

# 基于光学频率梳的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统

卢振旭, 李培丽\*, 王浩然

南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 针对波分复用-光纤无线通信(WDM-ROF)系统中采用的激光器阵列成本高、可扩展性与重构性差、生成的毫米波信号单一不可调、每个基站业务传输相同且可应用场合受限等问题,提出了基于光学频率梳(OFC)的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统。在该方案中,采用光学频率梳作为系统的多载波光源,有利于系统的扩展与重构;在中心站(CS)预留部分光载波作为基站(BS)上行链路的光源,实现了基站上行传输的无光源化;在次级中心站(SCS)引入基于微机电系统(MEMS)的光开关矩阵,由 MEMS 光开关矩阵的不同种控制状态实现毫米波信号的可选频;构建具有分层结构的基站组(BSG),为每个基站提供多个业务的接入。建立了基于光学频率梳的 WDM-ROF 系统的理论模型,并进行了仿真研究。在仿真中获得了平坦度为 0.58 dB、频率间隔为 20 GHz 的 15 线光学频率梳。在下行链路中,利用其中一种控制状态的 MEMS 光开关矩阵与光电探测器将两个不同的 10 Gbit/s 下行数据上变频,得到频率为 35、45、65、95 GHz 的 4 个毫米波信号,并根据不同应用场合分配给基站组中的两个基站(分层 BSG),进行多个业务传输。经 40 km 单模光纤传输后,下行和上行传输的接收灵敏度分别不低于 -10.086 dBm 和 -17.922 dBm,对应的功率代价均小于 1 dB,业务数据接收眼图均保持睁开状态。该 WDM-ROF 系统可以实现可选频毫米波信号产生、多个业务传输、低功率代价的高效传输。

**关键词** 光通信; 光学频率梳; 可选频毫米波; MEMS 光开关矩阵; 分层基站组

中图分类号 TN929.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220907

## 1 引言

目前,物联网、人工智能、5G 通信等新兴信息产业迅猛发展,给人们的生产生活带来了极大便利,与此同时,人们对通信网络的要求也越来越高。用户业务由单一化到多样化的转变,使得当前的频谱资源已不能满足人们的要求,甚至对下一代通信网络(NGN)提出了挑战<sup>[1-2]</sup>。这就需要进一步挖掘更高频的毫米波信号,以扩展通信带宽和提高传输速率<sup>[3-4]</sup>。然而,高频毫米波信号易受外界天气影响,传输性能不稳定,传输距离大大缩短<sup>[5]</sup>。

光纤无线通信(ROF)技术是无线和光学的集成,有效避免了高频毫米波在电域内实现困难和处理电路造价高的问题。利用光纤传输无线信号具有衰减损耗小、容量大、传输距离远、成本低等优点<sup>[6-7]</sup>。在光纤无线通信的基础上引入波分复用技术,即波分复用-光纤无线通信(WDM-ROF)技术<sup>[8-10]</sup>,可以处理多样化业务并能实现多通道中不同数据的加载。该技术已成为近年来的研究热点。

近年来,国内外针对 WDM-ROF 系统进行了大量的研究工作。利用激光器阵列作为光源的 WDM-ROF 系统<sup>[11-14]</sup>可以产生多个毫米波信号,提高了系统的利用率,但其将激光器阵列作为系统光源,需要对所有激光器的中心波长和间距进行精确控制,而且这种控制方式相对复杂且可扩展性差。将光学频率梳(OFC)作为 WDM-ROF 系统的多载波光源,可以满足系统的可扩展、可重构等需求。基于调制器型的光学频率梳产生技术是目前研究的最多的光学频率梳产生技术。光学频率梳发生器<sup>[15-16]</sup>中的马赫曾德尔调制器(MZM)的损耗比较低,且可对信号实现多种方式的编码,但将其作为调制器来产生平坦度高的光学频率梳时存在驱动电压较高和消光比低的问题。调制格式不同的 WDM-ROF 系统具有不同的性能:幅度调制(AM)的 WDM-ROF 系统<sup>[17-20]</sup>易于实现,解调电路相对简单,但功率利用率不高,传输距离近,并且噪声一旦落在信号带宽内,就无法消除噪声的影响,导致传输性能变差。光单边带调制(OSSB)的 WDM-ROF 系统<sup>[21-24]</sup>的抗色散性能优良,可以有效增大带宽,但光载波与单边带的群速度

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-07-01; 网络首发日期: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61275067)

通信作者: \*lip1@njupt.edu.cn

不同,导致二者到达光电检测器的时间不同,从而出现眼图偏移等问题;此外,光载波与单边带的功率不同会导致毫米波的接受灵敏度降低。基于多载波光源的密集波分复用-光纤无线通信(DWDM-ROF)系统<sup>[25]</sup>可以产生 5 种频率的毫米波,但这 5 种毫米波只能传输同一个用户的业务信息,没有充分利用毫米波容量和带宽大、频谱资源丰富的优点,系统利用率较低。在多基站群的分层光纤无线电系统中<sup>[26]</sup>,利用半导体放大器(SOA)的四波混频效应生成多频毫米波(MMWs),比较容易满足不同场合下对业务的需求,但利用 SOA 的四波混频不仅会产生新的频率成分而导致串扰,还会引起各信道增益的不均匀,同时 SOA 与光纤的耦合损耗较大,噪声及串扰也较大,影响了系统的传输距离。

笔者提出了一种基于光学频率梳的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统。在中心站(CS),采用级联相位调制器(PM)、电吸收调制器(EAM)产生平坦的可调光学频率梳,这种方式具有频率分量多、相干性好、间距可调的优点,便于系统的扩展和重构,而且降低了光源成本;选择光抑制载波双边带(OCS)的光载波调制方式,这种调制方式可使系统具有较好的抗色散性能,而且产生的光信号的频率范围较大;在次级中心站(SCS)引入微机电系统(MEMS)光开关矩阵,实现 24 种子载波组合,可产生 10 个频率的毫米波;采用分层结构的基站组(BSG),即一个基站组内配置多个基站,根据应用的不同,每个基站分配不同的波长,在每个基站内两种用户业务信息都可以经无线传输到达用户端,从而实现多业务传输。笔者利用 OptiSystem 软件搭建了基于光学频率梳的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统,并对其传输灵敏度和功率代价进行了研究。

## 2 工作原理

图 1 给出了基于光学频率梳的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统的结构示意图(RF:射频驱动信号;OBPF:光带通滤波器;AWG:阵列波导光栅;PC:偏振控制器;LPF:低通滤波器;BERT:误码率测试仪)。该系统由中心站、远程节点、次级中心站和基站组等 4 部分组成。

可调谐光学频率梳(TOFC)作为 WDM-ROF 系统的多载波光源,不仅可以降低系统光源的成本,还可以灵活控制光频梳的线数,动态调整光频梳的频率间隔,可以满足 WDM-ROF 系统的可扩展与可重构需求。在中心站中,可调谐光学频率梳发生器(TOFCG)由一个连续波(CW)激光器、一个射频源(RF1)、一个功率分配器、一个电放大器(EA)、两个电吸收调制器和一个相位调制器组成。相比于马赫曾德尔调制器,电吸收调制器<sup>[27-29]</sup>的插入损耗虽然比较大,但其具有消光比大、驱动信号电压低、易集成化等特点,同时具有偏振无关特性。可调谐的射频源 RF1 被功率分配器分为三路,分别用来驱动 EAM1、相位调制器和 EAM2。连续波激光

作为可调谐光学频率梳发生器的光源输入到 EAM1、相位调制器和 EAM2 中,其中 EAM1 和相位调制器用来产生更多的光频梳线数,EAM2 用来改善光频梳的平坦度。生成的光频梳如图 1(a)所示。为了进一步产生平坦度高且适合应用于 WDM-ROF 系统的光载波,采用光带通滤波器(OBPF)滤除不需要的高阶边带。

