

doi: 10.3788/gzxb20124105.0522

光载超宽带脉冲雷达信号传输性能研究

姚现勋, 闫娟娟

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:采用双并行马赫曾德尔调制器产生高斯脉冲一阶微分和二阶微分型超宽带脉冲雷达信号和光载无线电传输技术,通过仿真研究了两种超宽带脉冲雷达信号在标准单模光纤中的传输特性。结果表明,高斯脉冲一阶微分型脉冲随着传输距离的增大而不断展宽,而高斯脉冲二阶微分型脉冲则先压缩后展宽。经 100km 标准单模光纤传输之后,在传输终端采用色散补偿光纤对传输信号进行不同程度的色散补偿,可获得满足美国联邦通信委员会规范要求的不同宽度高斯脉冲一阶微分和二阶微分型脉冲信号。

关键词:光通信;光载超宽带脉冲雷达信号;双并行马赫曾德尔调制器;高斯脉冲一阶微分型脉冲;高斯脉冲二阶微分型脉冲;色散补偿光纤

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0522-6

0 引言

超宽带(Ultra-Wideband, UWB)雷达以其高距离分辨率、强穿透力、低截获概率及强抗干扰性等优点^[1-3],在各研究领域受到越来越多的关注。超宽带脉冲雷达是超宽带雷达的一种,其发射的是无载波短脉冲信号,工作带宽极宽,因而具有穿透性强、目标识别率高的优点。然而,超宽带脉冲雷达发射的信号峰值功率虽然可以很高,但由于占空比极低,平均功率很小,直接限制了其最大作用距离。

为延长超宽带脉冲雷达的作用距离,设计中常采用高功率的脉冲源或分布式结构,将雷达天线与其数据处理中心分开。常用的 UWB 脉冲雷达信号是高斯脉冲的多阶微分形式,其一阶微分(monocycle)及二阶微分(doublet)形式的脉冲应用最广。在电域内,文献[4]报道了一些基于电路的脉冲产生实现方法,但产生的脉冲绝对带宽和相对带宽受限,并且对电路要求苛刻、成本高昂,很难实现纳秒级以上的超短脉冲。微波光子技术的发展为超宽带脉冲雷达信号的产生提供了一种新方法^[5]。

目前,基于微波光子技术的 UWB 脉冲信号产生技术主要有以下几种:

1) 基于半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)中交叉相位调制(Cross-

Phase Modulation, XPM)效应,以及光带通滤波器(Optical Band-Pass Filter, OBF)的鉴频特性实现相位调制到强度调制转化^[6],产生 monocycle 或 doublet 型脉冲。

2) 基于可调光滤波器(Tunable Optical filter, TOF)和光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)实现频谱整形^[7],并通过光纤的色散效应产生频域到时域的转换^[8],得到 UWB 脉冲。

3) 基于各种非线性效应的实现方案,如基于非线性光纤环境(Nonlinear Optical Loop Mirror, NOLM)的开关效应^[9],产生 UWB 脉冲。

4) 基于负抽头系数微波光子滤波器的实现方案^[10],如采用双并行马赫曾德尔调制器(Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator, DPMZM),通过调节调制器的工作区域,使得两臂调制后的高斯脉冲组合在一起产生 monocycle 型脉冲^[11]和 doublet 型脉冲^[12]。由于光器件信号处理速度快,因此,借助微波光子技术可以产生纳秒甚至皮秒级超短脉冲雷达信号,并具有可调性强、抗电磁干扰等优点。此外,如果将雷达天线与其数据处理中心分开,将光域内产生的超宽带脉冲雷达信号经光纤传输^[13-15]后,再由远端的天线发射出去,则可以在一定程度上克服超宽带脉冲雷达作用距离受限的不足。

在上述产生 UWB 脉冲信号的四种光学方法

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB315601),高等学校博士学科点专项科研基金(No. 200800061070)和北京航空航天大学基本科研-唯实人才培养基金(No. YWF-11-03-Q-174)资助

