

# 支撑RoF技术的新型光电子器件及技术

## Novel Photoelectron Elements and Technologies to Support RoF

中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1009-6868 (2009) 03-0011-06

**摘要:**在高频的微波光子学研究的领域中,光载无线(RoF)技术已经成为下一代宽带无线通信技术的发展热点。近年来,支撑RoF技术的新型光电子器件的关键技术有毫米波副载波光学产生技术和接收技术,其中包括外调制器方法、射频上转换法、光学外差法、毫米波调制光脉冲发生器等。这些技术的突破将促进RoF技术市场化的步伐。

**关键词:**无线光载系统技术;光电子器件;光学产生技术

**Abstract:** In the research of high-frequency microwave photonics, Radio over Fiber (RoF) technology has become the hot spot in the next generation broadband wireless communication technologies. The key technologies of novel photoelectron elements to support RoF are optical generations and receivers technologies for millimeter wave subcarrier, including external modulator method, radio frequency up-conversion method, self-heterodyne method, generator of optical pulse self-modulation, and so on. These technologies will contribute to the RoF technology breakthrough in the speed of application.

**Key words:** RoF system technology; photoelectron elements; optical generation of millimeter wave subcarrier

瞿荣辉/QU Rong-hui

(中国科学院上海光学精密机械研究所 信息光学实验室,上海 201800)  
(Lab of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

构包括双向的收发模块、远端的收发模块和光纤。与传统的无线通信系统技术相比,RoF通信系统有着更广的蜂窝覆盖、更宽的带宽、较低的成本、较低的功耗和易安装等优点,因此在未来通信、军事上等诸多领域有着非常重要的应用价值。在激光技术与光通信技术推动下发展起来的RoF用的新型光电子器件,与微波器件相比具有体积小、重量轻、速度快、精度高、效率高、功耗低、价格低等多种优点,将激光、光电子、光纤技术的成果与微波技术的融合,必将带来优势互补,解决一些难以克服的“瓶颈”问题,获得一些意想不到的效果。为此,必须掌握满足毫米波副载波光纤通信需要的关键器件和技术。

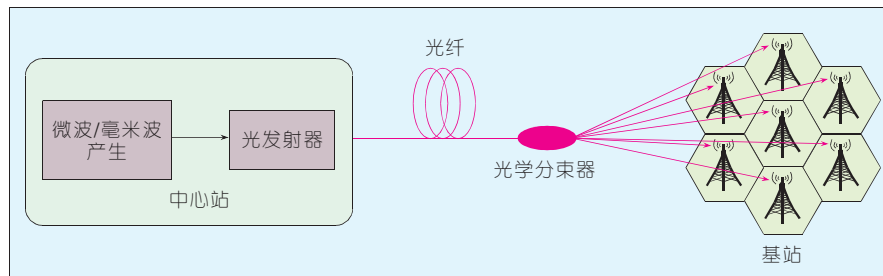
### 1 基于光电子器件的毫米波副载波的光学产生技术

毫米波副载波由于具有较高的频率,很难直接通过激光器的直接调

**微**波光子学作为一个微波技术和光子技术相融合的学科和技术,其发展史可以追溯到激光和光纤发明之初<sup>[1]</sup>,随着超高速光纤通信技术的成熟、宽带无线个人移动通信的普及以及微波技术在军事、工业和尖端科研中应用的增长,微波光子学正展现出一个个生机勃勃的发展机遇和前景。目前,光纤通信技术不断发展与进步,已经实现了单一波长信道的40 Gb/s的高速宽带信息传送,解决了克服光纤中色散、非线性等效应的光学器件和技术问题。用光时分复用技术获得更高频率信号的研究取得了突破,太赫兹技术也在光学科技的推

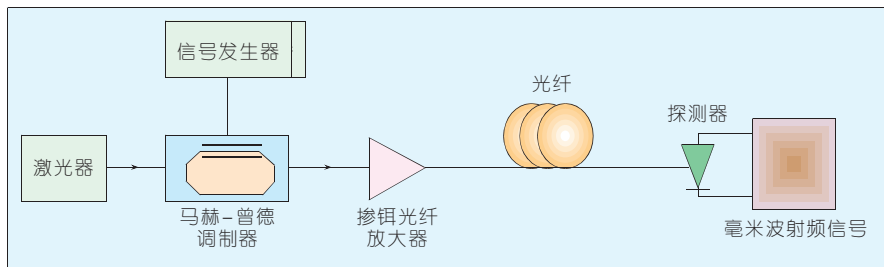
动下取得了快速的进展。而在高频的微波光子学研究的领域中,利用光学方法产生毫米波调制的副载波信号,将光纤传输、高速光电子器件与毫米波信号在空间的辐射传送相互融合,已经成为下一代宽带无线通信技术的发展热点,即光载无线(RoF)技术,其基本概念如图1所示。

