

光子时间拉伸相干雷达中信号产生对探测性能的影响

汪熹,李杏,张斯滕,陈建平,邹卫文*

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要:采用光纤结构产生线性调频信号的稳定性容易受实验器材和环境因素的影响,导致产生信号的幅相特性发生变化,进而影响到光子时间拉伸相干雷达系统的探测性能。主要分析了实验器材和环境因素对线性调频信号探测性能的影响,包括光纤耦合器分光比、滤波器中心波长偏移及干涉臂的延时扰动等因素。通过仿真不同条件下产生信号脉冲压缩后的峰值功率和距离分辨率,与理想情况下的脉冲压缩结果进行对比,得到各因素的影响情况及保证探测性能的参数范围,可以为光子时间拉伸相干雷达的设计与实现提供参考。

关键词:雷达;线性调频信号;分光比;中心波长偏移;延时扰动

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)12-0001-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impacts on detection performance of signals generation in photonic time-stretched coherent radar

WANG Xi, LI Xing, ZHANG Siteng, CHEN Jianping, ZOU Weiwen*

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The stability of linear frequency modulated signals generated by optical fiber structure is easily affected by experimental devices and environmental factors, which leads to the change of amplitude and phase characteristics of the generated signal, and then affects the detection performance of photonic time-stretched coherent radar system. This paper mainly analyzes the impacts of experimental devices and environmental factors on detection performance of linear frequency modulated signals, including splitting ratio of optical couplers, center wavelength shift of the filter and delay perturbation of the interference arm. By simulating peak power and range resolution of signals after pulse compression under different conditions, comparing them with the results after pulse compression under the ideal condition, the influence of every factor and the parameter range to ensure the detection performance are obtained, which can provides a reference for design and implementation of photonic time-stretched coherent radar.

Key words: radar; linear frequency modulated signal; splitting ratio; center wavelength shift; delay perturbation

0 引言

作为重要的探测设备,雷达在目标识别、遥感和成像等领域都已得到了广泛的应用。经过几十年的发

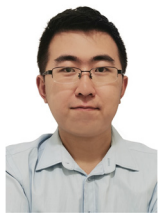
展,传统微波雷达受限于“电子瓶颈”,已难以满足目前大带宽的探测需求,基于光子学技术的微波光子雷达应运而生,其具有大带宽、低损耗、高分辨率和抗电磁干扰等优点。2014年,意大利的研究小组^[1]提出了世界上第一个微波光子相干雷达架构,为未来雷达系统的发展提供了一个范例。同年,美国普渡大学^[2]提出了具有高时间带宽积的W波段(75~110 GHz)任意波形的光子产生及测距方案,在使用线性调频信号进行实际测距时,实现了3.9 mm的距离分辨率。此后,国内外研究人员提出了多种微波光子雷达的实现方案。2017年,中国科学院电子研究所^[3]提出了基于微波光子倍频技术产生线性调频信号的微波光子合成孔径

收稿日期:2020-05-04。

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB2203700)资助;国家自然科学基金(61822508、61571292)资助。

作者简介:汪熹(1995—),男,硕士生,现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子科学与技术专业,主要从事光子时间拉伸相干雷达应用的研究工作,包括系统架构的稳定性分析与改善、光子时间拉伸相干雷达样机的研制等。