第一作者:姚现勋(1987-),男,博士,主要研究方向为光载雷达信号传输技术。Email: yaoxiaxun@126.com

责任作者/导师(通讯作者):闫娟娟(1976-),女,副教授,主要研究方向为光信号处理与传输技术。Email: yanjuanjuan@buaa.edu.cn

收稿日期:2011-10-28; **修回日期:**2012-02-17

中,前三种方案都利用了多个不同波长的激光源^[7-9],由此产生的 UWB 脉冲在光纤中传输时会受到更多色散及非线性效应^[14]的影响,导致脉冲失真.因此,本文采用第四种方案,基于 DPMZM 及单波长激光源,通过仿真产生 monocycle 和 doublet 型信号,得到相对带宽大于 130% 的 UWB 脉冲雷达信号.同时,分析了两种 UWB 脉冲雷达信号在光纤中的传输性能,利用不同长度色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber,DCF)对传输 100 km 后的 UWB 脉冲信号进行补偿,并对补偿性能进行了分析.

1 超宽带雷达信号光学产生方法

利用双并行马赫曾德尔调制器原理,将高斯脉冲信号作为调制信号,通过设置每个马赫曾德尔调制器的直流偏置点实现光场叠加,产生了 monocycle、doublet 型的超宽带脉冲雷达信号.monocycle 型脉冲信号系统框图如图 1.

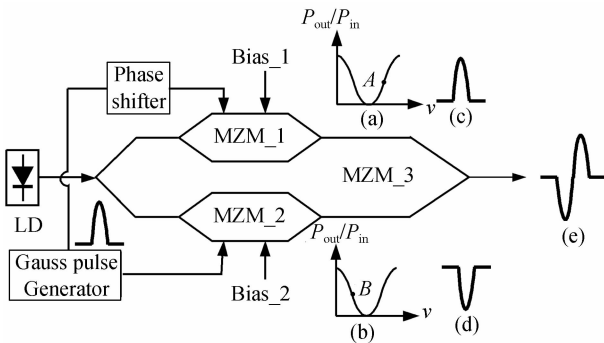


图 1 Monocycle 型信号产生原理
Fig. 1 The principle diagram of monocycle pulse generation

双并行马赫曾德尔调制器在主调制器 MZM₃ 的两个干涉臂上分别有一个子调制器 MZM₁ 和 MZM₂,如图 1.主调制器 MZM₃ 输出的光场为

$$E_{out}(t) = E_{out1} \exp\left(j \frac{\pi}{2} V_{bias} / V_{\pi}\right) + E_{out2} \exp\left(-j \frac{\pi}{2} V_{bias} / V_{\pi}\right) \quad (1)$$

式中 E_{out1} 、 E_{out2} 分别为 MZM₁ 与 MZM₂ 的输出光场, V_{bias} 、 V_{π} 分别为 MZM₃ 的偏置电压和半波电压.通过调整 V_{bias} 、 V_{π} 使得从 MZM₁、MZM₂ 输出的光强叠加,可产生 monocycle 或 doublet 型的 UWB 信号.MZM₁ 与 MZM₂ 都为普通的马赫曾德尔调制器,其调制强度响应相对于调制电压表现为升余弦函数的特性.对这两个 MZM 加载不同的偏置电压,使 MZM₁ 工作在图 1(a) 中的 A 正交偏置点;MZM₂ 工作在图 1(b) 中的 B 正交偏置点.通过调节移相器使输出脉冲(c)相对于脉冲 1(d) 有一固定延迟,使两脉冲叠加后得到如图 1(e) 所示 monocycle 型脉冲.同理,通过调整 MZM₁ 和

MZM₂ 的直流偏置点,使其分别工作在图 2(a) 中 A 点、(b) 中 B 点,使得输出脉冲分别如图 2 中(c)、(d).并调整 MZM₃ 的 V_{bias} 、 V_{π} 使得输出光场相减得到 doublet 型的脉冲,如图 2(e).