可调谐光学频率梳发生器产生的多载波注入到 AWG1 后分为多路单波长相光载波。为降低全双工通信系统的光源成本,一部分光载波用于下行传输,另一部分光载波预留为上行传输。在下行传输中,每 6 个光载波为一组,每组中的前 2 个光载波分别输入到两个马赫曾德尔调制器中进行调制,后 4 个光载波不进行调制。MZM1 由携带下行基带信号 data1(Service A)和频率为  $f_2$  的 RF2 信号混频后驱动,MZM2 由携带下行基带信号 data2(Service B)和频率为  $f_2$  的 RF2 信号混频后驱动。设置 MZM1 和 MZM2 在最小工作点工作,以便实现携带下行信号的光抑制载波双边带调制(OCS),频率间隔为  $2f_2$ 。相比于幅度调制(AM)与光单边带调制(OSSB),光抑制载波双边带调制会使色散因子共轭相乘后互相抵消,受光纤色散的影响更小,且可以产生二倍频电信号。预留为上行传输的光载波不需要调制。所有光调制载波与未调制载波一同注入到 AWG2 中[经 AWG2 复用后的光谱如图 1(b)所示],然后经过单模光纤(SMF)和掺铒光纤放大器(EDFA)传输至远程节点。

在远程节点中,采用输出端口带宽为 AWG2 带宽 6 倍的 AWG3,AWG3 将传输的光信号分为多个通道(CH1,CH2,...,CH $n$ ),每个通道连接相应的一个次级中心站。前几个通道为下行传输,均由两组正负一阶边带(带数据)和 4 根未调制光载波(不带数据)组成,共有 8 条光频,如图 1(c)所示。以第一个通道为例,将这 8 条光频注入到输出端口带宽为 AWG3 带宽 1/2 的 AWG4 中,AWG4 将 CH1 中的光频解复用分为两部分,其中:一部分为带数据的两组正负一阶边带,该部分输入到 SCS1 的 AWG7 中;另一部分为不带数据的 4 根未调制光载波,该部分输入到 SCS1 的 AWG8 中。AWG5 与 AWG4 的功能一样。

系统包括多个次级中心站,次级中心站中的 MEMS 光开关矩阵控制着不同光频的组合输出,从而实现毫米波频率的可选。以 SCS1 为例,AWG7 将两组正负一阶边带解复用为 4 条单波长的光边带,AWG8 将 4 根光载波解复用为 4 根单波长的光载波,AWG7 与 AWG8 的输出一同注入到 MEMS 光开关矩阵,如图 1[e]和图 1[f]所示。MEMS 光开关矩阵由 11 个两进两出的 MEMS 光开关以及 4 个耦合器(OC)组成,有 8 个输入端口和 4 个输出端口。8 条光频输入到 MEMS 光开关矩阵,MEMS 光开关可以有不同的控制方式,图 1 给出了其中的一种。根据 MEMS 光开关的不同控制方式,在输出端口的所有两个光频的组合方式中,共有 24 种组合方式由一条携带下行信号的边带和一条光载波组成。4 个输出端口可以

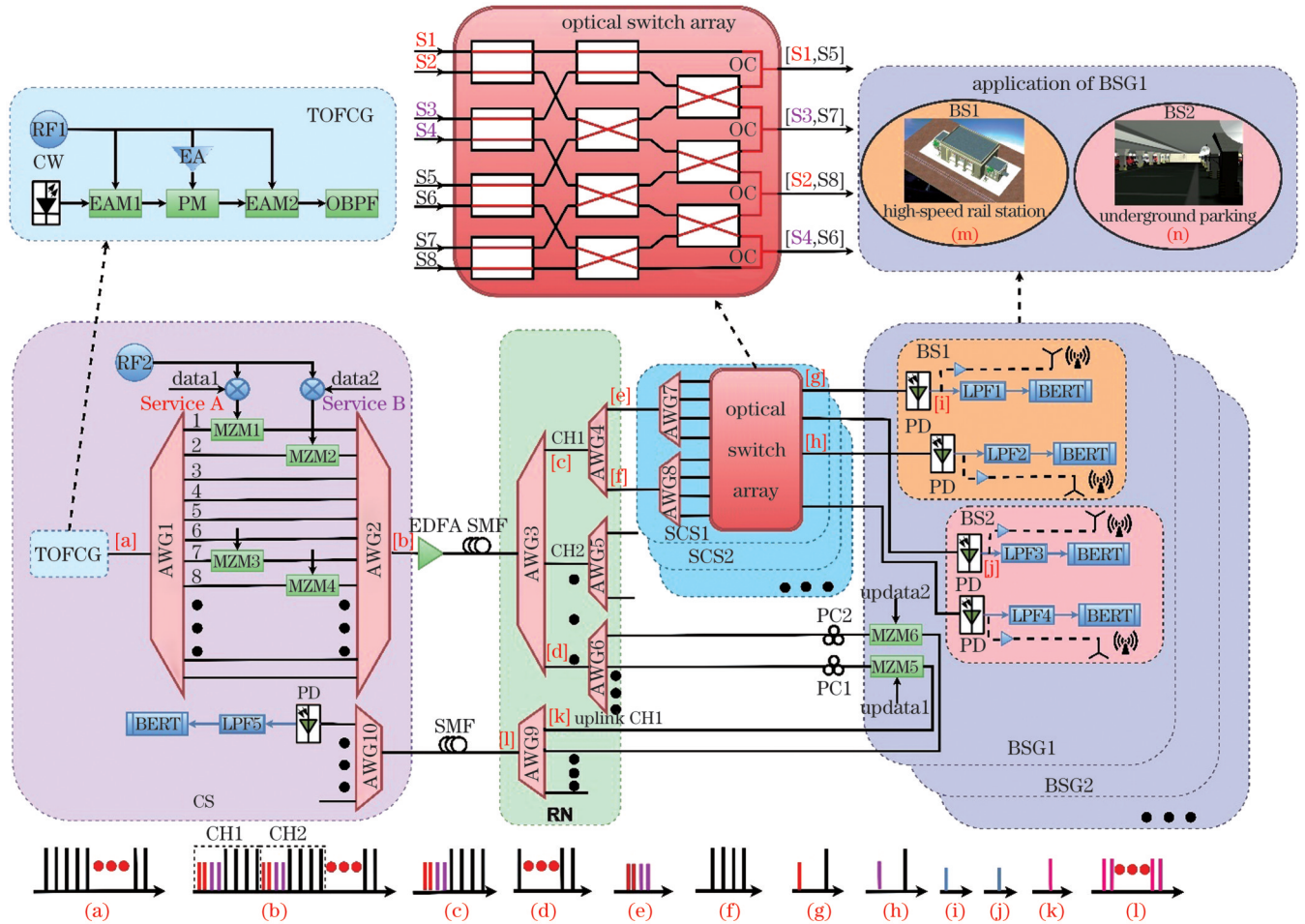


图 1 基于光学频率梳的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of multi-service layered WDM-ROF system with optional frequency millimeter wave based on optical frequency comb

得到 4 种光频组合,其中两种光频组合信号如图 1(g)、(h)所示。对于 24 种光频组合方式,经光电探测器(PD)拍频后,一共可以产生 10 个频率的毫米波。

次级中心站中的 MEMS 光开关矩阵输出的 4 个组合输入到相应的基站组中的两个基站中,每个基站将两种用户业务信息无线传输到用户端。以 BSG1 为例,将输入的 4 种组合分为两部分(每部分包含两个组合),其中一部分输入到 BS1 中,另一部分输入到 BS2 中。经基站中的光电探测器拍频后,产生 4 个频率不同的毫米波信号[该信号携带着两种业务信息,其中的两个毫米波如图 1(i)和图 1(j)所示],毫米波信号经电放大器(EA)天线传输。根据不同的应用场合,将 4 个毫米波分配给不同的基站,每个基站有两种业务信息进行无线通信。比如:在地下停车场中,信号极其不稳定,且信号质量差,覆盖范围小,需要提供高频毫米波,以提高用户的消费体验,因此 BS2 产生的高频毫米波可应用于地下停车场;在高铁站,人群聚集,用户的需求比较复杂,需要提供多个业务毫米波,因此 BS1 产生的多个业务毫米波可应用于高铁站,如图 1(m)和图 1(n)所示。