通常来说,RoF通信系统基本结



▲ 图1 RoF通信系统结构简图

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60871067)



▲图2 外调制RoF发射器示意图

制的方法获得。因此,随着光电子器件技术的快速发展,一些光生毫米波技术在近年来已经被大量的提出,总体归纳起来大致上可分成4种类型<sup>[2]</sup>:一是使用外部光学调制器法,即利用高速外部光学调制器实现在毫米波频段的调制,如LiNO<sub>3</sub>调制器;二是采用频率上转换器实现低频微波副载波光纤传输和在基站实现频率上转换的技术,如声光移频器;三是光外差的方法,即利用特殊波长和相位关系的激光器在探测器端的拍频;四是基于一些特殊新型光子器件的光学产生技术,如超结构的光纤光栅、法布里-珀罗(FP)谐振腔和其他一些新型光电子组合器件的应用等。

### 1.1 外部光学调制器法

外部的光学调制器法<sup>[3-5]</sup>是一种最简单和传统的毫米波副载波的光学产生方法,其主要功能器件是一个高速的光学调制器。其原理是从激光器输出的光波经过一个马赫-曾德调制器(MZI),将携带传输信息的毫米波射频信号直接加载到MZI上,这样输出光波形成一个双边带调制的光学信号,如图2所示。在光学接收器上,每个边带与中心频率发生拍频,产生所需要的毫米波频段的射频信号。但是,这种双边带调制的光波在光纤中传输时,色散效应对不同的频率成分产生不同的相位,使产生的两个拍频的射频信号具有不同的相位,以致于射频信号功率随着传输距离和载波频率呈现周期性的变化。为此需要采用单边带调制<sup>[6]</sup>、光纤光栅色散补偿<sup>[7]</sup>和光学相位共轭<sup>[8]</sup>等方法加

以补偿。

### 1.2 低频微波传输和基站频率上转换法

这种方法<sup>[9]</sup>主要是依靠一个移频器,即频率上转换器。为了克服色散效应引起的信号损伤,一种可行的方法是在光纤中传输频率较低的副载波,然后在基站利用频率上转换器实现频率的上转换,达到毫米波段的高频载波。在发射端用电光调制将较低频率的射频副载波调制到光波上,通过光纤传送到接收端,经光电转换还原为低频射频信号,然后上变频到毫米波段,通过天线发给用户。由于在光纤中传输的副载波频率较低,可以克服色散效应带来的影响。同时,在发射端不需要复杂和特殊的光源,但是在基站中需要增加一个频率上转换器和相关的毫米波电路设备,增加了基站的复杂性和成本。

### 1.3 光外差方法

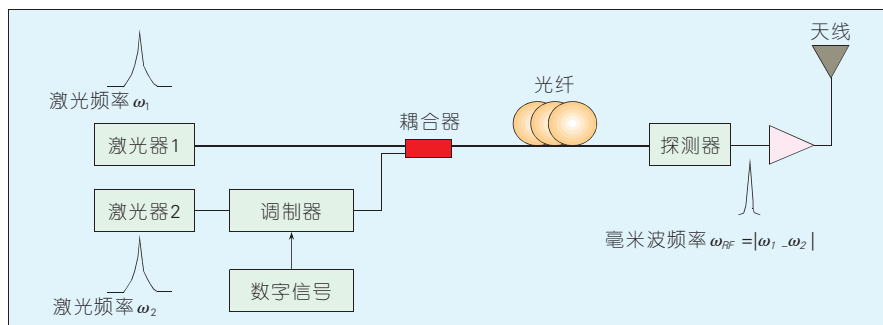
光外差<sup>[10]</sup>的方法是最常用的光生毫米波技术,其性能主要是依赖频率差等于所需要的毫米波频率的两个相位锁定的窄线宽激光器,其中之一

