

doi:10.3788/gzxb20174612.1206005

基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计和实现

崔元军¹, 邹卫文¹, 张斯滕¹, 李曙光², 姜媛媛², 陈建平¹

(1 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

(2 上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109)

摘 要:提出一种基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计方案,既可以产生宽带线性调频信号,又可以实现线性调频信号的光域脉冲压缩.在发射端利用互逆色散光纤产生线性调频信号.在接收端,雷达回波信号通过马赫-曾德调制器调制到预啁啾的光信号上,然后经过色散光纤的进一步色散.最终在探测器端可以得到目标回波信号脉冲压缩后的结果.该方案无需脉冲压缩过程中数字化和离线处理,且具有脉冲压缩比的调谐作用.理论、数值仿真和实验证明了该设计方案能有效进行线性调频信号的光域脉冲压缩.实验产生了 C 波段下时宽 1.2 ns,带宽 3.2 GHz 的线性调频信号,并通过互逆色散光纤将该信号压缩到了 0.09 ns,脉冲压缩比达 13.3.

关键词:电磁场与电磁波;光信号处理;光纤色散;光域脉冲压缩;线性调频信号;外差拍频;微波光子学

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1206005-8

Scheme of the Microwave Photonic Radar Architecture Based on Mutual Optical Fiber Dispersion

CUI Yuan-jun¹, ZOU Wei-wen¹, ZHANG Si-teng¹, LI Shu-guang², JIANG Yuan-yuan², CHEN Jian-ping²

(1 *State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

(2 *Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China*)

Abstract: A scheme of microwave photonic radar architecture based on mutual optical fiber dispersion was proposed, including generation and compression of wideband linear frequency modulation signal. Linear frequency modulation was generated at the transmitting end by using the mutual dispersion fiber. At the receiving end, the radar echo was modulated by the Mach-Zehnder modulator onto the pre-chirped optical signal, and that was further dispersed in the optical dispersion fiber. Finally, the pulse compression signal of the target echo can be obtained at the detector end. The linear frequency modulation signal can be directly compressed by the proposed technique in the optical domain without digital signal processing during pulse compression process, and the pulse compression ratio could be further programmable. The numerical simulations and experimental results showed that the proposed scheme can effectively perform the pulse compression of the LFM in the optical domain. A linear frequency modulation signal with temporal width of 1.2 ns, bandwidth of 3.2 GHz in the C-band was generated by the experiment, and that was compressed to 0.09 ns through the mutual dispersion fiber. The pulse compression ratio is up to 13.3.

Key words: Electromagnetic field and electromagnetic wave; Optical signal processing; optical fiber dispersion; pulse compression in optical domain; linear frequency modulation signal; heterodyne beating;

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61571292, 61535006)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20130073130005)资助

第一作者:崔元军(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为光信号处理.Email:cuiyuanjun@sjtu.edu.cn

导师(通讯作者):邹卫文(1980—),男,教授,博士,主要研究方向为光信号处理.Email:wzou@sjtu.edu.cn

收稿日期:2017-07-03; **录用日期:**2017-08-28

<http://www.photon.ac.cn>

microwave photonics

OCIS Codes: 060.5625; 140.4050; 350.4010

0 引言

超高频超宽带线性调频信号及其脉冲压缩处理技术被广泛应用在现代雷达系统来提高距离分辨率和速度分辨率^[1-2].传统电子学技术受到“电子瓶颈”的限制,能够产生的信号中心频率不够高,带宽也不够大.近年来,新兴的微波光子技术突破了“电子瓶颈”限制,尤其是光子模数转换技术为数字接收提供了更大的采样带宽和更高的采样速率,但光子模数转换技术仍然面临着巨大数据量存储和处理的压力^[3-5].相比之下,光域模拟处理方法具有超宽带产生、接收和实时处理优势.

国内外研究报道表明,采用波长-时间映射法^[6-7]、时域脉冲整形法^[8-9]、外差拍频法^[10-12]等手段可实现宽带微波信号的模拟产生,无需上变频和数模转换等辅助处理.基于光纤色散的时间拉伸效应被成功用于微波光子雷达的信号接收^[13],与意大利 Ghelfi P 等学者^[14]提出的微波光子雷达系统相比,时间拉伸信号接收大幅压缩了后端模数转换的带宽和采样率,但仍然需要数字化脉冲压缩处理.近年来,采用光域脉冲压缩技术有望突破模数转换后的大数据脉冲压缩处理难题^[15-16].譬如,采用非线性群延时的布喇格光栅,可将带宽 3 GHz、时宽 3.75 ns 的信号压缩至 0.667 ns,脉冲压缩比达 5.62.但该方法需要预先设计微波光子滤波器,无法保证可重构性.通过设计可编程的光滤波器,结合多波长激光源,可实现可重构的单次啁啾微波信号的脉冲压缩^[17].利用微波光子滤波器和时间反转模块可以同时实现任意微波信号的产生和处理^[18],该方案将 8 GHz 带宽的 5.57 ns 的线性调频信号压缩至 0.27 ns,将 5.4 ns 的相位编码信号压缩至 0.58 ns,对应的脉冲压缩比分别是 20.6 和 9.3.

