

射频无源光网络中几种新技术的研究

李荣玲 张俊文 邵宇丰 方武良 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要 随着各种多媒体业务的发展,对更高信道容量、更广服务覆盖范围以及宽带无线接入系统的强烈需求,使得基于光纤的无线信号传输(ROF)迅速发展起来。一些新型的技术如相干技术、多边带技术、多输入多输出(MIMO)技术、正交频分复用(OFDM)技术等,在ROF中的理论研究与应用也日趋完善,将其应用到射频无源光网络(RPON)系统中有望解决目前ROF接入的技术瓶颈,并改善ROF系统的性能。讨论和分析了这些新技术的原理,以及将其应用到ROF中的优缺点,以期为未来的研究提供一些参考。

关键词 光通信;射频无源光网络;相干技术;多边带技术;多输入多输出技术;正交频分复用技术

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.100603

Research of New Technologies Employed in Radio over Passive Optical Network

Li Rongling Zhang Junwen Shao Yufeng Fang Wuliang Chi Nan

(State Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit and System,

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

Abstract With the development of multimedia services, demands of higher channel capacity, wider service coverage and broadband wireless access advance radio over fiber (ROF) technology rapidly. Meantime, some new technologies, such as coherent technology, multiband technology, multiple input multiple output (MIMO), orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and so on, are introduced and being optimized in ROF system. Employing such new technologies in ROF system, promises to solve the present technological bottlenecks in radio over passive optical network (RPON) and optimize the performance of the whole system. In this paper, the principles of those technologies, how they could be used in ROF system and their advantages as well as shortcomings are discussed and analyzed to provide a reference for future researchs.

Key words optical communications; radio over passive optical network; coherent technology; multiband technology; multiple input multiple output; orthogonal frequency division multiplexing

OCIS codes 060.2330; 060.2605; 060.4080; 060.4230

1 引言

目前,基于光纤的无线信号传输(ROF)技术已经被广泛研究,因为它可以提供高的带宽和小的蜂窝尺寸(微微小区)。在ROF系统中,高频的无线信号在中心站(CS)和基站(BS)之间通过光纤传输,因而可以得到很高的带宽。大部分的信号处理,比如无线信号的产生、编码、复用和调制等都在中心站完成,从而降低了基站的复杂性,使得它可以以低成本的基础设施需求来发展宽带移动服务。实质上,ROF就是无线接入网和光网络的融合,通过使用ROF,可以将光网络的容量和无线接入网的灵活性结合起来。由于现在多模光纤^[1]和单模光纤的广泛铺设,ROF的发展很有前景,但是要将它应用到实际系统中,为移动和固定终端用户

收稿日期: 2011-04-24; **收到修改稿日期**: 2011-07-13; **网络出版日期**: 2011-09-25

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(600837004, 60777010)、中国博士后基金项目(20090460593)、上海博士后资助计划面上项目(A类)(10R21411600)和上海市曙光学者基金资助课题。

作者简介: 李荣玲(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: sophielinda2@gmail.com

导师简介: 迟楠(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信系统方面的研究。E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

提高更好、更多元化的服务,为未来的高清视频业务和多媒体业务做好准备,ROF 接入网需要进一步提高带宽和数据传输率以及对光纤非线性和色散的抵抗能力。为此,许多的研究者已经几种新技术应用在 ROF 系统中,以提高系统的性能^[2~9]。本文将重点讲述 ROF 系统中的光生毫米波技术、新型的光调制与信号处理技术、多业务与带宽支持技术、更高带宽的多天线技术以及正交频分复用(OFDM)技术,这些技术都是为解决 ROF 系统现有的问题而提出的。

光生毫米波技术扩展了 ROF 系统的传输带宽。由于可用的无线频带有限,未来的 ROF 希望利用毫米波段来满足日益增长的带宽需求,以及克服 ROF 接入网中的频率拥塞,因此 ROF 系统中的毫米波发生技术就成为了一个研究的热点。毫米波对于许多应用,如无线系统、雷达系统等,都是很重要的,因此目前已经有许多人研究过毫米波发生技术。然而,利用常规电子学的方法产生几十吉赫兹的毫米波仍然面临很多挑战,因此很多人已经尝试使用光学的方法产生毫米波^[2],即光生毫米波技术。

新型的光调制与信号处理技术提高了 ROF 系统的传输性能。ROF 实际上是通过光调制射频信号,以实现无线信号在光纤上的传输。因此,光调制方式的选择也是 ROF 系统中一个重要的问题。选择合适的调制方式可以降低光纤非线性的影响,提高 ROF 系统的传输性能。最近,在天线基站端使用光相位调制的 ROF 光链路备受瞩目。光相位调制相对于直接强度调制有一些优点,采用相位调制时,将无线信号映射到光载波上的处理是线性的,而且在远程天线端不需要偏压^[3]。由于光相位调制的信号不能直接采用平方律检波接收^[10],它要求一个相干接收机,因此相干接收机的设计就成为了系统的主要挑战。现在,高速器件和光电器件的不断发展,数字信号处理技术的前进,使得采用数字信号处理(DSP)的相干光接收机成为可能,一种适用于相位调制的 ROF 光链路 DSP 相干接收机已经被提出并得到实验证明^[3]。