在上行链路中,如图 1[d]所示,将 AWG6 预留的光

载波作为上行链路传输的光源时,需要加入偏振控制器(PC)使重用的波长保持线偏振状态<sup>[30]</sup>,再用马赫曾德尔调制器加载上行基带信号[经马赫曾德尔调制器加载后上行信号如图 1(k)所示]。各基站组中的上行信号经 AWG9 复用,如图 1(l)所示,复用后的信号通过单模光纤传输至中心站,在中心站中通过 AWG10 将各路信号分离,之后再经光电探测器转换为电信号。

提出的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统可以实现扩展与重构。首先增加光学频率梳的梳线数(提供较多的光载波进行多数据加载),使远程节点中的每个通道包含更多的光频;然后增大次级中心站中 MEMS 光开关矩阵的结构,以便可以输出更多组合光频;接着配置更多的基站,以接收组合光频。由此最终实现了 WDM-ROF 系统中基站组数量的扩展,从而可以支持多业务传输。调整光学频率梳的频率间隔,使远程节点每个通道内光频的间隔可变,就可以改变次级中心站中 MEMS 光开关矩阵输出组合光频的间隔,在基站中产生新频率的毫米波信号,从而实现 WDM-ROF 系统中毫米波信号的重构,丰富毫米波信号的频率。

### 3 理论模型

在中心站,可调谐光学频率梳发生器的输入信号为连续光信号,其表达式为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t), \quad (1)$$

式中: $E_0$ 和 $\omega_0$ 分别表示输入光信号的振幅和中心角频率; $t$ 表示时间。

连续波激光器发出的光载波注入到EAM1中被调制,输出的光信号<sup>[31]</sup>为

$$E_{out1}(t) = E_{in}(t) \sqrt{(1 - \gamma_1) + \gamma_1 V_{RF1}(t) \cos(\omega_1 t)} \cdot \exp\left\{\frac{j\alpha_1}{2} \ln\left[(1 - \gamma_1) + \gamma_1 V_{RF1}(t) \cos(\omega_1 t)\right]\right\} \propto \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp[j(\omega_0 + n\omega_1)t], \quad (2)$$

式中: $\omega_1$ 为RF1信号的角频率; $V_{RF1}$ 为RF1信号的电压; $\gamma_1$ 为EAM1的调制指数; $\alpha_1$ 为EAM1的啁啾因子; $A_n$ 为 $n$ 阶边频的幅度加权值。

EAM1输出的光信号注入到相位调制器,经相位调制器调制后的输出信号为

$$E_{out2}(t) = E_{out1}(t) \exp[j\pi m_{PM} \cos(\omega_1 t)] \propto \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp[j(\omega_0 + n\omega_1)t] \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\pi m_{PM}) \exp(jm\omega_1 t), \quad (3)$$

式中: $m_{PM}$ 为相位调制器的调制指数,等于相位调制器电压 $V_{PM}$ 与调制器半波电压 $V_\pi$ 的比值; $J_n(\cdot)$ 为 $n$ 阶贝塞尔函数; $m$ 为边频的阶数。

进一步提高光频梳的平坦度,将相位调制器的输出信号注入到EAM2中,EAM2输出的光学频率梳表达式为

$$E_{out}(t) \propto \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp[j(\omega_0 + n\omega_1)t] \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\pi m_{PM}) \exp(jm\omega_1 t) \cdot \sum_{h=-\infty}^{+\infty} A_h \exp[j(\omega_0 + h\omega_1)t] \propto \sum_{i=-\infty}^{+\infty} B_i \exp[j(\omega_0 + i\omega_1)t], \quad (4)$$

式中: $A_h$ 为 $h$ 阶边频的幅度加权值; $B_i$ 为输出光学频率梳第 $i$ 阶边带的幅度加权值。每个频率的谱线功率因相加项大小不同而不同,调节 $V_{PM}$ 、 $\gamma_1$ 、 $\alpha_1$ 、EAM2的调制指数 $\gamma_2$ 、EAM2的啁啾因子 $\alpha_2$ 等参数可使各谱线的功率近似相等,从而产生平坦的光学频率梳。

可调谐光学频率梳发生器产生的光学频率梳经AWG1解复用为 $n$ 路单波长边带。一部分光载波用于下行传输,一部分光载波用于上行传输。以下行传输中的第一组为例,假设第1根光载波为光学频率梳的第 $r$ 阶边带,则其光场可以简写为 $E_r(t) = B_r \exp[j(\omega_0 + r\omega_1)t]$ ,其中 $B_r$ 表示 $r$ 阶边频的幅度加权值。将第一根光载波注入到MZM1中进行调制,MZM1输出的光信号<sup>[32]</sup>可以表示为

$$E_{MZM1}(t) = \frac{1}{2} B_r \exp[j(\omega_0 + r\omega_1)t] \left\{ \exp\left[j\pi \frac{V_{DC1} + V_{RF2} B_1(t) \cos(\omega_2 t)}{V_\pi}\right] + \exp\left[j\pi \frac{V_{DC2} - V_{RF2} B_1(t) \cos(\omega_2 t)}{V_\pi}\right] \right\}, \quad (5)$$

式中: $V_{RF2}$ 为驱动信号的幅度; $\omega_2 = 2\pi f_{RF2}$ 为驱动信号的角频率,其中 $f_{RF2}$ 为驱动信号的频率; $V_{DC1}$ 与 $V_{DC2}$ 分别表示MZM1上下两臂的直流偏置电压; $B_1(t)$ 为下行基带的data1信号。设置MZM1在最小工作点工作,根据贝塞尔函数展开式,可将式(5)进一步化简为

$$E_{MZM1}(t) = \frac{1}{2} B_r \exp[j(\omega_0 + r\omega_1)t] \left\{ \exp[j\beta_1 B_1(t) \cos(\omega_2 t)] + \exp[-j\beta_1 B_1(t) \cos(\omega_2 t)] \right\} \approx B_r \beta_1 B_1(t) \left\{ \exp\left\{j\left[(\omega_0 + r\omega_1 + \omega_2)t + \frac{\pi}{2}\right]\right\} + \exp\left\{j\left[(\omega_0 + r\omega_1 - \omega_2)t + \frac{\pi}{2}\right]\right\} \right\}, \quad (6)$$

式中: $\beta_1 = \frac{V_{RF2}}{V_\pi}$ 为MZM1的调制指数。由式(6)可以看出MZM1输出信号主要为正负一阶边带。

同理,第2根光载波为光学频率梳的第 $r-1$ 阶边带,注入到MZM2中被调制。设置MZM2在最小工作点工作,根据贝塞尔函数展开式,MZM2的光信号可以简写为

$$E_{MZM2}(t) = \frac{1}{2} B_{r-1} \exp\left\{j\left[\omega_0 + (r-1)\omega_1\right]t\right\} \left\{ \exp\left[j\pi \frac{V_{DC3} + V_{RF2} B_2(t) \cos(\omega_2 t)}{V_\pi}\right] + \exp\left[j\pi \frac{V_{DC4} - V_{RF2} B_2(t) \cos(\omega_2 t)}{V_\pi}\right] \right\} \approx B_{r-1} \beta_2 B_2(t) \left\{ \exp\left\{j\left[\omega_0 + (r-1)\omega_1 + \omega_2\right]t + \frac{\pi}{2}\right\}\right\} + \exp\left\{j\left[\omega_0 + (r-1)\omega_1 - \omega_2\right]t + \frac{\pi}{2}\right\}\right\}, \quad (7)$$

式中:  $V_{DC3}$  与  $V_{DC4}$  分别为 MZM2 上下两臂的直流偏置电压;  $B_2(t)$  为下行基带的 data2 信号;  $\beta_2 = \frac{V_{RF2}}{V_\pi}$  为 MZM2 的调制指数。由式(7)同样可看出 MZM2 输出信号主要为正负一阶边带。

