

# 实验演示 100 Gbaud Delta-Sigma 调制信号 O 波段传输

杨雄伟, 魏怡, 龙健宇, 余建军\*

复旦大学信息科学与工程学院通信科学与工程系, 上海 200433

**摘要** 为了解决传输高阶正交幅度调制(QAM)信号时的非线性损伤问题,提出了一种基于Delta-Sigma调制(DSM)的高阶QAM传输系统。通过采用1-bit量化的DSM,成功将携带有高阶QAM的离散多音调制(DMT)信号量化编码为开关键控(OOK)信号,实现了高阶QAM信号在O波段强度调制/直接检测(IM/DD)系统中的传输。由于DSM拥有较高的量化信噪比,系统最高支持满足软判决 $2.4 \times 10^{-2}$ 阈值的4096QAM信号的传输。特别地,通过采用预均衡技术,成功实现了50/100 Gbaud DSM信号分别在O波段的50/15 km的传输。实验演示了高速DSM信号在O波段的传输系统,为高阶QAM信号在IM/DD链路的传输提供了解决方案,同时也为未来基于DSM技术的高速移动前传方案设计提供了参考。

**关键词** 光通信; Delta-Sigma调制; 移动前传; 强度调制/直接检测

**中图分类号** TN929.11

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230765

## 1 引言

随着短视频、高清视频以及虚拟现实应用的兴起,互联网流量激增,对现有的通信网络提出了新的挑战<sup>[1]</sup>。即使第5代移动通信(5G)已经考虑将24 GHz以上的毫米波频段用作通信频段,但面对持续增长的网络流量,需要更多的频谱资源来满足未来的通信需求。毫米波拥有丰富的频谱资源,因此,已经有很多人在光载射频的通信架构下,基于光子辅助毫米波通信技术实现了高速的无线通信,极大地缓解了宽带接入网的压力<sup>[2-11]</sup>。然而,这也对目前的移动前传(MFH)方案提出了新的挑战,如在支持更高的调制格式方面和系统架构方面。

在模拟光载无线(A-ROF)通信系统中,对于MFH需要的高保真度传输,研究者提出采用角调制的方式来实现频谱扩展,从而实现线路非线性损伤的容忍度以及信噪比(SNR)的增强<sup>[12]</sup>。由于在链路中直接进行传输的是模拟信号,因此具有较高的频谱效率,但同时也导致了对光电/电光转换以及链路的非线性损伤较为敏感。另外,链路中通常需要数模转换器(DAC)、混频器以及功放等设备,这些设备大多价格昂贵且耗电。相比于A-ROF系统,另外一种技术是数字光载无线(D-ROF)系统。在D-ROF通信架构中,

MFH接口如通用公共无线电接口(CPRI),通常采用量化编码的方式来实现高保真度的传输。在基带处理单元(BBU)中,传输的模拟信号被量化编码为二进制序列通过光纤进行传输,接收端通过串并转换以及DAC实现模拟信号的恢复,从而在射频拉远单元(RRU)进行传输。由于链路中传输的信号是量化编码的二进制序列,因此可以实现高保真度的传输。量化编码在实现高保真度传输的同时导致了较低频谱效率,并且接收端需要DAC。这对于需要布置大量微基站来满足毫米波全面覆盖需求的5G通信来说是一件令人担忧的事情<sup>[13]</sup>。目前,许多研究人员已经将Delta-Sigma调制(DSM)技术应用在MFH中,大量的研究表明,DSM技术可以在实现高保真度传输的同时也实现相对较高的频谱效率<sup>[14-20]</sup>。例如,CPRI接口15-bit的采样位宽意味着至少需要15倍的过采样,而DSM技术在10倍过采样时就可以提供约30 dB的量化SNR并支持1024QAM信号的移动前传。另外,基于DSM技术的MFH方案,结构上较为简单。发射端可以用脉冲模式发生器(PPG)生成DSM量化编码后的数字信号,接收端利用滤波器就可以完成模拟信号的恢复,不需要DAC等设备。带通或高通的DSM方案也支持将中频的模拟信号直接量化编码为数字幅度电平进行传输,接收端采用带通或高通的滤波器可

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-04-26; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(618350026, 1935005)

通信作者: \*jianjun@fudan.edu.cn

以完成中频信号的恢复。因此 RRU 可以简化射频源以及混频器等装置,这对于毫米波的 MFH 方案十分有益。文献[20]中,研究者提出了作为 SNR 频谱效率的度量函数  $R(\text{SNR})$ ,定义为目标 SNR 所需带宽与传输信号带宽的比值。同时指出 DSM 技术可以作为 D-ROF 与 A-ROF 技术的平衡点,即在一定的  $R(\text{SNR})$  范围内,DSM 技术可以实现较高的频谱效率。因此,面对新兴应用对网络速率以及容量持续增长的需求,有必要开展基于 DSM 的高速 MFH 实验,研究宽带 DSM 信号的传输性能。

