

基于压缩脉冲载波的远端上变频光载射频系统

闻 和 陈宽桐 郑小平 张汉一 周炳琨

(清华大学电子工程系, 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

摘要 提出并实现了一种用光纤色散压缩脉冲为载波的上变频射频光载系统。该系统把传统的连续光载波替换为频率啁啾脉冲, 利用传输光纤色散压缩脉冲宽度, 增强谐波分量, 使脉冲载波上的信号在接收端转换到脉冲高次谐波上, 从而实现了远端上变频。该方法的特点是用低频本振就可实现高频微波信号的产生, 发射端无需电倍频器、混频器, 接收端只需用滤波器选择所需频率信号, 系统结构简单。应用该方法实现了 2 Gbit/s 信号经 60 km 普通单模光纤传输后远端上变频到 16 GHz, 经过 5.4 m 无线传输后误码率低于 10^{-8} 的射频光载系统, 系统中只有一个光功率放大器, 无光在线和预放大以及光滤波器和色散补偿。

关键词 光通信; 上变频; 脉冲压缩; 模拟链路; 光载无线通信; 光纤色散; 带通滤波

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0405001

Remote Frequency Up-Conversion of Radio over Fiber by Dispersion Compression of Short Pulse

Wen He Chen Kuantong Zheng Xiaoping Zhang Hanyi Zhou Bingkun

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A scheme on frequency up-conversion of radio-over-fiber (RoF) signal is proposed to use dispersion-compressed short pulse rather than the tradition continuous wave carrier as carrier. By compressing pulse width based on optical fiber dispersion, harmonic component is strengthened, signal component over pulse carrier at the receiving end is converted to higher harmonic waves, and finally the up-conversion is completed at the remote antenna unit (RAU). The generation of high-frequency microwave signal with low frequency local oscillator (LO) doesn't need any electric frequency multiplier and mixer in transmitting terminal, rather than a filter which can select the desired signal in receiving terminal, and the system is simplified. In this system only with an optical amplifier, 2 Gbit/s signal can be up-converted to 16 GHz after transmission of 60 km standard single-mode fiber (SMF), and the bit error rate (BER) is below 10^{-8} after 5.4 m wireless communication, no need of on-line, pre-amplification, dispersion compensation and optical filter.

Key words optical communications; frequency up-conversion; pulse compression; analog links; radio-over-fiber; fiber dispersion; band-pass filtering

OCIS codes 060.4510; 060.5625; 320.5520; 060.2400

1 引言

光载射频(RF)系统利用光纤的大带宽、低损耗和无电磁干扰等特性, 传输高频、宽带模拟信号^[1-4], 在许多特殊场合具有很高的应用价值。比如在天线拉远系统中^[5], 基站与天线单元相分离, 基

站馈入天线的射频信号通过光载射频链路取代传统微波电缆传输, 可使基站与天线单元距离拉开几百米到几十千米^[6], 将多个天线单元组成阵列^[7], 则可以扩大等效天线的口径, 组成长基线阵列^[8-10], 大大提高天线阵列的特性。拉远基站与远端天线距离

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(61007045, 61025004, 61032005)

作者简介: 闻 和(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光通信信号质量监测以及微波光子学等方面研究。

E-mail: wen-he@tsinghua.edu.cn

可以扩大系统的覆盖范围,比如沿海各岛屿、山区、沙漠等地区,在战场上可以提高基地的隐蔽性和系统的抗击毁能力,具有重要的应用价值和现实意义。但是拉远基站与远端天线的距离,使得模拟信号传输面临很大困难,距离越长,在恒定发射功率条件下接收功率微弱。因为光强检测为平方检测,光链路损耗增加 1 dB,接收微波功率损耗增加 2 dB^[6];如果不断提高发射功率,则光纤非线性效应(如受激布里渊散射)将会限制有效进入光纤的功率^[6],通常普通单模光纤(SMF)发生受激布里渊散射的阈值功率为 6 dBm~9 dBm,而且随光纤长度增加而有所降低^[11],虽然已提出不少方法提高受激布里渊散射阈值^[12-13],但是多数都难以大规模现场使用;而链路中通过光中继放大器补偿功率损耗的方法在一些特殊场合不适用,比如当光载射频链路通过海床连接大陆与海岛,以及海岛之间,或通过山区连接山顶与山脚,或通过沙漠区连接绿洲等,这些场合中光载射频链路通常穿过无人区,供电困难,器件可靠性要求非常高。因此,研究无中继放大的长距离传输光载射频链路具有很高的使用价值和很强的迫切性,比如将近海许多岛屿通过光载射频链路连接起来构成阵列或网络,可以在维护国家主权、开发利用海洋资源、海上救护、科学考察、导航、侦测等方面发挥重要作用。需要说明的是,对于视距传播的无线链路,需要架设上百米的发射接收塔才能达到几十千米的传播距离,很难实用,而战场的隐蔽性要求是不允许采用这种方法的。