携带了需要传输信息的基带数据,在基站通过外差产生毫米波载波信号。在传输光纤中两光波的光谱都很窄,色散效应很小,因此光外差方法既可以克服光纤中的色散问题,又可以简化基站的结构和成本,成为近年来RoF发射机研究工作的热点。由于信号直接调制在一个窄线宽的光波上,这就避免了数十吉赫兹高频调制所带来的困难,又解决了光纤色散对高频调制光信号影响的问题,其基本原理简图如图3所示。

因为在光外差法中采用了两个半导体激光器,它们存在随机的相位噪声,由此产生的拍频毫米波信号也存在相位噪声。这对系统性能造成很大影响,因此必须消除。为此近年来有了一些新的研究,主要有光注入锁定法(OIL)<sup>[11]</sup>、光学锁相环法(OPLL)<sup>[12]</sup>和光注入锁相环法(OIPLL)<sup>[13]</sup>。

### 1.4 基于特殊功能器件的毫米波副载波脉冲信号的光学产生技术

除了上面介绍的几种连续的毫米波副载波调制信号的光学产生技术外,近年来,基于一些特殊设计功能器件或组合器件的毫米波副载波脉冲信号的光学产生技术也吸引了人们很大的关注,研究人员也取得了一些不错的研究结果。其基本物理思想是:利用光纤和光纤器件的色散和非线性效应,实现在一个光脉冲内部的自拍频,从而实现将一个单一的光学脉冲转换为毫米频率调制的光学脉冲,然后经过高速的光电转换后,形成一个高频的毫米波脉冲信号,通



▲图3 光外差方案简图

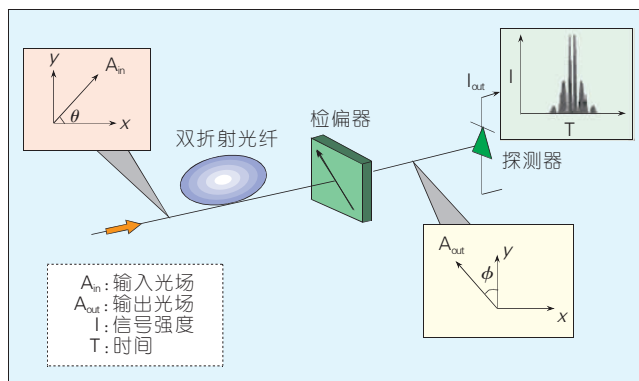


图4  
光学毫米波脉冲信号产生的结构方案简图

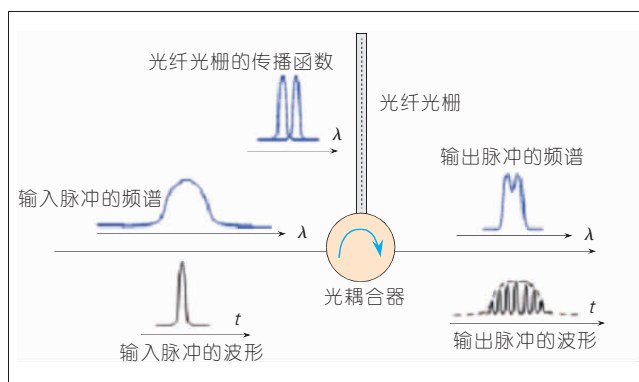


图5  
利用双峰值波长的光纤光栅产生毫米波副载波的示意图

过天线发射出去。

文献[14]最早介绍了这种光生毫米技术,如图4所示。线性偏振入射光波的偏振方向与双折射光纤的慢轴 $x$ 方向成 $\theta$ 夹角;检偏器以与光纤快轴成 $\phi$ 角放置。光脉冲在光纤中传输时,存在两偏振分量,同时,由于光线的色散效应和非线性的自相位调制效应,光谱发生频移,经检偏器后两分量发生差拍,即在一个脉冲包络内部发生高频调制。这种高频调制,可以是单一射频频率的调制,也可以是具有啁啾性的调制,取决于光纤和光脉冲参数的选择和控制在。

为了降低对于光纤和光脉冲参数的控制要求,有人采用一个马赫-曾德干涉仪来代替双折射光纤[14]。在这一实验中,由光纤激光器输出的1550 nm波段3 ps脉宽、250 MHz重复频率的光波经环行器后输入到一个啁啾率为0.13 nm/cm的10 cm长的啁啾光纤光栅上,光纤光栅反射后脉冲展宽为1000 ps。马赫-曾德干涉仪的一臂接入了一个可变时延器和一个