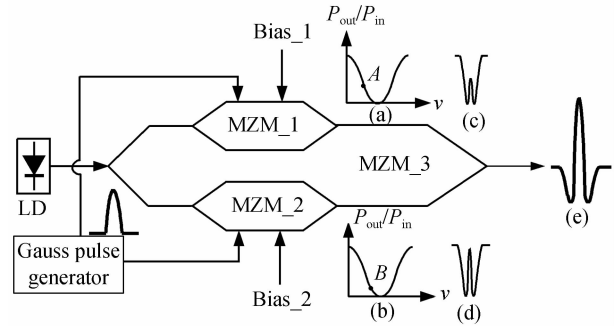


图 2 doublet 型脉冲产生原理
Fig. 2 The Principle diagram of doublet pulse generation

本文基于以上原理,使用 Optisystem 结合 Matlab 仿真产生了 monocycle 和 doublet 型 UWB 信号.其中,所用激光器(LD)的中心波长设为 1 551 nm,DPMZM 的输入信号为 10Gbit/s 的高斯脉冲序列“00000010000000000000”,其脉冲重复频率为 500 MHz.仿真中,两个子 MZM 工作于推挽模式.设置 MZM₂ 的输入高斯脉冲延迟刚好为一个脉冲宽度.所产生的 monocycle 型脉冲波形和频谱如图 3.由图可见,信号的半高全宽(Full Width at

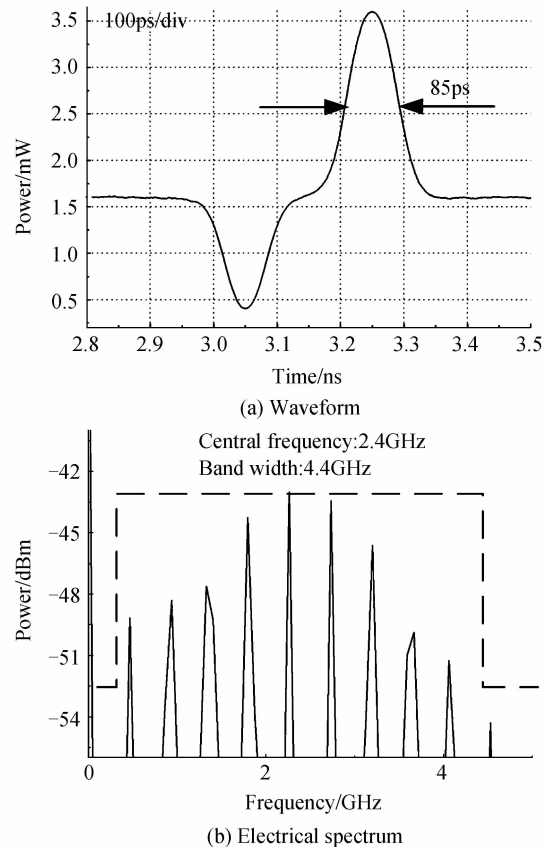


图 3 monocycle 型脉冲仿真结果
Fig. 3 Simulation results of monocycle pulse

Half Maximum,FWHM)为 85 ps. 从频谱图可知其中心频率约为 2.4 GHz,10 dB 带宽为 4.4 GHz,相对带宽约为 183%,完全满足美国联邦通信委员会(Federal Communication Commission, FCC)对 UWB 雷达信号的要求.

同样,调整两个子 MZM 调制器的偏置电压和

调制电压,并通过光场叠加可产生 doublet 型信号,信号波形和频谱如图 4. 其中,信号的 FWHM 为 71 ps. 从频谱图可知其中心频率约为 5 GHz,10 dB 带宽约为 6.8 GHz,相对带宽为 136%,完全满足 FCC 对 UWB 信号的要求.