在无中继放大的限制下要拉伸基站和远端天线单元距离,可行的办法不外乎提高发射功率和接收灵敏度。接收灵敏度受系统本底噪声限制,很难有本质的改善,所以提高发射功率就成为唯一的办法,而传统的光载射频信号方式为受激布里渊散射限制,入纤功率难以超过 10 dBm。通过对光载波进行调相展宽是提高受激布里渊散射阈值的一种有效方法^[14-15]。和以往提出的远端上变频方案^[16-25]不同,本文采用频率啁啾脉冲取代传统连续波(CW)作为光载波,由于频谱展宽而提高了受激布里渊散射阈值,使得入纤功率可以提高到 14 dBm 以上,进而使接收射频功率提高 5 dB~6 dB。通过进一步优化系统条件,扩大了继续提高的空间。另外,利用脉冲重复频率高的脉动谐波可以实现多个频率点的谐波上变频,远端天线单元只需要用带通滤波器选择出指定频率的信号即可。该方法除了允许更大的发射功率外,还因节省了基站处高频的本振、混频器和放大器(通常频率越高、越难

获得大功率)而简化了系统,信号产生方式简单,无需复杂的调制器偏置点控制,而且光纤色散会加强谐波信号功率而不像传统方式那样造成功率衰落。采用该方法实现了 2 Gbit/s 信号经 60 km 普通单模光纤传输后远端上变频到 16 GHz、经过 5.4 m 无线传输后误码率(BER, R_{BE})小于 10^{-8} 的射频光载系统,系统中只有一个光功率放大器,无光在线、预放大、光滤波器和色散补偿,从而简化了结构,上述信号采用窄带滤波,使得幅移键控(ASK)的频谱效率达到了 1 bit/(s·Hz)。

2 压缩脉冲载波实现远端上变频的原理

图 1 给出了压缩脉冲载波实现远端上变频的原理,传输光纤色散压缩脉冲宽度,增强谐波分量,实现信号频谱的搬移。其中发射端的载波为频率啁啾脉冲,脉冲通过调制器脉冲切割产生,宽度通常为脉冲间隔的 50% 左右,以此脉冲为载波携带信号经光纤传输。由于光纤色散使得组成脉冲的不同频率分量具有不同的群延时,通过合理选择脉冲重复频率和频率啁啾,可以使脉冲传输过程中,脉冲前沿的红移分量群延时大,后沿的蓝移分量延时小,于是脉冲宽度不断减小,到达远端天线单元时脉冲压缩到最窄。一般可以压缩到脉冲间隔的 3%~5%,对于低频信号,如此窄的光脉冲可以视为理想的采样脉冲,在远端天线单元处实现对待传信号采样。根据采样定理可知,当脉冲重复频率大于信号最高频率的两倍时,可以做到无失真恢复原信号,而且信号的频谱以脉冲重复频率为周期在频率轴上延拓,从而可以得到各次谐波处的信号频谱,只需要用带通滤波器(BPF)滤出所需频率处的信号频谱,即完成了远端信号上变频。

该方法把传输光纤当作整个系统的一部分来处理,光纤色散所起的作用是压缩脉冲、增强高次谐波分量,而不像传统光载射频传输中那样引起色散所致的功率衰落。而频率啁啾是能够产生高次谐波的本质,因为频率啁啾中蕴含着许多频率分量,当与光纤色散相配合时,这些频率分量便显现出来。由于恰当利用各部分的功能,系统结构得以简化。频率啁啾带来的另一个好处是光谱展宽,从而提高了受激布里渊散射的阈值。