多业务与带宽支持技术丰富了 ROF 系统的服务内容,使之更加实用。未来的 ROF 接入网应该同时提供高带宽与多业务,也应该同时满足固定和移动终端用户,因此多边带信号的调制和传输成为一个热门的研究方向。多边带信号的调制与传输早已经被实验证明,但是存在着许多严重的问题,比如系统非常复杂,并且需要昂贵的器件,光纤非线性和色散对信号影响太大等,这些都阻碍了多边带传输技术的实际应用。许多研究者都致力于解决上述问题,现在已有一定成效。

更高带宽的多天线技术进一步提高了 ROF 系统的传输速率。对于更高的数据传输速率的需求是没有止境的。无线系统中多输入多输出(MIMO)技术的出现,使得人们可以利用多个发射和接收天线的空间分集来实现更高的数据速率,更长的传输距离和更强的链路可靠性。MIMO 是 ROF 系统未来的发展趋势之一,它已经被多个下一代无线标准采用,如 WiFi 的 802.11n 标准,WiMAX 的 802.16e 和面向未来的基于蜂窝系统的 4 G/LTE(long term evolution)^[11]。

正交频分复用(OFDM)技术不仅可以增加 ROF 系统的覆盖范围,还可以进一步提高系统的传输速率。OFDM 技术早已被广泛应用于无线通信,现在由于其对光纤色散和偏振模色散具有很高的抵抗力,引起了 ROF 研究者的注意。由于 OFDM 信号的每个子载波的正交性,采用 OFDM 的系统具有更高的频谱效率以及更高的数据传输率^[4]。因此,OFDM 与 ROF 的结合,自然是扩展 ROF 系统带宽、增长无线信号传输距离的一个有效解决方法。

2 ROF 链路构架

现今的 ROF 系统构架主要有三种形式^[12~16],如图 1 所示。基于光纤的射频传输链路如图 1(a)所示,它的构造最为简单。已调射频(RF)信号在 CS 端产生,然后直接通过光纤传输到达 BS。在 BS 端,已调信号被光电探测器(PD)检测,经过放大之后传送给移动终端。图 1(b)是基于光纤的中频传输链路,在 CS 端,RF 信号首先下变频到中频段,然后已调信号直接通过光纤传输到达 BS。在 BS 端,已调中频信号(IF)被 PD 探测之后,经过中频放大并上变频到射频段,最后发送给移动终端。基于光纤的数字化中频传输链路如图 1(c)所示,其构造与基于光纤的中频传输链路类似,不同之处在于,在 CS 端,RF 信号下变频到中频段,在调制之前信号被数字化,再通过光纤传输到 BS。在 BS 端,已调信号采用 PD 检测之后,再将数字信号转换为模拟信号,然后上变频到射频段,最后传送给移动终端。

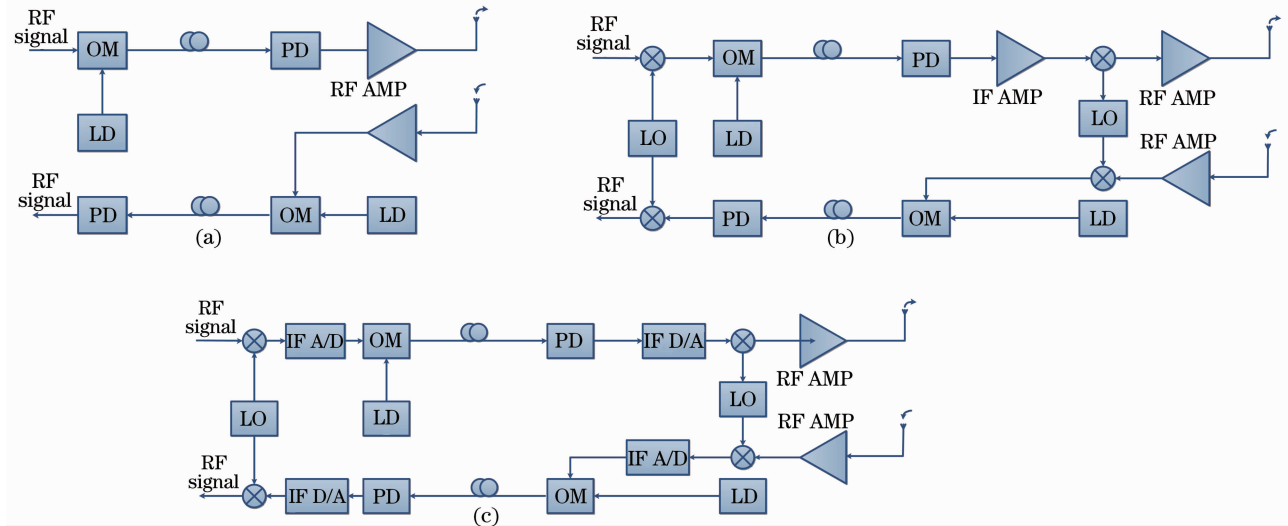


图1 (a)基于光纤的射频传输链路;(b)基于光纤的中频传输链路;(c)基于光纤的数字化中频传输链路

Fig.1 (a) RF transmission over fiber; (b) IF transmission over fiber; (c) digitized IF transmission over fiber

3 ROF 中的新技术

3.1 相干技术

相干技术在 ROF 系统中的应用已经越来越受重视,其对进一步提高 ROF 系统的带宽和对光纤非线性的抵抗力有着重要的作用。相干技术在 ROF 系统中主要体现在两个方面:1)毫米波产生;2)相干接收机。下面将从这两个方面具体讲述相干技术的原理与应用。

