

激光与光电子学进展

光子辅助四倍频 W 波段 LFM 信号感知测距

潘龙威, 王演祯, 谭宇璇, 王源罡, 王凯辉, 周雯*

复旦大学通信科学与工程系和电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 提出了一种基于光学外调制器倍频产生 W 波段线性调频(LFM)信号并用于高分辨率测距的新方案。通过光调制器将来自任意波形发生器(AWG)的 LFM 信号调制到光载波的边带上,利用光电探测器(PD)拍频完成光电转换,从而产生四倍频 W 波段 LFM 信号,其中心频率与带宽均为原始 LFM 信号的四倍。发射上述宽带 LFM 信号对相距为 50 cm 的 2 个目标分别测距,测量结果为 48.8 cm,误差为 1.2 cm。为进一步验证实验的可靠性,调整 2 个目标的距离为 40 cm,测量结果为 38.9 cm,误差为 1.1 cm。该系统克服了难以直接在电域产生高频信号的“电子瓶颈”,通过光子辅助产生宽带 LFM 信号实现了高分辨率感知测距,为未来超高分辨率的线性调频连续波雷达系统提供了一种解决方案。

关键词 微波光子学; 雷达测距; 光子辅助倍频; 线性调频连续波; W 波段

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223134

Photonics-Aided Quadruple Frequency W-Band Linear Frequency Modulated Signal Sensing and Ranging

Pan Longwei, Wang Yanyi, Tan Yuxuan, Wang Yuangang, Wang Kaihui, Zhou Wen*

Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Ministry of Education, Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract A new system based on optical external modulator frequency multiplication is proposed to generate W-band linear frequency modulated (LFM) signals for high-resolution ranging. The LFM signals from the arbitrary waveform generator (AWG) are modulated to the sideband of the optical carrier through the optical modulator. The photoelectric conversion is completed in the photodetector (PD) to generate quadruple frequency W-band LFM signals, whose center frequency and bandwidth are four times the original LFM signal. This broadband LFM signal is emitted to free space for target detection. For distance measurements, the two targets are separated by 50 cm, and the measured value is 48.8 cm with an error of 1.2 cm. The distance between the two objects is set to 40 cm to demonstrate the reliability of the experiment. The measured value is 38.9 cm, and the error is 1.1 cm. The system overcomes the “electronic bottleneck” that is difficult to directly generate high-frequency signals in the electrical domain and achieves high-resolution ranging via photonics-aided generation of the broadband LFM signal. Thus, the proposed method provides a solution for future ultrahigh-resolution LFM continuous-wave radar systems.

Key words microwave photonics; radar ranging; photonics-aided frequency multiplication; linear frequency modulated continuous wave; W band

1 引言

线性调频连续波(LFMCW)信号由于具备大的时宽带宽积(TBWP)^[1],能够很好地解决雷达距离分辨率与最大探测范围之间的矛盾,被广泛应用于雷达系统中。高分辨率的雷达系统在未来如自动驾驶、安全扫描等场景有着广泛的应用前景^[2-3],雷达系统的距离

分辨率与线性调频(LFM)信号带宽直接相关,增大信号带宽可以提高测距分辨率^[4-6],但受限于当前电子器件工艺水平,在电域利用直接数字合成器(DDS)产生 LFM 信号的频率有限^[7],要想获得宽带 LFM 信号从而提高雷达系统性能,需将原始信号多次倍频,这将会用到昂贵的倍频器和锁相环,从而大大提高系统的成本。

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-04-07; 录用日期: 2023-04-15; 网络首发日期: 2023-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61720106015、62127802)