最后需要说明的是待传信号可以是任意形式的信号,如基带数字信号、脉冲、中频信号、副载波信号、任意模拟信号等,只要信号的最高频率低于脉冲重复频率的一半,即可无失真传输。

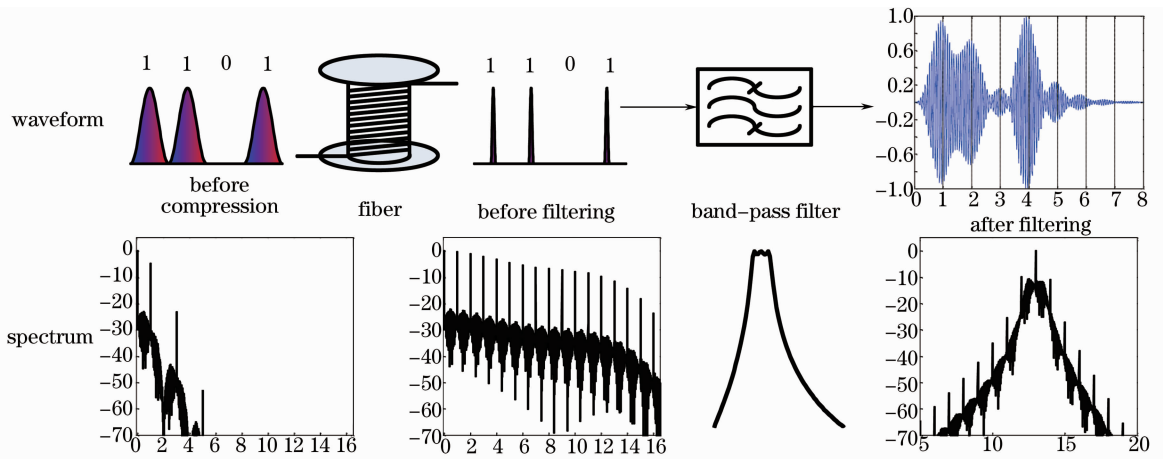


图 1 光纤色散压缩光脉冲远端上变频原理图

Fig. 1 Schematic diagram of remote up-conversion with optical short pulse carrier compressed by fiber dispersion

3 实验验证

采用如图 2 所示的实验装置进行了实验,其中频率啁啾脉冲是用一级相位调制器与一级强度调制器对半导体激光器发出的连续光调制而成,相位调制器为 Covega Mach10,采用功率约为 24 dBm、频率为 2 GHz 的正弦信号驱动,强度调制器工作于正交点,用同一正弦信号经过适当微波移相后驱动相位,控制信号幅度约为调制器半波电压,以得到占空比约为 50% 的频率啁啾脉冲。调节微波移相器使得正弦驱动信号的最低点对应于脉冲的最高点,得到正啁啾,即脉冲前沿瞬时频率低于后沿频率。再

使用另外一级强度调制将待传信号调制到脉冲载波上。调制信号选择为一般模拟信号由 Tektronix 的 AFG3252 产生;中频调制信号,由 Agilent 的 E4433B 产生,中频频率为 100 MHz,调制信号为 5 Mbaud(baud 表波特率)的四相移键控(QPSK)和 16 进制正交幅度调制(16QAM);数字基带信号为由 Anritsu 公司 MP1761B 所产生的 2 Gbit/s 长度为 2^9-1 和 $2^{31}-1$ 的伪随机二进制序列(PRBS)。经信号调制后的光脉冲被光放大后注入 60 km 的普通单模光纤到达远端天线单元,在此经光电探测、带通滤波和放大后通过增益为 20 dBi(dBi 这个单位表

