

微波光子四倍频复合雷达信号生成及 目标多维度探测

梁丁丁, 陈 阳

(华东师范大学通信与电子工程学院上海市多维度信息处理重点实验室, 上海 200241)

摘 要: 在雷达系统中, 为了实现对目标的高精度、多维度测量, 产生雷达信号是一个基本而又重要的环节. 本文提出了一种微波光子四倍频复合雷达信号产生方法, 该复合雷达信号包括单啁啾线性调频信号和单音微波信号. 利用单音微波信号和单啁啾线性调频信号实现目标径向速度的测量, 使用单啁啾线性调频信号实现目标距离测量和高分辨率微波成像. 在发射端, 使用微波光子四倍频技术生成了瞬时带宽为 2 GHz 的正啁啾线性调频信号和频率为 13.2 GHz 的单音微波信号. 在接收端, 目标回波信号经去斜后用来实现距离和径向速度测量以及高分辨率逆合成孔径成像. 实验结果表明, 测量得到的目标的距离和径向速度绝对误差分别不超过 4.2 cm 和 1.7 cm/s, 多个探测目标成像结果清晰可辨.

关键词: 微波光子学; 雷达; 四倍频信号; 距离和速度测量; 逆合成孔径成像

中图分类号: TN95; TN29

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)04-0796-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211091

Frequency-Quadrupled Radar Composite Signal Generation and Multi-Dimensional Target Detection Enabled by Microwave Photonics

LIANG Ding-ding, CHEN Yang

(Shanghai Key Laboratory of Multidimensional Information Processing, School of Communication and Electronic Engineering, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: In radar systems, to achieve high-precision multi-dimensional measurement of targets, radar signal generation is a basic and important function. A microwave photonic frequency-quadrupled composite radar signal generation approach is proposed. The composite radar signal includes a single-chirped linearly frequency-modulated (LFM) signal and a single-tone microwave signal. The single-tone microwave signal and the single-chirped LFM signal are jointly used to measure the radial velocity of a target, while the single-chirped LFM signal is used to measure the distance of the target and implement the high-resolution microwave imaging. In the transmitter, an up-chirped LFM signal with an instantaneous bandwidth of 2 GHz and a 13.2 GHz single-tone microwave signal are generated using a photonic frequency quadrupler. In the receiver, target echo signals are de-chirped and then used to achieve the measurement of distance and radial velocity and the high-resolution ISAR imaging. Experimental results show that the absolute measurement errors of distance and radial velocity are no more than 4.2 cm and 1.7 cm/s, respectively, and the imaging results of multiple targets are clear and identifiable.

Key words: microwave photonics; radar; frequency-quadrupled signal; distance and velocity measurement; ISAR imaging

1 引言

雷达波形的产生是现代雷达和电子战系统的基本组成部分, 是实现目标高精度、多维度探测的核心使能技术^[1,2]. 不同种类的雷达信号波形可用来实现目标不

同维度的探测, 例如目标的距离、速度和形状^[3-5]. 目标的距离测量方法主要包括基于脉冲体制的回波延时测距和基于连续波体制的频率差测距^[6], 目标的速度测量和形状获取则主要依据多普勒频移和微波成像算法实

收稿日期: 2021-08-14; 修回日期: 2021-10-18; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 上海自然科学基金(No.20ZR1416100); 国家自然科学基金(No.61971193); 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京大学)开放基金(No.2020GZKF005)

现. 为了实现高精度目标探测, 需要雷达系统能够产生高频率、大带宽的雷达信号波形^[7]. 然而, 受到“电子瓶颈”的限制, 传统电子技术在高频、大带宽雷达信号生成方面面临巨大挑战, 越来越难以满足高精度、多维度目标探测的需求^[7,8].