偏振控制器,这样,在干涉仪的第二个耦合器上,啁啾光脉冲的前沿就可能与后沿发生差拍,产生一个射频调制的光脉冲。基于上述思想,一些其他的特殊无源新型的功能器件的光生毫米技术的产生方法也被提出。如利用一个具有双峰值波长的变迹莫尔光纤光栅滤波器来实现毫米波副载波信号的产生[15]。图5显示了相应结构的示意图。输入窄脉冲激光经光纤环行器入射到光纤光栅并被其反射回到环行器,从另一端口输出,

采用的光纤光栅具有双峰值波长的光谱结构。入射光谱被光纤光栅谱所调制,转换为一个具有双峰值波长光谱的光脉冲。当这一光束被光电二极管接收时,双波长之间发生拍频,在时域上转换为一个与入射光脉冲时间和幅度相对应的毫米波调制的脉冲串,构成一个幅移键控(ASK)调制的毫米波副载波。其中,具有双峰值波长的光纤光栅可以通过光栅的逆工程方法进行设计。在这种技术方案中,其基本结构是一个特殊设计的莫尔光栅,这种光栅目前在设计上和工艺上都已经比较成熟。图6为设计的修正的莫尔光纤光栅的折射率分布和反射谱。

此外,也可以利用简单低反射率腔的FP滤波器,实现脉冲的重复延时,形成高重复频率超短脉冲序列,即毫米波脉冲包络,来实现光生毫米波技术。其基本思路如图7所示。进行初步的理论分析[16]得到相关的器件特性参数与所产生的微波脉冲特性之间的关系,可通过调节FP腔的光程和反射率来控制输出光学脉冲的重复频率、消光比和包络波形。初步的研究结果表明这一方案技术成熟,简单易行。为了改善毫米波脉冲包络的质量和性能,可以通过FP半导体光放大器(SOA)组合功能器件的使用来实现,其基本思路如图8所示。即利用SOA的驱动电流脉冲的波形,产生具有所需时域波形的增益,来放大和控制光脉冲幅度,实现脉冲包络的整