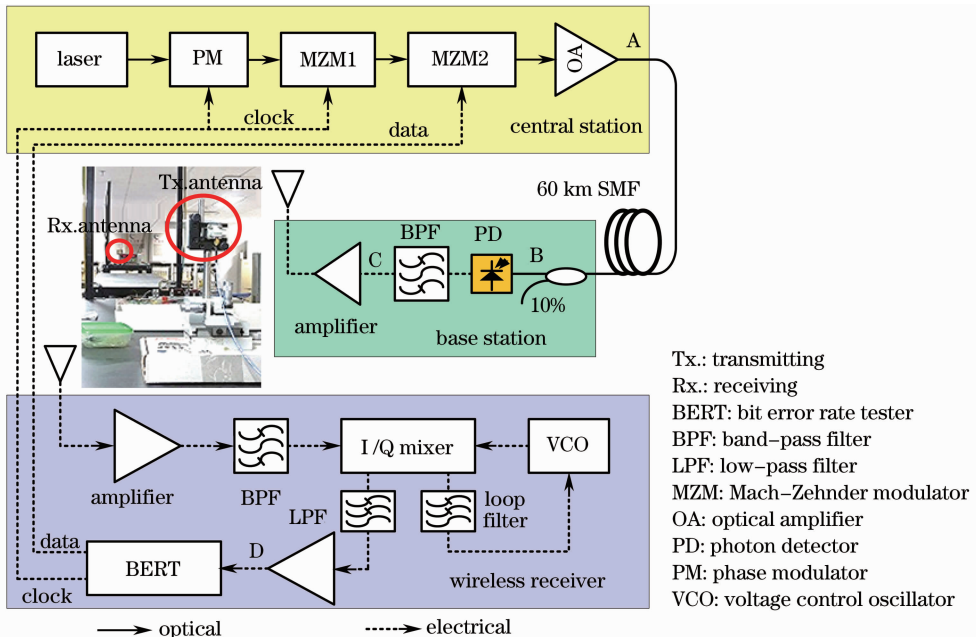


图 2 色散压缩光脉冲信号远端上变频系统实验装置连接图

Fig. 2 Experimental setup of remote up-conversion with optical short pulse carrier compressed by fiber dispersion

示比较对象是各向均匀辐射的理想点源)的喇叭口天线辐射,经 5.4 m 之外相同天线接收后放大检测。其中,带通滤波器中心频率为 16 GHz,带宽为 2 GHz,插入损耗约为 1.5 dB,发射天线处放大器增益约为 30 dB,饱和输出功率为 27 dBm,接收天线处放大器增益约为 45 dB,饱和输出功率约为 30 dBm。对于一般模拟信号和数字信号的检测采用零差混频,即接收信号与同步的本振混频,输出经低通滤波放大。为了实现本振与信号载波同步,采用提出的 I/Q 混频方式^[26],其中混频器输出经过滤波放大反馈控制本振。图 2 中给出待传信号为数字信号的具体实施方式,对于其他种类的信号,只需要将图中马赫-曾德尔调制(MZM2)的驱动信号替换为其他信号即可。另外,对于中频信号检测直接用 Agilent 的信号分析仪 N9030A+89600 对接收带通滤波之后的信号进行解调分析。

图 3 以 2 Gbit/s 数字信号调制为例给出了系统中不同参考点处信号的波形和功率谱。可以看出,光纤传输前脉冲宽度较宽,约为 190 ps,而经过光纤传输压缩后,宽度明显减小,约为 20 ps,而对应的功率谱高频分量明显增强,强度高于 -40 dBm 的谱线条数从传输前的 3 条增加到传输后的 14 条,这意味

着可用的上变频频率为 28 GHz。经过带通滤波后的波形为典型的幅移键控(ASK),载波频率为滤波器选择的 8 次谐波即 16 GHz,参考点 C 滤波器输出信号信噪比(SNR)约为 30 dB,如图 3(f)所示,其中滤波器的带内损耗约为 1.6 dB,表明变频信号具有较高的信噪比。由于带通滤波器的带宽为 2 GHz,与 2 Gbit/s 数字信号带宽相比形成紧限带滤波,信号频谱主瓣之外的部分受到很强的抑制,因此引入较严重的符号间干扰,使得 ASK 信号的 1 码幅度有较大变化,而 0 码有不为零的幅度,但经过零差混频滤波后仍然可以得到清晰的眼图见图 4(a), (d)。而采用带宽远小于 2 GHz 的模拟信号和中频信号,则信号失真非常小。图 4(b)~(e)给出了模拟信号为三角波、脉冲和中频信号的结果,用 Agilent DSO81204B 记录,因为模拟信号的频率为 2 MHz,落在低频放大器的下限频率之外,所以测量结果直接取自于 I/Q 混频滤波之后,所以信噪比看起来较差。若经过放大则可以得到较好的波形。图 4(f)给出了用 Agilent 信号分析仪 N9030A 分析中频调制信号得到的 16QAM 信号星座图,可以看出具有较好的信号质量,测量的误差矢量幅度(EVM)小于 5%。