本文提出了一种基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计方案,仿真分析了利用该方案进行线性调频信号光域产生和脉冲压缩的可行性和有效性,验证了脉冲压缩比的可调谐性.实验产生 C 波段下时宽 1.2 ns,带宽 3.2 GHz 的线性调频信号,并将该信号压缩至 0.09 ns,对应的脉冲压缩比达 13.3.

1 微波光子雷达系统方案设计和基本原理

基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计方案如图 1.信号产生模块由锁模激光器(MLL)、滤波器模块(TOF)、互逆色散光纤模块(DE_1 和 DE_2)和探测器模块(PD_1)等构成.信号接收模块由锁模激光器、延时模块($VODL_2$)、互逆色散光纤模块(DE_3 和 DE_4),调制模块(MZM)和探测模块(PD_2)等构成.信号产生和信号接收模块共用同一台锁模激光器,可以有效抑制相位噪声抖动并保证微波光子雷达系统的高度相参性.图 1 中色散模块的正负号表示光纤的色散系数,“+”表示色散系数为正,“-”表示.

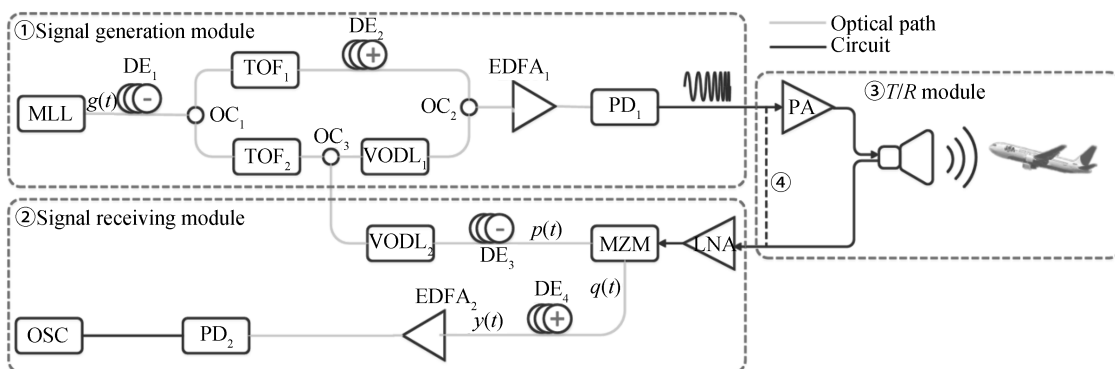


图 1 基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计方案

Fig.1 Scheme of the microwave photonic radar architecture based on mutual optical fiber dispersion

色散系数为负.由锁模激光器(MLL)输出的重频为 37 MHz 脉冲光首先经过第一段色散光纤(DE_1)实现预啁啾,预啁啾后的光信号被一个耦合比为 3 dB 的耦合器(OC_1)分成两路,两路信号分别进入两个可调光滤波器(TOF)进行频谱滤波.由于第二段色散光纤(DE_2)具有相反的色散系数,故在时域中上臂上的信号比下臂上的信号更窄.下臂上经过光谱滤波的信号又被一个 3 dB 的耦合器(OC_3)分成两路,分别用来信号产

生和信号接收.两路信号经耦合器(OC₂)耦合到一起,最终在光电探测器(PD₁)上拍频产生线性调频信号.通过改变光滤波器带宽可以改变 PD₁ 产生线性调频信号的时间带宽积.在信号接收端,通过马赫-曾德调制器(MZM)将目标回波信号调制到预啁啾的光信号上,被调制的光信号又经过第四段光纤(DE₄)进一步色散.为了补偿接收链路的功率损耗,第四段色散光纤的输出端被接入一个掺铒光纤放大器(EDFA₂)进行功率放大.被放大后的信号进入第二个光电探测器(PD₂)进行检测,最终在示波器(OSC)上采集和记录脉冲压缩后的结果.根据文献[7,13],雷达产生线性调频信号(见图1的PD₁)的脉宽和带宽分别为

$$T = 2\pi c \Delta\lambda (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) / \lambda^2 \quad (1)$$

$$B = -(c \Delta\lambda / \lambda^2) \cdot (\ddot{\phi}_2 / \dot{\phi}_1) \quad (2)$$

在 DE₃ 端输出信号的时域表达式为^[19-21]

$$p(t) = g(t) \otimes \exp\left(j \frac{t^2}{2 \ddot{\phi}_5}\right) \approx \exp\left(j \frac{t^2}{2 \ddot{\phi}_5}\right) G(\omega) \Big|_{\omega = \frac{t}{\dot{\phi}_5}} \quad (3)$$

式中, \otimes 表示卷积, $g(t)$ 表示锁模激光器产生的脉冲信号, $G(\omega)$ 表示 $g(t)$ 的傅里叶变换, $\dot{\phi}_1$ 、 $\dot{\phi}_2$ 和 $\dot{\phi}_4$ 分别表示 DE₁、DE₂和 DE₄的色散量.为了表述简洁,图1中 DE₁和 DE₃两者的色散量之和记为 $\dot{\phi}_5$,即 $\dot{\phi}_5 = \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_3$.

