- hybrid silicon Mach-Zehnder modulator with lowchirp [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1455-1460.
- [12] Agrawal G P, Dutta N K. *Semiconductor lasers*[M]. New York: Springer US, 2013.
- [13] Gliese U, Norskov S, Nielsen T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, 44(10): 1716-1724.
- [14] Li X H, Yang C, Chong Y H, *et al.* High dynamic range microwave photonic link based on dual-wavelength dual-parallel modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0105003.  
李向华, 杨春, 崇毓华, 等. 基于双波长双并联调制的大动态范围微波光子链路[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105003.
- [15] Li Y J, Zong N, Peng Q J. Characteristics and progress of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050006.  
李玉娇, 宗楠, 彭钦军. 垂直腔面发射半导体激光器的特性及其研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050006.
- [16] Wang Q, Guo J J, Chen W, *et al.* Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101004.  
王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0101004.