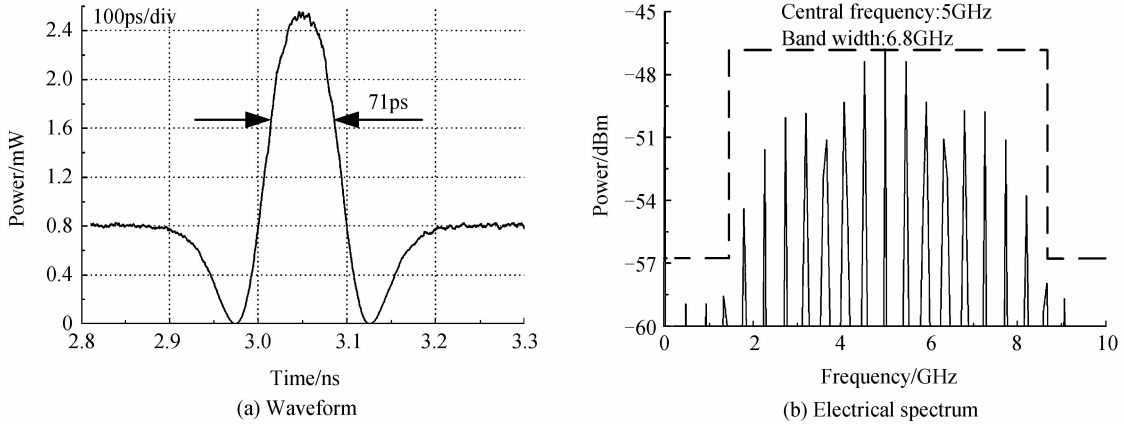
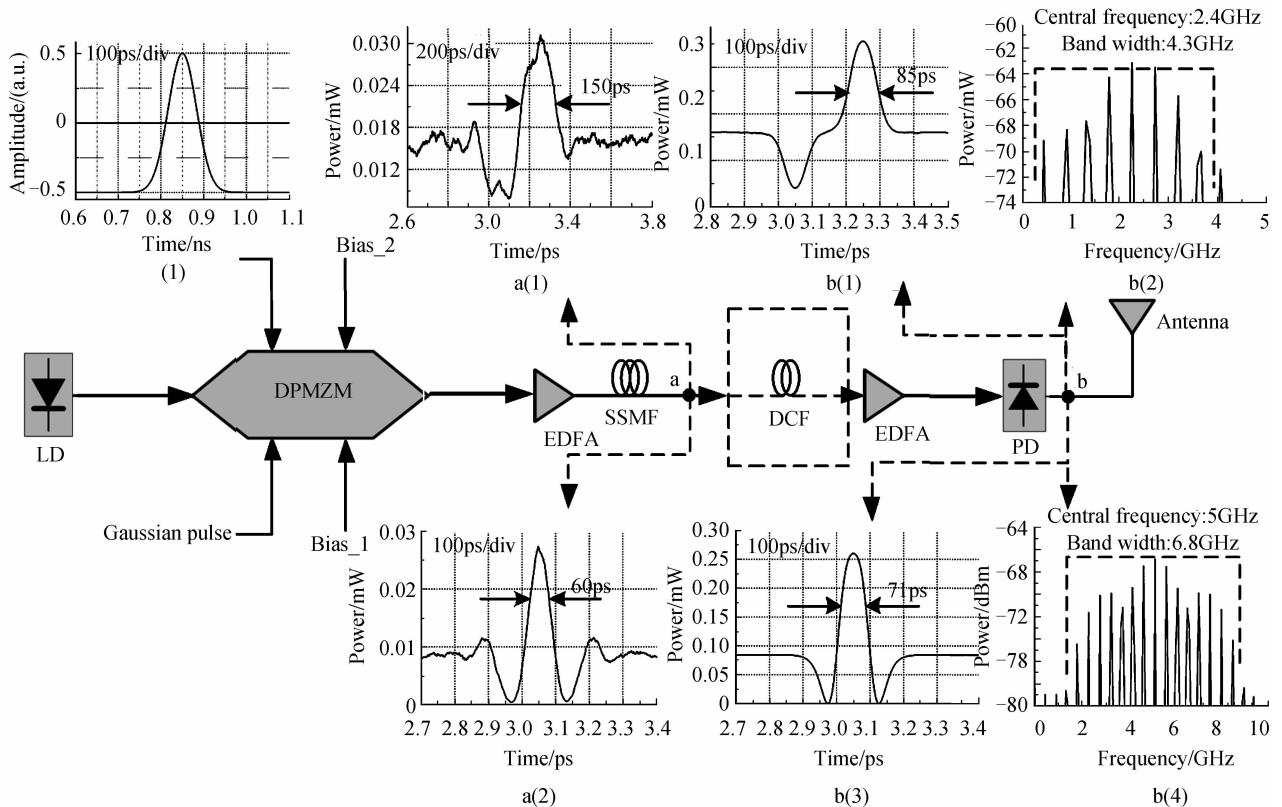


图 4 doublet 型脉冲仿真结果
Fig.4 Simulation results of doublet pulse

2 光纤传输超宽带雷达信号性能分析

将上述基于光学方法产生的 UWB 脉冲雷达信号,采用光纤进行长距离传输可大大延长雷达天线

与数据处理中心之间的距离,扩大 UWB 雷达的作用范围. 为此,本文进行了仿真研究. 系统的仿真结构框图及部分仿真结果如图 5.