所有光频经 AWG2 复用, 然后通过单模光纤传输至远程节点。MZM1 和 MZM2 输出的光信号与调制的 4 根光载波组成 CH1。以 CH1 为例, 8 条光频经过解复用和光开关矩阵后, 输出 4 个组合光频, 分别在光电探测器中拍频, 产生不同频率的毫米波信号。以 MZM1 产生的负一阶边带和第 3 根光载波拍频产生毫米波为例, 光电探测器端输出电流<sup>[33]</sup>的表达式为

$$I_{out1}(t) = I_p(t) + i_s(t) = R \left\{ B_r \beta_1 B_1(t) \exp \left\{ j \left[ (\omega_0 + r\omega_1 + \omega_2)t + \frac{\pi}{2} \right] \right\} + B_{r-2} \exp \left\{ j \left[ \omega_0 + (r-2)\omega_1 \right] t \right\} \right\}^2 + i_s(t) = R \left\{ [B_r \beta_1 B_1(t)]^2 + B_{r-2}^2 + B_r B_{r-2} \beta_1 B_1(t) \cos \left[ \pi (2f_{RF1} + f_{RF2})t + \frac{\pi}{2} \right] \right\} + i_s(t), \quad (8)$$

式中:  $I_p(t)$  为光拍频电流;  $R$  为光电探测器的响应度;  $i_s(t)$  为散粒噪声电流, 主要来源于光电流、背景光电流及暗电流等的随机量子起伏;  $[B_r \beta_1 B_1(t)]^2$  项为平方基带信号,  $B_{r-2}^2$  项为直流信号,  $B_r B_{r-2} \beta_1 B_1(t) \cdot \cos \left[ \pi (2f_{RF1} + f_{RF2})t + \frac{\pi}{2} \right]$  项为  $2f_{RF1} + f_{RF2}$  的毫米波信号。散粒噪声常采用均方散粒噪声电流  $\sigma_s^2$  表示,  $\sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = 2q \bar{I}_p(t) B$ , 其中  $q$  为电子电量,  $\bar{I}_p(t)$  为平均电流,  $B$  为系统噪声的等效带宽。

以上行传输中第一个通道 (uplink CH1) 为例, 假设上行第一个通道中的光载波为光学频率梳的第  $k$  阶边带, 其光场  $E_k(t)$  可简写为

$$E_k(t) = B_k \exp [j(\omega_0 + k\omega_1)t], \quad (9)$$

式中:  $B_k$  为光学频率梳中  $k$  阶边带的幅度加权值。MZM5 调制上行信号后, 输出信号可以表示为

$$E_{uplink-CH1}(t) = B_k \exp [j(\omega_0 + k\omega_1)t] B'_1(t), \quad (10)$$

式中:  $B'_1(t)$  为上行基带 updata1 的信号。

在中心站中, uplink CH1 经光电探测器转换为电信号, 光电探测器输出端的电流表达式为

$$I_{uplink-CH1}(t) = R' \cdot [B_k B'_1(t) \exp [j(\omega_0 + k\omega_1)t]]^2 + i'_s(t) = R' \cdot B_k^2 B_1^2(t) + i'_s(t), \quad (11)$$

式中:  $R'$  为上行链路中光电探测器的响应度;  $i'_s(t)$  为散粒噪声电流。经光电探测器转换后可得到原始基带信号。

## 4 仿真与讨论

由上节分析可知, 电吸收调制器的调制指数  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ 、相位调制器的调制电压  $V_{PM}$ 、电吸收调制器的啁啾因子  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  均对多载波光源有影响。分别对这些参数进行探究, 结果表明: 当连续波激光器的工作频率为 193.1 THz、光功率为 10 dBm、线宽为 1 MHz, EAM1 和 EAM2 的调制指数均为 0.99、啁啾因子均为 2, 电放大器的增益为 14.3 dB, 相位调制器的相移为  $90^\circ$  时, 可调谐光学频率梳发生器产生了频率间隔为 20 GHz、平坦度为 0.96 dB 的 21 线光梳, 如图 2 所示。

用中心频率为 193.1 THz、插入损耗为 0.8 dB、带宽为 300 GHz 的光带通滤波器滤出中间平坦度高的光学频率梳。如图 3 所示, 通过光带通滤波器得到了频率间隔为 20 GHz、平坦度为 0.58 dB 的 15 线光频梳。

输出的多载波光源经输出端口数为 15、插入损耗为 0.7 dB、带宽为 20 GHz 的 AWG1 分为 15 根单个波长的光载波, 其中前 12 根光载波用作下行光载波, 后 3 根光载波用作上行光载波。下行载波以 6 根光载波为

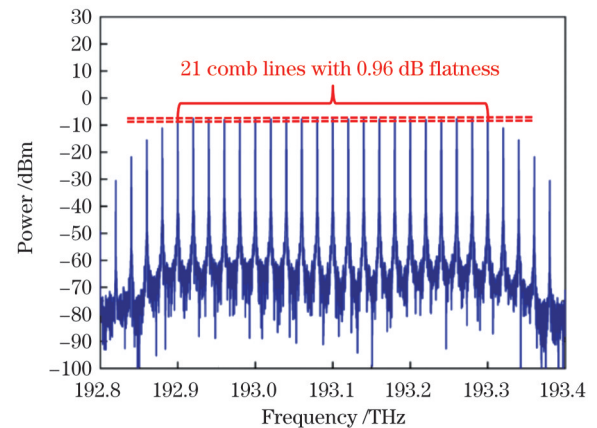


图 2 电吸收调制器和相位调制器的输出频谱  
Fig. 2 Output spectra of EAMs and PM

一组, 可分为两组。以第一组为例, 第 1 和第 2 根光载波分别注入 MZM1 与 MZM2 中产生携带下行信号的抑制载波双边带, 第 3~6 根光载波不需要调制。MZM1 与 MZM2 的工作参数相同, 半波电压为 4 V, 插入损耗为 4 dB, 消光比为 20 dB, 两臂间的相对直流偏

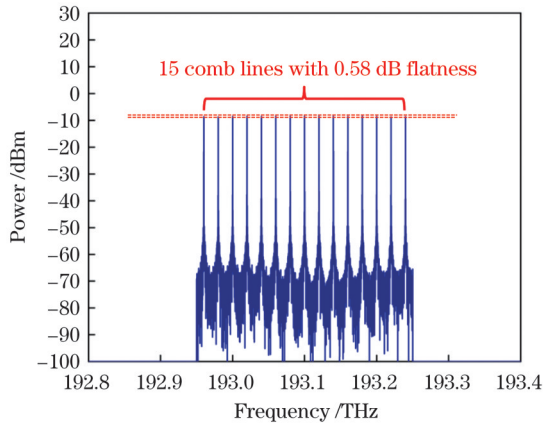


图3 光带滤波器的输出频谱

Fig. 3 Output spectra of OBPF

压差为 4 V; RF2 驱动信号的频率为 5 GHz, 电压  $V_{RF2}$  为 2.5 V; data1 信号和 data2 信号均是序列长为  $2^{11}-1$  的 10 Gbit/s 的伪随机序列 (PRBS) 非归零码 (NRZ)。第 7~12 根光载波为第二组, MZM3、MZM4 与 MZM1、MZM2 的工作参数设置相同。后 3 根预留给上行链路的光载波, 不经过调制。所有的光频最终一起注入输入端口数为 15、插入损耗为 0.7 dB、带宽为 20 GHz 的 AWG2 中, AWG2 的输出光信号如图 4 所示。