3.1.1 毫米波相干产生技术

为了提高可用带宽,未来的 ROF 会将频带扩展到毫米波段,所以简单有效的毫米波相干产生技术成为一个重要问题。ROF 毫米波系统的构造就主要取决于毫米波产生及其传输技术。应用光学方法产生毫米波的研究报道已有许多^[12,15,17~19],最常用的方法为光外差技术,其他还有三种新型的技术是外调制、电吸收收发机(EAT)以及上下变频^[2]。

光外差技术是指两个或多个光信号同时传输,最后在接收机中外差,外差所得到的一个或多个信号就是所需的 RF 信号。该技术最大的难点在于在光电二极管中外差的光信号必须与相位相关。外调制是由一个高速的外调制器如电吸收调制器(EAM)实现的,其系统结构简单,但存在一些缺点,如高插入损耗,并且光双边带信号对光纤色散效应很敏感。为了降低色散影响,可以采用单边带(SSB)调制。EAT 是一个在无源波导区域内两面都有吸收区域的电吸收型(EA)波导器件^[5],其构造是最简单的,同时还具有低成本的特点,并能设计在毫米波段有最小的回波损耗。EAT 两面吸收区域中的一面为下行链路提供光电转换,另一面为上行链路提供电光转换。两个不同波长的光信号从 CS 传到 BS,其中一个信号被下行的用户数据调制,另一个则被 BS 传来的上行数据调制,然后回传给 CS,因此 EAT 适用于全双工链路。在上下变频技术中,光纤传输的是 IF 信号,而不是 RF 信号,其特点是传输的中频带光信号几乎不受光纤色散的影响。比如,在上变频模式中,基带信号首先被调制到一个更高频率的中频,然后含有数据的中频信号被光调制,通过光纤传输,最后上变频为 RF 信号。

几种毫米波发生技术的优缺点比较如表 1 所示。

3.1.2 ROF 相干接收机

随着集成电路和数字信号处理技术的发展,相干解调、电子均衡技术以及前向纠错等关键技术的光通信中得到广泛应用,相干链路由于其优点已经越来越受重视。相干链路相对于直接检测链路有几个重要的优点,如分开波分复用信号的能力,频率变换和相位调制的使用^[20]。现在,ROF 系统已不再完全依赖于二进制强度调制,开始采用其他的调制格式,因此采用光相位调制的 ROF 系统也就应运而生。实现相位调制 ROF 链路的主要挑战在于光接收机,因为相位调制要求一个相干接收机,下面就介绍一种基于光相位调制

的 ROF 相干接收机。整个相干链路的构造和数字相干接收机的框图如图 2 所示^[3]。

表 1 几种毫米波发生技术比较

Table 1 Comparison of different millimeter-wave signal generation techniques

Technique	Optical heterodyne	External modulation	EAT	Up- and down-conversion
Advantage	No fiber dispersion effect; high link gain; high carrier-to-noise ratio (CNR)	Simple; supporting high frequency RF signals; simple light source	Simplest; low cost BS	No fiber dispersion effect; direct IF modulation
Disadvantage	Complicated configuration; phase correlated optical carriers; complicated light source	High insertion loss; high RF return loss; frequency chirping; requiring high driving voltage	High RF return loss; WDM; crosstalk	Requiring millimeter-wave oscillator; requiring high conversion efficiency mixer; high cost

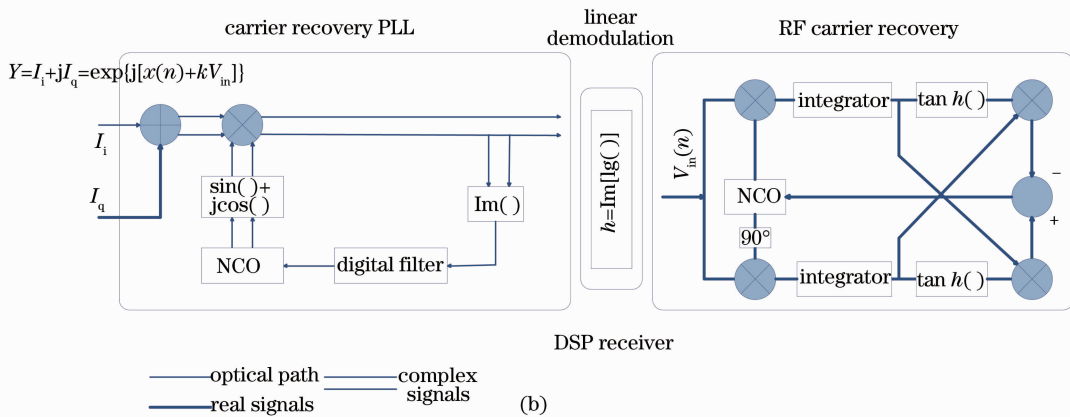
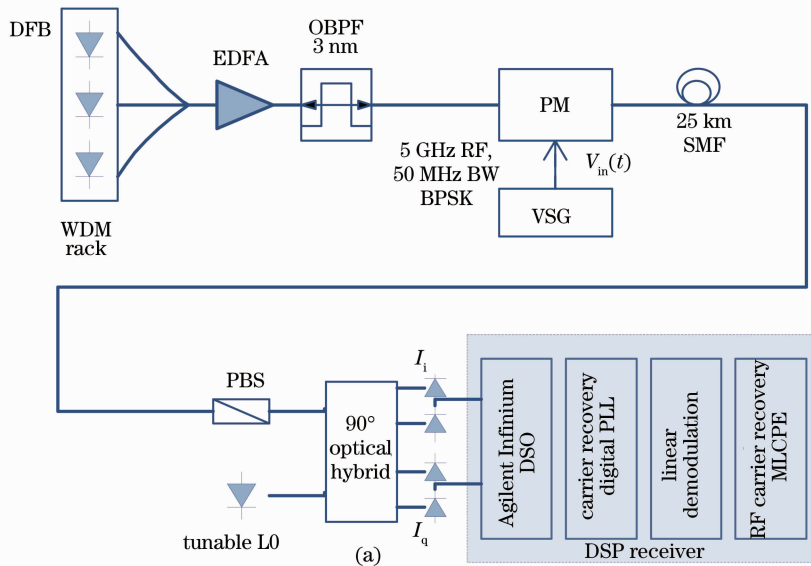