(1) Waveform of input Gaussian pulse, a(1) monocyte pulse over 100 km SSMF transmission, a(2) doublet pulse over 100 km SSMF transmission, b(1) monocyte pulse after DCF compensation, b(2) Electrical spectrum after DCF compensation, b(3) doublet pulse after DCF compensation, b(4) Electrical spectrum after DCF compensation

图 5 系统结构框图
Fig.5 The system setup

在雷达系统的数据处理中心产生的 UWB 雷达信号如图 3 和图 4,信号经过掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大到 3 dBm左右后进入标准单模光纤(Standard Single Mode Fiber, SSMF)传输,传输 100 km 之后 monocycle、doublet 信号的波形分别如图 5 中 a(1)和 a(2). 由于光纤的色散和非线性效应的影响,UWB 信号波形有一定失真. 天线发射端,经过光电检测器(Photoelectric Detector, PD)进行光电变换之前采用 20 km DCF 进行色散补偿,并利用 EDFA 将补偿后的信号放大,光电变换后得到电域内的 monocycle、doublet 型脉冲波形和频谱分别如图 5 中 b(1)、b(2)、b(3)和 b(4). 由图可知,经过合适长度的 DCF 补偿后,monocycle 和 doublet 型脉冲的 10dB 相对带宽分别为 179%、136% 都完全满足 UWB 雷达信号的要求. 仿真中 SSMF 和 DCF 的参数设置如表 1 所示.

表 1 SSMF 及 DCF 参量设置

Table 1 Parameter setting of SSMF and DCF

Sample	SSMF	DCF
Attenuation/(dB · km ⁻¹)	0.2	0.5
Dispersion/(ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	16	-80
Effective area/(μm ²)	80	30

经不同长度的 SSMF 传输后两脉冲的半高全宽变化如图 6. 从图 6 可看出,对于 monocycle 型脉冲而言,由于色散的影响,经过不同距离 SSMF 传输后脉冲不断展宽,而 doublet 型脉冲却随着传输

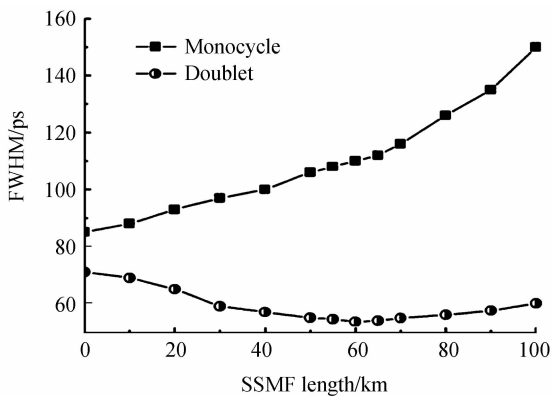


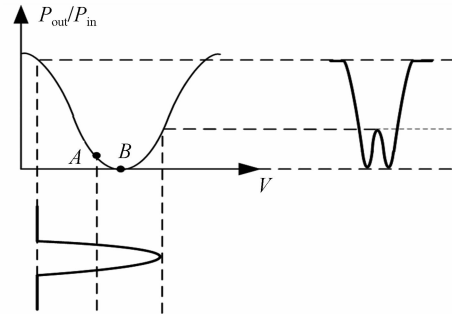
图 6 传输不同距离后 monocycle、doublet 脉冲的半高全宽
Fig. 6 The FWHM of monocycle pulse and doublet pulse versus transmission distance

距离的增加,先压缩后展宽,在 60 km 左右达到最窄. 这是由于在产生 doublet 型脉冲时,MZM₁ 及 MZM₂ 的偏置点较低,如图 7(a)的 A 点,接近调制器的最低调制点 B 点. 考虑 MZM 输出光场表达式为