本文实验演示了 100 Gbaud DSM 信号在 O 波段强度调制/直接检测(IM/DD)系统中的传输。通过采用 1-bit 量化的 DSM,成功将携带着高阶正交幅度调制(QAM)的离散多音调制(DMT)信号量化为开关键控(OOK)信号进行传输,有效解决了传输高阶 QAM 信号时的非线性损伤问题,接收端利用低通滤波就可恢复原始的 DMT 信号。通过采用预均衡技术,有效解决了器件带宽限制的问题,成功实现了 50/100 Gbaud DSM 信号在 O 波段 50/15 km 的传输。

## 2 数字信号处理和实验装置

图 1 展示了发送端和接收端的数字信号处理

(DSP)流程框图。发射端(TX)伪随机序列(PRBS)产生的数据进行 QAM 符号的映射,然后串并转换进行快速傅里叶逆变换(IFFT)长度为 256 的 DMT 调制。由于量化编码的原因,不需要考虑峰均比过高的问题,因此有效子载波数量设置为 127,对称的子载波用于放置共轭复数。IFFT 操作后,执行并串转换以及 10 倍的过采样。过采样后的数据送入 1-bit 量化的 DSM 调制器,量化编码为 DSM-OOK 信号。图 1(a)是 DMT 和 DSM 信号的功率谱,图 1(b)是 DMT 和 DSM 信号的波形,可以发现,量化噪声被成功地挤出了信号的带宽范围外,并且 DMT 信号的时域波形被编码为 OOK 信号。由于要进行 100 Gbaud 的传输实验,因此发射端还需要进行预均衡以解决器件带宽限制的问题。

在接收端(RX),接收的 OOK 信号进行离线 DSP。OOK-DSP 包括下采样、重定时、恒模算法(CMA)与判决反馈最小均方误差(DD-LMS)。对 DSP 后的 OOK 信号进行符号判决与同步,然后利用低通滤波滤除量化噪声,恢复出原始的 DMT 信号。经过下采样后进行 DMT 信号的解调,恢复出来的 QAM 信号用于计算误码比特率(BER)与误差矢量幅度(EVM)。

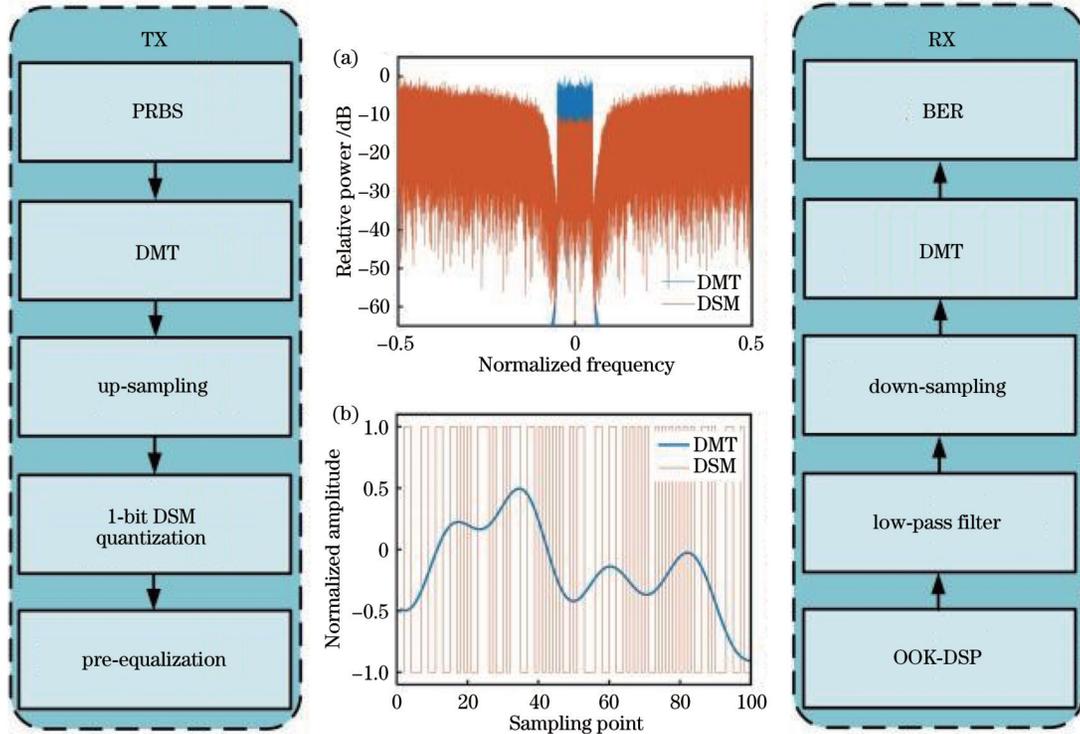


图 1 DSP 流程框图。(a)DMT 与 DSM 信号的功率谱;(b)DMT 与 DSM 信号的时域波形

Fig. 1 Flow chart of DSP. (a) Power spectra of DMT and DSM signals; (b) time domain waveforms of DMT and DSM signals

图 2 展示了实验装置,发射端离线 DSP 生成的 DSM-OOK 信号送入任意波形产生器(AWG)(Keysight M8194A)产生基带电信号,然后经过电放大器(SHF S804B)放大后用于驱动 3 dB 带宽为