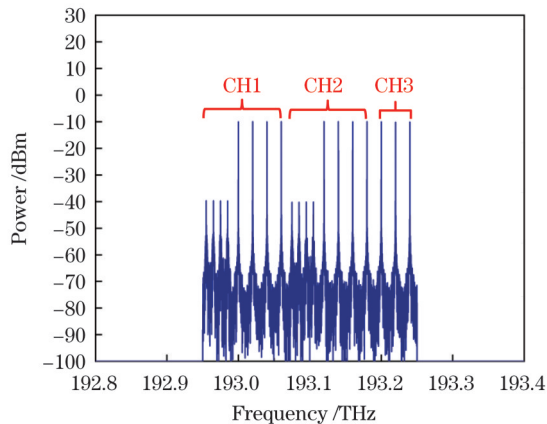


图4 AWG2的输出频谱

Fig. 4 Output spectra of AWG2

AWG2 的输出光信号经单模光纤和掺铒光纤放大器传输至远程节点, 单模光纤的衰减因子为 0.2 dB/km, 色散系数为  $16.75 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 掺铒光纤放大器的功率增益为 25 dB, 噪声系数为 4 dB。在远程节点中, 采用输出端口数为 3、插入损耗为 0.7 dB、带宽为 120 GHz 的 AWG3 将光信号解复用为三个通道。以第一个通道 (CH1) 为例, 其输出信号由马赫曾德尔调制器产生的携带下行信号的两组正负一阶边带和 4 根未经调制的光载波组成, 共 8 条光频。每组正负一阶边带的频率间隔为 10 GHz, 4 根未调制光载波的频率间隔为 20 GHz, 如图 5 所示。

以 SCS1 和 BSG1 为例进行解释。第一通道的光信号被 AWG4、AWG7、AWG8 解复用为 8 条独立的光

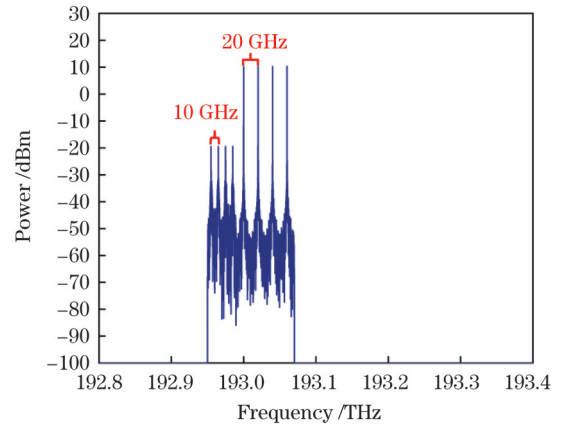


图5 经 20 km 单模光纤传输后第一通道的光谱图

Fig. 5 Optical spectra of channel 1 after transmission through 20 km SMF

频, 其中: AWG4 的输出端口数为 2, 插入损耗为 0.7 dB, 带宽为 80 GHz; AWG7 的输出端口数为 4, 插入损耗为 0.7 dB, 带宽为 10 GHz; AWG8 的输出端口数为 4, 插入损耗为 0.7 dB, 带宽为 20 GHz。解复用的 8 条独立光频注入光开关矩阵中, MEMS 光开关矩阵的输出信号注入 BSG1 的光电探测器中, 其中: MEMS 光开关的插入损耗为 1 dB, 消光比为 15 dB; 光电探测器的响应度为 1 A/W, 暗电流为 10 nA, 拍频产生了 35、45、65、95 GHz 的毫米波信号, 其中 45 GHz 和 95 GHz 毫米波携带 Service A, 35 GHz 和 65 GHz 毫米波携带 Service B。可根据不同的应用场合将不同频率的毫米波进行分配, 如: 将高频 65 GHz 与 95 GHz 毫米波信号分配给 BS2, 应用于地下停车场; 将低频 35 GHz 与 45 GHz 毫米波信号分配给 BS1, 应用于高铁站。

在上行链路中, 远程节点中的 AWG3 输出的第三通道 (CH3) 为三根未经调制的光载波。这三根光载波通过输出端口数为 3、插入损耗为 0.7 dB、带宽为 20 GHz 的 AWG6 实现分离, 作为上行链路的光源; 之后经过角度为  $45^\circ$  的 PC1 与 PC2, 输入到 MZM5、MZM6 中调制成 10 Gbit/s 的上行基带信号 (MZM5 与 MZM6 的工作参数相同, 半波电压为 4 V, 插入损耗为 4 dB, 消光比为 20 dB, 两臂间的相对直流偏压差为 2 V); 接着, 输入端口数为 3、插入损耗为 0.7 dB、带宽为 20 GHz 的 AWG9 对上行信号进行波分复用, 并通过单模光纤传输至中心站, 中心站中输出端口数为 3、插入损耗为 0.7 dB、带宽为 20 GHz 的 AWG10 将各路信号分离, 分离后的信号经光电探测后转换为电信号, 从而实现上行链路的传输。

为了评价 WDM-ROF 系统下行链路与上行链路的多业务传输性能, 研究了毫米波信号经背靠背 (B-T-B)、20 km 单模光纤、40 km 单模光纤传输后的误码率 ( $B_{ER}$ ) 性能。

#### 1) 下行链路的误码率曲线与眼图

以第一通道为例, 图 6 给出了 4 种毫米波信号

(BS1 中 35、45 GHz 毫米波信号和 BS2 中 65、95 GHz 毫米波信号)经 B-T-B、20 km 单模光纤、40 km 单模光纤传输后的误码率曲线。从图 6 中可以看出,随着接收光功率的降低,误码率逐渐增加,接收灵敏度与误码率大致成线性关系。下行链路中的 4 个毫米波信号在

三种传输模式下的接收灵敏度及功率代价如表 1 所示,可以看到:随着传输距离增大,接收灵敏度逐渐降低,功率代价逐渐变大;随着毫米波信号频率增大,接收灵敏度略有劣化,经 20 km 和 40 km 单模光纤传输后的功率代价均略微递增,但均在 1 dB 以内。

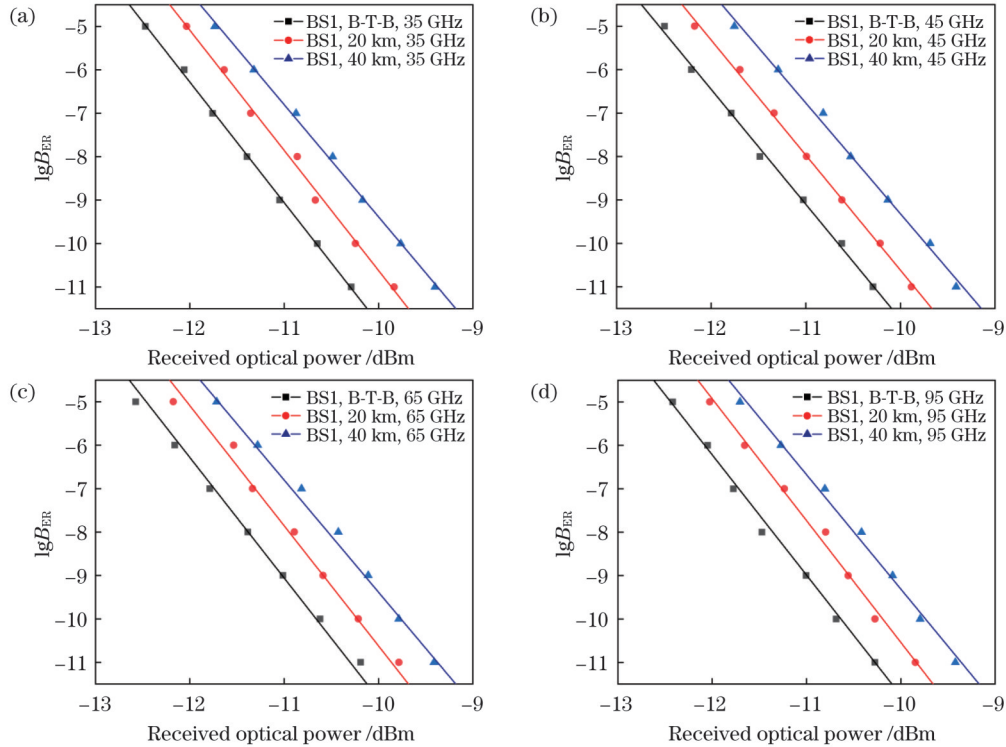


图 6 经 B-T-B、20 km 单模光纤和 40 km 单模光纤传输后,基站中 4 个毫米波信号的误码率曲线。(a) 35 GHz 毫米波信号; (b) 45 GHz 毫米波信号; (c) 65 GHz 毫米波信号; (d) 95 GHz 毫米波信号