近年来, 微波光子技术被广泛地应用于雷达系统中, 其目的是突破传统雷达面临的频率和带宽瓶颈, 是一项具有发展潜力的技术^[9-11]. 许多基于微波光子技术的高频、宽带雷达信号产生方法已经被提出^[12-18], 尤其是线性调频(Linearly Frequency-Modulated, LFM)信号^[14-17]的产生方法. 文献[16]使用微波光子四倍频技术产生了瞬时带宽高达 8 GHz 的 LFM 信号, 并用于实现高分辨率实时逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像, 距离分辨率高达 2 cm. 为了提高距离分辨率, 文献[17]基于微波光子六倍频技术产生了瞬时带宽高达 10.02 GHz 的雷达信号, ISAR 成像距离分辨率高达 1.68 cm. 基于微波光子信号产生技术, 一些高精度的目标测量方法也被提出^[18-21]. 通常, 单啁啾 LFM 信号被用来实现目标距离测量和高分辨率 ISAR 成像^[16,17], 而双啁啾 LFM 信号被用来实现目标距离和速度的同时测量^[18-20]. 文献[18]提出了一种高分辨率的距离和速度测量方法, 使用微波光子倍频技术生成“V”型的双啁啾 LFM 信号, 其距离和速度的测量分辨率均能够提高一倍. 文献[19]提出使用多波段双啁啾 LFM 信号实现目标距离和速度测量, 实验结果表明, 目标距离和速度的相对测量误差分别小于 0.005% 和 0.59%. 文献[20]提出使用双波段对称三角 LFM 信号实现多个目标的距离和速度测量, 实验结果表明, 目标距离和速度绝对误差分别小于 9 mm 和 0.16 m/s. 上述方法^[16-20]均可以实现目标的高精度测量. 然而, 文献[16, 17]可以实现距离测量和高分辨率微波成像, 但无法准确测量目标速度, 文献[18-20]可以实现目标距离和速度测量, 但当目标径向速度较大时, 2 个双啁啾 LFM 信号去斜后的信号将会互相干扰, 导致难以进行高质量的 ISAR 成像. 针对上述问题, 文献[21]提出使用一种复合雷达波形同时实现目标距离和速度测量以及高分辨率 ISAR 成像. 在实验中, 该复合雷达信号由正啁啾 LFM 信号和单音微波信号组成, 其信号产生方法是基于微波光子上变频技术. 实验结果表明, 目标的距离和径向速度绝对误差分别小于 5.9 cm 和 2.8 cm/s. 该方法与上述 3 种距离和速度测量方法^[18-20]的不同之处在于使用单啁啾 LFM 信号和单音微波信号的同时实现了目标距离、径向速度的测量和 ISAR 成像, 且在实验中探测目标处于运动状态而非静止状态, 目标回波是真实回波而非由任意波形发生器模拟的回波.

为了进一步实现高精度、多维度目标探测并降低系统对电域信号源的要求, 本文提出一种微波光子四倍频复合雷达信号产生方法, 该复合雷达信号由单啁啾 LFM 信号和单音微波信号组成, 其中单音微波信号和单啁啾 LFM 信号被联合用于实现目标径向速度测量, 单啁啾 LFM 信号被用于实现目标距离测量和高分辨率微波成像. 在发射端, 使用微波光子四倍频技术生成了瞬时带宽为 2 GHz 的正啁啾线性调频信号和频率为 13.2 GHz 的单音微波信号. 在接收端, 目标回波信号经去斜后用来实现距离和径向速度测量以及高分辨率 ISAR 成像. 实验结果表明, 目标的距离和径向速度绝对误差分别不超过 4.2 cm 和 1.7 cm/s, 多个探测目标成像结果清晰可辨.

2 基本原理

图 1 为复合雷达信号生成及目标多维度探测系统原理图. 激光器(Laser Diode, LD)产生的单频光载波通过一个偏振控制器(Polarization Controller, PC)注入双偏振马赫-曾德尔调制器(Dual-polarization Mach-Zehnder Modulator, Dpol-MZM), 该光载波可表示为

$$E_{in}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

其中, E_0 是光载波的电场幅度; f_0 是光载波的中心频率. Dpol-MZM 由 2 个马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)组成. 中频 LFM 信号由任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)生成, 经电放大器(Electrical Amplifier, EA1)放大和带通滤波器(Band-pass Filter, BPF1)滤波后用于驱动 MZM1 上的射频端口. 频率为 f_L 的单音信号由微波信号源(Microwave Signal Generator, MSG)产生并用于驱动 MZM2 上的射频端口. 因此, 2 个马赫-曾德尔调制器上的调制信号可以分别表示为

$$V_{CW}(t) = V_1 \cos(2\pi f_L t) \quad (2)$$

$$V_{LFM}(t) = \begin{cases} V_2 \cos\left[2\pi\left(f_C - \frac{1}{2}f_B\right)t + \pi kt^2\right], & t \in (0, 0.8T] \\ 0, & t \in (0.8T, T] \end{cases} \quad (3)$$

其中, V_1 和 V_2 分别是单音信号和中频 LFM 信号的幅度; f_C 和 f_B 分别是中频 LFM 信号的中心频率和带宽; T 为中频 LFM 信号的脉冲周期; $k = f_B/0.8T$ 为中频 LFM 信号的啁啾率.

调节 2 个子调制器的偏置电压使其均工作在最大传输点, 此时 MZM1 和 MZM2 输出的光信号主要由光载波和 ± 2 阶光边带组成, 如图 1(a) 所示. 为了抑制光载波对复合雷达信号生成的影响, 使用一个光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)对 Dpol-MZM 输出的光