25 GHz 的强度调制(IM)器(FTM7938EZ),IM 偏置在正交偏置点。为了实现宽带 DSM 信号在 IM/DD 链路的传输,实验进行 O 波段的传输以避免色散引起的功率衰落。直接调制激光器(DML)产生波长为

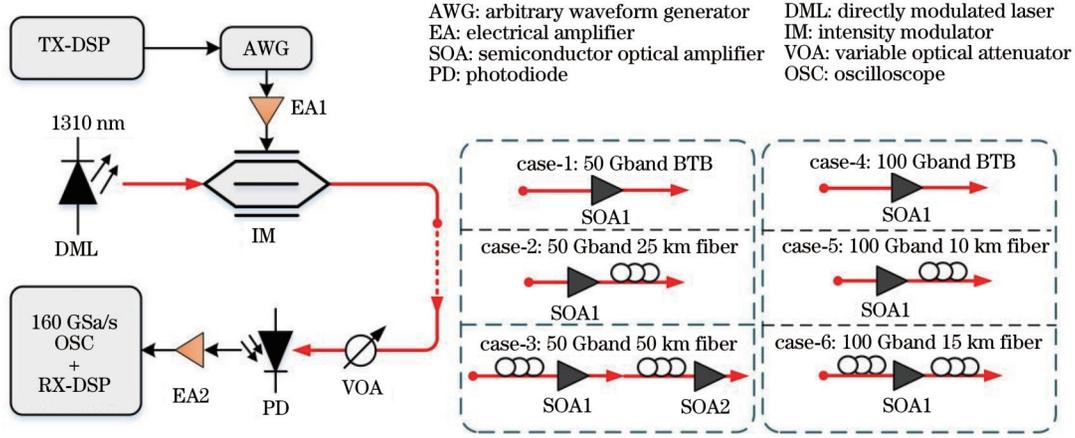


图 2 IM/DD 传输系统的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of IM/DD transmission system

1310 nm 的光波用作光载波,通过 IM 后产生基带光信号。由于调制器工作波长不匹配的原因,13 dBm 输入的光功率调制后只有 -5 dBm 的输出,并且由于 O 波段的传输损耗较大,因此传输前需要利用半导体光放大器(SOA)进行前置放大。在利用可变光衰减器(VOA)控制接收光功率(ROP)后,利用 3 dB 带宽为 50 GHz 的光电二极管(PD)(XPDV2150R)实现光电转换。转换后的电信号经过电放大器(EA)放大后利用采样率为 160 GSa/s、带宽为 62 GHz 的示波器(DSAX96204Q)进行接收。

有一定的偏振敏感特性,实验中在光波进入 SOA 放大之前,需要利用偏振控制器调节入射光的偏振状态,从而保证达到最优的放大效果。

### 3 实验结果与分析

对于 50 Gbaud DSM 信号的传输实验,分别进行了 Case 1: BTB(背靠背,表示无光纤传输的情况)、Case 2: 25 km 以及 Case 3: 50 km 的传输。在 Case 1: BTB 的传输实验中,IM 后输出的光功率为 -5 dBm,经过驱动电流为 130 mA 的 SOA1 放大后,输出光功率约为 8 dBm,然后利用 VOA 控制 ROP 后进行接收。在 BTB 实验的基础上,在 SOA 将光波放大至 8 dBm 后进行 Case 2: 25 km 的传输实验,传输损耗约为 8 dB。需要注意的是,在进行光纤传输前需要接入光隔离器以减少反射光对传输的影响。由于 SOA 具有较小的饱和功率,为了提高功率利用率,又进行了 Case 3: 50 km 有中继的传输实验。IM 后的输出先进行 25 km 的光纤传输,传输完的光功率约为 -13.5 dBm,然后经过驱动电流为 150 mA 的 SOA1 放大后至 8 dBm 后进行第二段 25 km 的传输,测量得到的光功率小于 0 dBm。为了保证实验的传输效果,接收前利用驱动电流为 130 mA 的 SOA2 进行后置放大,然后进行接收。实验中分别测试了 1024/2048/4096QAM DSM-OOK 信号的传输,测量得到的 BER 与 ROP 的关系如图 4 所示。

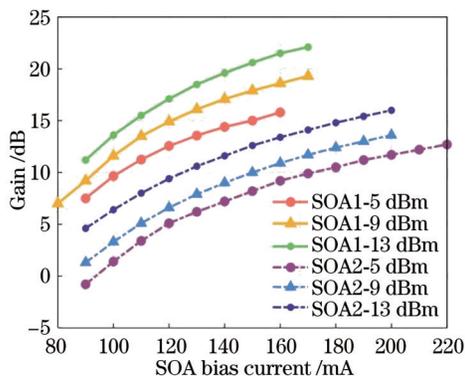


图 3 SOA1 和 SOA2 在不同驱动电流下的增益曲线

Fig. 3 Gain curves of SOA1 and SOA2 under different driving currents

由于 SOA 具有较小的饱和输出功率,为了避免出现过饱和效应而影响传输。首先对实验中使用的 SOA 的增益进行了测量,分别测量 SOA1 与 SOA2 在 -5、-9、-13 dBm 输入光功率时不同驱动电流下的增益,测量的曲线如图 3 所示。由于制造工艺的原因,在相同的驱动电流下 SOA1 的增益比 SOA2 高 4 dB 左右,同时测量出 SOA1 的饱和输出光功率约为 11 dBm,SOA2 的饱和输出光功率约为 8 dBm。为了提高功率利用率,选择将 SOA1 用作前置放大器,SOA2 用作后置放大器。需要注意的是,由于 SOA 具