雷达产生的线性调频信号 $x(t)$ 的表达式可表示为

$$x(t) = T^{-\frac{1}{2}} \text{rect}(t/T) \exp(j\pi k t^2) \quad (4)$$

式中, T 表示线性调频脉冲信号的脉冲周期, k 表示线性调频信号的调频斜率.

经过马赫曾德调制器调制后的信号可以写为^[22]

$$q(t) = \beta x(t) \cdot p(t) = \beta x(t) \cdot \exp\left(j \frac{t^2}{2 \ddot{\phi}_5}\right) G(\omega) \Big|_{\omega = \frac{t}{\dot{\phi}_5}} \quad (5)$$

式中, β 表示调制深度.调制后的信号经 DE₄后,其时域表达式为

$$y(t) = q(t) \otimes \exp\left(j \frac{t^2}{2 \ddot{\phi}_4}\right) = K \cdot g(t) \otimes F\left[\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)\right] \Big|_{\omega = \frac{t}{\dot{\phi}_4}} \quad (6)$$

式中, $K = 2\pi |\dot{\phi}_5| \beta \frac{1}{\sqrt{T}} \exp\left(j \frac{t^2}{2 \ddot{\phi}_4}\right)$, F 表示傅里叶变换运算符.如果光源光脉冲是超短脉冲,那么 PD₂ 的输出可以近似表达为

$$I(t) = \Re \cdot y(t) \cdot y^*(t) \propto S a^2 (tT/2 \ddot{\phi}_4) \quad (7)$$

式中, \Re 表示探测器的响应度, $*$ 表示共轭运算符.

将式(1)和式(2)带入式(7),经过化简后得

$$I(t) = S a^2 (tT/2 \ddot{\phi}_4) = S a^2 (\pi m B t) \quad (8)$$

$$m = (\ddot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_1 \ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_2 \ddot{\phi}_5) / \ddot{\phi}_5 \ddot{\phi}_2 \quad (m \neq \dot{\phi}_1 / \dot{\phi}_2, m \neq 0, m \neq -1) \quad (9)$$

$$\ddot{\phi}_4 = T/2\pi m B \quad (10)$$

式中, m 的值由 $\dot{\phi}_1$ 、 $\dot{\phi}_2$ 和 $\dot{\phi}_5$ 共同决定.由式(8)可知,经过第四段色散光纤的作用最终在 PD₂后可以得到线性调频信号脉冲压缩的结果.

由式(8)可知,雷达回波信号脉冲压缩后的主瓣宽度 τ 为

$$\tau = |mB|^{-1} \quad (11)$$

将式(11)与匹配滤波结果对比可知:参数 m 决定了脉冲压缩比的可调谐性,其值与 DE₁、DE₂和 DE₃的色散量有关.由式(9)可知:当在产生信号的条件一定的情况下(即当 $\dot{\phi}_1$ 和 $\dot{\phi}_2$ 的值确定时),通过改变第三段光纤的色散量可得到不同的脉冲压缩比.

2 系统仿真分析

基于 MATLAB 软件对基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统进行仿真.图 2(a)表示由锁模激光器产

生的时宽为 40 fs 的脉冲信号。 DE_1 的色散量设为 -898 ps^2 , DE_2 的色散量设为 48 ps^2 . 两路可调光滤波器的中心波长设置为 1550 nm , 带宽设置为 3 nm . 两路信号经过 OC_2 耦合到一起, 然后在第一个探测器(PD_1)上拍频检测. 图 2(b)展示了 PD_1 产生的时宽约为 2 ns 的线性调频信号.