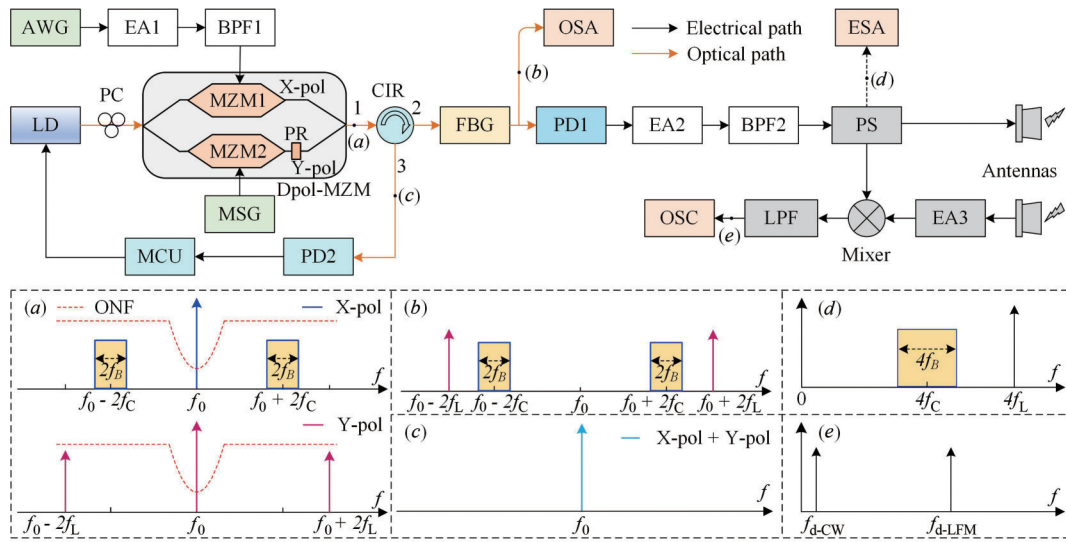


图1 复合雷达信号生成及目标多维度探测系统原理图

信号进行处理. FBG的透射谱可以当作一个光陷滤波器(Optical Notch Filter, ONF),用于滤除光载波,仅保留 ± 2 阶光边带,如图1(b)所示. FBG的反射谱将光载波进行反射,被反射的光载波经环形器(Circulator, CIR)的端口3输出并当作反馈信号,如图1(c)所示. 该反馈

$$\begin{bmatrix} E_X(t) \\ E_Y(t) \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} J_2(m_1) \exp[j2\pi(f_0 - 2f_C + f_B)t - j2\pi kt^2] + J_2(m_1) \exp[j2\pi(f_0 + 2f_C - f_B)t + j2\pi kt^2] \\ J_2(m_2) \exp[j2\pi(f_0 - 2f_L)t] + J_2(m_2) \exp[j2\pi(f_0 + 2f_L)t] \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, m_1 和 m_2 分别是 MZM1 和 MZM2 的调制指数; $J_n(\cdot)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数. 该透射光信号经 PD1 探测后, 产生四倍频复合雷达信号, 如图1(d)所示. 该复合雷达信号可以表达为

$$\begin{aligned} E_{PD1}(t) &= \eta \cdot |E_X(t)|^2 + \eta \cdot |E_Y(t)|^2 \\ &\propto J_2^2(m_1) \cos[2\pi(4f_C - 2f_B)t + 4\pi kt^2] \\ &\quad + J_2^2(m_2) \cos(8\pi f_L t) + DC \end{aligned} \quad (5)$$

其中, η 为 PD1 的响应度. 从式(5)中可知, 输出线性调频信号的频率和带宽以及单音微波信号的频率均为输入信号的4倍. 生成的雷达信号经电放大器(EA2)进行放大, 并使用带通滤波器(BPF2)消除光电探测器输出信号中的直流分量和非线性成分后, 可以表达为

$$\begin{aligned} E_T(t) &= V_3 \cos[2\pi(4f_C - 2f_B)t + 4\pi kt^2] \\ &\quad + V_4 \cos(8\pi f_L t) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, V_3 和 V_4 分别是单啁啾 LFM 信号和单音微波信号的幅度. 使用该复合雷达信号即可实现目标多维度探测. 首先, 将产生的宽带 LFM 信号和单音微波信号经功分器(Power Splitter, PS)分成2路, 一路与混频器(Mixer)本振端口相连作为雷达参考信号, 另一路经天线(Antenna)

回路由一个光电探测器(Photodetector, PD2)和一个微控制器(Micro-Control Unit, MCU)组成, 用于根据反射光载波的强度调节激光器中心波长使其与 FBG 凹陷位置对齐. 此时, FBG 输出的偏振复用的透射光信号可以表示为

发射用于探测目标. 此时, 雷达参考信号可以表达为

$$\begin{aligned} E_{ref}(t) &= E_1 \cos[2\pi(4f_C - 2f_B)t + 4\pi kt^2] \\ &\quad + E_2 \cos(8\pi f_L t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, E_1 和 E_2 分别是单啁啾 LFM 信号和单音微波信号的幅度. 移动目标反射的雷达回波信号经 $\Delta\tau$ 延时后由接收天线接收, 该延时可以表达为

$$\Delta\tau = \frac{2}{c}(R_0 + vt) \quad (8)$$

其中, c 是真空中光速; R_0 是目标距离天线的起始距离; v 是目标的径向速度; t 是时间. 接收到的雷达回波信号通过一个电放大器(EA3)进行放大. 放大后的回波信号可以表达为

$$\begin{aligned} E_{echo}(t) &= E_3 \cos[2\pi(4f_C - 2f_B)(t - \Delta\tau) + 4\pi k(t - \Delta\tau)^2] \\ &\quad + E_4 \cos[8\pi f_L(t - \Delta\tau)] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, E_3 和 E_4 分别是 LFM 信号和单音微波信号的幅度.