通信作者: *zwen@fudan.edu.cn

微波光子学的兴起为宽带雷达信号的产生提供了一种解决方案,常见光子辅助产生毫米波的方法有:外调制器倍频法^[8-10]、光外差拍频法^[11-14]。基于外调制器倍频的主要思想是将射频信号调制到光载波的边带上,通过调节光调制器的直流偏置电压与射频信号幅度可以得到特定阶数的光边带,经过光电探测器(PD)拍频得到倍频信号。光外差法是将射频信号调制到光载波上,随后与未经调制的另一路光载波耦合,经过PD拍频得到微波信号。国内外在微波光子雷达领域投入了很多研究^[14-22],文献^[14]使用外差拍频的方法将带宽为5 GHz的LFM信号转换至W波段,对相距20 cm的2个目标进行探测,测量结果为18 cm,测距误差为2 cm,但外差拍频只能实现LFM信号的频谱线性搬移,无法增大雷达信号带宽从而提高雷达系统的测距分辨率。文献^[19]将中心频率为5.5 GHz、带宽为2 GHz的LFM信号倍频至18~26 GHz,将上述K波段信号通过天线发射到自由空间,并使用逆合成孔径雷达(ISAR)技术对目标进行成像,实现了2 cm×2 cm的二维成像分辨率。但上述研究成果中,雷达信号的带宽依旧有限,为了适应未来自动驾驶、安全扫描等应用场景对超高分辨率感知的需求,继续增大雷达信号的带宽是雷达系统的一种发展方向。

针对以上问题,本文提出了一种基于外调制器产生W波段LFM信号用于雷达高分辨率测距的新方案,在发射端使用光子倍频技术生成W波段宽带LFM信号,将18~23 GHz的LFM信号四倍频至72~92 GHz,对2个目标发射上述宽带LFM信号探测其间距。由于LFM信号为啁啾信号,在接收端使用了一种光子辅助去啁啾的方案,通过一次电光转换消除啁啾项。当2个目标的间距为50 cm时,使用该方案得到的测量结果为48.8 cm,误差为1.2 cm。为验证实验的可靠性,调整2个目标的间距为40 cm,得到测量结果为38.9 cm,误差为1.1 cm,实验结果表明,该系统通过发射宽带LFM信号实现了高分辨率测距。

2 系统原理

2.1 LFM CW 雷达测距原理

图1为LFMCW雷达测距原理,LFMCW雷达测距系统的结构如图1(a)所示,图1(b)为LFM信号从发射到接收的频率变化示意图。LFM信号的频率随着时间线性增大,LFMCW雷达系统的测距原理本质上是测量LFM信号从发送到接收所产生的频率增量,换算出从发送到接收的传输时延,已知电磁波传输速度,可以通过传输时延计算得到目标到雷达发射机的距离。

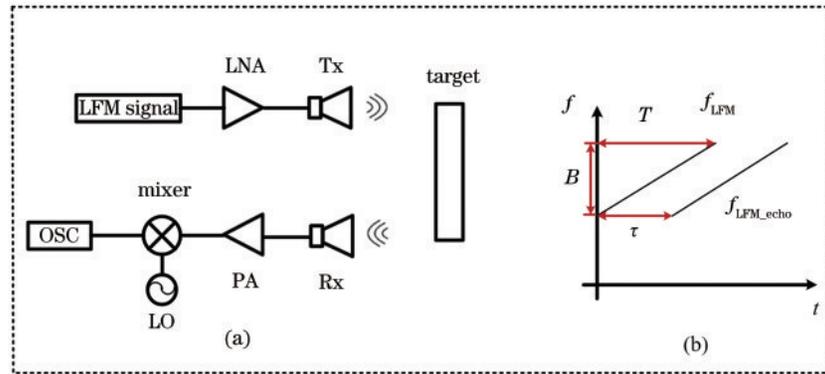


图1 LFMCW雷达测距原理图。(a) LFMCW雷达测距系统结构;(b) LFM信号从发射到接收的频率变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of linear frequency modulated continuous wave radar ranging. (a) Structure of LFMCW radar ranging system; (b) frequency of transmitted and received LFM signal