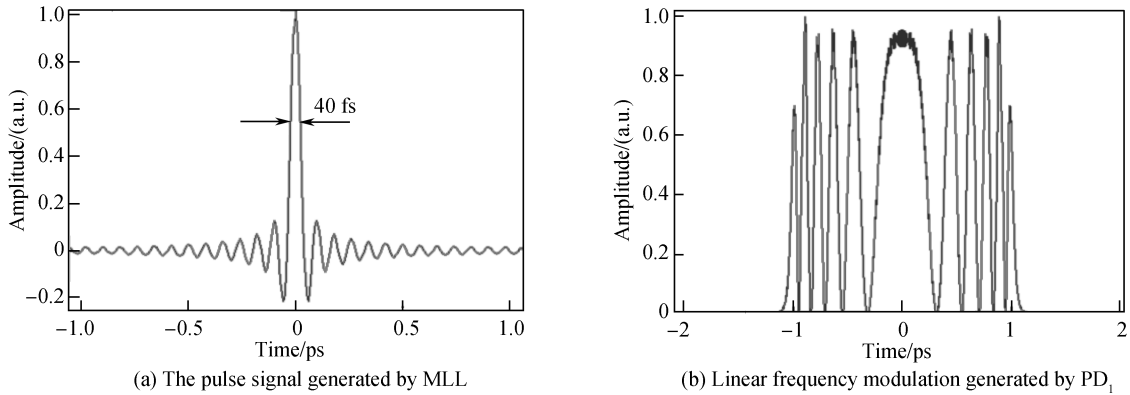


图 2 线性调频信号产生的仿真结果

Fig.2 The generation of linear frequency modulation

图 3(a)描述了经过色散量约为 -550 ps^2 的 DE_3 后的光信号时域波形. 将产生的线性调频信号调制到图 3(a)中的光包络上, 调制结果如图 3(b)所示. 图 3(c)表示未调制线性调频信号的光包络经过 DE_4 后的时域波形. 调制了线性调频信号的光包络经过色散量约为 1592 ps^2 的 DE_4 后, 最终在 PD_2 输出后的信号如图 3(d)所示. 从图 3 中可以得知: 由于 DE_3 和 DE_4 具有互逆光纤色散作用, 一方面光信号的包络在时域变窄, 另一方面加载到光包络上的线性调频脉冲信号被有效压缩. 将图 3(c)与图 3(d)中对应的曲线相减可得线性调频信号脉冲压缩后的结果, 如图 4 所示. 经过互逆光色散作用后, 所获得的光域脉冲压缩的主瓣宽度约为 4.3 ps . 由公式(9)可求得 m 的值约为 -12 , 脉冲压缩后的理论值约为 5 ps , 理论值与仿真结果较为吻合.