图 2 (a)采用数字相干检测的(WDM)相位调制 ROF 光链路框图;(b)相干接收机框图

Fig. 2 (a) General outline for the (WDM) phase-modulated ROF optical link using digital coherent detection; (b) outline of the digital coherent receiver

发送机由 3 个可调谐分布式反馈(DFB)激光器组成。发送机的输出信号被高功率掺铒光纤放大器(EDFA)放大,并经光带通滤波器(OBPF)滤波,传输到一个传统的铌酸锂光相位调制器(PM),该相位调制器波由矢量信号发生器(VSG)产生的 BPSK 或 QPSK 数据信号调制的 RF 载波驱动。在标准单模光纤(SMF)上传输之后,相位调制的光信号被偏振分束器(PBS)分成了两路偏振光信号。在接收机端,用一个 90° 的光混频器将接收到的信号与可调谐外腔本地振荡(LO)激光器信号进行混合。如图 2 所示,在接收机端光混频之前,利用偏振控制器对齐偏振方向以获得最大光功率。在实际系统中,还可采用极化分集技术或极化跟踪技术。同相(I_i)和正交(I_q)光信号分量使用两对均衡光电二极管检测。高带宽实时示波器采样得到光电流被用于离线信号解调和数据恢复。数字化的光电流构成一个复数量 $Y[n] = I_i[n] + jI_q[n] = \exp\{j[x(n) + kV_{in}]\}$,其中 n 为整数, k 为常数。数字信号 $Y[n]$ 包含了补偿发送机与 LO 激光器 $[x(n)]$ 之间的相位和频率差,并恢复了 RF 载波频率和相位。在图 2 中,发送机激光器和 LO 激光器之间的频率偏移包含在复量 $Y[n]$ 中,通过载波恢复数字锁相环(PLL)滤波,并被线性解调器模块解调的信号为发送机端的 RF 信号,即 V_{in} ,该信号被送至 RF 载波恢复模块,以消除 RF 载波和相位,从而完成信号解调。如果数据信号采用二进制幅移键控(ASK)调制,只需要对最后的载波恢复模块做细微的修改即可适用^[21]。

3.2 多边带技术

未来的有线和无线接入带宽预计将达到 Gb/s 量级,以便提供高清视频服务。多边带的调制和传输已经被验证。最近,又有一种新型的多边带发生方案被提出并已验证,与之前的方案相比,它可以提供高的色散容限,但是由于对两个马赫-曾德尔调制器(MZM)同时产生单边带和光载波抑制的要求,它需要昂贵而复杂的偏压电路,以维持两个调制器的精确工作点,这点在实际系统中很难实现。使用多边带技术的 ROF 系统框图如图 3 所示^[6]。