在雷达接收端, 采用电域混频方式实现对雷达回波信号的去斜, 图2给出了雷达信号去斜处理的基本原理. 经混频器混频、低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)滤波后的电信号可以表达为

$$E_{\text{LPF}}(t) = \frac{1}{2} E_1 E_3 \cos 2\pi \left[(4f_C - 2f_B) \Delta\tau + 2kt^2 - 2k(t - \Delta\tau)^2 \right] + \frac{1}{2} E_2 E_4 \cos(8\pi f_L \Delta\tau) \quad (10)$$

该去斜后的电信号由 2 个频率分量组成,即

$$f_{d-\text{CW}} = \frac{2|v|}{c} \cdot 4f_L \quad (11)$$

$$f_{d-\text{LFM}} = \frac{2v}{c} (4f_C - 2f_B) + 4kt - 4k(t - \Delta\tau) \left(1 - \frac{2v}{c} \right) \quad (12)$$

由于 $v \ll c$ 和 $(2v/c)(4f_C - 2f_B) \ll 4k\Delta\tau$, 因此, 式(12)可以简化为

$$f_{d-\text{LFM}} \approx 4k\Delta\tau \quad (13)$$

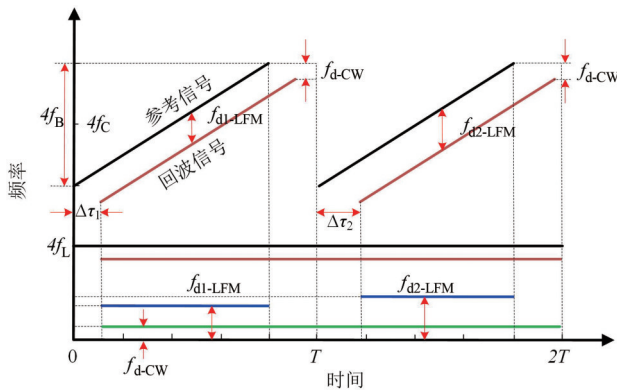


图2 雷达信号去斜处理的基本原理

依据式(11)和(13), 目标的距离和径向速度的大小可以表达为

$$R = \frac{1}{2} c\Delta\tau = \frac{c}{8k} f_{d-\text{LFM}} \quad (14)$$

$$|v| = \frac{c}{8f_L} f_{d-\text{CW}} \quad (15)$$

为了确定目标径向速度的方向, 需要使用相邻采样的 2 个回波信号. 在实际的应用中, 目标距离变化引起的去斜频率 $f_{d-\text{LFM}}$ 变化远大于目标速度变化引起的多普勒频率 $f_{d-\text{CW}}$ 变化. 因此, 假设相邻 2 次采样目标的径向速度不变, 若测量的目标距离在增加, 可确定目标在远离雷达, 此时, 定义目标的径向速度方向为正, 反之, 径向速度方向为负. 通过式(14)、式(15)和上述方法, 运动目标的距离和径向速度信息均能够获取.

由于目标速度引起的多普勒频率远小于宽带 LFM 信号去斜后的频率, 因此, 使用一个数字高通滤波器可消除多普勒频率对 ISAR 成像的影响. 理论上, ISAR 成像的距离分辨率和方位分辨率可以分别表达为

$$R_L = \frac{c}{2B} \quad (16)$$

$$R_c = \frac{\lambda}{2\theta} \quad (17)$$

其中, B 是发射 LFM 信号的带宽; λ 和 θ 分别是发射 LFM 信号的中心波长和目标在一帧图像内的旋转角度. 依据式(16)和式(17)可知, 高分辨率 ISAR 成像可以通过采用大带宽的 LFM 信号和积累更大的旋转角度来实现.