LFM信号的频率 f_{LFM} ,可表示为

$$f_{\text{LFM}} = f_0 + kt, \quad (1)$$

式中: f_0 为初始频率; k 为调频斜率($k=B/T$), B 为LFM信号的带宽, T 为时间宽度; t 为时间。使用低噪声放大器(LNA)放大后,通过发送天线(Tx)发射LFM信号至自由空间对目标进行探测。接收天线(Rx)接收到的LFM回波信号频率 $f_{\text{LFM,echo}}$,可表示为

$$f_{\text{LFM,echo}} = f_0 + kt - k\tau, \quad (2)$$

式中: τ 为传输时延。LFM回波信号在功率放大器(PA)处被放大,当回波信号频率较高时示波器无法捕捉,使用混频器(Mixer)进行下变频处理,得到中频

LFM信号。本振(LO)频率为 f_{LO} ,中频LFM信号频率 $f_{\text{LFM,IF}}$,可表示为

$$f_{\text{LFM,IF}} = f_0 + kt - k\tau - f_{\text{LO}}. \quad (3)$$

分别对2个目标进行探测,由于2个目标到发射机的距离不同,导致传输时延 τ 不同,表现为中频LFM信号的频率产生差异。假设测得中频信号频率差值为 Δf ,则可计算得到2个目标间距 L 为

$$L = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta f}{k}, \quad (4)$$

式中: c 为真空中光速。

2.2 光子辅助产生四倍频W波段LFM信号

LFMCW雷达系统的测距分辨率 R_s 为

$$R_s = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

由式(5)可知,增大 LFM 信号带宽可以提高测距分辨率,但现有电子器件所能产生的信号频率有限,因

此借助光子倍频技术将初始 LFM 信号四倍频至 W 波段,四倍频后 LFM 信号的中心频率与带宽均为初始 LFM 信号的四倍。光子辅助产生四倍频 W 波段 LFM 信号的原理,如图 2 所示。

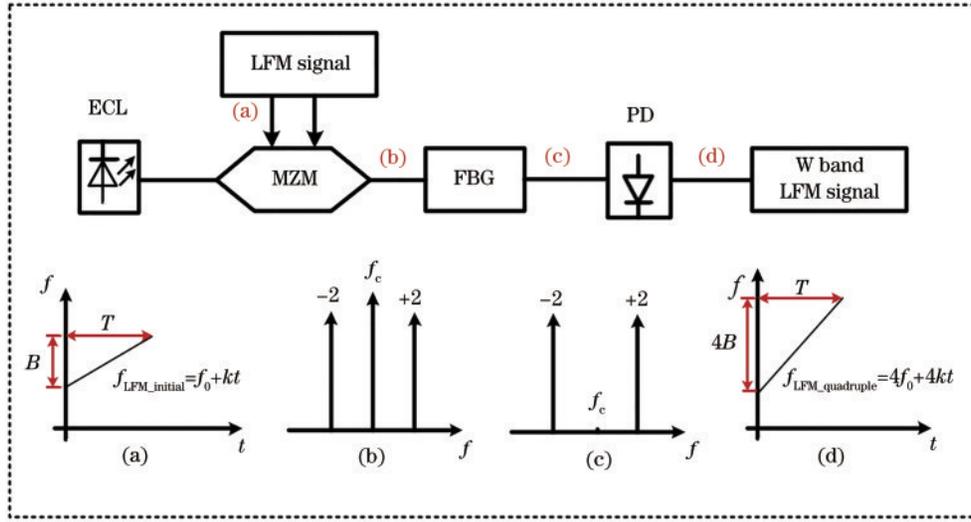


图 2 光子辅助产生四倍频 W 波段 LFM 信号原理图。(a)~(d)信号转换过程中的简化频谱图

Fig. 2 Schematic diagram for Photonics-aided generation of quadruple frequency W-band LFM signal. (a)–(d) Simplified spectra during signal conversion

初始 LFM 信号的频率由式(1)给出。光调制器(MZM)将初始 LFM 信号调制到外腔激光器(ECL)输出光载波的光边带上,光载波频率为 f_c 。MZM 工作在最大传输点,抑制奇数阶光边带,输出偶数阶光边带与光载波。为产生四倍频信号,调节射频信号幅度,使得 MZM 输出光信号仅包含正负二阶光边带与光载波,高阶边带功率较小,可忽略不计, MZM 输出的光边带如图 2(b)所示。则 MZM 输出光信号 $E_{MZM}(t)$, 可表示为

$$E_{MZM}(t) = J_0(m) \cos(2\pi f_c t) + J_2(m) \cos[2\pi(f_c + 2f_{LFM})t] + J_2(m) \cos[2\pi(f_c - 2f_{LFM})t] \quad (6)$$