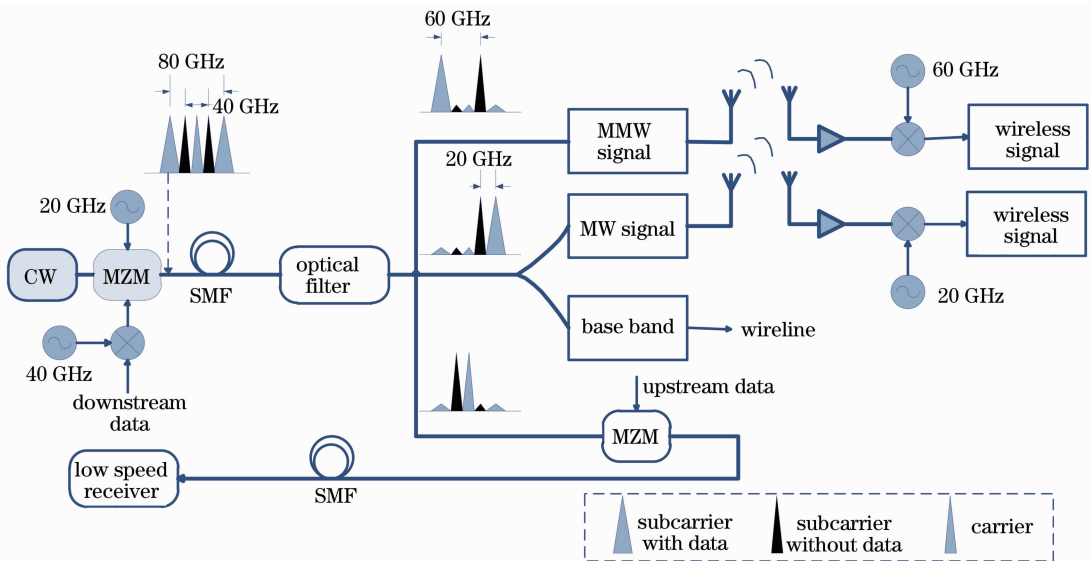


图 3 多边带信号的产生和传输框图

Fig. 3 Schematic diagram of the multiband generation and transmission

来自分布式反馈激光二极管的连续波(CW),用 $E_{in} = E_0 \exp(j\omega_c t)$ 表达,被两个调制驱动信号 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 通过 MZM 调制。 $V_1(t)$ 包含与电正弦信号混频的基带数据,可写为 $V_1(t) = A(t) \cos(\omega_1 t)$,式中 $A(t)$ 表示 2.5 Gb/s 的基带数据信息, ω_1 为 40 GHz 电正弦信号的角频率。 $V_2(t)$ 包括一个 20 GHz 射频正弦时钟和一个直流偏置电压,可写为 $V_2(t) = V_b + B \cos(\omega_2 t)$,式中 V_b 为直流偏置电压, B 和 ω_2 是电正弦信号的振幅和角频率。假设 MZM 两臂的功率分束比为 1:2。MZM 输出端的电场由下式给出

$$E_{out} \approx \frac{\sqrt{\alpha} E_0}{2} \{ [J_0(m_A) + J_0(m_B) \exp(j\pi V_b/V_\pi)] \exp(j\omega_c t) + J_1(m_A) \exp[j(\omega_c + \omega_1)t + \pi/2] + J_1(m_A) \exp[j(\omega_c - \omega_1)t + \pi/2] + J_1(m_B) \exp(j\pi V_b/V_\pi) \exp[j(\omega_c + \omega_2)t + \pi/2] + J_1(m_B) \exp(j\pi V_b/V_\pi) \exp[j(\omega_c - \omega_2)t + \pi/2] \}, \quad (1)$$

式中 α 是 MZM 插入损耗, $J_k(x)$ 是 k 阶第一类贝塞尔函数, 并且 $m_A = \pi A(t)/V_\pi$ 和 $m_B = \pi B/V_\pi$ 表明, 载波和 4 个子载波之间等间距 20 GHz, 2 个内子载波都没有任何数据信息。在光纤上传输 L 的距离之后, 在基站, 不同频段通过光滤波器分离。60 GHz 的毫米波 (MMW) 和 20 GHz 的微波 (MW) 信号都是具有高色散容限的光单边带调制方案。光毫米波和微波通过 PIN 二极管检测, 其光电流如下描述

$$I_{\text{MMW}} = \frac{\mu \alpha E_0^2}{4} \left\{ J_1^2(m_A) + J_1^2(m_B) + 2J_1(m_A)J_1(m_B)\cos[(\omega_1 + \omega_2)t - \beta'(\omega_c)(\omega_1 + \omega_2)l + \frac{1}{2}\beta''(\omega_c)(\omega_1^2 - \omega_2^2)l + \pi V_b/V_\pi] \right\}, \quad (2)$$

$$I_{\text{MW}} = \frac{\mu \alpha E_0^2}{4} \left\{ J_1^2(m_A) + J_1^2(m_B) + 2J_1(m_A)J_1(m_B)\cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \beta'(\omega_c)(\omega_1 - \omega_2)l + \frac{1}{2}\beta''(\omega_c)(\omega_1^2 - \omega_2^2)l - \pi V_b/V_\pi] \right\}, \quad (3)$$

式中光纤损耗被忽略, μ 是 PIN 二极管的响应度。此外, 传播常数 $\beta(\omega_c + n\omega_m)$ 用它的泰勒展开代替

$$\beta(\omega_c + n\omega_m) = \beta(\omega_c) + \beta'(\omega_c)(n\omega_m) + \beta''(\omega_c)(n\omega_m)^2 + \dots, \quad (4)$$

并且忽略高阶光纤色散。

通过滤除高频载波信号, 可以得到基带信号, 基带信号可以直接通过用户单元铺设的光纤传输, 从而实现了有线无线同时接入。而用户单元只需要一个低成本的接收机直接检测基带信号即可, 因而大大降低了成本^[22]。此外, 载波和内子载波被滤出, 以便被上行数据再调制, 然后传送给 CS, CS 端采用一个低速接收机检测信号^[6]。另外, 工作点对上行链路调制的重用载波有重大影响。由载波传送的下行链路数据引起的消光比越大, 上行链路性能越差, 同时, 下行链路的毫米波和微波信号几乎不随偏置点变化。对于上述方案, 最佳偏置点应约 $0.8V_\pi$ 。

3.3 MIMO 技术

在分配的无线信道带宽没有增加的情况下, 对更高的数据传输速率的持续需求使得采用 MIMO 技术的 ROF 系统应运而生。MIMO 系统可以利用空间分集和相位分集, 并提供比单天线更高的数据传输率。MIMO 技术的应用给 ROF 系统带来了新的挑战, 由于多个无线信号都在一个特定频率范围, 因此需要一种经济而有效的方式来维持 MIMO 信号的相位和空间分集。虽然可以采用波分复用技术、光子载波复用技术实现, 但是它们都有一些致命的缺点。波分复用技术需要多个发送机和接收机, 而光子载波复用要求严格的窄带滤波器。最近已经验证了一种支持多频带多业务的 MIMO 信号传输的 ROF 系统^[23], 此系统采用了宽带带移机制并且不需要任何窄带滤波器, 因此提高了成本效益。图 4 显示了多业务宽带 MIMO 传输的框图。