*通信作者:邹卫文(E-mail: wzou@sjtu.edu.cn)。



雷达方案,其雷达发射信号带宽为 600 MHz,对应成像距离分辨率为 25 cm。同年,南京航空航天大学^[4]研制出了可实现小目标实时成像的微波光子雷达验证系统,该系统利用微波光子倍频技术将 4.5~6.5 GHz 的线性调频信号倍频到 K 波段(18~26 GHz),成功实现了对小尺寸目标的实时高分辨成像,成像精度优于 2 cm。基于波长-时间映射和时间拉伸技术,本课题组^[5-6]提出了一种新型的微波光子雷达系统,该系统对不同色散的光脉冲进行光谱滤波与外差拍频,从而产生线性调频信号波形,信号的脉冲宽度为 23 ns,频率范围可达 5~60 GHz,时间带宽积高达 1265,并通过收发实验,在 X 波段验证了 5.4 cm 的距离分辨率。该方案的最大优势是能够产生中心频率、带宽和脉宽均可调谐的线性调频信号,这是传统微波光子雷达所不具备的。然而,基于光脉冲外差拍频方法产生线性调频宽带信号的稳定性容易受实验器材和环境因素的影响,导致产生信号的幅相特性发生变化,进而影响到微波光子雷达系统的探测性能。

针对上述问题,本文简要分析光子时间拉伸相干雷达中所产生的宽带信号的幅相特性,主要研究实验器材和环境因素对信号探测性能的影响,包括光纤耦合器分光比、滤波器中心波长偏移及干涉臂的延时扰动等参数。

1 光子时间拉伸相干雷达信号产生架构

本课题组提出的光子时间拉伸信号产生的实验架构如图 1 所示^[9]。锁模激光器(MLL)发出的光脉冲信号具有窄脉冲与宽光谱的特点。光脉冲信号被一个分光比为 50:50 的光纤耦合器(OC1)分成两部分,分别进入上、下 2 路。其中,一路光脉冲信号首先通过光谱滤波器(TOF1),被滤波为近似矩形的光谱;随后经过一段色散补偿光纤(DCF1),受到波长-时间映射作用,光脉冲信号在时域上表现为与滤波后光谱形状相同的矩形光脉冲。另一路光脉冲信号经过 TOF2 的滤波和 DCF2 的色散作用,DCF2 的色散量与 DCF1 略有差异,

该路产生的矩形光脉冲还需经过一个可调光纤延时线(VODL)来产生特定的延时差,实现特定波段。之后,上、下 2 路上的矩形光脉冲通过另一个分光比为 50:50 的光纤耦合器(OC2)耦合到一起,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,光电探测器(PD)将光信号转化为宽带线性调频的电信号。

本课题组之前已对产生信号的时宽和带宽特性进行探究,由于受到色散和滤波的影响,产生信号为脉冲信号,时宽为 $T_d \approx \left| 2\pi c \lambda' \ddot{\Phi}_2 \right| / \lambda_0^2$,其中 λ' 为 2 个光滤波器滤波带宽的较小值, c 为光在真空中的传播速度, λ_0 为 2 个光滤波器中心波长的平均值, $\ddot{\Phi}_2$ 为 DCF2 的色散量^[5]。在 OC2 处耦合的 2 路光信号可以表示为:

$$y_i(t) = \sqrt{C_i} A_i(t) \exp \left[j \left(\omega_i t + \frac{t^2}{2 \ddot{\Phi}_i} \right) \right] \quad (1)$$

其中, i 代表上、下 2 路 ($i=1,2$); C_i 为该支路的分光比; $A_i(t)$ 为经过 TOF 滤波后信号的时域幅度; ω 为滤波带宽范围内波长所对应的角频率, ω_i 为滤波后光脉冲信号的中心角频率, t 为出现信号的时刻, $\ddot{\Phi}_i$ 为 DCF 的色散量, $\omega - \omega_i = \frac{t}{\ddot{\Phi}_i}$ 。经过 PD 探测后的微波信号可以表示为:

$$I(t) \propto \mathcal{R} \cdot \{ [y_1(t) + y_2(t)] \cdot [y_1(t) + y_2(t)]^* \} = \mathcal{R} \cdot \{ C_1 A_1^2(t) + C_2 A_2^2(t) + 2\sqrt{C_1 C_2} A_1(t) A_2(t) \cos[\Phi(t)] \} \quad (2)$$