Fig. 6 Bit error rate (BER) curves of four millimeter wave signals in base station for B-T-B, 20 km SMF and 40 km SMF transmission cases. (a) Millimeter wave signal with frequency of 35 GHz; (b) millimeter wave signal with frequency of 45 GHz; (c) millimeter wave signal with frequency of 65 GHz; (d) millimeter wave signal with frequency of 95 GHz

表 1 误码率为  $10^{-9}$  时,下行链路中 4 个毫米波信号的接收灵敏度和功率代价

Table 1 Receiving sensitivity and power cost of four millimeter wave signals in downlink when BER is  $10^{-9}$

Millimeter wave frequency /GHz	Receiving sensitivity of B-T-B /dBm	Receiving sensitivity of 20 km SMF /dBm	Receiving sensitivity of 40 km SMF /dBm	Power cost of 20 km SMF /dB	Power cost of 40 km SMF /dB
35	-11.047	-10.669	-10.168	0.378	0.879
45	-11.025	-10.619	-10.132	0.406	0.893
65	-11.013	-10.581	-10.109	0.432	0.904
95	-11.003	-10.558	-10.086	0.445	0.917

本文仅用下行链路中 45 GHz 毫米波的眼图来进一步说明 WDM-ROF 系统的下行传输性能。图 7 给出了经 B-T-B、20 km 单模光纤、30 km 单模光纤和 40 km 单模光纤传输后 45 GHz 毫米波信号对应的眼图。B-T-B 传输时,眼图大幅度张开;随着传输距离增加,光纤损耗增大,光信号功率降低。光信号各频率成分传输速度不同导致的色散,使得下行传输的数字信号光脉冲展宽,从而易产生码间干扰,增大了误码率,影响眼图的睁开效果;经 40 km 单模光纤传输后,眼图依然保持睁开且清晰,表明系统的下行传输性能

良好。

2) 上行链路的误码率曲线与眼图

图 8 给出了经 B-T-B、20 km 单模光纤和 40 km 单模光纤传输后上行数据 updata1 和 updata2 的误码率曲线,可以看出:上行数据 updata1 和 updata2 的误码率曲线相差不大,与下行链路类似,误码率随着接收光功率的降低而逐渐增加,接收灵敏度与误码率成线性关系。上行链路中的 updata1 和 updata2 经 20 km、40 km 单模光纤传输后的接收灵敏度和功率代价如表 2 所示,可以看到:随着传输距离增大,接收灵敏度逐渐降低,功

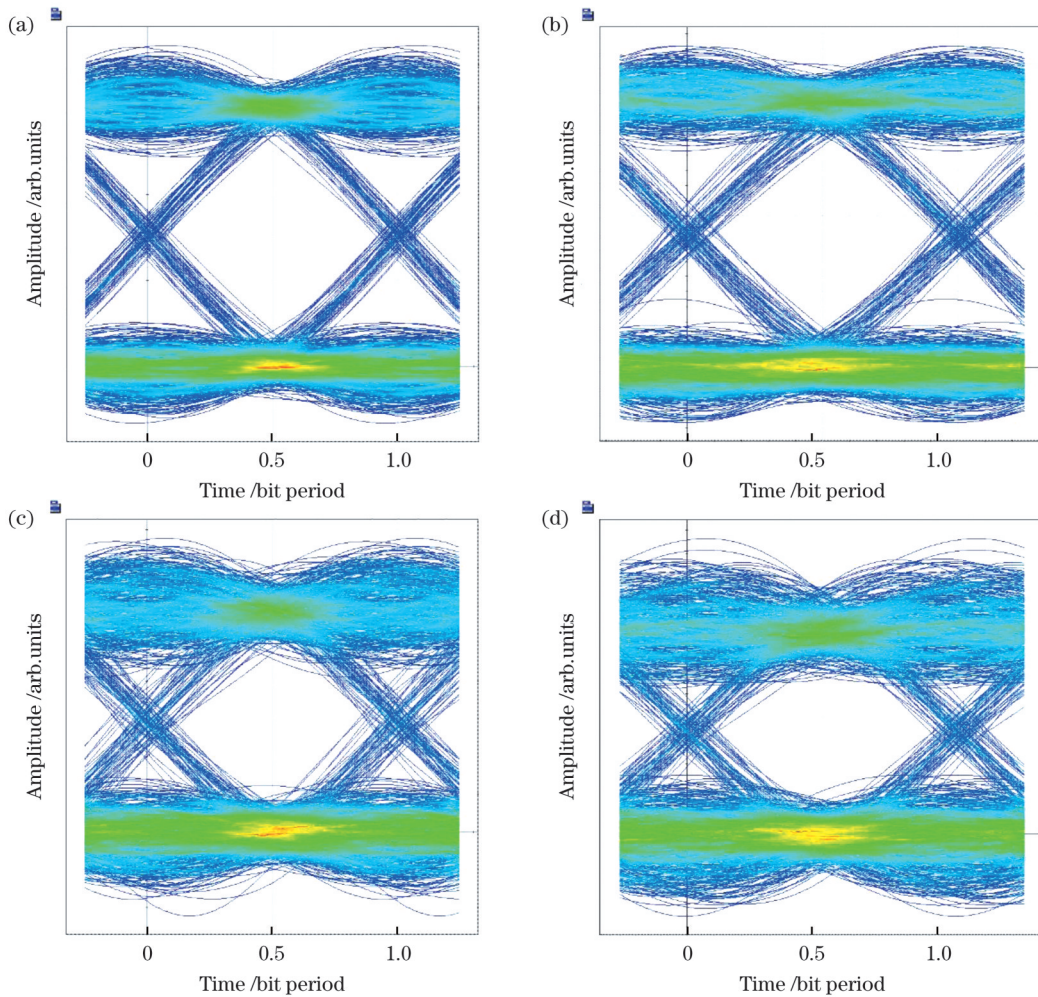


图 7 不同传输距离下 45 GHz 毫米波的下行数据眼图。(a) B-T-B; (b) 20 km 单模光纤; (c) 30 km 单模光纤; (d) 40 km 单模光纤  
 Fig. 7 Downlink data eye diagrams of 45 GHz millimeter wave for different transmission distances. (a) B-T-B; (b) 20 km SMF; (c) 30 km SMF; (d) 40 km SMF

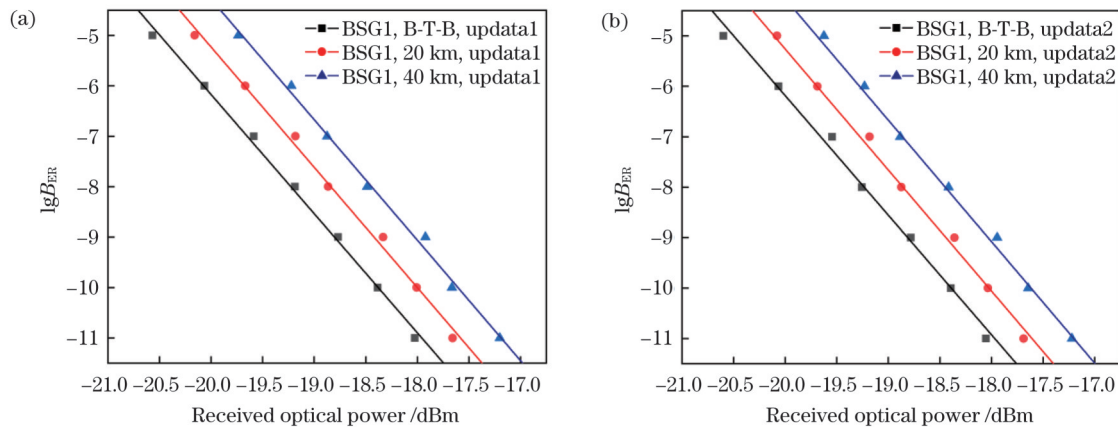


图 8 BSG1 中上行数据经 B-T-B、20 km 单模光纤和 40 km 单模光纤传输后的误码率曲线。(a) 上行数据 updata1; (b) 上行数据 updata2  
 Fig. 8 BER curves of uplink data in BSG1 for B-T-B, 20 km SMF and 40 km SMF transmission cases. (a) Uplink data updata1; (b) uplink data updata2