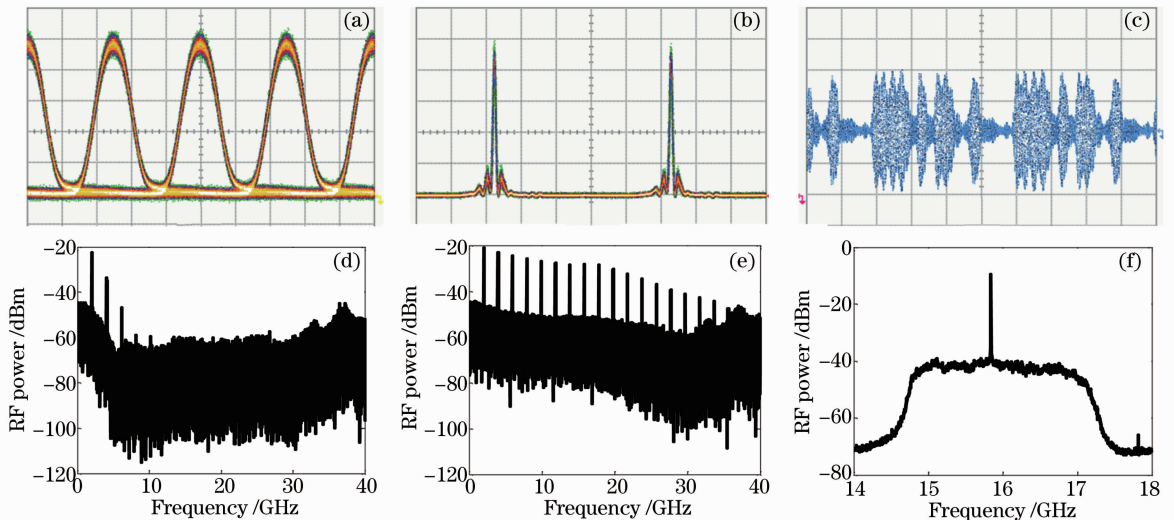


图 3 不同参考位置处信号的波形和功率谱。(a)(d) 见图 2 中参考点 A; (b)(e) 见图 2 中参考点 B; (c)(f) 见图 2 中参考点 C

Fig. 3 Waveforms and power spectra at different reference points. (a)(d) Reference point A in Fig. 2; (b)(e) reference point B in Fig. 2; (c)(f) reference point C in Fig. 2

图 5 给出了数字信号的误码测量结果。经过 5.4 m 无线传输后的接收灵敏度为 -6.2 dBm,误码率为 10^{-8} ,功率参考点在探测器之前,其中 PRBS 2^9-1 与 PRBS $2^{31}-1$ 的灵敏度差别小于 0.5 dB,但对于长的码序列存在一定的误码平台,这主要是码型

效应所引起,而引起码型效应的主要原因是: 1) 带通滤波器的紧滤波引起的符号间干扰与码长有关; 2) 接收信号用的射频放大器下截止频率较高,对长连 0、连 1 码的影响较大。