其中, $\mathcal{R}$ 为 PD 的响应率,式(2)前两项为直流项,最后一项为信号项, $\Phi(t)$ 为信号的相位。根据式(1)进一步推导,可得到产生的线性调频宽带信号的表达式为:

$$s(t) = \mathcal{R} \cdot 2 \left\{ \sqrt{C_1 C_2} A_1(t) A_2(t) \times \cos \left[(\omega_1 - \omega_2) t + \frac{t^2}{2} \left(\frac{1}{\ddot{\Phi}_1} - \frac{1}{\ddot{\Phi}_2} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

根据相位与频率之间的关系,输出信号的实时频率可以表示为:

$$f = \frac{\left| \omega_1 - \omega_2 + \left(\frac{1}{\ddot{\Phi}_1} - \frac{1}{\ddot{\Phi}_2} \right) t \right|}{2\pi} \quad (4)$$

脉冲压缩后输出结果的包络为:

$$x_{ideal}(t) = s(t) \times s^*(-t) = P_{ideal} \frac{\sin(\pi B_{ideal} t)}{\pi B_{ideal} t} \propto C_1 C_2 \frac{\sin(\pi B_{ideal} t)}{\pi B_{ideal} t} \quad (5)$$

其中, P_{ideal} 是理想情况下脉冲压缩结果的峰值功率,

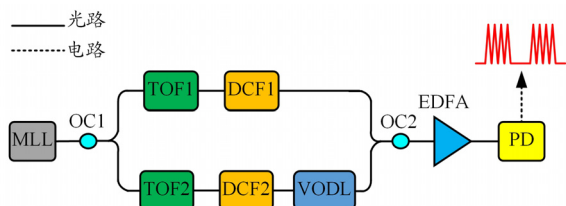


图1 基于光谱滤波和不同色散的宽带线性调频信号产生光子时间拉伸信号方法的结构示意图

B_{ideal} 为理想情况下产生线性调频信号的带宽, 距离分辨率 $\Delta D = \frac{c}{2B_{\text{ideal}}}$ 。在实验过程中, 脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率会受到光纤耦合器分光比、滤波器中心波长偏移及干涉臂的延时扰动等因素的影响, 根据式(3)和式(5)可以分析和仿真各个因素对雷达系统脉冲压缩输出结果的峰值功率和距离分辨率产生的影响。

2 分析及仿真

考虑到实际实验情况^[7-8], 本文仿真时设置 TOF1 的中心波长为 1550 nm, 调节 TOF2 的中心波长使其比 TOF1 的中心波长大 0.08 nm, 2 个光滤波器的滤波带宽均设置为 2 nm, 2 路 DCF 的色散量分别为 1968 ps/nm 和 2000 ps/nm, 通过调节光纤延时线使得 2 路光脉冲信号对齐, 从而产生了脉宽为 4 ns、频率范围为 8~12 GHz 的 X 波段信号。PD 后端的微波放大器和天线等微波器件的工作频率范围为 8~12 GHz。本文分别对光纤耦合器分光比、滤波器中心波长偏移以及干涉臂的延时扰动等对产生信号的影响因素进行分析。

2.1 光纤耦合器分光比

由式(3)可知, 产生信号的幅度 $s(t) \propto \sqrt{C_1 C_2}$, 因此光纤耦合器分光比只影响信号的幅度特性而不影响其相位特性^[9]。理想情况下, 光纤耦合器的分光比为 50:50, 而实际情况耦合器的分光比会存在一定的偏差, 本文仿真了 4 种情况下 (① $C_1=C_2=0.5$, ② $C_1=0.1$ 、 $C_2=0.9$, ③ $C_1=0.3$ 、 $C_2=0.7$, ④ $C_1=0.8$ 、 $C_2=0.2$) 的脉冲压缩结果, 对比情况如图 2 所示。可以看出, 不同分光比会导致所产生信号的幅度发生变化, 进而影响脉冲压缩结果的峰值功率。