式中: m 为调制指数; J_0 、 J_2 分别为第一类 0 阶、2 阶贝塞尔函数。继续使用光纤布拉格光栅(FBG)滤除光载波分量,留下正负二阶光边带进入光电探测器(PD)进行光电转换,得到四倍频 W 波段宽带 LFM 信号,图 2(c) 为 FBG 后的光边带分布, PD 处得到的四倍频 LFM 信号频率示意图如图 2(d)所示。四倍频 LFM 信号频率 $f_{LFM_quadruple}$, 可表示为

$$f_{LFM_quadruple} = 4f_0 + 4kt \quad (7)$$

初始 LFM 信号的频率为 18~23 GHz, 四倍频后频率为 72~92 GHz, 四倍频 LFM 信号的中心频率与带宽均为初始 LFM 信号的四倍。通过发射天线将上述宽频带 LFM 信号发射至自由空间对目标进行距离探测。

2.3 光子辅助去啁啾原理

接收天线(Rx)接收到的四倍频 LFM 回波信号频率 $f_{LFM_quadruple_echo}$, 可表示为

$$f_{LFM_quadruple_echo} = 4f_0 + 4kt - 4k\tau \quad (8)$$

对 2 个目标进行探测, 得到 2 次探测所得四倍频 LFM 回波信号的频率差值 Δf , 从而根据式(4)解出 2 个目标之间的距离。回波信号中含有啁啾项 $4kt$, 在接收端通过光子辅助去啁啾(消除 $4kt$), 光子辅助去啁啾的原理如图 3 所示。

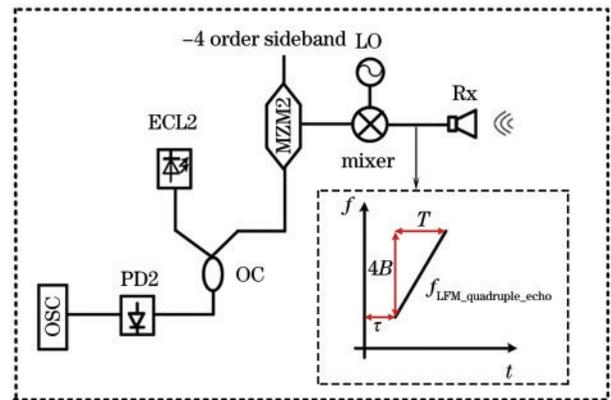


图 3 光子辅助去啁啾原理图。插图:回波信号的简化频谱
Fig. 3 Schematic diagram for photonics-aided de-chirping. Insert: simplified spectrum of echo signal

图 3 的插图为四倍频 LFM 回波信号的频率示意图。回波信号的频段较高,但光调制器的调制带宽有限,为使回波信号在中频信号驱动光调制器(MZM2)

处顺利进行电光调制,应当根据 MZM2 的带宽选择合适的 LO 信号频率,在混频器处对回波进行下变频处理,得到中频 LFM 信号 $f_{\text{LFM_quadruple_IF}}$,可表示为

$$f_{\text{LFM_quadruple_IF}} = 4f_0 + 4kt - 4k\tau - f_{\text{LO}} \quad (9)$$

该中频信号驱动 MZM2 对光载波进行调制,为了消除啁啾项 $4kt$,MZM2 的输入光载波应为发送端光调制器输出的负四阶光边带,2.2 节中发送端 MZM 输出偶数阶光边带中,除了包含用于拍频产生四倍频 LFM 信号的正负二阶光边带,还包含微弱的正负四阶光边带,用于接收端光子辅助去啁啾。使用光带通滤波器取出负四阶光边带作为 MZM2 的输入光载波,负四阶光边带的频率 $f_{-4\text{order_sideband}}$,可表示为

$$f_{-4\text{order_sideband}} = f_c - 4f_0 - 4kt \quad (10)$$

MZM2 的输入光载波与调制信号均为啁啾信号,工作在正交传输点,中频 LFM 信号对上述光载波进行单边带调制,输出的光信号频率应为 MZM2 的输入光载波频率与中频驱动信号频率之和 $f_{\text{MZM2_output}}$,可表