图 4(a) 中,在 BTB 传输情况下,当 ROP 为 -4 dBm 时 DSM-OOK 信号就实现了无误码的传输。由于 1-bit 量化的 DSM 调制器只有 33 dB 的量化 SNR,因此在 DSM-OOK 零误码的情况下量化误差也会导致高阶 QAM 出现误码,其中 1024QAM 满足硬判决阈值  $3.8 \times 10^{-3}$ ,2048/4096QAM 满足软判决阈值  $2.4 \times 10^{-2}$ 。从图 4(b)可以看出,25 km 光纤的传输引入了约 2 dB 的功率惩罚,-2 dBm 时才实现了零误码的 DSM-OOK 信号传输。从图 4(c)可以看出,中继

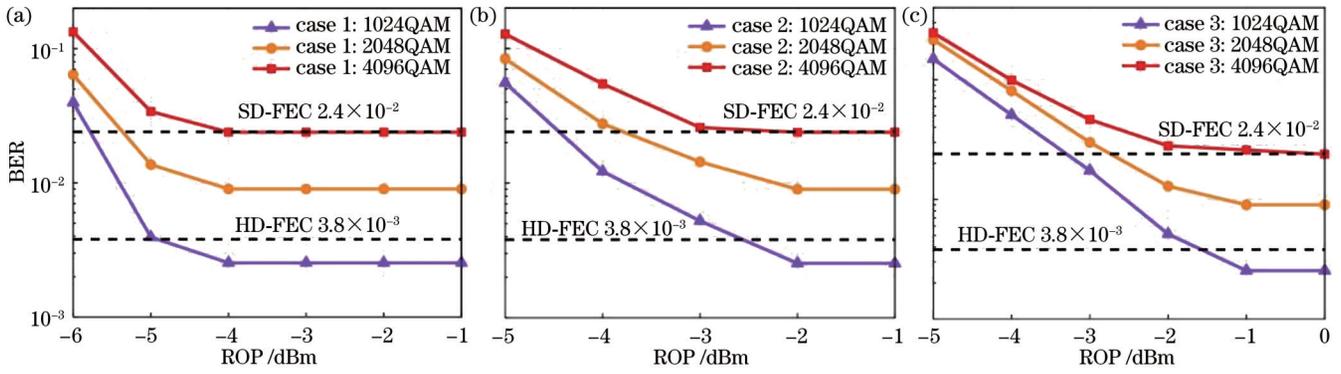


图 4 50 Gbaud DSM-OOK 信号的 BER 与 ROP 的关系。(a) BTB; (b) 25 km; (c) 50 km  
Fig. 4 BER versus ROP of 50 Gbaud DSM-OOK signal. (a) BTB; (b) 25 km; (c) 50 km

50 km 的传输相对于 BTB 传输引入了 4 dB 的功率惩罚。当 ROP 为 0 dBm 时, 50 Gbaud DSM-OOK 信号才能实现零误码的传输, 由量化误差导致 1024/2048/4096QAM 的 BER 分别为  $2.1 \times 10^{-3}$ 、 $9.5 \times 10^{-3}$ 、 $2.1 \times 10^{-2}$ , 对应的 EVM 分别为 1.88%、1.80%、1.80%, 其中 1024QAM 信号的传输满足移动前传 2.5% 的 EVM 门限。

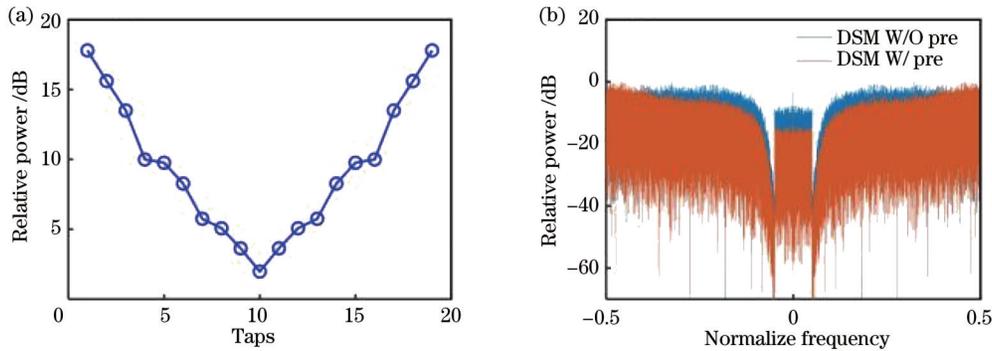


图 5 预均衡。(a) 信道的频域响应; (b) 均衡前后 DSM 信号的功率谱

Fig. 5 Pre-equalization. (a) Frequency domain response of channel; (b) power spectrum of DSM signal before and after equalization