率代价逐渐变大; updata1 和 updata2 的接收灵敏度基本相同, 经 40 km 单模光纤传输后的功率代价分别为 0.846 dB 和 0.837 dB。由此可以看出, 上行链路的传输性能良好, 明显优于下行链路的传输性能。这是由于上行链路光纤中传输的是基带数据信号, 其抗色散

性能较好且对接收机的相位变化不敏感。

本文只给出了上行链路中 updata1 信号传输不同距离时对应的眼图, 如图 9 所示。经 B-T-B、20 km 单模光纤和 40 km 单模光纤传输后眼图比较清晰; 随着传输距离增加, 光信号功率因光纤损耗而有所降低, 并



表 2 误码率为  $10^{-9}$  时, 上行数据 updata1 和 updata2 的接收灵敏度和功率代价Table 2 Receiving sensitivity and power cost of uplink data updata1 and updata2 when BER is  $10^{-9}$ 

Uplink data	Receiving sensitivity of B-T-B /dBm	Receiving sensitivity of 20 km SMF /dBm	Receiving sensitivity of 40 km SMF /dBm	Power cost of 20 km SMF /dB	Power cost of 40 km SMF /dB
Updata1	-18.768	-18.332	-17.922	0.436	0.846
Updata2	-18.783	-18.358	-17.946	0.425	0.837

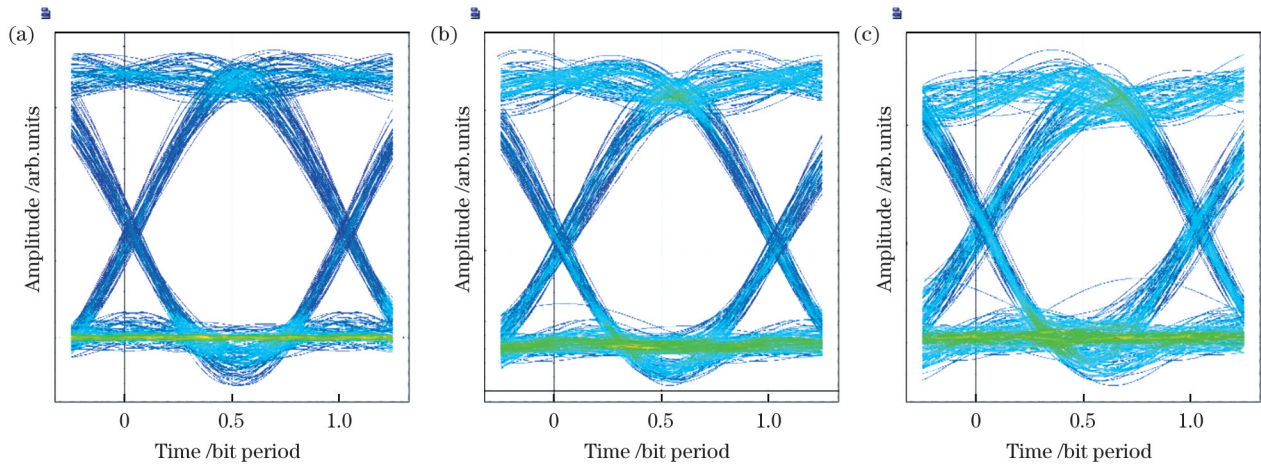


图 9 不同传输距离下上行数据 updata1 的眼图。(a) B-T-B; (b) 20 km 单模光纤; (c) 40 km 单模光纤

Fig. 9 Eye diagrams of uplink data updata1 for different transmission distances. (a) B-T-B; (b) 20 km SMF; (c) 40 km SMF

且上行传输的光信号频率成分少, 数字信号受光纤色散产生的码间干扰较小(与下行传输的数字信号相比), 因而眼图的睁开效果存在较小程度的闭合。这表明该系统的上行链路传输性能优良。

## 5 结 论

提出了一种基于光学频率梳的可选频毫米波生成多业务分层 WDM-ROF 系统, 并对其传输灵敏度和功率代价进行了研究。研究表明: 经 40 km 单模光纤传输后, 下行和上行数据的平均功率损耗均小于 1 dB; 下行链路和上行链路经 40 km 单模光纤传输后的眼图均保持睁开状态; 上行链路的传输性能明显优于下行链路。在增多光频梳梳线数目、调整光频梳频率间隔、增大 MEMS 光开关矩阵结构、配置多组基站的条件下, 该系统能够实现基站组扩展、毫米波信号选频与重构、多业务传输等功能, 为下一代宽带光无线接入网络提供了一条有效途径。

## 参 考 文 献

- [1] Safi H, Montazeri A M, Rostampoor J, et al. Spectrum sensing and resource allocation for 5G heterogeneous cloud radio access networks[J]. IET Communications, 2022, 16(4): 348-358.
- [2] López-Benitez M, Raschella A, Pizzi S, et al. Smart spectrum and radio resource management for future 5G networks[J]. Computer Networks, 2021, 193: 108089.
- [3] Okazaki H. FOREWORD: special section on microwave and millimeter wave technologies[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2020, E103-C(10): 396.
- [4] Li X Y, Yu J J, Chang G K. Photonics-aided millimeter wave technologies for extreme mobile broadband communications in 5G[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 366-378.
- [5] Wang W Z, He S W, Wu Y P, et al. Performance evaluation and analysis of millimeter wave communication system[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 159-170.
- [6] 李沙, 张春蕾, 王欢. 基于概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0906008. Li X, Zhang C L, Wang H. 16QAM/OFDM-RoF system based on probabilistic shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0906008.
- [7] 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.
- [8] Yu J J, Dong Z, Chi N. 1.96 Tb/s ( $21 \times 100$  Gb/s) OFDM optical signal generation and transmission over 3200-km fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1061-1063.
- [9] Yu J J, Dong Z, Chien H C, et al. 7-Tb/s ( $7 \times 1.284$  Tb/s/ch) signal transmission over 320 km using PDM-64QAM modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 264-266.
- [10] 马子洋, 吴琼琼, 李启华, 等. 超密集波分复用无源光网络的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500006. Ma Z Y, Wu Q Q, Li Q H, et al. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500006.
- [11] Ma J X, Zhang R J, Li Y J, et al. Full-duplex RoF link with broadband mm-wave signal in W-band based on WDM-PON access network with optical mm-wave local oscillator broadcasting[J]. Optics Communications, 2015, 336: 248-254.
- [12] Liu A L, Yin H X, Wu B. High-efficient full-duplex WDM-RoF system with sub-central station[J]. Optics Communications, 2018, 414: 72-76.
- [13] 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.
- [14] Pang X D, Beltrán M, Sanchez Vilchez J, et al. Centralized optical-frequency-comb-based RF carrier generator for DWDM fiber-wireless access systems[J]. Journal of Optical