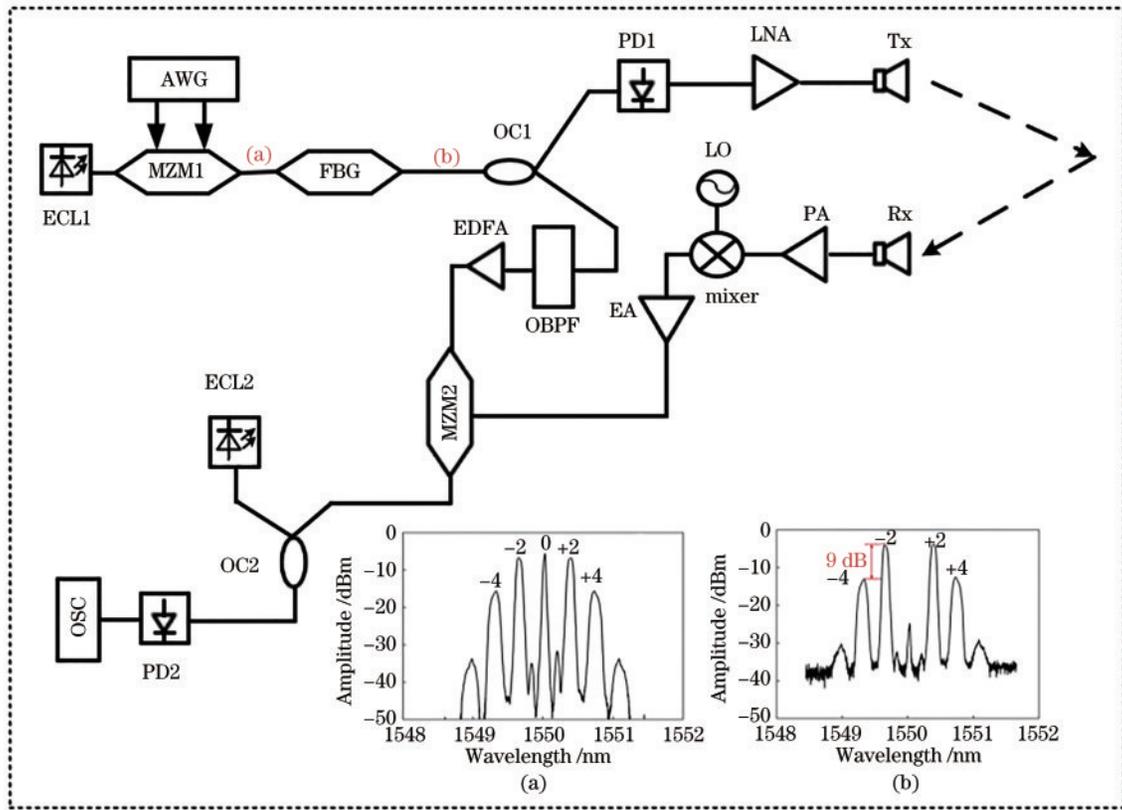
示为

$$f_{\text{MZM2_output}} = f_c - 4k\tau - f_{\text{LO}} \quad (11)$$

可见啁啾项 $4kt$ 被成功消除,MZM2 输出为点频信号,该点频信号携带四倍频 LFM 回波信号的频域信息。将该点频信号与来自外腔激光器(ECL2)的光载波耦合,根据光电探测器(PD2)的带宽选择合适的 ECL2 波长,将耦合后的信号输入 PD2 拍频,通过示波器(OSC)可以观察到一个频率峰值。为测得 2 个目标的间距,对 2 个目标分别重复上述步骤。2 个目标到雷达发射机的距离不同,导致信号从发射机到接收机传输时延不同,最终表现为示波器上的频率峰值存在差异,记该差值为 Δf ,根据式(4)可得到 2 个目标间的距离。