在预均衡操作完成后, 将均衡后的 DSM-OOK 数据送入工作在 100 GSa/s 的 AWG8194 中, 进行 100 Gbaud 的传输实验。首先进行 Case 4: BTB 的传输, IM 后输出的光功率约为 -5.5 dBm, 通过驱动电流为 150 mA 的 SOA1 放大到 10 dBm 后进行接收。对于 Case 5: 10 km 光纤的传输, 在 SOA1 放大后注入光纤进行 10 km 的传输, 光电转换完成后利用示波器进行接收。为了提高功率利用率, 又进行了 Case 6: 15 km 的传输实验。在 IM 后先进行 5 km 的传输, 输出光功率为 -7.5 dBm 左右。然后利用驱动电流为 150 mA 的 SOA1 放大至 7 dBm 后再进行 10 km 光纤的传输。实验测量得到的 1024/2048/4096QAM 信号的 BER 与 ROP 关系曲线如图 6 所示。

图 6(a) 中展示了 100 Gbaud Case 4: BTB 传输的实验结果, 当 ROP 为 2 dBm 时, 传输的 DSM-OOK 信号实现了  $10^{-5}$  级别的传输, 对应 1024/2048/4096QAM

在 100 Gbaud 的传输实验中, 发射端先将 OOK 信号作为训练序列获取信道响应, 然后进行预均衡操作以减小器件带宽对传输的影响。图 5(a) 展示了利用训练序列获取的信道响应, 图 5(b) 展示了预均衡前后 DSM 信号的功率谱, 可以发现, 均衡后信号高频分量的功率增加, 这将有效减少电子器件带宽对传输的影响。

信号的 BER 分别为  $2.6 \times 10^{-3}$ 、 $1.5 \times 10^{-2}$ 、 $2.7 \times 10^{-2}$ 。当 ROP 继续增大时, BER 保持不变, 这可能是由于 SOA 光放大引入过多的放大器自发辐射 (ASE) 噪声导致的。图 6(b) 展示了 Case 5: 10 km 传输后的实验结果, 当 ROP 为 2 dBm 时实现了 DSM-OOK 信号  $3 \times 10^{-5}$  级别的传输, 对应的 1024/2048/4096QAM 信号的 BER 分别为  $5.3 \times 10^{-3}$ 、 $1.8 \times 10^{-2}$ 、 $3.1 \times 10^{-2}$ 。当进行 Case 6: 15 km 有中继的传输时, DSM-OOK 信号只能实现  $10^{-4}$  级别的传输。由于 DSM 技术需要过采样的原因, 每 10 个 OOK 信号只代表原始 DMT 信号的一个采样点信息, 同时低通滤波恢复原始 DMT 信号的过程与积分器类似, 因此 OOK 信号中发生的错误很容易导致误差传播, 从而影响 DMT 信号的解调。在  $10^{-4}$  级别 DSM-OOK 的误码情况下, DMT 携带着的高阶 QAM 信号无法实现满足纠错码阈值的传输。

对此, 本文在 DD-LMS 算法后又级联了后置滤波

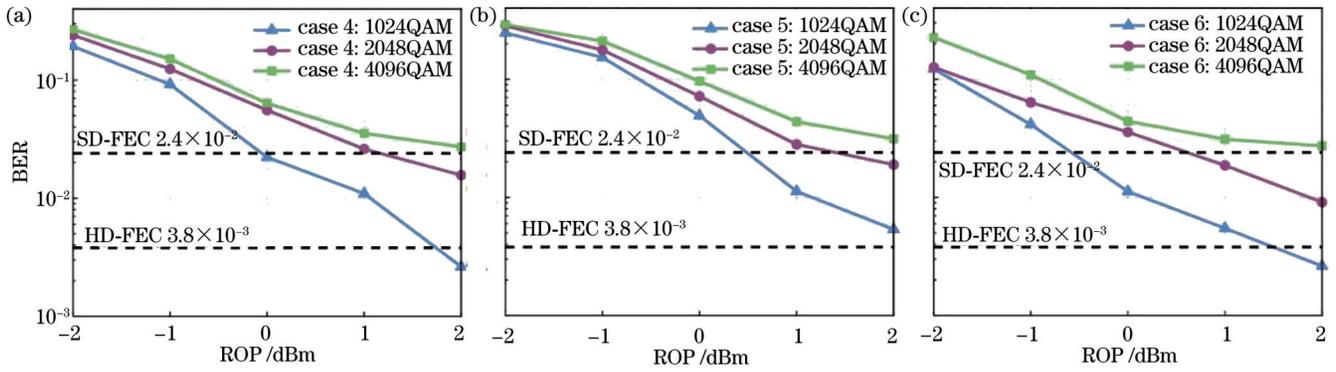


图 6 100 Gbaud DSM-OOK 信号的 BER 与 ROP 的关系。(a) BTB; (b) 10 km; (c) 15 km  
Fig. 6 BER versus ROP of 100 Gbaud DSM-OOK signal. (a) BTB; (b) 10 km; (c) 15 km