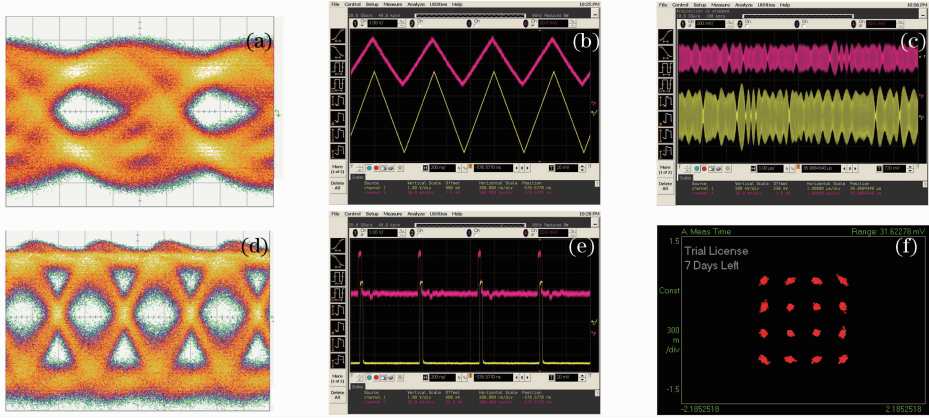


图 4 各种接收信号. (a)(d)不经过/经过天线传输接收 2 Gbit/s 数字信号;(b)(c)(e)经天线传输接收三角波/中频调制/脉冲信号(上)与信号源产生三角波/中频调制/脉冲信号(下);(f) 经过天线传输后接收中频信号解调分析星座图,EVM 为 4.2%

Fig. 4 Received signals of different types. (a)(d) Signals of 2 Gbit/s before/after antenna transmission; (b)(c)(e) triangle/modulated intermediate/pulse after antenna transmission (upper) compared with generated frequency waveform signals (lower); (f) signal constellation diagram of demodulated intermediate frequency after antenna transmission with an EVM of 4.2%

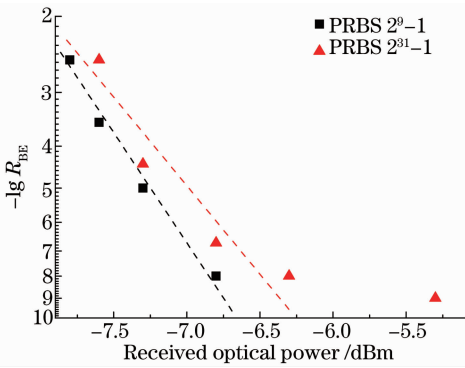


图 5 经过 60 km 普通单模光纤和 5.4 m 无线传输后 2 Gbit/s 数字信号误码率

Fig. 5 Bit error rate of 2 Gbit/s digital signal after 60 km standard single mode fiber and 5.4 m wireless transmission

4 影响因素讨论

图 6 给出了该信号背向散射功率与注入光纤功率(在图 2 参考点 A 处)的关系,作为对比同时给出了仅有连续波(未经任何调制)以及经过信号调制而没有频率啁啾的背向散射功率,图中 OOK 为开关键控,PM-CW 为未加数据的调相连续波,PM-OOK 为进行开关键控的调相波。可以看出,加了频率啁啾后由于光谱变宽,使得受激布里渊散射阈值(背向散射功率从第一个线性区变化到第二个线性区的转折点)提高了 5 dB~6 dB,从而允许更高的光纤注入功率。对于单边带信号和载波抑制双边带信号,其光谱分量分别是一个准连续波加一个信号边带以及两个信号边带,因此受激布里渊散射阈值应是单个连续波和信号边带受激布里渊散射阈值基础上加

3 dB,其最终的受激布里渊散射阈值仍然低于本方法。文献[27]报道,采用光频梳作为载波也得到相似的结果,因为光频梳的光谱加宽,使得有效注入光纤功率提升,最终获得了自报道以来 50 km 光纤链路中最大的无杂散失真动态范围。本文的工作与他们的差别在于:1)利用色散压缩脉冲作为载波实现谐波上变频,而非基波信号,亦非一般的光频梳;2)在载波上真正传输了各种信号,并进行了信号传输性能测试;3)光纤链路中未使用色散补偿光纤和接收预放大器。

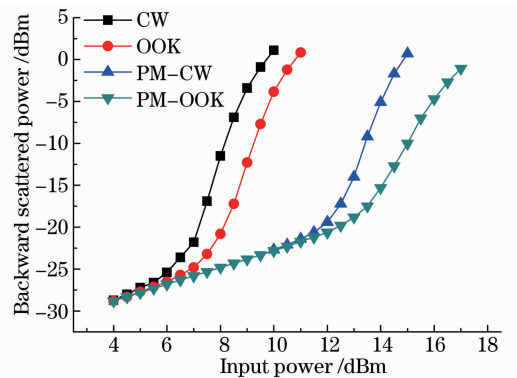


图 6 不同信号注入 60 km 光纤的背向散射光和注入功率关系

Fig. 6 Backward scattered optical power versus the input power into 60 km standard single mode fiber of different signals