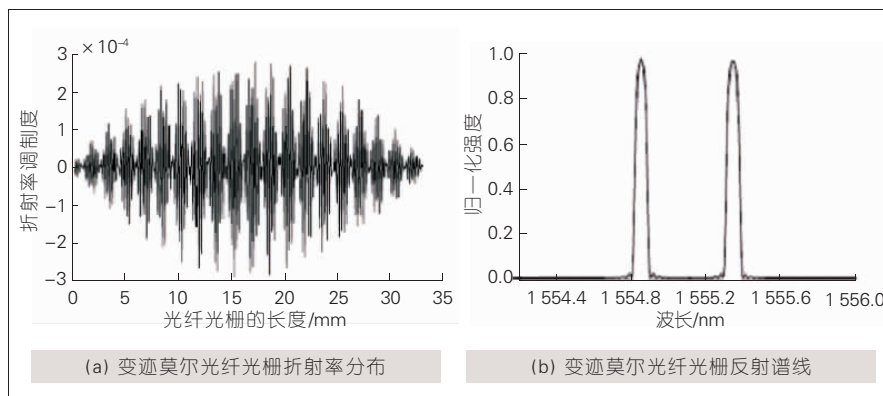


图6 变迹莫尔光纤光栅折射率分布和反射谱线



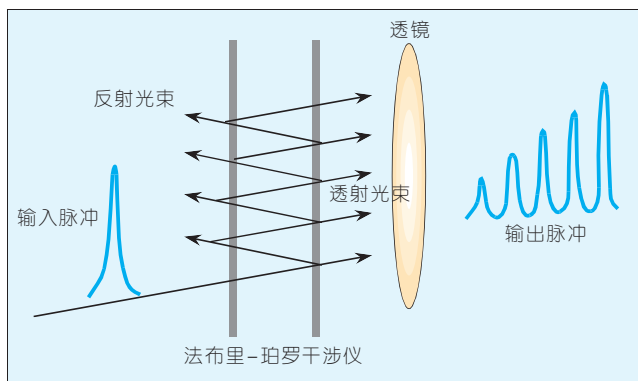


图7  
法布里-珀罗干涉仪实现高频重复脉冲序列的产生

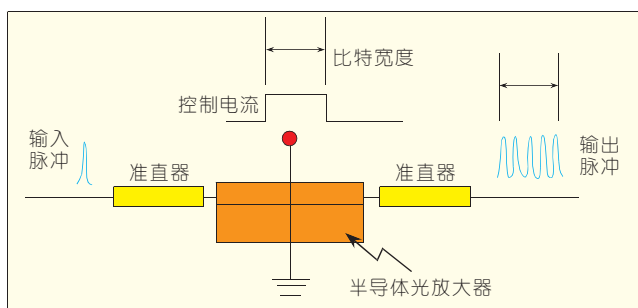


图8  
半导体光放大器型法布里-珀罗干涉仪毫米波光脉冲产生和整形的基本概念示意图

形。这种方法可以将高频重复脉冲序列的产生及其包络波形的整形结合在一个器件上完成。

除此之外,其他一些组合的新型功能的光电器件技术也可以应用来进行毫米波副载波的光学产生,如参考文献[17]提出的利用脉冲重复率倍增和时域泰伯效应的组合光电子器件实现毫米波脉冲的产生(如图9所示),以及文献[18]提出的级联的Gires-Tournois干涉仪或环型谐振腔来实现毫米波的光学产生(如图10所示)等等,这些新型的功能器件的使用在一定程度上都对毫米波的性能起到了一定的改善作用,它们都为RoF技术的发展起到了积极的推进作用和相关的技术储备。

## 2 RoF接收端技术

RoF接收技术也是一项十分关键的技术。在RoF接收系统中,光载波的发射和接收全部在中心站完成,而在基站中只保留高速光电探测器、调制器和天线。这样,从中心站发射的载波经过光纤传输到达基站后,通过光电探测器光电转化后经过天线发射

出去。而基站天线接收到的射频信号通过调制器被调制到光载波上并通过光纤传送回中心站,由于基站中只有光电探测器、调制器和天线,整个体积可以得到很大缩减,成本也大大降低,为RoF密集型“蜂窝”的发展起到了较大的促进作用。

### 2.1 UTC-PD光探测器

由RoF系统的配置可见,光纤链

路接收端的高速的光探测器是另一个关键器件。它必须具有与常规光通信系统要求不同的性能:一是高速率;二是高功率输出,即高的饱和和工作点;三是能够在器件上直接转换为毫米波功率,并从微波天线发射出去;最后,当然也要求价格低廉。一个能够满足这几个要求的器件,单行波波导探测器(UTC-PD),已经问世。其基本原理是,将电子利用为激活载流子,而将空穴限制在一定的区域,利用电子的高迁移率大大提高器件的响应速率。UTC-PD还采用波导结构,增加光吸收的作用长度,设计最佳传输线阻抗,获得高响应速率和高饱和和功率。它的能带结构如图11(a)所示,图11(b)则是一个将发射天线与UTC-PD集成为一体的器件<sup>[19]</sup>。据文献[20]报道,UTC-PD器件探测速度可达310 GHz、50 Ω负载上输出电压达1.5 V(相当于输出功率7.5 dBm),并已在RoF研发中被证明了其可行性<sup>[21]</sup>。

### 2.2 光子微波接收机

图12是基于微腔的光子微波接收机<sup>[22]</sup>。由于采用了高Q值的光学微腔,利用光在微腔中的谐振,可以大大提高整个系统的调制效率。同时采用的金属电极也是一种微波谐振结构,这样在射频信号耦合到电极的同