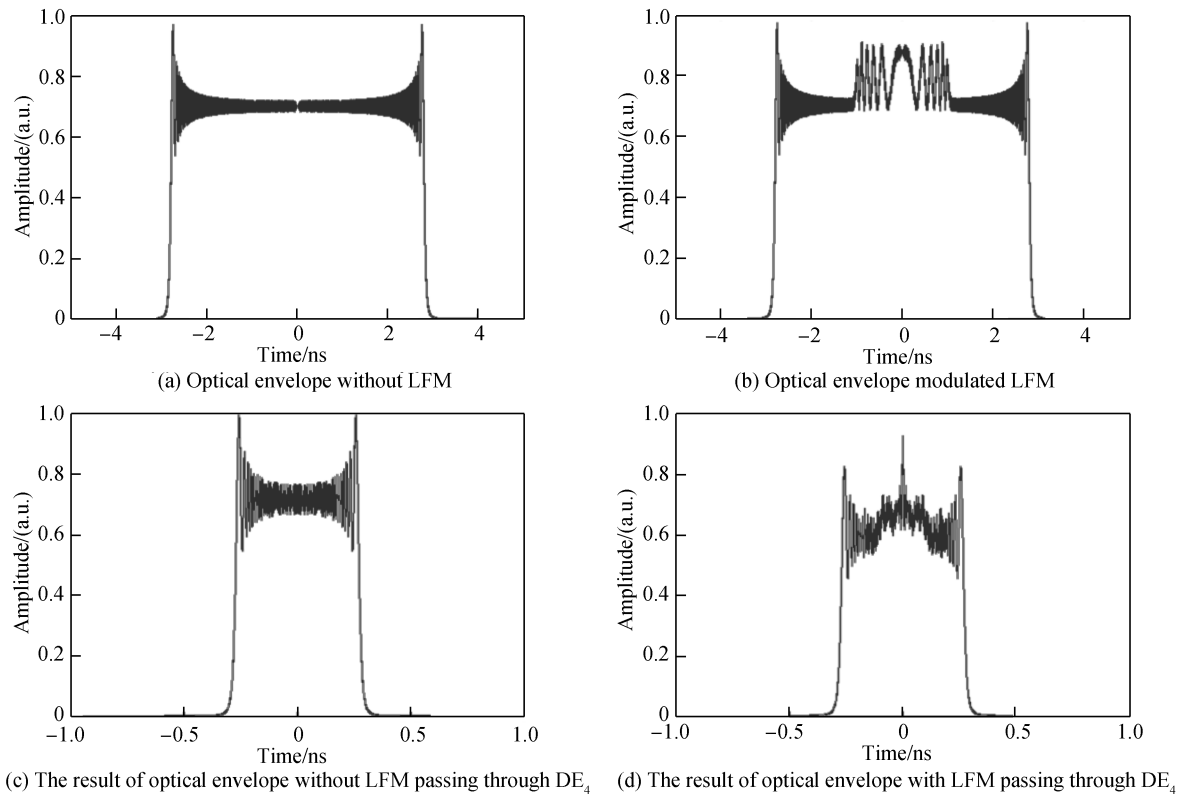


图 3 脉冲压缩的仿真结果

Fig.3 Pulse compression results

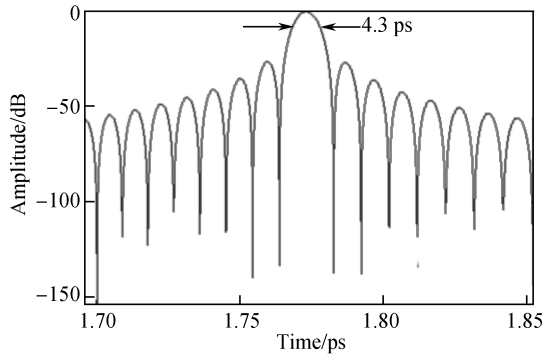


图4 脉冲压缩后的仿真结果
Fig.4 Simulation of the pulse compressed signal

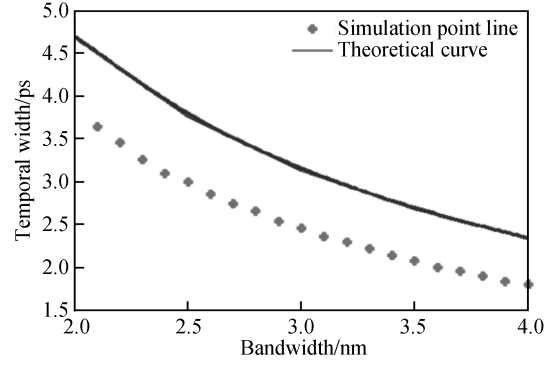


图5 TOF₁带宽和线性调频信号脉冲压缩后时宽的关系
Fig.5 Relationship between optical bandwidth of TOF₁ and temporal width after pulse compression

将式(2)和式(9)带入式(11),可得

$$\tau = \left| \frac{\lambda^2}{c \Delta\lambda} \cdot \frac{\ddot{\phi}_5 \ddot{\phi}_1}{\ddot{\phi}_1^2 + \ddot{\phi}_1 \ddot{\phi}_2 - \ddot{\phi}_2 \ddot{\phi}_5} \right| \quad (12)$$

为了验证可调光滤波器的带宽 $\Delta\lambda$ 与脉冲压缩后信号时宽 τ 的关系,模拟了 $\Delta\lambda$ 与 τ 的变化关系.仿真中,DE₁、DE₂和DE₃的色散量分别设置为 $-1\ 912\ \text{ps}^2$ 、 $217\ \text{ps}^2$ 和 $-2\ 293\ \text{ps}^2$.通过改变TOF₁的带宽可以得到在不同光滤波器带宽下输出信号的时宽,仿真结果如图5中点线所示.图5中曲线表示根据式(12)计算得到的可调光滤波器带宽与脉冲压缩后信号时宽的理论曲线.对比发现,理论与仿真趋势基本吻合.图5表明在光纤色散量一定的条件下,可调光滤波器带宽与脉冲压缩后信号的时宽成反比.因此,通过增加可调光滤波器的带宽,可以减小脉冲压缩后信号的时宽,等效于增加脉冲压缩比.

为了说明光纤色散量对脉冲压缩比的影响,仿真分析了光纤色散量与脉冲压缩比 m 的关系,见图6.仿真中,设置DE₁的色散量为 $-407\ \text{ps}^2$,DE₂的色散量为 $4.3\ \text{ps}^2$.通过改变DE₃和DE₄的色散量,得到DE₃和DE₄的色散量对 m 值影响的关系曲线,分别如图6(a)和图6(b)所示.由图6可知:1) m 的值与光纤的色散量成反比.要使脉冲压缩后的信号具有较小的 m 值,就必须采用较大的光纤色散量.在现有条件下,可以通过增加光纤的长度来获取较大的色散量,但单纯的光纤长度增加会带来更大的损耗和信噪比恶化等影响.因此,在光纤长度的选取和 m 值之间存在优化条件;2)DE₃与DE₄的色散系数需要相反,即互逆光纤色散条件.图6还为合理选取色散光纤和获取特定的脉冲压缩比等方面提供了参考意义.