为了保证信号的探测性能维持在可接受的范围内, 即功率损失不超过 1 dB、距离分辨率恶化不超过

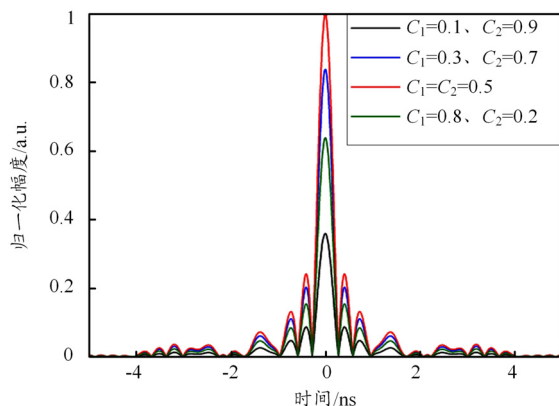


图2 不同分光比下的脉冲压缩结果

30%, 分别仿真了脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率随分光比的变化趋势。当分光比从 0.05 变化到 0.95 时, 仿真结果如图 3 所示。由式(3)和式(5)可知, 分光比只改变产生信号幅度的大小, 而信号幅度的平方正比于脉冲压缩结果的峰值功率, 因此分光比会改变脉冲压缩结果的峰值功率; 另一方面, 分光比对产生信号的相位特性没有影响, 不会改变信号的带宽, 因此脉冲压缩结果的距离分辨率不受影响。从图 3(a)可以看出当分光比为 0.5 时, 峰值功率达到最大值。为了保证峰值功率变化维持在可接受的 1 dB 范围内, 需要保证光纤耦合器分光比控制在 0.27~0.73 范围内。从图 3(b)可以看出距离分辨率没有变化, 始终保持在 5.1 cm 处。

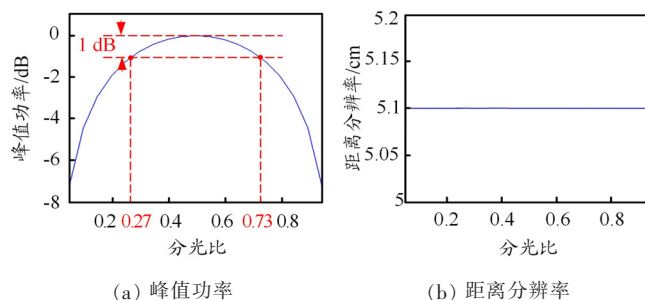


图3 峰值功率与距离分辨率随分光比的变化趋势

2.2 滤波器中心波长偏移

根据式(4)可知, 当 $t=0$ 时的中心频率为:

$$f_c = \frac{|\omega_1 - \omega_2|}{2\pi} = \left| \frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2} \right| \approx \left| \frac{c(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_0^2} \right| \quad (6)$$

其中, λ_1 和 λ_2 分别为 2 个光滤波器的中心波长。当 TOF1 的中心波长保持不变、TOF2 的中心波长偏移 $\Delta\lambda$ 时, 产生信号的中心频率为:

$$f_c \approx \left| \frac{c(\lambda_2 - \lambda_1 + \Delta\lambda)}{\lambda_0^2} \right| \quad (7)$$

本文分别仿真了 $\Delta\lambda$ 为 0 nm、-0.02 nm、-0.01 nm 和 0.01 nm 这 4 种情况下的信号相位、频率特性, 如图 4 所示。理想情况(红色线条)下产生的信号中心频率为 10 GHz, 频率范围为 8~12 GHz。以 -0.01 nm 情况(蓝色线条)为例, 根据式(7)可以计算得出此时的中心频率为 8.75 GHz, 则在完整的 -2~2 ns 的时间窗口内, 产生的信号频率应为 6.75~10.75 GHz (4G 的带宽不变), 但受限于微波器件的工作频率范围(8~12 GHz), 因此最后得到的信号频率为 8~10.75 GHz。滤波器中心波长偏移会使信号相位产生较大的偏移, 产生信号的频率范围也会逐渐偏离 X 波段, 中心波长偏移越大, 信号的频率范围偏离得越远。4 种仿真情况下的脉冲压缩