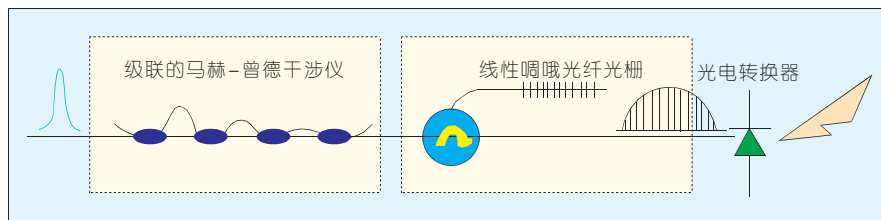


图9 基于脉冲重复率倍增和时域泰伯效应的组合光电子器件实现毫米波脉冲的产生

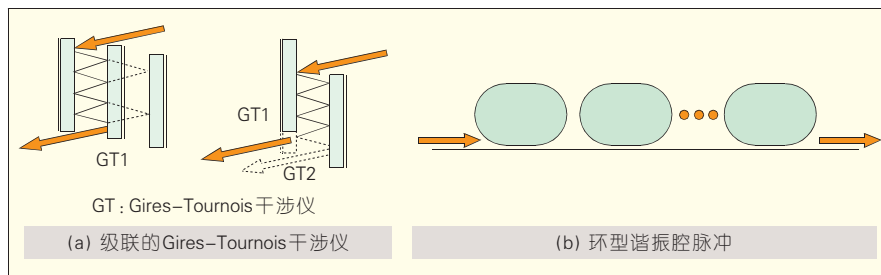
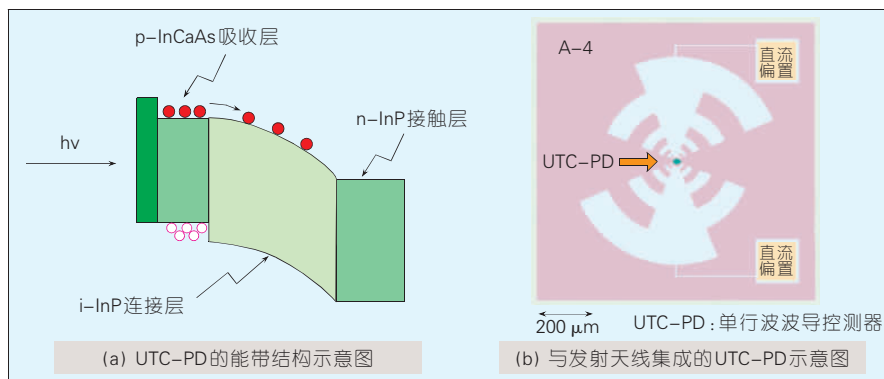
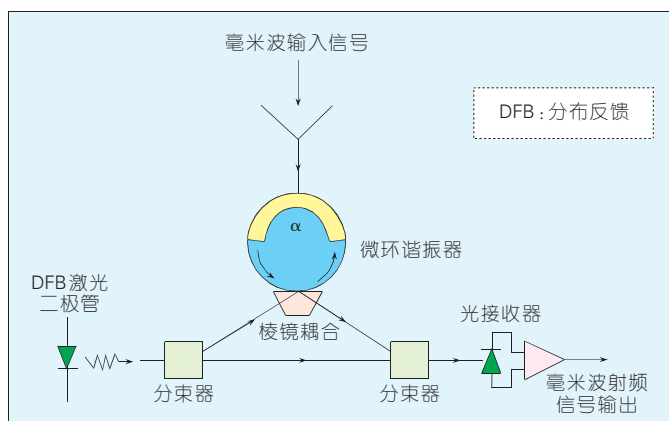


图10 基于级联的Gires-Tournois干涉仪或环型谐振腔脉冲实现毫米波脉冲的产生



▲图11 UTC-PD光探测器

◀图12  
光子微波接收机的  
原理图

时会因为微波的谐振而被放大,从而克服了Moodie等人提出的结构由于射频能量损耗很大,只能用于短距离的无线通信的缺陷。利用这一种光子微波接收结构,Levi等人实现了100 M/s的数据传输,与此同时,Ilchenko等人也利用这一结构实现了亚微瓦级的光子微波接收机。

### 2.3 电光调制器

在文献[22]中,也有人设计了一种天线耦合的电光调制器,这种设计最初是为了实现接收的射频信号和光载波相位匹配。调制器上的电极同时用作接收天线。电磁波以特定角度入射的时候,相临的天线接收的信号间的相位差正好等于光波经过它们之间距离的相位变化,从而实现相位匹配。

## 3 结束语

如今,RoF技术已是国际学术界

微波毫米波领域的一个研究热点,用于无线通信、雷达等系统中,是微波光子学的一个重要应用。长期以来,人们对微波光子学中涉及的光源、调制器、传输介质和探测器等器件技术作了大量的研究工作,正是微波光子学领域新型功能器件研究的快速发展,极大地推进RoF系统的应用进展。根据文献资料的调研和相关市场发展的趋势,现阶段RoF在移动通信和个人通信中毫米波副载波光通信技术的真正使用,除了决定于新技术在经济上的竞争力,也在很大程度上有赖于相关关键功能器件技术的突破,这些研究与进展都将决定RoF技术向市场化推进的步伐。

## 4 参考文献

- [1] SEEDS A J. Microwave Photonics [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3):877-887.
- [2] 方祖捷,叶青,刘峰,等.毫米波副载波光通信技术的研究进展 [J]. 中国激光,2006,33(4): 481-488.