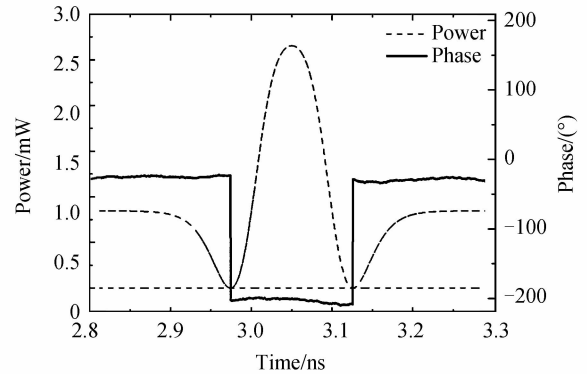
$$E_{out}(t) = E_{in} \cos \left[\frac{\pi(V_1(t) - V_2(t))}{2V_{\pi}} \right].$$

$$\exp \left[j \frac{\pi(V_1(t) + V_2(t))}{2V_{\pi}} \right] \quad (2)$$

式中 $V_1(t)$ 、 $V_2(t)$ 分别为调制器上、下臂的驱动电压,包括调制电压和直流偏置 $V_1(t) + V_2(t) = 0$ 、 $V_1(t) - V_2(t) = 2V_{\pi}$ 时,即调制器工作在如图 7(a)的 B 点,此时 $E_{out}(t) = E_{in} \cos \left[\frac{\pi(V_1(t) - V_2(t))}{2V_{\pi}} \right] = -E_{in}$. 所以当通过该点时输出光强会有 π 相位的跳变.



(a) The modulation characteristics of MZM



(b) Waveform of power and phase for the generated doublet pulse

图 7 Doublet 脉冲产生相位跳变原理

Fig. 7 Principle of doublet pulse phase jump

由于以上原因,所产生的 doublet 型脉冲的波形及其相位如图 7(b),相位的跳变会导致啁啾,由图 7(b)可知,脉冲的前沿为负啁啾,脉冲后沿为正啁啾. 在负色散的 SSMF 中传输时,负啁啾的脉冲前沿传输速度较慢,而正啁啾的脉冲后沿传输速度较快. 因此, doublet 型脉冲经 SSMF 传输时,会出现先压缩的情况. 当传输一段距离之后,由于色散作用的累积,脉冲才会发生展宽.

当 UWB 脉冲雷达信号传输 100 km 之后,经不同长度的 DCF 进行色散补偿可得到不同宽度的 UWB 脉冲信号,如图 8 所示. 对于 monocycle 型脉冲,随着 DCF 长度的增加,累积色散逐渐被补偿,展宽后的脉冲也随之变窄,并在 20 km 时达到传输前的脉冲宽度 85 ps. 而对于 doublet 型脉冲,随着 DCF 长度的增加,累积色散被逐渐补偿,脉冲宽度也会先变窄,当 DCF 长度大于 12 km 时,脉冲发生展宽,当 DCF 长度为 20 km,SSMF 的累积色散被

完全补偿时,脉冲的宽度达到传输前的脉冲宽度 71 ps. 因此,对于 doublet 型脉冲,由于啁啾的存在,用较短的 DCF 补偿经较长 SSMF 传输后的脉冲,可得到比传输前更窄的脉冲.

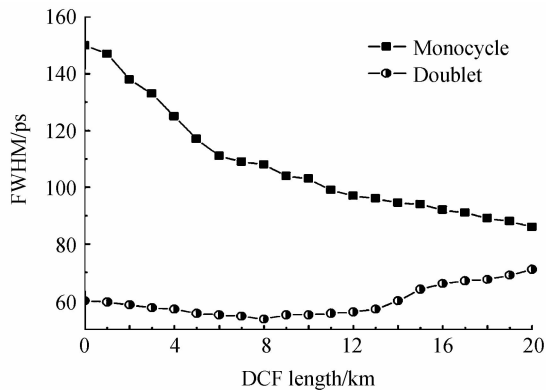


图 8 传输 100 km 后使用不同长度 DCF 补偿后脉冲的高全宽

Fig. 8 The FWHM of pulse compensated with different length of DCF after transmission of 100 km SSMF

3 结论

本文基于 DPMZM 产生了 monocycle、doublet 型 UWB 脉冲雷达信号,通过仿真研究了两种信号经 SSMF 传输的性能. 研究发现,在色散的作用下 monocycle 型脉冲随着传输距离的增大不断展宽,而 doublet 型脉冲由于产生时引入了频率啁啾,传输时会先压缩后展宽. 在天线发射端采用 DCF 对传输后的雷达脉冲进行色散补偿,当累积色散被完全补偿时可得到与传输前宽度相等且满足 FCC 规范的脉冲. 对于 doublet 型脉冲,由于啁啾的存在,用较短 DCF 补偿较长 SSMF 累积的色散,可得到比传输前更窄的脉冲. 对增大 UWB 脉冲雷达的作用范围,提高其距离分辨率等具有重要意义. 同时光载 UWB 脉冲雷达信号传输技术也可应用于分布式雷达系统的研究中,对促进远程超宽带雷达技术在我国的发展和有着重要的意义.