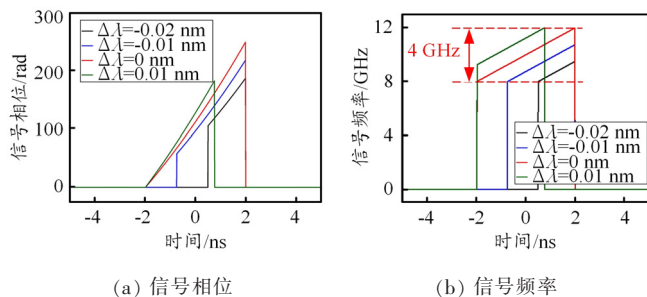


图4 不同滤波器中心波长偏移下的信号相位特性

结果对比如图5所示。可以看出,相较于中心波长偏移为0 nm时的理想情况,中心波长偏移会使得产生信号的部分频率不在X波段范围内。由于微波器件在工作带宽外的滤波效果,导致信号脉宽和带宽的部分缺失,因此对脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率都会产生影响。为了保证信号的探测性能维持在可接受的范围内,即功率损失不超过1 dB、距离分辨率恶化不超过30%,本文分别仿真了脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率随中心波长偏移的变化趋势,当中心波长偏移从-0.03~0.03 nm时,仿真结果如图6所示。

根据式(7)可知,当滤波器中心波长发生偏移时,受到微波器件的工作带宽限制,产生信号的脉宽和带宽出现部分缺失,导致式(5)的脉冲压缩效果不能充

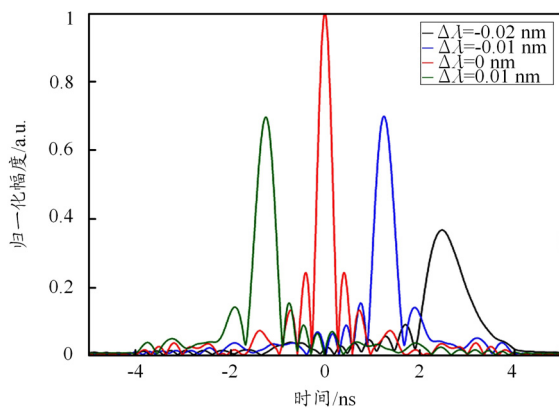


图5 不同中心波长偏移下的脉冲压缩结果

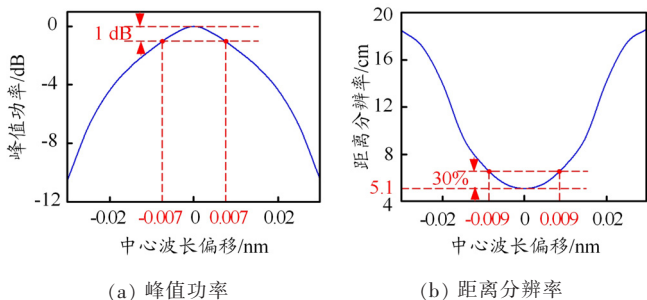


图6 峰值功率和距离分辨率随滤波器中心波长偏移的变化趋势

分实现,从而使得脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率出现恶化。中心波长偏移越大,峰值功率和距离分辨率的恶化程度越大。从图6(a)可以看出,当中心波长偏移为0 nm时,峰值功率达到最大值。为了保证峰值功率损失维持在可接受的1 dB范围内,需要保证中心波长偏移控制在-0.007~0.007 nm范围内。从图6(b)可以看出,当中心波长偏移为0 nm时,距离分辨率达到最小值5.1 cm。为了保证距离分辨率恶化维持在30%以内,需要保证中心波长偏移控制在-0.009~0.009 nm范围内。