(PF)与最大似然序列估计(MLSE)算法。其中,系数为 0.3 的 PF 用来解决 CMA 与 DD-LMS 算法后信号高频分量增强的问题,MLSE 算法用于解决 PF 引入的符号间干扰。在 PF 与 MLSE 算法处理后,成功将 15 km 传输后的 DSM-OOK 信号的 BER 降到  $10^{-5}$  级别,从而实现了满足软判决阈值高阶 QAM 信号的传输。

图 7(a)展示了 100 Gbaud DSM-OOK 信号传输

15 km 后,ROP 为 2 dBm 时的功率谱。图 7(b)为 ROP 为 2 dBm 时 CMA+DD-LMS 算法处理后的 OOK 信号的符号分布图,图 7(c)为经过 PF+MLSE 处理后 OOK 信号的符号分布图,可以发现误码率明显降低。图 7(d)、7(e)、7(f)分别为最终恢复的 1024/2048/4096QAM 信号星座图,对应的 BER 分别为  $2.6 \times 10^{-3}$ 、 $9.1 \times 10^{-3}$ 、 $2.7 \times 10^{-2}$ , EVM 分别为 1.9%、1.8%、2.1%。

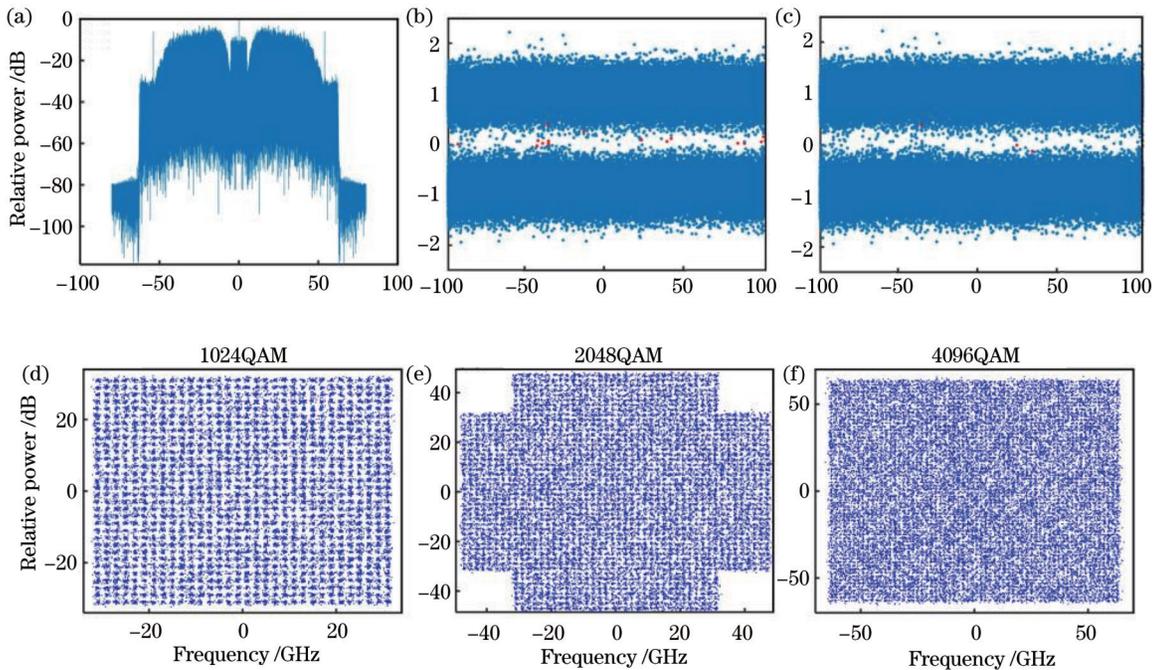


图 7 100 Gbaud DSM-OOK 信号。(a)功率谱;(b)DSM-OOK 信号符号分布图;(c)PR+MLSE 处理后 DSM-OOK 信号的符号分布图;(d)、(e)、(f)1024/2048/4096QAM 信号星座图

Fig. 7 100 Gbaud DSM-OOK signal. (a) Power spectrum; (b) symbol distribution diagram of DSM-OOK signal; (c) symbol distribution diagram of DSM-OOK signal after PR+MLSE processing; (d), (e), (f) constellation of 1024/2048/4096QAM signal

表 1 总结了宽带 DSM 信号 O 波段的传输实验结果,可以看出,在 4 种传输情况下,1024QAM 信号的传输都满足移动前传 2.5% 的 EVM 要求。2048QAM 和 4096QAM 信号的传输分别满足 20% 开销和 25% 开销的软判决前向纠错码门限。实验结果表明,相比于

CPRI 接口需要 15 bit 的采样位宽,基于 DSM 的方案可以在 10 倍过采样下实现 1024QAM 信号的移动前传。

## 4 结 论

本文通过使用 1-bit 量化的 DSM 与预均衡技术,

表 1 不同波特速率和不同传输距离下的实验结果

Table 1 Experimental results of different baud rates and different transmission distances