3 实验结果与分析

为验证该方案的可行性, 根据图 1 所示原理图搭建了实验链路. 在实验中, 激光器 LD(HLT-ITLA-M-C-20-1-1-FA) 输出光载波的中心波长为 1550.136 nm, 功率为 13 dBm. 中频 LFM 信号由任意波形发生器 AWG(Key-sight M8190A) 产生, 其中心频率、带宽和脉冲周期分别为 3 GHz、0.5 GHz 和 100 μs . 该中频 LFM 信号经电放大器 EA1(Aeroflex AMPF-107MDA-09) 放大和带通滤波器 BPF1(KGL YA351-2, 2.4~4.1 GHz) 滤波后注入双偏振马赫-曾德尔调制器 Dpol-MZM(Fujitsu FTM7981EDA) 中. 单音信号由微波信号源 MSG(Agilent 83630B) 产生, 其频率为 3.3 GHz. Dpol-MZM 输出的光信号经环形器(Circulator, CIR) 注入 FBG 中, FBG 的中心波长和 3 dB 带宽分别为 1550.136 nm 和 10 GHz. FBG 输出的反射光信号经光电探测器 PD2(LSIPD-A75) 转换为电信号后输入 MCU, MCU 根据反射光载波功率的大小控制激光器的中心波长, 使激光器的中心波长与 FBG 凹陷位置对齐. FBG 输出的透射光信号经光电探测器 PD1(HLT-PD-M-15550-40-0-1-FA) 转换为电信号, 使用电放大器 EA2(CLM 145-5023-293, 5.85~14.5 GHz) 放大和带通滤波器 BPF2(KGL YA356-2, 10.4~14.1 GHz) 滤波后, 得到复合雷达信号, 该信号可作为雷达发射信号用于高精度、多维度目标探测.

系统产生的复合雷达信号经功分器 PS(Narda MODEL 4456, 2~18 GHz) 分成两路, 一路与混频器(M/A-COM M14A) 本振端口相连作为参考信号, 另一路经发射天线(GHA080180-SMF-14, 8~18 GHz) 发射用于探测目标. 目标反射回波经接收天线(GHA080180-SMF-14, 8~18 GHz) 接收、电放大器 EA3(CLM 145-7039-293B, 5.85~14.50 GHz) 放大后与混频器射频端口相连. 混频器输出的信号经低通滤波器 LPF(Mini-Circuits SLP-1650, DC-1.4 GHz) 滤波后, 输出去斜后的电信号. 该电信号由实时示波器 OSC(R&S RTO2032) 采样, 用于实现目标距离和径向速度的测量以及高分辨率 ISAR 成像.

3.1 复合雷达信号生成

首先, 使用光谱分析仪 OSA(Ando AQ6137B) 测量了 FBG 输入端和透射输出端的光谱以及 FBG 透射谱传输曲线, 如图 3 所示. 红色虚线表示 FBG 透射谱传输曲线; 黑色实线表示 FBG 输入端的光谱, 即 Dpol-MZM 输出光信号的光谱; 蓝色实线表示 FBG 输出端的光谱, 即 FBG 光陷波滤波后光信号的光谱. 从图 3 中可知, 经

FBG 进行陷波滤波后,光载波抑制比达到 23.0 dB. 需要注意的是,图 3 显示的光谱中 2 个偏振态的光信号已经叠加在一起, ± 2 阶的单音光边带和 ± 2 阶的 LFM 光边带并不能区分,这主要受限于光谱仪的分辨率.

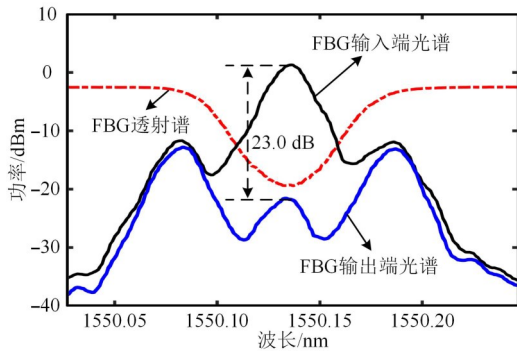
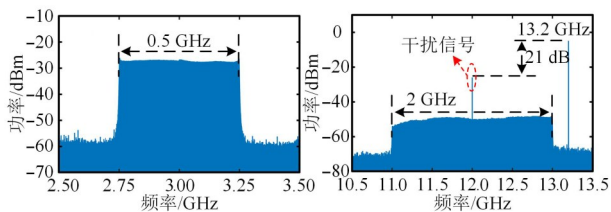


图3 FBG输入端和输出端的光谱及FBG透射谱传输曲线

然后,使用频谱分析仪 ESA (R&S, FSP-40) 分别测量了 AWG 输出的中频 LFM 信号和产生的复合雷达信号的频谱,如图 4 所示. 由图 4 可知,宽带雷达 LFM 信号的中心频率和带宽分别是 AWG 输出的中频 LFM 信号的 4 倍,即中心频率为 12 GHz、带宽为 2 GHz. 在图 4(b) 中,频率为 13.2 GHz 的单音微波信号是由微波信号源产生的频率为 3.3 GHz 的信号经微波光子四倍频生成的. 需要指出的是,在频率为 12 GHz 处存在一个干扰信号,这是由 AWG 12 GHz 的采样时钟及非线性引起的. 由于干扰信号的功率远小于频率为 13.2 GHz 的单音微波信号和宽带 LFM 信号的功率,因此,该干扰信号的影响在实验中可以被忽略.