2.3 干涉臂延时扰动

根据式(1)和式(3),当干涉结构的其中一路存在延时扰动时,产生信号的相位和频率变为:

$$\Phi(t) = (\omega_1 - \omega_2)t + \omega_1\tau + \frac{t^2}{2} \left(\frac{1}{\ddot{\Phi}_1} - \frac{1}{\ddot{\Phi}_2} \right) + \frac{t\tau}{\dot{\Phi}_1} + \frac{\tau^2}{2\dot{\Phi}_1} \quad (8)$$

$$f = \frac{\omega_1 - \omega_2 + \left(\frac{1}{\ddot{\Phi}_1} - \frac{1}{\ddot{\Phi}_2} \right)t + \frac{\tau}{\dot{\Phi}_1}}{2\pi} \quad (9)$$

本文分别仿真了延时扰动 τ 为0 ps、-30 ps、-10 ps和20 ps时的信号相位和频率,仿真结果如图7所示。相对于信号本身4 ns的时宽而言,30 ps延时扰动的影响很小,占比不到1%,再加上采样率的限制,因此延时扰动对信号时宽的影响可以忽略不计,但延时扰动对信号相位和频率的影响很大,故主要分析信号的相位和频率。

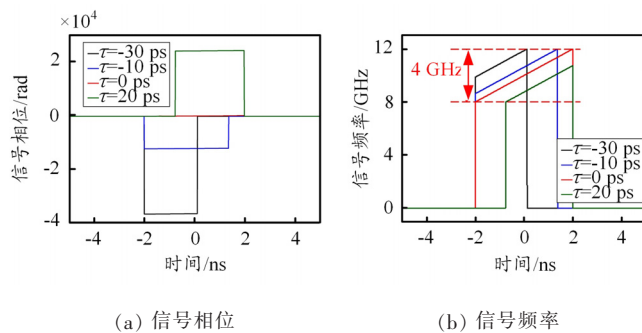


图7 不同干涉臂延时扰动下的信号相位特性

从图7可以看出,延时扰动会使得信号相位产生非常大的偏移,产生信号的频率范围会逐渐偏离X波段,延时扰动越大,信号的频率范围偏离得越远,这与式(9)是一致的。这4种情况下的脉冲压缩结果对比如图8所示。可以看出,相较于延时扰动为0 ps时的理想情况,延时扰动会使得产生信号的部分频率不在X波段范围内。由于微波器件在工作带宽外的滤波效

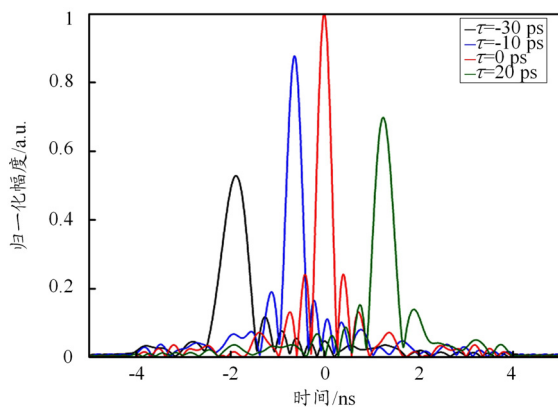


图8 不同延时扰动下的脉冲压缩结果

果,从而导致信号脉宽和带宽的部分缺失,因此对脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率都会产生影响。为了保证信号的探测性能维持在可接受的范围内,即功率损失不超过 1 dB、距离分辨率恶化不超过 30%,本文分别仿真了脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率随延时扰动的变化趋势,当延时扰动从-30~30 ps 时,仿真结果如图 9 所示。