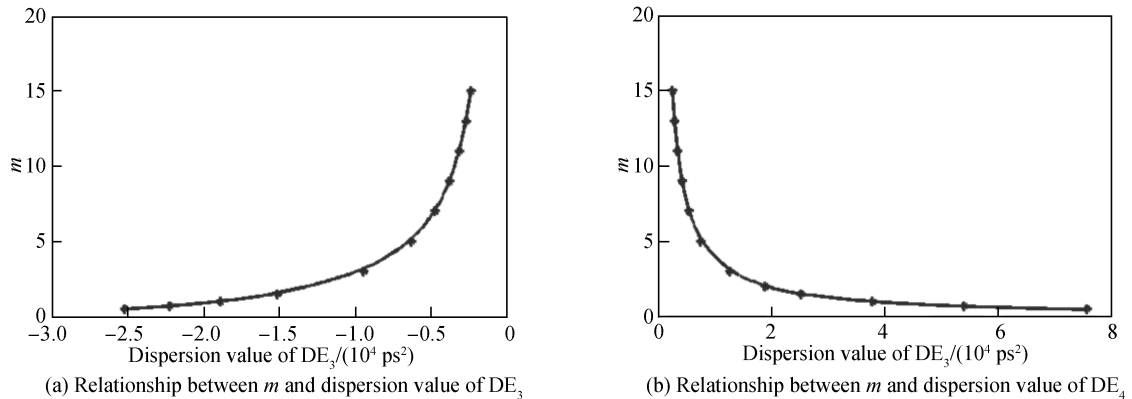


图6 m 值与光纤色散量的关系
Fig.6 Relationship between m and optical fiber dispersion

3 实验验证

实验中所用的光源是锁模激光器(FFL-1560-B),该激光器产生的脉冲重复频率是37MHz.选取DE₁为色散补偿光纤,其色散量约为 $-407\ \text{ps}^2$,DE₂采用200米的普通单模光纤.两个可调光滤波器(CVF-220CL)的中心频率设置在1550nm附近、相隔0.06nm左右,TOF₁的带宽设置为3nm,为了增加调制线性调频信

号的灵活性, TOF_2 的带宽设置为 10 nm. DE_3 选取色散量约为 $-1\ 460\ \text{ps}^2$ 的色散补偿光纤. 为了验证方案的可行性, 图 1 中 T/R 组件采用模块④表示的“直通”模式, 即用射频电缆将两端直接相连组成“直通”. 实验过程中, 首先调节可调光滤波器的中心频率与带宽, 然后调节可调光滤波器后的光延时线, 以便获得高质量高稳定的线性调频信号. 图 7(a) 给出实验测得的时宽约为 1.2 ns 的线性调频信号, 图 7(b) 给出该信号经过短时傅里叶变换后的结果.

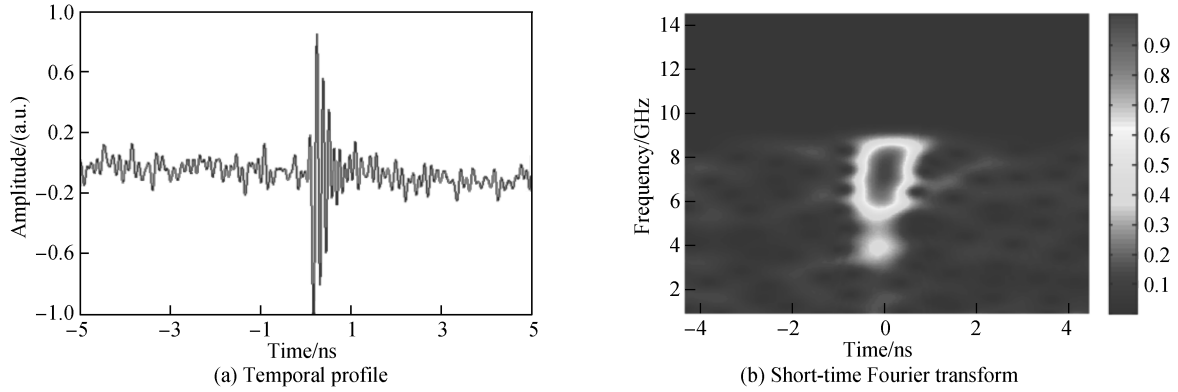


图 7 PD_1 输出的线性调频信号的实测结果
Fig.7 Measured linear frequency modulation generated by PD_1

图 8(a) 表示未调制线性调频信号的光包络. 为了放大 PD_1 产生的线性调频信号, 实验中在调制器的前端添加了一个低噪声放大器 (TLA-060120G36). 将产生的线性调频信号通过马赫-曾德调制器 (PHOTLINE, MXAN-LN-40) 调制到预啁啾的光信号上, 调制结果如图 8(b) 所示.