通过进一步的系统参数优化,可以实现 100 km 的信号传输和更高次谐波的产生。图 7 给出了仿真结果,图 7(a)为采用 2 GHz 正弦信号相位调制,调制深度为 1.7π 下,经不同长度普通单模光纤传输后

基波、8次和10次谐波功率分布,可以看出在60~100 km之间8次谐波功率与基波功率相比相差不到10 dB,波动在5 dB范围内,表明完全可用;图7(b)给出同样的2 GHz正弦信号相位调制,调制深

度为 2.2π 下,经过60 km普通单模光纤传输后的射频功率谱,其中前12次谐频的功率相差不到10 dB,表明可用的谐波次数可到12次,进一步的实验工作正在进行中。

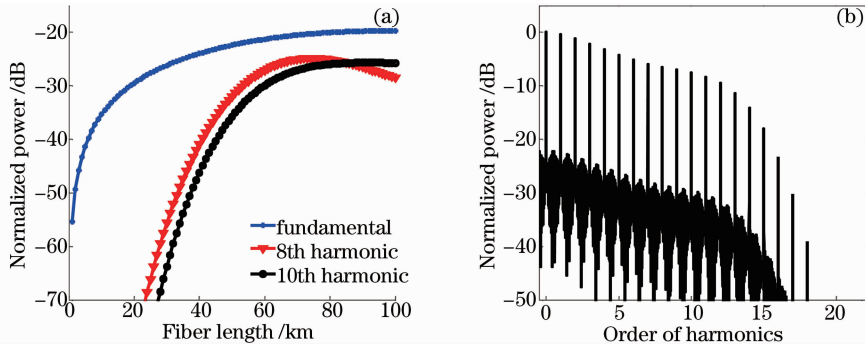


图7 (a) 经不同长度普通单模光纤传输后,基波、8次和10次谐波的功率大小(仿真);
(b) 经60 km普通单模光纤传输后的射频功率谱.基波频率为2 GHz(仿真)

Fig. 7 (a) Simulated electrical power of up-converted signal along fiber for the fundamental wave, 8th and 10th harmonics;
(b) simulated electrical power spectrum of up-converted signal with frequency of 2 GHz after transmission over 60 km standard single mode fiber

5 结 论

提出了一种通过光纤色散压缩脉冲为光载波的新型光载射频上变频系统,可实现长距离传输后的远端谐波上变频,无需电混频器和高频本振,简化了系统。由于所用光载波光谱展宽,允许更高的注入光纤功率,从而实现长距离的传输,以满足一些特殊场合需要。应用该方法,实验实现了2 Gbit/s信号经60 km普通单模光纤传输后远端上变频到16 GHz、经过5.4 m无线传输后误码率小于 10^{-8} 的射频光载系统,系统中只有一个光功率放大器,无光在线、预放大、光滤波器和色散补偿。

参 考 文 献

- 1 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng, *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 481-488.
方祖捷, 叶青, 刘峰, 等. 毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 481-488.
- 2 W S C Chang. RF Photonic Technology in Optical Fiber Links [M]. New York: Cambridge, 2002.
- 3 E I Ackerman, C H Cox. RF fiber-optic link performance [J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(4): 50-58.
- 4 J Yu, G K Chang, Z Jia, *et al.*. Cost-effective optical millimeter technologies and field demonstrations for very high throughput wireless-over-fiber access systems [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(16): 2376-2397.
- 5 Yang Fan. The Analysis of Remote Base Stations Based on Fibre and the Applications in High-Speed Railways [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. 5-17.
杨帆. 光纤拉远基站系统及其在高速铁路中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009. 5-17.
- 6 V J Urick, F Bucholtz, J D McKinney, *et al.*. Long-haul analog