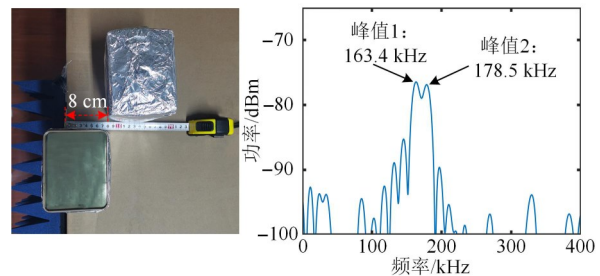
(a) AWG 输出的中频 LFM 信号的频谱 (b) 雷达发射信号的频谱

图4 AWG 输出的中频 LFM 信号和产生的复合雷达信号的频谱

3.2 距离和径向速度测量

在实验中,利用系统产生的宽带 LFM 信号进行了物体测距. 沿着雷达视线方向,2 个静止的长方体相距 8 cm,被测物体的实物图如图 5(a) 所示. 2 个静止目标的反射回波经混频后由示波器进行采样,示波器采样率为 4 MSa/s. 图 5(b) 是一个周期采样信号的频谱. 由图 5(b) 能够明显地观测到 2 个峰值,其频率分别为 163.4 kHz 和 178.5 kHz. 依据式(14),可计算出 2 个峰值

相距 9.1 cm,对应的测量绝对误差为 1.1 cm.



(a) 被测物体的实物图 (b) 去斜信号的频谱

图5 实验情况

为了进一步验证系统的测距和测速能力,使用单个沿圆周运动的圆柱体作为待测目标. 该目标位于转台上,目标与转台中心的距离 R 为 30 cm,转台旋转周期为 24.56 s,转台中心与天线距离 L 为 137.5 cm,如图 6(a) 所示. 在旋转过程中,目标回波的采样受电脑控制,每隔 $17/16$ 旋转周期采样一次,共采样 17 次,每次采样时间为 2 s. 图 6(b) 是第 13 次采样信号的时域波形,经快速傅里叶变换后,频谱如图 6(c) 所示. 从图 6(c) 可知,在频率为 100 kHz 附近,存在一个较强的干扰信号,该干扰信号主要是发射端发射信号被泄露到接收天线引起的. 由于干扰信号出现的位置与目标回波去斜后的信号在频域上是分开的,因此可用一个数字带阻滤波器来消除该干扰信号对目标距离和径向速度测量的影响. 图 6(d) 是消除天线自干扰后信号的频谱,其低频分量是目标运动引起的多普勒频率,较高频率分量是宽带 LFM 信号去斜后的频率,该实验结果与图 2 分析结果一致. 因此,依据式(14)和式(15),可从低频分量处提取目标的径向速度大小,从较高频率分量处提取目标的距离信息. 目标的径向速度方向可通过相邻 2 次采样回波信号提取的距离信息进行确定. 图 7 是待测目标在转台圆周内不同位置处(通过 17 个周期 17 次测量得到)测量得到的距离和速度曲线. 其中,蓝色五星和黑色方块分别表示各采样点的测量值和理论值,红色圆圈表示测量误差. 由图 7 可知,目标距离和径向速度的测量值与理论值高度一致,其绝对误差分别小于 4.2 cm 和 1.7 cm/s.

3.3 高分辨率 ISAR 成像

在 ISAR 成像实验中,中心频率为 12 GHz、带宽为 2 GHz 的单啁啾 LFM 信号和频率为 13.2 GHz 的单音微波信号仍作为雷达发射信号. 为了实现高分辨率 ISAR 成像,使用一个数字高通滤波器消除单音微波信号和天线自干扰信号对 ISAR 成像的影响. 实验中,将 3 个圆柱体和 3 个长方体置于转台上,具体实验场景如图 8(a) 所示. 沿着雷达视线方向,转台中心与天线相距为 1.52 m,转台旋转周期为 24.56 s. 依据式(16)和式(17),