采用色散量约为 $2550\ \text{ps}^2$ 的单模光纤作为 DE_4 . 为了补偿接收链路的功率损耗, DE_4 的输出端被接入到

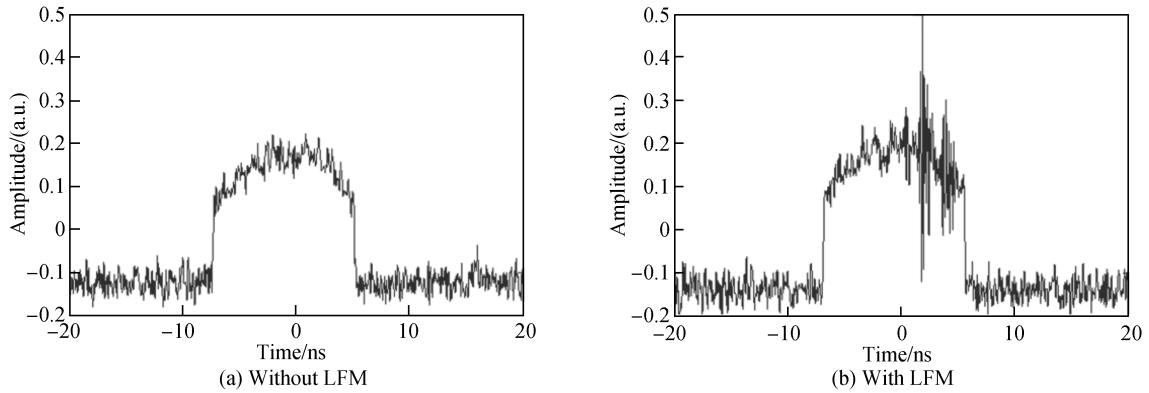


图 8 未调制和调制线性调频信号的光包络实测结果
Fig.8 Measured optical envelope with and without LFM

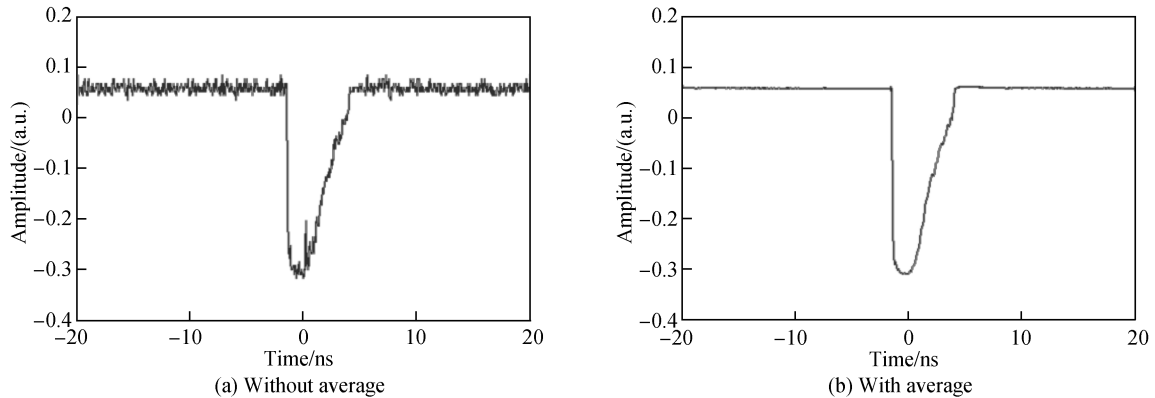


图 9 PD_2 输出信号的实测结果
Fig.9 Measured signal after PD_2

一个掺铒光纤放大器(EDFA₂)进行功率补偿.最终,经过放大的信号进入PD₂(DSC-R412-39-FC)进行检测,最终在示波器(Keysight DSO S804A, Sa = 25 GHz)上呈现的结果如图9(a)所示.为了去除光包络信号及随机噪声,实验中将上千次的波形进行平均处理,平均后的波形如图9(b)所示.将图9(a)和图9(b)中对应的曲线相减,从而就得到了线性调频信号脉冲压缩后的实验结果,如图10.由图10可知,实验得到的线性调频信号脉冲压缩后的时域宽度约为0.09 ns,对应的脉冲压缩比约为13.3.

4 结论

本文提出了一种基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计方案.通过理论分析,数值仿真和实验验证,证明了该设计方案的有效性和可行性,该雷达系统结构简单,无需脉冲压缩过程中数字化和离线处理.结果表明:利用互逆光纤色散不但可以实现宽带线性调频信号的光域产生和光域脉冲压缩,而且该方案还具有脉冲压缩比的调谐作用.在实验验证中,首先产生了C波段下时宽1.2 ns,带宽3.2 GHz的线性调频信号,并通过互逆色散光纤成功的将该信号压缩至0.09 ns,脉冲压缩比达13.3.受限于现有的实验条件,目前仅完成了该方案可行性的验证,对于脉冲压缩比调谐性的实验验证将是课题组后续工作的重点,而且若采用更高色散系数的色散媒质,有望进一步提高调节脉冲压缩比的灵活度.