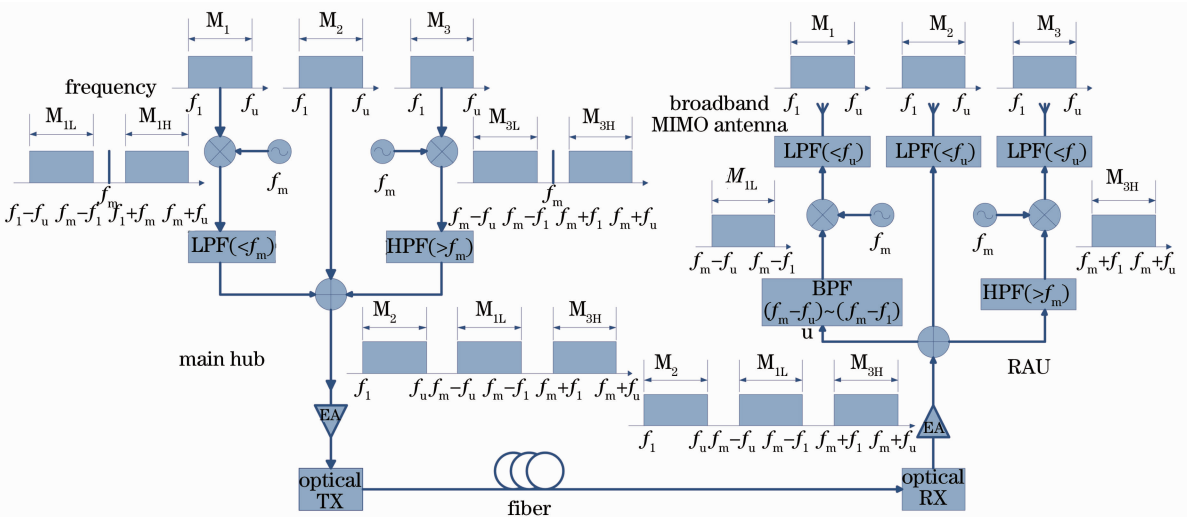


图 4 多业务 MIMO-ROF 系统框图

Fig. 4 Block diagram of the multi-service multiband MIMO-ROF system

在 CS 端,三个宽带 MIMO 信号(M_1, M_2 和 M_3)从服务提供商方面接收,其中每一个 MIMO 频带都携带了从 $f_1 \sim f_u$ 的多个 RF 信号。 M_1 和 M_3 频带与本地振荡器 f_m 混频,分别使 M_1 带移到 M_{1L} 和 M_{1H} , M_3 带移到 M_{3L} 和 M_{3H} 。将新生成的频带分别通过截止频率为 f_m 的宽带低通滤波器(LPF)和宽带高通滤波器(HPF)。但是,低通滤波器只允许 M_{1L} 通过,而高通滤波器只允许 M_{3H} 通过。新生成的 M_{1L}, M_{3H} 和原始的 M_2 频带通过 RF 相加器混频。本振频率 f_m 应高于 $2f_u$, 以便新生成的频带 M_{1L} 不会与原始的 M_2 频带重叠。此方案中,设定 M_1, M_2 和 M_3 在 500 MHz(f_1)~3 GHz(f_u)之间,本地振荡器频率为 7 GHz(f_m)。因此,RF 相加器后合并信号的范围为 500 MHz~10 GHz。在经过标准单模光纤传送到远端天线单元(RAU)之前,合并后的信号用于驱动一个合适带宽的光发送机。

在 RAU 端,带移 MIMO 信号通过光电探测器接收,并将其分成三路信号。一路信号通过截止频率为 f_u 的低通滤波器,以恢复 M_2 信号,其他两路信号分别通过宽带带通滤波器(BPF)和合适带宽的宽带高通滤波器。该带通滤波器和高通滤波器的输出与本振频率 f_m 进行混频,在通过另一组截止频率为 f_u 的低通滤波器之前实现频带回移。低通滤波器各自的输出是原始的 M_1 和 M_3 MIMO 信号。最后得到的 MIMO 信号在无线链路中传输,用户端进行接收,然后对其提供服务。

3.4 OFDM 技术

OFDM 应用在无线通信系统中,可以改善多径传输带来的信道衰落。在 OFDM 系统中,高速信号被分成多路低速信号,并分别加载到正交的副载波上传输,彼此之间没有干扰,所以 OFDM 可以有效地降低光纤色散的影响,提高 ROF 系统的性能。总的来说,光的 OFDM 技术有如下优点^[24]:1)将高速信号分为多路低速信号,降低了码间干扰;2)OFDM 采用的副载波是等间隔的,所以光纤传输时由于色散而引入的线性相移就可以在接收机处很容易地纠正;3)信号的副载波相互正交,不再需要大量的频率间隔,提高了频谱效率;4)不需要大量的振荡器和滤波器,成本效益好。采用 OFDM 技术的 ROF 系统构架如图 5^[4]所示。