参考文献

[1] Fed Communication Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems. Tech. Rep, ET-Docket 98-153, Apr. 2002. FCC 02-48.

[2] AIELLO G R, ROGERSON G D. Ultra-wideband wireless systems[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2003, **4**(2): 36-47.

[3] IMMOREEV I I, FEDOTOV P G S D V. Ultra wideband radar systems: advantages and disadvantages[C]. 2002 IEEE Conference on Ultra Wideband System and Technologies, 2002; 201-205.

[4] LIN Wen-piao, CHEN Jun-yu. Implementation of a new ultrawide-band impulse system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(11): 2418-2420.

[5] LOPEZ R R, CABALLERO A, YU Xian-bin, *et al.* A comparison of electrical and photonic pulse generation for IR-UWB on fiber links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **17**(5): 263-265.

[6] DONG Jian-ji, ZHANG Yin, XU Yuan, *et al.* Photonic generation of power-efficient ultra-wideband waveforms using a single semiconductor optical amplifier[C]. Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2010 Asia, 1223-1225.

[7] MCKINNEY J D, LIN I S, WEINER A M. Shaping the power spectrum of ultra-wideband radio-frequency signals[J]. *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions on*, 2006, **12**(54): 4247-4255.

[8] WANG C, ZENG F, YAO J. All-fiber ultra wideband pulse generation based on spectral shaping and dispersion-induced frequency-to-time conversion[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(3): 137-139.

[9] HUANG Hao, XU Kun, LI Jiang-qiang, *et al.* UWB pulse generation and distribution using a NOLM based optical switch [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(15): 2635-2640.

[10] YAO Jian-ping, ZENG Fei, WANG Qing. Photonic generation of ultra-wideband signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(11): 3219-3235.

[11] CHANG Qing-jiang, TIAN Yue, YE Tong, *et al.* A 24-GHz ultra-wide band over fiber system using photonic generation and frequency up-conversion [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1651-1653.

[12] ZHAO Ying, ZHENG Xiao-ping, ZHANG Han-yi, *et al.* Edge-triggered ultra-wide band signal over fiber system using dual-parallel mach-zehnder modulator[J]. *Communications and Photonics Conference and Exhibition(ACP)*, 2009, 1.

[13] PAN Shi-long, YAO Jiang-ping. UWB-over-fiber communication: modulation and transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(16): 2445-2455.

[14] CAI Tuo, SANG Tian, ZHANG Xiao-wei. Theoretical analysis on dispersion and non-linearity affecting gauss pulse propagation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 829-833.

蔡托,桑田,张小伟. 色散和非线性效应对高斯脉冲综合影响的理论分析[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 829-833.

[15] HAN Yi-shi, ZHANG Li, CHEN Wei-tao. Bi-directional radio over fiber system based on integrated optical modulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 401-406.

韩一石,张厉,陈伟涛. 基于综合光学调制技术的光纤无线双向通信系统设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 401-406.

Transmission Performance of Ultra Wideband Pulse Radar Signal over Fiber

YAO Xian-xun, YAN Juan-juan

*(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)*

Abstract: Monocycle pulse and doublet pulse used for ultra-wideband (UWB) pulse radar are generated with dual-parallel Mach-Zehnder modulator (DPMZM). Based on the radio over fiber (RoF) technology, the transmission performance of the UWB pulses over standard single mode fiber (SSMF) are theoretically analyzed. It is found that monocycle pulse is broadened with the increase of transmission distance, while doublet pulse is firstly compressed and then broadened. Monocycle pulse and doublet pulse with different width satisfying the FCC requirements of UWB pulse radar can be obtained, when the accumulated dispersion of the radar signal is compensated in different degree with dispersion compensation fiber (DCF) after 100 km transmission over SSMF.

Key words: Optical communication; UWB pulse radar signal over fiber; Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator(DPMZM); Monocycle pulse; Doublet pulse; Dispersion Compensation Fiber(DCF)