3 实验装置及结果讨论

光子辅助四倍频 W 波段 LFM 信号感知测距实验装置图,如图 4 所示,实验所使用的关键器件参数,如表 1 所示。



OSC: oscilloscope; ECL: external cavity laser; MZM: Mach-Zehnder modulator; PD: photodetector; OC: optical coupler; FBG: fiber Bragg grating; AWG: arbitrary waveform generator; EDFA: Erbium doped fiber amplifier; OBPF: optical bandpass filter; EA: electric amplifier; PA: power amplifier; LNA: low noise amplifier; LO: local oscillator

图 4 光子辅助四倍频 W 波段 LFM 信号感知测距实验装置图。(a) MZM1 输出光谱图;(b) FBG 输出光谱图

Fig. 4 Experimental setup for photonics-aided quadruple frequency W-band LFM signal sensing and ranging. (a) MZM1 output optical spectrum; (b) FBG output optical spectrum

发送端使用 AWG 产生频率为 18~23 GHz 的 LFM 信号,在 MZM1 处对来自 ECL1 的波长为 1550.02 nm 的光载波进行调制,MZM1 的 3 dB 带宽为

40 GHz,插入损耗为 5 dB,工作在最大传输点以抑制奇数阶光边带,调节 MZM1 的直流偏置电压与射频信号强度,使 MZM1 输出包含光载波、正负二阶光边带

表 1 实验中关键器件参数

Table 1 Key device parameters in the experimental setup

Device	Parameter	Device	Parameter
ECL1	Wavelength: 1550.02 nm	LNA	Gain: 22 dB
ECL2	Wavelength: 1550.58 nm	Tx, Rx Antenna	Gain: 25 dBi
MZM1, MZM2	3 dB bandwidth: 40 GHz Insertion loss: 5 dB	OBPF	3 dB bandwidth: 0.56 nm
AWG	3 dB bandwidth: 23 GHz Sample rate: 64 GSa/s	FBG	3 dB bandwidth: 0.39 nm Central wavelength: 1550.02 nm
PA	Gain: 25 dB	LO	Frequency: 75 GHz
PD1	3 dB bandwidth: 100 GHz	EA	Gain: 31 dB
PD2	3 dB bandwidth: 15 GHz	OSC	3 dB bandwidth: 32 GHz Sample rate: 80 GHz

与微弱正负四阶光边带分量, 实验中 MZM1 输出的光边带分布如图 4(a) 所示。利用 FBG 抑制光载波, FBG 的中心波长为 1550.02 nm, 3 dB 带宽为 0.39 nm, 边模抑制比为 12 dB, 图 4(b) 为 FBG 输出光谱图。随后 OC1 将光信号分为两路, 使用带宽为 0.56 nm 的 OBPF 取出下路信号的负四阶光边带用于接收端 LFM 回波信号的解啁啾, 上路信号进入到 3 dB 带宽为 100 GHz 的 PD1 进行光电转换, 正负二阶光边带拍频得到四倍频 LFM 信号, 频率为 72~92 GHz, 由于正负四阶光边带较为微弱, 所产生的拍频串扰可忽略不计。使用 LNA 放大来自 PD1 的 W 波段 LFM 信号, 随后通过 Tx 发射到自由空间。

在接收端, Rx 完成回波信号的接收, 回波信号在 PA 处被放大, 利用 mixer 对 W 波段回波信号作下变频处理, LO 频率为 75 GHz。下变频后的中频信号在被 EA 放大后, 在 MZM2 处对 OBPF 取出的负四阶光边带调制, MZM2 工作在正交传输点, 根据式 (11) 可知, MZM2 输出光信号中啁啾项 $4kt$ 被成功消掉, 得到点频信号。随后将该点频信号与 ECL2 产生的波长为 1550.58 nm 的光载波耦合, 并输入到 PD2 拍频, 通过 OSC 可以清晰地观察到一个频率峰值。

实验中分别对相距 50 cm 的 2 个目标进行探测, 2 个目标分别距离发射天线 1 m 与 1.5 m, 示波器处得到频谱如图 5 所示, 测得 2 个频率峰值的差值为 6.51 GHz, 而四倍频 LFM 信号的带宽为 20 GHz, 时间宽度为 10 ns, 根据式 (4) 解出 2 个目标间距为 48.8 cm, 误差为 1.2 cm。