- photonics [J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(8): 1182-1205.
- 7 J E Roman, L T Nichols, K J Williams, *et al.*. Fiber-optic remoting for ultrahigh dynamic range radar [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46(12): 2317-2323.
- 8 M Ryle, A Hewish, J Shakeshaft. The synthesis of large radio telescopes by the use of radio interferometers [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1959, 7(5): 120-124.
- 9 S Montebugnoli, M Boschi, F Perini, *et al.*. Large antenna array remoting using radio-over-fiber techniques for radio astronomical application [J]. Microw Opt Technol Lett, 2005, 46(1): 48-54.
- 10 Lu Rusen, Shen Zhiqiang, T P Krichbaum. Development and future prospects of millimeter-VLBI [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(7): 74-79.
路如森, 沈志强, T P Krichbaum. 毫米波甚长基线干涉测量的发展与展望 [J]. 科技导报, 2011, 29(7): 74-79.
- 11 Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin, *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4): 497-500.
沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(4): 497-500.
- 12 N Yoshizawa, T Imai. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling [J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(10): 1518-1522.
- 13 P D Dragic, Liu Chihung, G C Papen, *et al.*. Optical fiber with an acoustic guiding layer for stimulated Brillouin scattering suppression [C]. Conference on Lasers and Electro-Optic (CLEO), 2005, CThZ3: 1984-1986.
- 14 Yang Jianliang, Guo Zhaonan, Zha Kaide. Experimental study of phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV system [J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(5): 439-442.
杨建良, 郭照南, 查开德. 调相法抑制光纤CATV中受激布里渊散射的实验研究 [J]. 中国激光, 2001, 28(5): 439-442.
- 15 Xie Shuping, Xu Guoliang. Suppression on fiber stimulated Brillouin scattering based on phase modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0200603.
谢淑平, 许国良. 基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0200603.

- 16 L Chunting, S Potsung, J Chen, *et al.*. Optical millimeter-wave signal generation using frequency quadrupling technique and no optical filtering[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(12): 1027–1029.
- 17 L A Johansson, A J Seeds. Millimetre-wave radio-over-fibre transmission using an optical injection phase-lock loop source[C]. *Proceedings of the Microwave Photonics (MWP)*, 2000, WE1. 2.
- 18 H J Song, J S Lee, J I Song. Signal up-conversion by using a cross-phase-modulation in all-optical SOA-MZI wavelength converter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(2): 593–595.
- 19 Zhang Dapeng, Yu Chongxiu, Xin Xiangjun, *et al.*. Design of up conversion system based on millimeter sub-carrier ROF technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 31–35.
张大鹏, 余重秀, 忻向军, 等. 光载毫米波上变频系统的设计与研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 31–35.
- 20 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.
- 21 Xu Gang, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi. Frequency quadrupling for single-sideband optical millimeter-wave up conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3386–3390.
徐 刚, 郑小平, 张汉一. 基于四倍频技术的单边带光载毫米波上变频[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3386–3390.
- 22 Guo Jingzhong, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Optical frequency up-conversion by injection locking semiconductor laser with directly modulated baseband signal[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0205003.
郭精忠, 于晋龙, 王文睿, 等. 利用基带直调信号注入锁定半导体激光器产生全光上变频信号的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0205003.
- 23 Shen Da, Hu Zongfu, Wu Jiaqing, *et al.*. Design and realization of a radio-over-fiber system based on self-homodyned 60 GHz receiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506005.
沈 达, 胡宗福, 吴佳青, 等. 基于自差 60 GHz 接收机的光载无线通信系统设计与实现 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506005.
- 24 Xu Lili, Ning Tigang, Li Jing, *et al.*. Improved 60 GHz millimeter-wave generator based on feed-forward modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0206002.
许丽丽, 宁提纲, 李 晶, 等. 一种改进的基于前向调制技术生成 60 GHz 毫米波方案[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0206002.
- 25 Changjuan Tang, Rongling Li, Yufeng Shao, *et al.*. Experimental demonstration for 40-km fiber and 2-m wireless transmission of 4-Gb/s OOK signals at 100-GHz carrier[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(2): 020608.
- 26 He Wen, Lin Cheng, Jinxin Liao, *et al.*. Simultaneous clock recovery and dispersion, OSNR monitoring for 112-Gbit/s NRZ-DQPSK using frequency down-conversion electro-optical phase-locked loop[J]. *Opt Express*, 2011, 19(26): B687.
- 27 J D McKinney, V J Urlick, J Briguglio. Optical comb sources for high dynamic-range single-span long-haul analog optical links[J]. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59(12): 3249–3257.

栏目编辑: 王晓琪