- [3] SCHMUCK H. Comparison of optical millimeter-wave system concepts with regard to chromatic dispersion [J]. Electronics Letters, 1995, 37(21): 1848-1849.
- [4] SMITH G H, NOVAK D, AHMED Z. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1410-1015.
- [5] GLIESE U, NGRSKOV S, NIELSEN T N. Chromatic dispersion in fiber-optic millimeter-wave and millimeter-wave links [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(10): 1716-1724.
- [6] SMITH G H, NOVAK D, AHMED Z. Technique for optical SSB generation to overcome fiber dispersion penalties in fiber-radio system [J]. Electronics Letters, 1997, 33(1): 74-75.
- [7] RAMOS F, MARTI J. Comparison of optical single-sideband modulation and chirped fiber grating as dispersion mitigating techniques in optical millimeter-wave multichannel systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(11): 1479-1481.
- [8] SOTOBAYASHI H, KITAYAMA K. Cancellation of the signal fading for 60 GHz subcarrier multiplexed optical DSB signal transmission in non-dispersion shifted fiber using midway optical phase conjugation [J]. Journal of Light wave Technology, 1999, 17(12): 2488-2497.
- [9] KOJUCHAROW K, SAUER M, SCHAFFER C. Millimeter-wave signal properties resulting from electro-optical up-conversion [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1977-1985.
- [10] HOFSTETTER R, SCHMUCK H, HEIDEMANN R. Dispersion effects in optical mm-wave systems using self-heterodyne method for transport and generation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(9): 2263-2269.
- [11] BRAUN R P, GROSSKOPF G, ROHDE D, et al. Low-phase-noise millimeter-wave generation at 64 GHz and data transmission using optical sideband injection locking [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(5): 728-730.
- [12] BORDONALLI A C, WALTON C, SEEDS A J. High-performance phase locking of wide linewidth semiconductor lasers by combined use of optical injection locking and optical phase-lock loop [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(2): 328-342.
- [13] JOHANSSON L A, Seed a j. Millimeter-wave modulated optical signal generation with high spectral purity and wide-locking bandwidth using a fiber-integrated optical injection phase-lock loop [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(6): 690-692.
- [14] LEVINSON O, HOROWITZ M. Generation of complex microwave and millimeter-wave pulses using dispersion and Kerr effect in optical fiber systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1179-1187.
- [15] YE Qing, LIU Feng, QU Ronghui, et al. Generation of millimeter-wave in optical

pulse carrier by using an apodized Moiré fiber grating [J]. Optics Communications, 2006, 266(2):532-535.

- [16] YE Qing, QU Ronghui, FANG Zujie. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using a Fabry-Perot interferometer [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 8-10.

- [17] PAN Zhengqing, YE Qing, CAI Haiwen, et al. Millimeter-wave modulated optical pulse generated by pulse repetition rate multiplication and temporal Talbot effect [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(9): 634-637.

- [18] XU Qinfeng, YE Qing, FANG Zujie, et al. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using cascaded all-pass cavities [J]. Chinese Optics Letters, 2009.

- [19] ITO H, FURUTA T, NAKAJIMA F, et al. Photonic generation of continuous THz wave using uni-traveling-carrier photodiode [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(12): 4016-4021.

- [20] ITO H, FURUTA T, KODAMA S, et al. InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiode with 310 GHz bandwidth [J]. Electronics Letters, 2000, 36(21):1809-1810.

- [21] OHNO T, FUKUSHIMA S, DOI Y, et al. Optical subcarrier transmission of millimeter wave by using uni-traveling-carrier waveguide photodiode [C]//Proceedings Of 3rd Optoelectronics and Communication Conference(OECC' 98), Jul 13-15, 1998, Chiba, Japan. 1998:308-310.

- [22] 李嵩. RoF系统中的光子微波接收关键技术研

究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 7-9.