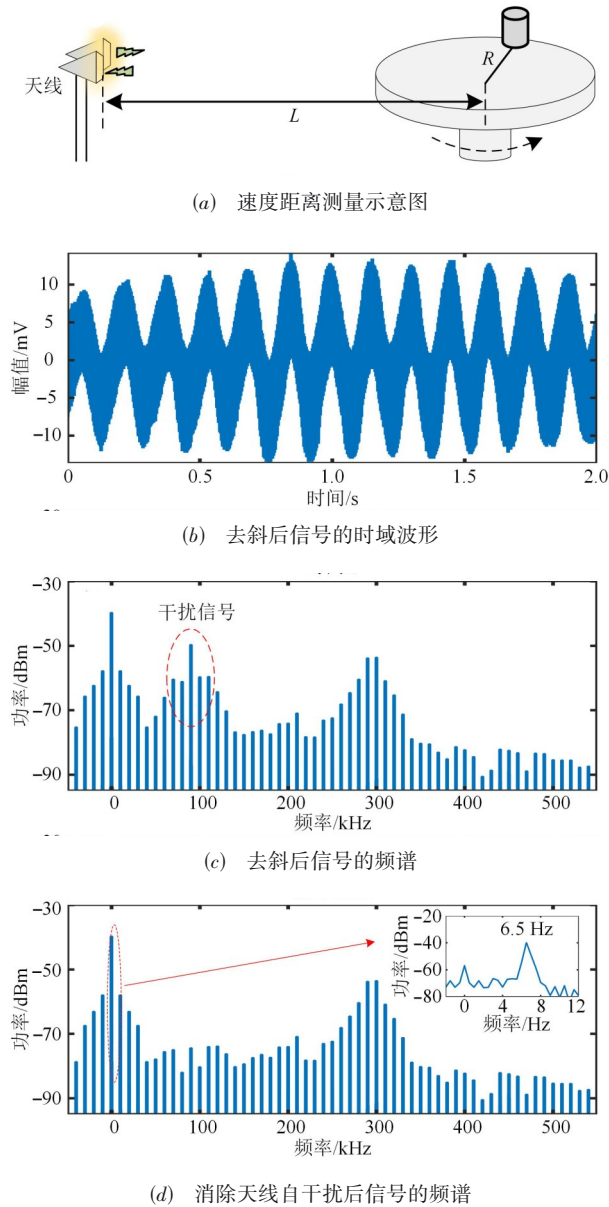


图6 实验结果

带宽为 2 GHz 的 LFM 信号对应的 ISAR 成像距离分辨率为 7.5 cm, 积累时间为 2 s 的方位分辨率为 2.4 cm. ISAR 成像结果如图 8(b) 所示, 6 个目标清晰可辨. 图 8(b) 中成像结果在方位向和距离向的显示分辨率分别为 2.4 cm 和 6 cm. 由于发射信号是占空比 80% 的 LFM 信号, 而该图是通过对整个信号周期内的信号使用成像算法得到的, 因此图中显示分辨率为 6 cm.

为了进一步展示系统 ISAR 成像的性能, 3 个长方体作为探测目标被置于转台的不同位置, 如图 9(a) 所示. 与第一次 ISAR 成像实验参数不同之处在于, 转台中心与天线相距为 1.75 m. 在旋转过程中, 目标每隔 5/4 周期采样一次, 共采样 5 次, 每次采样时间为 2 s. 图 9

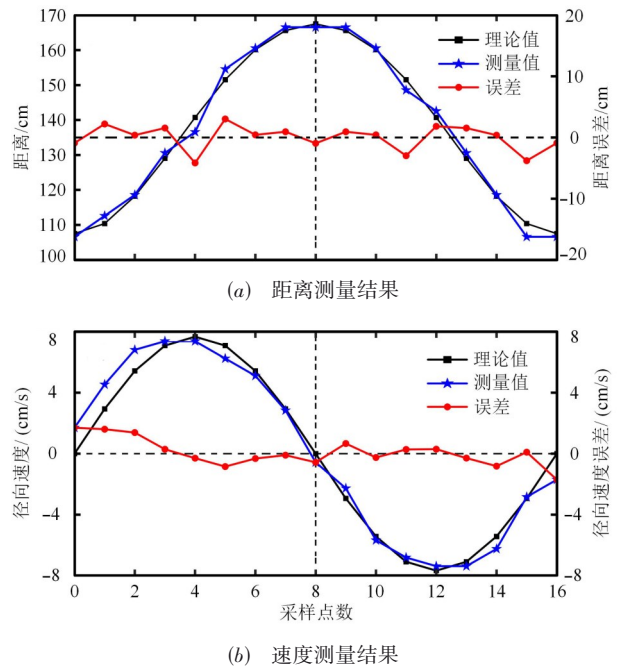


图7 测量结果

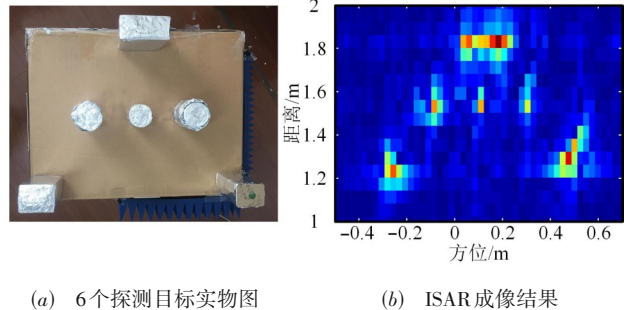


图8 ISAR 成像

(b) 是第一次采样后 ISAR 成像结果, 3 个探测目标清晰可辨. 图 9(c) 和 (d) 分别是第三次和第四次的成像结果, 同样实现了对目标的高分辨率成像.

4 结论

本文提出了一种微波光子四倍频复合雷达信号产生方法, 该复合雷达信号包括单啁啾 LFM 信号和单音微波信号. 通过实验, 利用低频、窄带宽的 LFM 信号和微波信号生成了频率为 11~13 GHz 的宽带单啁啾 LFM 信号和频率为 13.2 GHz 的单音微波信号. 利用该复合信号, 可同时实现高精度的目标距离和径向速度测量以及高分辨率 ISAR 成像. 实验结果表明, 目标的距离和径向速度绝对误差分别不超过 4.2 cm 和 1.7 cm/s, 多个探测目标成像结果清晰可辨. 本文所提出的方法可以为测距、测速和成像一体化的多功能雷达提供新的技术途径和解决方案.