Baud rate / Gbaud	Distance / km	DSM-OOK	1024QAM		2048QAM		4096QAM	
		BER	BER	EVM	BER	EVM	BER	EVM
50	25	0	$2.5 \times 10^{-3}$	1.8%	$9.0 \times 10^{-3}$	1.8%	$2.3 \times 10^{-2}$	1.8%
	50	0	$2.5 \times 10^{-3}$	1.8%	$9.0 \times 10^{-3}$	1.8%	$2.3 \times 10^{-2}$	1.8%
100	10	$3.0 \times 10^{-5}$	$5.3 \times 10^{-3}$	2.2%	$1.8 \times 10^{-2}$	2.7%	$3.1 \times 10^{-2}$	2.4%
	15	$1.5 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-3}$	1.9%	$9.1 \times 10^{-3}$	1.8%	$2.7 \times 10^{-2}$	2.1%

成功实现了 50/100 Gbaud DSM 信号在 O 波段 IM/DD 链路中的 50/15 km 的传输。得益于 DSM 1-bit 量化 33 dB 的量化 SNR, 系统最高支持 4096QAM 信号满足软判决阈值  $4.0 \times 10^{-2}$  的传输, 1024QAM 信号的 EVM 满足移动前传 2.5% 的 EVM 标准。在 50 Gbaud DSM 信号的传输中, 成功实现了速率为  $5 \times 10 \times 127/256 = 24.8$  Gbit/s 1024QAM 信号 50 km 的移动前传。在 100 Gbaud DSM 信号的传输中, 通过使用 PF 与 MLSE 算法, 成功实现了速率为  $10 \times 10 \times 127/256 = 49.6$  Gbit/s 的 1024QAM 信号 15 km 的移动前传。此外, 系统支持最大的净比特通信速率为  $12 \times 10 \times 127/256 \times 0.75 = 44.6$  Gbit/s。实验演示的宽带 DSM 信号传输系统, 为高阶 QAM 信号在 IM/DD 链路中的传输提供了解决方案, 也为未来基于 DSM 技术的高速移动前传方案设计提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [2] Li X Y, Yu J J, Wang K H, et al. Photonics-aided  $2 \times 2$  MIMO wireless terahertz-wave signal transmission system with optical polarization multiplexing[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33236-33242.
- [3] Liu K X, Jia S, Wang S W, et al. 100 Gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350-GHz band with extended reach [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(11): 1064-1067.
- [4] Li X Y, Yu J J, Wang K H, et al. Delivery of 54-Gb/s 8QAM W-band signal and 32-Gb/s 16QAM K-band signal over 20-km SMF-28 and 2500-m wireless distance[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(1): 50-56.
- [5] Li X Y, Yu J J, Zhao L, et al. 1-Tb/s millimeter-wave signal wireless delivery at D-band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(1): 196-204.
- [6] Zhao F, Li J L, Gong J M, et al. 80-GHz RoF based on push-pull modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 7204606.
- [7] 李韦萍, 孔森, 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, 40(19): 1906001.  
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]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1906001.
- [8] 刘翠微, 余建军. 结构简单的 D 波段矢量毫米波信号产生的方法[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0406001.  
Liu C W, Yu J J. A new scheme of D-band mm-wave vector signal generation with simple structure[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0406001.
- [9] 刘翠微, 余建军, 熊良明, 等. 带预编码的六倍频矢量毫米波信号产生和探测[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0906006.  
Liu C W, Yu J J, Xiong L M, et al. Generation and detection of six-fold frequency vector millimeter-wave signal with precoding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906006.
- [10] Wang Y Y, Wang K H, Zhou W, et al. Photonic aided vector millimeter-wave signal generation without digital-to-analog converter[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(1): 011101.
- [11] Zhu B W, Wang Y Y, Li W P, et al. Delivery of 40 Gbit/s W-band signal over 4600 m wireless distance employing advanced digital signal processing[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(10): 103901.
- [12] Che D, Yuan F, Shieh W. High-fidelity angle-modulated analog optical link[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16320-16328.
- [13] Breyne L, Torfs G, Yin X, et al. Comparison between analog radio-over-fiber and sigma delta modulated radio-over-fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(21): 1808-1811.
- [14] Gray R. Oversampled sigma-delta modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(5): 481-489.
- [15] Bai K, Zou D D, Zhang Z X, et al. Digital mobile fronthaul based on performance enhanced multi-stage noise-shaping delta-sigma modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2): 439-447.
- [16] Zhao F, Yang X W, Zhao L, et al. Demonstration of 4096QAM THz MIMO wireless delivery employing one-bit delta-sigma modulation[J]. Optics Letters, 2022, 47(24): 6361-6364.
- [17] Liu J X, Ding J J, Wang C, et al. 8192QAM signal transmission by an IM/DD system at W-band using delta-sigma modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(4): 207-210.
- [18] Wang J, Jia Z S, Campos L A, et al. Delta-sigma modulation for next generation fronthaul interface[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 37(12): 2838-2850.
- [19] Zhu Y X, Fang X S, Yin L J, et al. Delta-sigma modulation with coherent detection for high-fidelity 4194304-QAM transmission at 71.5 dB SNR[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2021, October 24-27, 2021, Shanghai, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2021: T4D.4.
- [20] Che D. Analog vs digital radio-over-fiber: a spectral efficiency debate from the SNR perspective[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(16): 5325-5335.