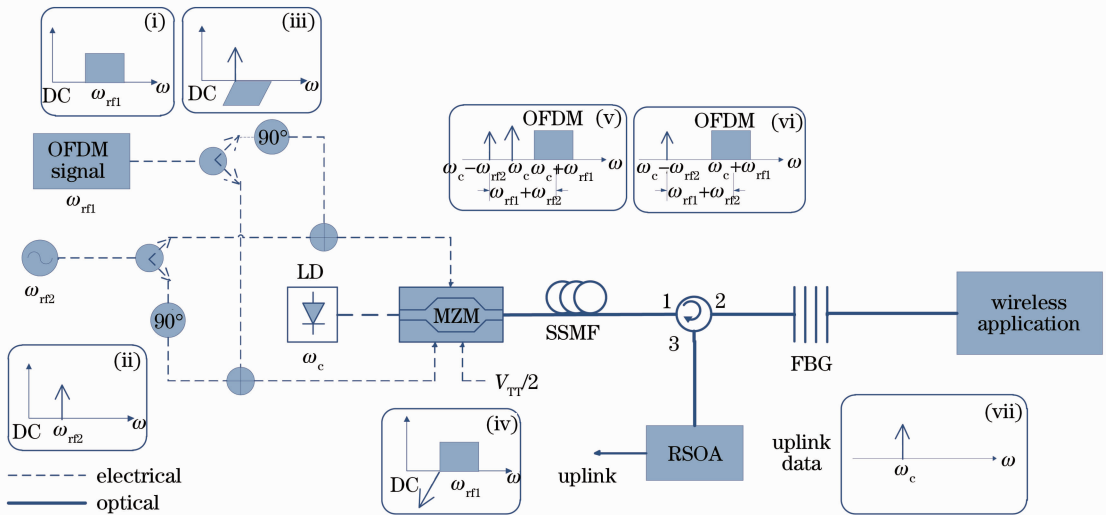


图 5 采用 TSSB 调制的倍频系统概念图

Fig. 5 Conceptual diagram of the frequency doubling system using TSSB modulation

此系统采用倍频技术产生毫米波。该技术也被应用在低频的射频振荡器产生毫米波方面^[4,25],具有成本效益高等特点。调制技术采用的是串联式单边带(TSSB)调制,其原因是传统的抑制载波双边带调制(DSB-SC)调制方式仅支持 OOK 格式,并且 SSB 信号相对于双边带调制(DSB)信号对光纤色散不那么敏感。TSSB 调制方案是利用一个正交点偏置的双电极 MZM 实现的。在 OFDM 路径和正弦信号路径上分别添加一个 90° 相移,以产生 OFDM 调制的上光边带和未调制的下光边带。OFDM 信号和正弦信号合并之后,如图 5 中的(iii)和(iv)所示,被传送到双电极 MZM,在 MZM 输出端得到一个包含原始的光载波(ω_c)、OFDM 调制的光边带($\omega_c + \omega_{rf1}$)以及未调制的光边带($\omega_c - \omega_{rf1}$)的 TSSB 光谱,如图 5 中的(v)所示。经过标准单模光纤(SSMF)传输之后,在远程节点使用光纤布拉格光栅(FBG),将原始的光载波(ω_c)与其他两个边带分离,如图 5 中的(vi)和(vii)所示,因此原始的光载波可以为上行链路的数据所用,而未调制和 OFDM 调

制的光边带则被无线终端用户接收。如此,系统可以升级为全双工系统,而且不需要为上行链路增加额外的光源,极大地节约了成本。需要注意的是,由于 ω_{rf1} 等于 ω_{rf2} ,因而实现了二倍频。未调制和 OFDM 调制的光边带之间的光功率比($R_{OP} = P_{\text{sub_carrier}}/P_{\text{OFDM}}$,其中 $P_{\text{sub_carrier}}$ 和 P_{OFDM} 分别是未调制和 OFDM 调制的光边带的平均功率)是优化接收机性能的一个重要因子,并且未调制和 OFDM 调制的光边带是由两个驱动信号产生的,因此 R_{OP} 可以自由设置以优化接收机性能。基于以上提出的 TSSB 调制方案,可以利用高频谱效率的矢量信号使得 OFDM-ROF 系统不存在由色散引起的性能衰减。

4 几种新型技术的对比

以上介绍的 ROF 系统中的新技术,包括相干技术、多边带技术、MIMO 技术以及 OFDM 技术等,都在未来的 ROF 系统应用中极具潜力。相干的 WDM-ROF 系统可以克服光纤色散的影响,提供很高的系统容量,但是系统成本高是其致命缺点,并且频谱效率也不高。多边带 ROF 系统成本相对而言有所降低,但却降低了系统容量。MIMO-ROF 系统成本低,并且频谱效率较高,但是电处理却很复杂。OFDM-ROF 系统突出优点是频谱效率高,系统成本低,并且支持动态带宽分配(DBA),但是电处理也很复杂。每种技术都各有优缺点,如表 2 所示^[2]。

表 2 几种新型技术的比较
Table 2 Comparison of different new technologies

Technology	DBA	Capacity	Cost	Upgradeability	Electrical processing	Dispersion effect	Wavelength reuse	Spectral efficiency
Coherent WDM-ROF	No	Ultra large	Very high	Bad	Easy	Low	Yes	Not high
Multi-carrier ROF	No	Large	High	Good	Easy	Lower	Yes	Not high
MIMO-ROF	No	Very large	Low	Good	Very complex	Low	No	High
OFDM-ROF	Yes	Large	Low	Very good	Complex	Very low	Yes	Very high

5 结 论

本文论述了一些新型技术在 ROF 系统中的应用,并分析了这些新型 ROF 方案各自的优缺点。显然,仅仅依靠上述技术中的任何一种是不足以实现未来理想的 ROF 接入系统的,必须综合它们的优点,总结现有系统的经验,并且不断发展出更先进的技术,才能够实现 ROF 接入千家万户的美好前景。