参考文献

- [1] SKOLNIK M I. Introduction to radar[M]. Radar Handbook, 1962.
- [2] WU Jin. Matched filter in synthetic aperture radar imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2123-2129.
吴瑾. 合成孔径激光雷达呈像之匹配滤波器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2123-2129.
- [3] YANG Guang, ZOU Wei-wen, LI Xing, et al. Theoretical and experimental analysis of channel mismatch in time-wavelength interleaved optical clock based on mode-locked laser[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3): 2174-2186.
- [4] ZHANG Hua-jie, ZOU Wei-wen, YANG Guang, et al. Dual-output modulation in time-wavelength interleaved photonic analog-to-digital converter based on actively mode-locked laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(3): 030602.
- [5] ZHANG Yu-zhou, ZOU Wei-wen, LONG Xin, et al. Scheme of optical pulse compression reflectometry based on nonlinear frequency modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0606001.
张钰洲, 邹卫文, 龙鑫, 等. 基于非线性频率调制的光脉冲压缩反射测量方案[J]. *光子学报*, 2015, **44**(6): 0606001.
- [6] WANG Chao, YAO Jian-ping. Chirped microwave pulse generation based on optical spectral shaping and wavelength-to-time mapping using a Sagnac loop mirror incorporating a chirped fiber Bragg grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(16): 3336-3341.
- [7] ZHANG Hao, ZOU Wei-wen, CHEN Jian-ping. Generation of a widely tunable linearly chirped microwave waveform based on spectral filtering and unbalanced dispersion[J]. *Optics letters*, 2015, **40**(6): 1085-1088.
- [8] TAN Zhong-wei, QIN Feng-jie, REN Wen-hua, et al. Application of fiber dispersion in all optical data processing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(8): 080023.
谭中伟, 秦凤杰, 任文华, 等. 光纤色散在光信息处理中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(8): 080023.
- [9] CHI Hao, YAO Jian-ping. Symmetrical waveform generation based on temporal pulse shaping using amplitude-only modulator [J]. *Electronics Letters*, 2007, **43**(7): 415-417.
- [10] WANG Zhen-bao, WU Yong, WANG Ping, et al. Research on nonlinear effects in fiber-optic communication systems [J]. *Study on Optical Communications*, **3**(2011): 25-28.
王振宝, 吴勇, 王平, 等. 光纤通信系统中的非线性效应研究[J]. *光通信研究*, **3**(2011): 25-28.
- [11] GAO Hong-biao, CHENG Lei, CHEN Ming-hua, et al. A simple photonic generation of linearly chirped microwave pulse with large time-bandwidth product and high compression ratio[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(20): 23107-23115.
- [12] QIAN A-quan, ZOU Wei-wen, WU Gui-ling, et al. Design and implementation of multi-channel photonic time-stretch analog-to-digital converter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(5): 0505001.
钱阿权, 邹卫文, 吴龟灵, 等. 光子时间拉伸模数转换系统的多通道化设计与实现[J]. *中国激光*, 2015, **42**(5): 0505001.
- [13] ZOU Wei-wen, ZHANG Hao, LONG Xin, et al. All-optical central-frequency-programmable and bandwidth-tailorable radar[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**.
- [14] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, **507**

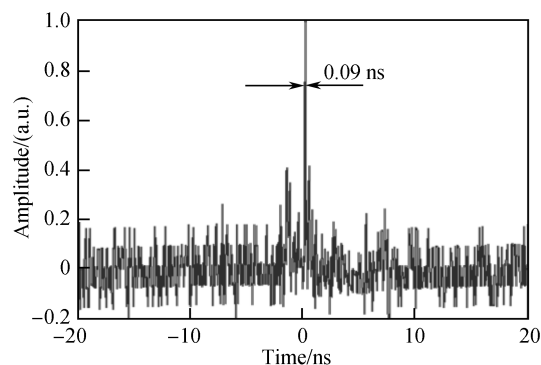


图10 脉冲压缩后的实测结果

Fig.10 Measured pulse compressed signal

- (7492): 341-345.
- [15] LONG Xin, ZOU Wei-wen, CHEN Jian-ping. All-optical pulse compression of broadband microwave signal based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(5): 5162-5171.
- [16] WANG Chao, YAO Jian-ping. Chirped microwave pulse compression using a photonic microwave filter with a nonlinear phase response[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, **57**(2): 496-504.
- [17] LI Ming, SUN Shu-qian, MALACARNE A, *et al.* Reconfigurable single-shot incoherent optical signal processing system for chirped microwave signal compression[J]. *Science Bulletin*, 2017, **62**(4): 242-248.
- [18] ZHANG Jie-jun, YAO Jian-ping. A microwave photonic signal processor for arbitrary microwave waveform generation and pulse compression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(24): 5610-5615.
- [19] XIA Nan, CHEN Ying, CHEN Xiang-ning, *et al.* Impact of nonlinearity effect on the performance of photonic time-stretch analog-to-digital converter system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(6): 0606002.
夏楠,陈颖,陈向宁,等. 光纤非线性效应对光子时间拉伸模数转换系统性能的影响[J]. 光学学报, 2014, **34**(6): 0606002.
- [20] COPPINGER F, BHUSHAN A, JALALI B. Photonic time stretch and its application to analog-to-digital conversion [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(7): 1309-1314.
- [21] FARD A M, GUPTA S, JALALI B. Photonic time-stretch digitizer and its extension to real-time spectroscopy and imaging[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, **7**(2): 207-263.
- [22] YAO Jian-ping. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(15): 3723-3736.