# Experimental Demonstration of 100 Gbaud Delta-Sigma Modulation Signal Transmission over O-Band

Yang Xiongwei, Wei Yi, Long Jianyu, Yu Jianjun\*

*Department of Communication Science and Engineering, School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China*

## Abstract

**Objective** To solve the nonlinear impairment during transmitting high-order quadrature amplitude modulation (QAM) signals, we propose a high-order QAM transmission system based on Delta-Sigma modulation (DSM). With the commercialization of 5G networks, the number of mobile internet traffic terminals has surged to increase the demand for fronthaul network transmission rates. At present, the mobile fronthaul network interface common public radio interface (CPRI) usually adopts 15-bits sampling width, which means that at least 15 times of oversampling is required, which results in low spectral efficiency (SE). To this end, researchers proposed a fronthaul network based on DSM technology. Under ten times of oversampling, one-bit quantized DSM can provide a signal-to-noise ratio (SNR) of about 33 dB and support 1024QAM mobile fronthaul. Therefore, facing ever-increasing traffic demands, we study the transmission performance of broadband DSM signals to provide certain references for the future design of high-speed fronthaul networks based on DSM technology.

**Methods** To study the transmission performance of broadband DSM signals, we carry out the transmission experiment of 100 Gbaud DSM signal. For the power fading caused by chromatic dispersion that often occurs in intensity modulation/direct detection (IM/DD) systems, we have chosen the O-band transmission. For the insufficient bandwidth for the transmission system, we employ pre-equalization technology to address the high-frequency fading caused by narrow-band channels. We adopt the on-off-keying (OOK) signal as the training sequence and carry out 100 Gbaud optical back-to-back (BTB) transmission. Then, the frequency domain corresponding to the tap coefficient in the steady state of the constant modulus algorithm (CMA) in the digital signal processing (DSP) algorithm is taken as the inverse response of the channel. Afterward, the finite impulse response (FIR) is generated according to the tap coefficients of CMA. Finally, the generated FIR filter is utilized to filter the transmission signal after two-up-sampling to complete the pre-equalization. Through O-band transmission and pre-equalization technology, the transmission of 100 Gbaud DSM signals is successfully realized.

**Results and Discussions** For the transmission of 50 Gbaud DSM signals, the corresponding experimental results are shown in Fig. 4. In the case of 25 km transmission, when the received optical power (ROP) is  $-2$  dBm, the DSM-OOK signal can realize the error-free transmission. In the case of 50 km fiber transmission, error-free transmission is realized when ROP is 0 dBm. Compared with BTB transmission, the transmissions of 25 km and 50 km introduce 2 dB and 4 dB of power penalty respectively. For the transmission of 100 Gbaud DSM signals, the corresponding experimental results are shown in Fig. 6. When the ROP is 2 dBm, the BER of the DSM-OOK signal after BTB transmission and 10 km transmission is  $10^{-5}$  and  $3 \times 10^{-5}$  respectively. However, in the case of 15 km transmission, the conventional DSP algorithm can only achieve BER of  $10^{-4}$ . Therefore, by adding post-filtering (PF) and maximum likelihood sequence estimation (MLSE) algorithm after the traditional DSP, the BER is successfully reduced to  $10^{-5}$ . The final experimental results are summarized in Table 1.

**Conclusions** This study realizes the 50/15 km transmission of 50/100 Gbaud DSM signals on the O-band IM/DD link by utilizing one-bit quantized DSM and pre-equalization technology. Thanks to one-bit quantization DSM with SNR of 33 dB, the system supports up to 4096QAM signal transmission that meets the soft decision threshold of  $4.0 \times 10^{-2}$ , and the EVM of 1024QAM signal meets the EVM standard of 2.5% for mobile fronthaul. In the transmission of 50 Gbaud DSM signals, the 1024QAM mobile fronthaul with a rate of  $5 \times 10 \times 127/256 = 24.8$  Gbit/s on 50 km fiber is achieved. In the transmission of 100 Gbaud DSM signals, by utilizing PF and MLSE, the 1024QAM signal mobile fronthaul with a rate of  $10 \times 10 \times 127/256 = 49.6$  Gbit/s on 15 km fiber is realized. In addition, the system supports a maximum net bit communication rate of  $12 \times 10 \times 127/256 \times 0.75 = 44.6$  Gbit/s. The broadband DSM signal transmission system demonstrated in the experiment provides a solution for high-order QAM signal transmission in the IM/DD link and also provides references for future design of high-speed mobile fronthaul approaches based on DSM technology.

**Key words** optical communication; Delta-Sigma modulation; mobile fronthaul; intensity modulation/direct detection