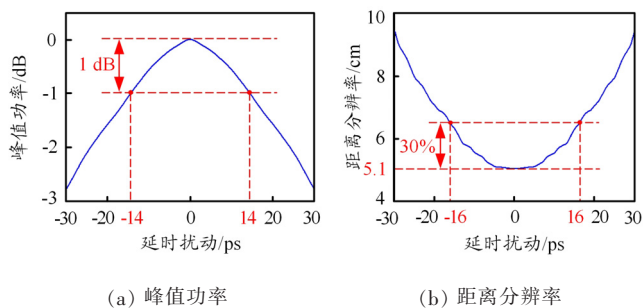


图9 峰值功率和距离分辨率随干涉臂延时扰动的变化趋势

根据式(8)和式(9)可知,干涉臂延时扰动会使产生信号引入额外的相位项和频率项,从而使得信号的频率范围偏离 X 波段;同时,受限于微波器件的工作带宽限制,使得信号信息出现缺失,导致式(5)的脉冲压缩效果不能充分实现,从而使得脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率出现恶化。延时扰动越大,峰值功率和距离分辨率的恶化程度越大。从图 9(a)可以看出,当延时扰动为 0 ps 时,峰值功率达到最大值。为了保证峰值功率损失维持在可接受的 1 dB 范围内,需要保证延时扰动控制在-14~14 ps 范围内;从图 9(b)可以看出,当延时扰动为 0 ps 时,距离分辨率达到最小值 5.1 cm。为了保证距离分辨率恶化维持在 30% 以内,需要保证延时扰动控制在-16~16 ps 范围内。

3 结束语

本文主要分析了实验器材和环境因素对信号探测性能的影响,包括 OC 分光比、滤波器中心波长偏移及干涉臂的延时扰动等因素。仿真了不同条件下的脉冲压缩输出结果,分析了不同条件下峰值功率和距离分辨率的变化趋势,并与理想情况下的性能指标进行对比,得出的结论为 OC 分光比主要影响脉冲压缩结果的峰值功率,而滤波器中心波长偏移及干涉臂的延时扰动则对脉冲压缩结果的峰值功率和距离分辨率均会产生影响。为了保证峰值功率损失维持在 1 dB 范围内,需要同时确保 OC 分光比保持在 0.27~0.73 范围内;中心波长偏移、延时扰动分别控制在-0.007~0.007 nm、-14~14 ps 范围内。为了保证距离分辨率恶化维持在 30% 以内,需要同时确保中心波长偏移、延时扰动分别控制在-0.009~0.009 nm、-16~16 ps 范围内,在该范围内产生的 X 波段线性调频信号的探测性能不会出现明显的恶化,从而为光子时间拉伸相干雷达的性能提升及后续的设计与实现提供参考。

参考文献:

- [1] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507: 341–345.
- [2] LI Y, RASHIDINEJAD A, WUN J M, et al. Photonic generation of W-band arbitrary waveforms with high time-bandwidth products enabling 3.9 mm range resolution[J]. *Optical*, 2014, 1(6): 446–454.
- [3] LI R, LI W, DING M, et al. Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14334–14340.
- [4] ZHANG F, GUO Q, WANG Z, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16274–16281.
- [5] ZHANG H, ZOU W, CHEN J. Generation of a widely tunable linearly chirped microwave waveform based on spectral filtering and unbalanced dispersion[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1085–1088.
- [6] ZOU W, ZHANG H, LONG X, et al. All-optical central-frequency-programmable and bandwidth-tailorable radar [J]. *Scientific Reports*, 2016. DOI:10.1109/URSIAP-RASC.2016.7883546.
- [7] ZHANG S, ZOU W, QIAN N, et al. Enlarged Range and Filter-Tuned Reception in Photonic Time-Stretched Microwave Radar [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(11): 1028–1031.
- [8] ZHANG S, LI X, CHEN J, et al. Maintenance of broadband detection in photonic time-stretched coherent radar employing phase diversity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 32892–32899.
- [9] 谷朋飞. 全光纤马赫—曾德尔干涉仪输出特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.