为验证本测距实验的可靠性, 调整 2 个目标间距为 40 cm 并重新进行探测, 得到频谱如图 6 所示, 测得两频率峰值的差值为 5.18 GHz, 解出 2 个目标间距为 38.9 cm, 误差为 1.1 cm。

实验结果表明: 该系统通过发射 W 波段宽频 LFM 信号实现了高分辨率测距, 实验误差控制在 1.2 cm 以内。测量值与实际值之间的差别主要有两方面: 大气中电磁波传输速度变化引起的误差; 回波信

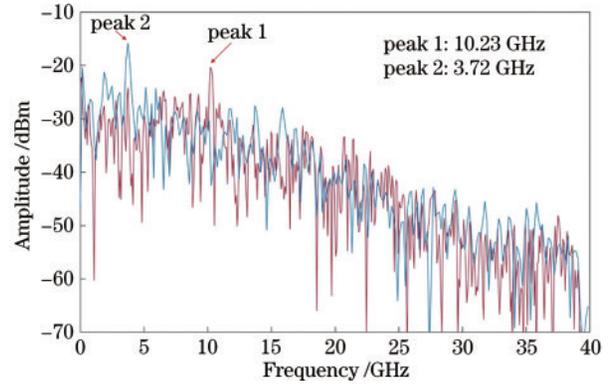


图 5 50 cm 测距实验所得去啁啾回波频谱

Fig. 5 De-chirped echo spectrum in 50 cm ranging experiment

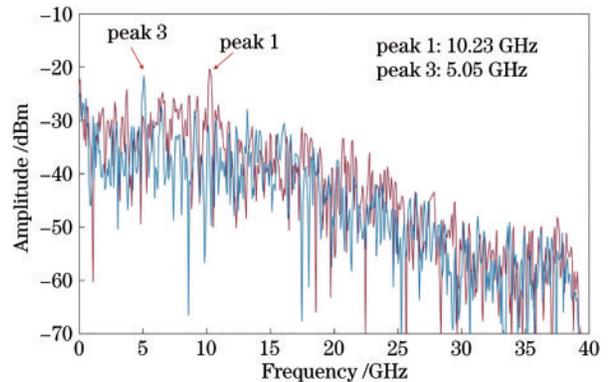


图 6 40 cm 测距实验所得去啁啾回波频谱

Fig. 6 De-chirped echo spectrum in 40 cm ranging experiment

号上叠加的加性高斯白噪声带来的误差。电磁波在真空中的传播速度等于光速且保持不变, 但实际的大气空间中大气密度、温度与湿度的随机变化都会导致磁导率与介电常数的变化, 从而使得电磁波的传播速度发生变化, 最终给 LFM CW 雷达测距系统带来测距误差。另外, 回波信号叠加有加性高斯白噪声, 噪声的存在也会导致信号从发射机到接收机的传输时延测量精度的劣化, 并对测距结果带来误差。同时, 在实验中通过改变探测目标到发射机的距离, 发现当目标到发射天线的距离超过 2.2 m 时, 信号往返距离为 4.4 m, 发

射信号频段高导致高传输损耗,接收端示波器上无法捕捉到清晰的频率峰值,信号峰淹没在杂散波之中。

4 结 论

宽带雷达信号有助于提高雷达系统的距离分辨率,在未来自动驾驶、安全扫描等对探测分辨率要求较高的场景中提升雷达系统的信号带宽是非常有必要的。然而受限于当前电子设备存在的“电子瓶颈”,高频的 LFM 信号需要对信号多次倍频,这将会大大增加系统成本。本研究通过光子倍频技术将 18~23 GHz 的 LFM 信号四倍频至 W 波段,分别对相距 50 cm 的 2 个目标进行探测,测得其间距为 48.8 cm,误差为 1.2 cm。为验证实验准确性,调整 2 个目标间距为 40 cm,测量结果为 38.9 cm,误差为 1.1 cm,实验结果表明:该系统使用光子倍频技术产生 W 波段宽带 LFM 信号实现了高分辨率测距功能。同时,分析了导致 LFM CW 雷达测距误差的因素,实际大气空间中电磁波速度随机变化带来的测距误差难以控制,在未来的工作中,进一步提升信号质量来提高测距精度是一种有前景的方法。