收稿日期: 2009-03-14

## 作者简介



瞿荣辉, 中科院上海光机所信息光学实验室主任、博士生导师, 中国通信学会会员, 中国光学学会纤维光学和集成光学委员会委员。研究方向为国际新型光电子发展的前沿技术、新型光电子器件的研究和单元技术的开发。曾先后参与了多项自然科学基金、国家科技部、中国科学院等的重要课题的研究和开发工作, 已发表学术论文50余篇, 申请专利10余项。

## 综合信息

### 中兴通讯WiMAX率先推出2.3 GHz Pico设备

【本刊讯】2009年5月, 中兴通讯宣布将率先推出基于Wave2的2.3 GHz频段Pico基站E9200, 进一步丰富和完善业界WiMAX设备供应链。该设备体积仅仅相当于普通家用电话机大小, 下行速率超过30 Mb/s, 此产品目前已经通过各类商用测试, 具备大规模商用能力, 为业界首款基于Wave2的2.3 GHz频段WiMAX Pico设备。

中兴通讯拥有WiMAX行业最全的系列化产品和全方位解决方案, 针对农村、沙漠、森林、城市商业区、写字楼、商场、家庭、地铁等不同应用场景覆盖问题都有对应的基站设备和灵活的解决方案, 频段包含2.3 GHz、2.5 GHz、3.5 GHz, 并且已经在全球各地成熟商用。此次中兴通讯率先推出2.3 GHz频段Pico与宏站混合组网的解决方案, 能有效提高信号覆盖效果, 提升网络建设速度, 并同时降低运营商约20%的建网成本。

“中兴通讯是运营商可以信赖的合作伙伴, 我们关注客户的各种需求——如何帮助运营商快速建网、降低成本, 如何灵活解决覆盖问题都是我们重点考虑的。经过这些年的技术更新和规模商用, 我们针对不同运营覆盖场景问题都有很好的解决方案和成功经验。”中兴通讯WiMAX产品总经理赵松璞说。

除了设备的技术领先性, 中兴通讯更加关注快速建网和商用能力。截止2009年第一季度, 中兴通讯在全球26个国家为超过40个运营商部署了2.3 GHz、2.5 GHz、3.5 GHz各频段商用WiMAX网络。

据In-Stat报告显示, 2008年全球新增WiMAX商用网络94个, 中兴通讯占了15个, 全球排名第二。而2009年第一季度中兴通讯在全球各地陆续收获商用合同, 对未来的发展充满信心。

### 中兴通讯全球承载网市场稳健发展、增速第一

【本刊讯】2009年5月, 中兴通讯承载网携新一代多业务承载IP传送产品IPTN亮相维也纳PTN大会。中兴通讯IP传送产品IPTN融合了传统光传输与IP网络的技术优势, 能够为业界提供灵活丰富的全业务解决方案。据全球市场调查机构OVUM2008年第四季度最新报告显示, 尽管经济环境恶劣, 但是由于技术的不断推陈出新, 新兴市场仍然推动全球承载网市场的稳步增长。

在全球主流厂商中, 中兴通讯包括多业务承载、波分在内的承载网产品2008年第四季度销售额同比2007年第四季度增长了27%, 增长速度居各厂商之首, 市场份额不断扩大。

OVUM分析师认为, 宏观经济动荡将影响运营商投资支出, 因此设备厂商的稳健性将成为运营商购买决策的评定标准。在未来的几个季度, 中兴通讯将是运营商“安全”的选择。OVUM分析师评价, “中兴通讯在MEA市场具有强大优势, 并活跃于独联体及欧洲市场, 不断赢得项目, 其中包括了复杂的Turnkey和无线-有线项目。”

OVUM认为, 中兴通讯在此类项目的执行方面具有优势, 能与其竞争的其他厂家只有两三个, 因此2009年, 中兴通讯在EMEA的市场份额仍有望增加。

中兴通讯承载网产品总经理樊晓兵认为: “坚持以技术为导向, 以全心服务客户为宗旨, 中兴通讯将为客户提供最佳的全业务承载平台。”

截至目前, 中兴通讯多业务承载、波分、数通产品已广泛进入欧洲、亚太、拉美、非洲及中东等区域的90多个国家的250多个运营商网络。在中国已经应用于30个省、160多个重要地市, 包括上海、香港等。市场占有率逐年大幅度提高。