参 考 文 献

- 1 Anthony Nkansah, Nathan J. Gomes. Characterization of radio over multimode fiber links using coherence bandwidth[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2694~2696
- 2 N. Mohamed, S. M. Idrus, A. B. Mohammad *et al.*. Review on system architecture for the millimeter-wave generation techniques for RoF communication link [C]. *IEEE International RF and Microwave Conference Proceedings*, 2008, 326~330
- 3 Darko Zibar, Xianbin Yu, Christophe Peucheret *et al.*. Digital coherent receiver for phase-modulated radio-over-fiber optical links[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(3): 155~157
- 4 Chunting Lin, Jyehong Chen, Po-Tsung Shih *et al.*. Ultra-high data-rate 60 GHz radio-over-fiber systems employing optical frequency multiplication and OFDM formats[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(16): 2296~2306
- 5 K. Kitayama, K. Ikeda, T. Kuri *et al.*. Full-duplex demonstration of single electroabsorption transceiver base station for mm-wave fiber-radio systems[C]. *2001 International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2001, 73~76
- 6 Yuting Hsueh, Zhensheng Jia, Hungchang Chien *et al.*. A novel bidirectional 60-GHz radio-over-fiber scheme with multiband signal generation using a single intensity modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(18): 1338~1340
- 7 Yufeng Shao, Junwen Zhang, Wuliang Fang *et al.*. A novel OFDM-CPM modulation scheme and its application in WDM-PON [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 894~898
- 8 Li Jin, Ning Tigang, Qi Chunhui *et al.*. Design of Bi-directional radio over fiber transmission system based on optical frequency multiplication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 607~613
- 李 晶, 宁提纲, 祁春慧等. 基于光学倍乘法产生光生毫米波的全双工毫米波光纤传输系统设计 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 607~613

- 9 Zhang Yimin, Chen Lin, Cao Zizheng *et al.*. Experimental research about a full-duplex OFDM-ROF system based on intensity modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1744~1749
张益民, 陈林, 曹子峥等. 基于强度调制器的全双工 OFDM-ROF 系统实验研究 [J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1744~1749
- 10 Peter J. Winzer, René-Jean Essiambre. Advanced optical modulation formats[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, **94**(5): 952~984
- 11 Chinpang Liu, Alwyn Seeds. Transmission of MIMO radio signals over fibre using a novel phase quadrature double sideband frequency translation technique[C]. 2008 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2008, 23~26
- 12 Ken-ichi Kitayama, Toshiaki Kuri, Hiroyuki Yokoyama *et al.*. 60 GHz millimeter-wave generation and transport using stabilized mode-locked laser diode with optical frequency DEMUX switch [C]. IEEE GLOBECOM, 1996, **3**: 2162~2169
- 13 D. Wake, M. Webster, G. Wimpenny *et al.*. Radio over fiber for mobile communications [C]. 2004 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2004, 157~160
- 14 Dalma Novak, Zaheer Ahmed, Rodney B. Waterhouse *et al.*. Signal generation using pulsed semiconductor lasers for application in millimeter-wave wireless links [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1995, **43**(9): 2162~2169
- 15 J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann *et al.*. Optical generation of very narrow linewidth millimeter wave signals [J]. *Electron. Lett.*, **28**(25): 2309~2311
- 16 L. Noël, D. Wake, D. G. Moodie *et al.*. Novel techniques for high-capacity 60-GHz fiber-radio transmission systems [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1997, **45**(8): 1416~1423
- 17 D. Novak, Z. Ahmed, R. B. Waterhouse *et al.*. Signal generation using pulsed semiconductor lasers for application in millimeter-wave wireless links[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1995, **43**(9): 2257~2262
- 18 T. Kuri, K. Kitayama. Optical heterodyne detection technique for densely multiplexed millimeter-wave-band radio-on-fiber systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(12): 3167~3179
- 19 Z. Deng, J. P. Yao. Photonic generation of microwave signal using a rational harmonic mode-locked fiber ring laser[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2006, **54**(2): 763~767
- 20 Ignacio Gonzalez Insua, Christian G. Schäffer. Heterodyne radio over fiber system with 10 Gbps data rates[J]. OFC 2009, 2009, JWA52
- 21 Darko Zibar, Idelfonso Tafur Monroy, Christophe Peucheret *et al.*. DSP based coherent receiver for phase-modulated radio-over-fiber optical links[J]. OFC 2008, 2008, OThH3
- 22 Gee-Kung Chang, Jianjun Yu, Zhensheng Jia *et al.*. Novel optical-wireless access network architecture for simultaneously providing broadband wireless and wired services[J]. OFC 2006, 2006, OFM1
- 23 Arshad Chowdhury, Hung-Chang Chien, Jian Wei *et al.*. Multi-service multi-carrier broadband MIMO distributed antenna systems for in-building optical wireless access[J]. NFOEC 2010, 2010, JWA57
- 24 Fang Wuliang, Zhang Junwen, Hou Chunling *et al.*. Employment of new information processing technologies in passive optical network[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 52~58
方武良, 张俊文, 侯春宁等. 新型信息处理技术在光无源接入网中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(12): 52~58
- 25 L. Chen, J. Lu, J. He *et al.*. A radio-over-fiber system with photonic generated 16QAM OFDM signals and wavelength reuse for upstream data connection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(3): 222~225