- Communications and Networking, 2014, 6(1): 1-7.
- [15] 高军萍, 赵盟盟, 卢嘉, 等. 基于单个强度调制器产生宽光学频率梳系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0913001. Gao J P, Zhao M M, Lu J, et al. Wide optical frequency comb system based on single intensity modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0913001.
- [16] Das B, Mallick K, Mandal P, et al. Flat optical frequency comb generation employing cascaded dual-drive Mach-Zehnder modulators[J]. Results in Physics, 2020, 17: 103152.
- [17] Zhang C, Ning T G, Li J, et al. A full-duplex WDM-RoF system based on tunable optical frequency comb generator[J]. Optics Communications, 2015, 344: 65-70.
- [18] Li X Y, Yu J J. W-band RoF transmission based on optical multi-carrier generation by cascading one directly-modulated DFB laser and one phase modulator[J]. Optics Communications, 2015, 345: 80-85.
- [19] Zhou H, Fei C Y, Zeng Y T, et al. A RoF system based on 18-tuple frequency millimeter wave generation using external modulator and SOA[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102402.
- [20] 狄哈, 陈新桥, 刘晓蕊, 等. RoF 系统中基于双重幅度调制的载波重用技术[J]. 光通信技术, 2021, 45(3): 47-50. Di H, Chen X Q, Liu X R, et al. Carrier reuse technology based on double amplitude modulation in RoF system[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(3): 47-50.
- [21] 张义军. ROF 通信系统中单边带抑制技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013. Zhang Y J. The research of single sideband suppression for ROF communication system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [22] 王现彬, 卢智嘉, 吕梦琦, 等. 一种载边比可调单边带全双工光载无线系统[J]. 微波学报, 2021, 37(2): 89-94. Wang X B, Lu Z J, Lü M Q, et al. Optical single sideband full-duplex RoF system with continuously tunable optical carrier-to-sideband ratio[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(2): 89-94.
- [23] 刘婷婷. 基于光载波抑制的高倍频可调谐毫米波生成技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. Liu T T. Research on technique of millimeter wave generation with high and tunable frequency multiplication factor based on OCS [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [24] 肖子蕾. 基于外部强度调制器的光毫米波产生方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2014. Xiao Z L. Millimeter wave generation methods based on external intensity modulator[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [25] 陆敏婷. DWDM-ROF 系统中多载波光源生成结构的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018. Lu M T. Research on generating structure of multi-carrier light source used in DWDM-ROF system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [26] Zhang Q Y, Zhang C F, Chen C, et al. Multi-service radio-over-fiber system with multiple base-station groups enabled by scalable generation of multi-frequency MMWs[J]. Optics Communications, 2014, 324: 120-126.
- [27] Shen C, Li P L, Zhu X Y, et al. Ultra-flat broadband microwave frequency comb generation based on optical frequency comb with a multiple-quantum-well electro-absorption modulator in critical state [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2019, 12(4): 382-391.
- [28] Jeong U, Lee D H, Lee K, et al. Monolithic  $1 \times 8$  DWDM silicon optical transmitter using an arrayed-waveguide grating and electro-absorption modulators for switch fabrics in intra-data-center interconnects[J]. Micromachines, 2020, 11(11): 991.
- [29] 孙洋. 偏振不敏感高速电吸收调制器的研制[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2001. Sun Y. Development of polarization insensitive high-speed electro-absorption modulator[D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [30] 李永倩, 孟祥腾, 安琪, 等. 电光调制器自适应偏振控制系统设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1854-1858. Li Y Q, Meng X T, An Q, et al. Design and implementation of electro-optic modulator adaptive polarization control system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1854-1858.
- [31] 谢倩. 基于双平行马赫增德调制器产生 Nyquist 脉冲及平坦光频率梳的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. Xie Q. Study on the generation of Nyquist pulse based on dual parallel Mach-Zehnder modulator and the generation of flat optical frequency comb[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [32] 谢海伦, 贾可昕, 陈佳文, 等. 基于耦合射频信号和单个马赫-曾德尔调制器的可调光学频率梳[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0706002. Xie H L, Jia K X, Chen J W, et al. Tunable optical frequency comb based on coupled radio frequency signal and single Mach-Zehnder modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0706002.
- [33] Liu Y, Gao H, Chen Y, et al. Full-duplex WDM-RoF system based on OFC with dual frequency microwave signal generation and wavelength reuse[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 58: 102252.

## Multi-Service Layered WDM-ROF System with Optional Frequency Millimeter Wave Based on Optical Frequency Comb

Lu Zhenxu, Li Peili\*, Wang Haoran

College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** The advent of the high-speed information age has led to the diversification of user service demand, which the currently available spectrum cannot meet. Hence, exploiting higher-frequency millimeter wave signals has become necessary. However, the transmission performance of high-frequency millimeter wave signals is unstable, and their transmission distance is significantly shorter. Radio-over-fiber (ROF) technology using optical fibers to transmit wireless signals has low attenuation loss, large capacity, and long transmission distance. A combination of wavelength division multiplexing (WDM) technology with ROF, WDM-ROF, can handle the diversification of services and load different data in multiple channels. In recent years, it has become an area of intense research interest.

The current WDM-ROF systems have some issues, such as the high cost of the laser array, poor scalability and

reconfigurability, generation of single and non-adjustable millimeter wave signals, same service transmission for each base station, and being applicable only to a small number of scenarios. To overcome these shortcomings, we propose a multi-service layered WDM-ROF system with an optional frequency millimeter wave based on an optical frequency comb.

**Methods** The structural diagram of the proposed multi-service layered WDM-ROF system with an optional frequency millimeter wave based on an optical frequency comb is shown in Fig. 1. The system consists of CS (central station), RN (remote node), SCS (subcentral station), and BSG (base station group). In the CS, the generation of a flat optical frequency comb, loading of data, and uplinking of a reserved optical carrier are accomplished, which reduces the cost of the laser array and improves its scalability and reconfigurability. In the RN, the required optical frequency is filtered out by a WDM filter. In the SCS, the optical switch matrix controlling the combined output of different optical frequencies can realize the selection of millimeter wave frequencies. In the BS, four millimeter wave signals with different frequencies and two service information are generated by the PD and transmitted through the electric amplifier (EA) antenna, reducing the cost due to identical transmission in each base station and making the system applicable to more situations. Simultaneously, the uplink signal is loaded to realize uplink transmission. The proposed multi-service layered WDM-ROF system with optional frequency millimeter waves based on an optical frequency comb was simulated and verified using OptiSystem simulation software. In addition, its transmission sensitivity and power cost were studied.

**Results and Discussions** The proposed optical frequency comb generation scheme meets the requirements of a 21-line optical comb with a frequency interval of 20 GHz, and flatness of 0.96 dB is obtained by simulation (Fig. 2). In the downlink, two 10 Gbit/s downlink data are upconverted to four-millimeter wave signals of 35, 45, 65, and 95 GHz using the MEMS optical switch matrix in one of the control states and PD, and the bit error rate (BER) curves of four millimeter wave signals after B-T-B, 20 and 40 km SMF transmissions are shown (Fig. 6). The figure shows that the BER increases gradually with a reduction in the received optical power, and the relationship between the receiving sensitivity and BER is approximately linear. The receiving sensitivity and power cost of four millimeter wave signals in the downlink after 20 and 40 km SMF transmissions are listed in Table 1. The table shows that the receiving sensitivity gradually decreases, and the power cost gradually increases with an increase in the transmission distance. The receiving sensitivity slightly degrades with an increase in the millimeter wave signal frequency, the power cost slightly increases (within 1 dB) after 20 and 40 km SMF transmissions. The BER curves of uplink data updata1 and updata2 after B-T-B, 20 and 40 km SMF transmissions are shown in Fig. 8. The figure shows that the BER curves of uplink data updata1 and updata2 are similar to those of the downlink, the BER gradually increases with a decrease in the received optical power, and the receiving sensitivity is linear with the BER. The receiving sensitivity and power cost of updata1 and updata2 after 20 and 40 km SMF transmissions are given in Table 2. The table shows that the receiving sensitivity gradually decreases, and the power cost gradually increases with an increase in the transmission distance. The receiving sensitivities of updata1 and updata2 are similar, and the power costs after 40 km SMF transmission are 0.846 and 0.837 dB, respectively. The transmission performance of the uplink is good and better than that of the downlink.

**Conclusions** This study proposes a multi-service layered wavelength-division multiplexing radio-over-fiber (WDM-ROF) system in which an optional frequency millimeter wave is generated based on an optical frequency comb (OFC). The transmission sensitivity and power cost characteristics of the WDM-ROF system were studied. The simulation results show that the average power loss of the downlink and uplink is less than 1 dB after 40 km of SMF transmission, while the eye diagrams of the downlink and uplink remain open after 40 km of SMF transmission; the transmission performance of the uplink is better than that of the downlink. By increasing the number of optical frequency comb lines, adjusting the frequency interval of the optical frequency comb, increasing the optical switch matrix structure, and configuring multiple groups of base stations, the system can realize BSG expansion, frequency selection, reconstruction of millimeter wave signals, and multiple service transmissions, providing an effective way for next-generation broadband optical wireless access networks.

**Key words** optical communications; optical frequency comb; optional frequency millimeter wave; MEMS optical switch matrix; layered base station group