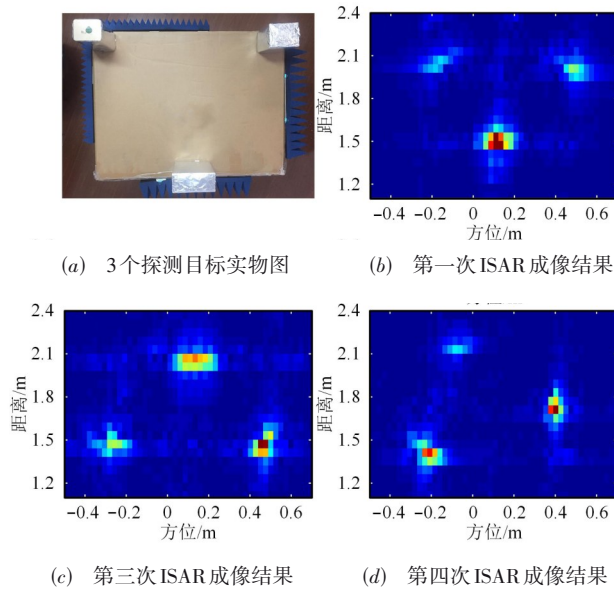


图9 多目标连续多帧 ISAR 成像

参考文献

- [1] GINI F, DE MAIO A, PATTON L. Waveform Design and Diversity for Advanced Radar Systems[M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [2] BLUNT S D, MOKOLE E L. Overview of radar waveform diversity[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(11): 2-42.
- [3] ZHANG H, LI L, WU K. Software-defined six-port radar technique for precision range measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(10): 1745-1751.
- [4] ROEHR S, GULDEN P, VOSSIEK M. Precise distance and velocity measurement for real time locating in multipath environments using a frequency-modulated continuous-wave secondary radar approach[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(10): 2329-2339.
- [5] CHEN V C, MARTORELLA M. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms and Applications[M]. Herts: Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [6] 陈宝欣, 关键, 董云龙, 等. 多频连续波雷达与角度-距离联合估计方法[J]. 电子学报, 2020, 48(2): 375-383.
- CHEN B X, GUAN J, DONG Y L, et al. Multiple-frequency CW radar and joint angle-range estimation method[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(2): 375-383. (in Chinese)
- [7] TONG Y T. Advanced photonics-based radar signal generation technology for practical radar application[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3371-3382.
- [8] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. Photonics in radar systems: RF integration for state-of-the-art functionality[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(8): 74-83.
- [9] SERAFINO G, SCOTTI F, LEMBO L, et al. Toward a new generation of radar systems based on microwave photonic technologies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 643-650.
- [10] PAN S L, ZHANG Y M. Microwave photonic radars[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5450-5484.
- [11] PAN S L, YE X W, ZHANG Y M, et al. Microwave photonic array radars[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 176-190.
- [12] CHEN Y, PAN S L. Photonic generation of tunable frequency-multiplied phase-coded microwave waveforms[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(13): 1230-1233.
- [13] CHEN Y, YAO J P. Simultaneous multi-frequency phase-coded microwave signal generation at six different frequencies using a DP-BPSK modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2293-2299.
- [14] ZHANG K, ZHAO S H, WEN A J, et al. Photonics-based multi-band linearly frequency modulated signal generation and anti-chromatic dispersion transmission[J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8350-8362.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] WANG A L, WO J H, LUO X, et al. Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20708-20717.
- [18] CHENG H X, ZOU X H, LU B, et al. High-resolution range and velocity measurement based on photonic LFM microwave signal generation and detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1-8.
- [19] ZHANG J X, JIANG W J, YU Y, et al. Photonics-based simultaneous measurement of distance and velocity using

multi-band LFM microwave signals with opposite chirps [J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27580-27591.

- [20] PENG S W, LI S Y, XUE X X, et al. Photonics-based simultaneous distance and velocity measurement of multiple targets utilizing dual-band symmetrical triangular linear frequency-modulated waveforms[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 16270-16279.
- [21] LIANG D D, JIANG L Z, CHEN Y. Multi-functional microwave photonic radar system for simultaneous distance and velocity measurement and high-resolution microwave imaging[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(20): 6470-6478.

作者简介



梁丁丁 男,1996年5月出生,河南周口人.现为华东师范大学通信与电子工程学院博士研究生.主要从事微波光子雷达方面的研究工作.

E-mail: 51191214019@stu.ecnu.edu.cn



陈 阳(通讯作者) 男,1986年7月出生,安徽凤阳人.2009年和2015年分别在西安电子科技大学获得工学学士和博士学位.现为华东师范大学通信与电子工程学院研究员,博士生导师.主要从事微波光子学、光载无线系统等方面的研究工作.

E-mail: ychen@ce.ecnu.edu.cn