参 考 文 献

- [1] Li W Z, Yao J P. Generation of linearly chirped microwave waveform with an increased time-bandwidth product based on a tunable optoelectronic oscillator and a recirculating phase modulation loop[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3573-3579.
- [2] Gonzalez-Valdes B, Alvarez Y, Mantzavinos S, et al. Improving security screening: a comparison of multistatic radar configurations for human body imaging[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, 58(4): 35-47.
- [3] Caris M, Stanko S, Johannes W, et al. Detection and tracking of micro aerial vehicles with millimeter wave radar[C]//2016 46th European Microwave Conference (EuMC), October 5-7, 2016, London, UK. New York: IEEE Press, 2016: 1553-1555.
- [4] Almorox-Gonzalez P, Gonzalez-Partida J T, Burgos-Garcia M, et al. Portable high resolution LFM-CW radar sensor in millimeter-wave band[C]//SENSORCOMM '07: Proceedings of the 2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications, October 14-20, 2007, Valencia, Spain. New York: ACM, 2007: 5-9.
- [5] Zhang B, Pi Y M, Li J. Terahertz imaging radar with inverse aperture synthesis techniques: system structure, signal processing, and experiment results[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(1): 290-299.
- [6] Asensio-López A, Blanco-del-Campo A, Gismero-Menoyo J, et al. High range-resolution radar scheme for imaging with tunable distance limits[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(17): 1085-1086.
- [7] Li Q H, Yang D, Mu X H, et al. Design of the L-band wideband LFM signal generator based on DDS and frequency multiplication[C]//2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), May 5-8, 2012, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2012.
- [8] Pan S L, Yao J P. A frequency-doubling optoelectronic oscillator using a polarization modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(13): 929-931.
- [9] Wang S W, Lu Z J, Idrees N, et al. Photonic generation and de-chirping of broadband THz linear-frequency-modulated signals[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 881-884.
- [10] 刘丽敏,董泽,皮雅雅,等.采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 148-153.
Liu L M, Dong Z, Pi Y Z, et al. Radio-over-fiber system for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 148-153.
- [11] Li X Y, Yu J J, Zhang J W, et al. A 400G optical wireless integration delivery system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18812-18819.
- [12] Li X Y, Yu J J. Photonics-aided 32-Gb/s wireless signal transmission over 1 km at K-band[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(13): 1120-1123.
- [13] 魏怡,王凯辉,张宇,等.实现 125.52 Gbit/s PDM-QPSK 信号在光载无线系统中的实时传输[J]. *光学学报*, 2022, 42(15): 1506003.
Wei Y, Wang K H, Zhang Y, et al. Real-time transmission of 125.52 Gbit/s PDM-QPSK signal in radio over-fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(15): 1506003.
- [14] Wang Y Y, Liu J X, Ding J J, et al. Joint communication and radar sensing functions system based on photonics at the W-band[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13404-13415.
- [15] Zha Y, Xue X X, Wang H J, et al. Fully compressible wideband radar signal generation with photonic frequency multiplication[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 14-19, 2017, San Jose, California, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2017: JW2A.146.
- [16] Li R M, Li W Z, Wen Z L, et al. Synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and processing[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 04, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017.
- [17] Zhang Y M, Ye X W, Guo Q S, et al. Photonic generation of linear-frequency-modulated waveforms with improved time-bandwidth product based on polarization modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 1821-1829.
- [18] Mei Y, Xu Y X, Chi H, et al. Photonic generation of chirped microwave signals with high time-bandwidth product[J]. *Optics Communications*, 2014, 316: 106-110.
- [19] Zhang F Z, Guo Q S, Wang Z Q, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse

- synthetic aperture imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16274-16281.
- [20] Gao H B, Lei C, Chen M H, 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.
- [21] Yao Y, Zhang F Z, Zhang Y, et al. Demonstration of ultra-high-resolution photonics-based Ka-band inverse synthetic aperture radar imaging[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-17, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [22] Rashidinejad A, Weiner A M. Photonic radio-frequency arbitrary waveform generation with maximal time-bandwidth product capability[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3383-3393.