

基于光注入半导体激光器的雷达通信一体化研究

梁丁丁, 左鹏程, 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: 雷达通信一体化是近年来研究的热点之一,它能够在单一系统中同时实现目标探测和数据传输两种功能. 本文提出了一种结构简单紧凑的基于光注入半导体激光器的雷达通信一体化方案. 利用注入相位调制光信号的 N 阶调制光边带锁定从激光器,以提高主从激光器之间的相干性;通过改变从激光器单周期振荡频率和注入光信号,可以实现工作频段和倍频因子均可调谐的幅度键控线性调频(Amplitude Shift-Keying Linearly Frequency-Modulated, ASK-LFM)信号的生成,并通过实验和仿真验证了基于该信号的一体化系统的雷达与通信功能. 实验结果表明,对于带宽为1 GHz的ASK-LFM信号,目标距离测量误差优于3.2 cm,3个探测目标成像结果可分辨且能够同时实现通信数据的正确传输.

关键词: 微波光子学;雷达通信一体化;半导体激光器;光注入;逆合成孔径成像

基金项目: 国家自然科学基金(No.61971193);上海自然科学基金(No.20ZR1416100);中央高校基本科研业务费(No.YBNLTS2022-016)

中图分类号: TN95;TN29

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)09-2321-09

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

DOI:10.12263/DZXB.20220495

Research on Radar-Communication Integration Based on Optically Injected Semiconductor Laser

LIANG Ding-ding, ZUO Peng-cheng, CHEN Yang

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

Abstract: Radar-communication integration is one of the research hotspots in recent years, which can simultaneously realize target detection and data transmission in a single system. In this paper, a simple and compact radar-communication integration scheme based on the optical injection of a semiconductor laser is proposed. The coherence between the master and slave lasers is improved by locking the slave laser with the N -order modulated optical sideband of the injected phase-modulated optical signal. By changing the period-one oscillation frequency and the injected optical signal, an amplitude shift-keying linearly frequency-modulated (ASK-LFM) signal with tunable operating frequency band and frequency multiplication factor is generated. The radar and communication functions of the integrated system based on the generated signal are verified through experiments and simulations. The experimental results show that for the ASK-LFM signal with a bandwidth of 1 GHz, the measurement error of the target range is better than 3.2 cm, the imaging results of the three targets are identifiable, and the correct transmission of communication data is achieved at the same time.

Key words: microwave photonics; radar-communication integration; semiconductor laser; optical injection; ISAR imaging

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61971193); Natural Science Foundation of Shanghai (No.20ZR1416100); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.YBNLTS2022-016)

1 引言

雷达感知和无线通信分别承担着目标探测和信息交互的使命,是军民系统不可缺少的组成部分^[1,2].

在军用领域,面对日益复杂的电磁环境和日益增多的武器威胁,作战平台的电子设备种类和数量不断增加,带来了严重的电磁兼容问题^[3];在民用领域,新一代智

慧交通不仅要实现车辆间的高速实时数据传输,还希望借助雷达系统提供精确感知能力.在车辆平台有限的资源下,智能驾驶系统面临体积庞大、功耗高等问题^[4].与分立的雷达和通信系统相比,雷达通信一体化系统能够让雷达和通信共享硬件平台和频谱资源,显著降低系统体积、功耗和成本,缓解电磁兼容问题,进而更好地应用于国防和民用领域^[3,4].因此,开展雷达通信一体化研究具有重要意义.

雷达通信一体化信号通常分为两类:一类基于信号复用,即在时间、空间和频率等维度合理分配雷达信号和通信信号^[5-8],两种信号彼此独立;另一类基于信号共享,即雷达和通信使用相同的波形^[9,10].文献[5,6]基于时分复用方式实现了目标距离测量和数据通信,最大通信速率分别为10 Mbps和50 Mbps,距离分辨率分别为7.5 m和1.5 m.文献[7]采用频分复用方式,雷达和通信系统的工作频段分别为5.06~5.11 GHz和5.11~5.14 GHz,较小的工作带宽无法实现高分辨率的目标探测和高速通信.文献[8]提出了一种空分复用方式来实现一体化功能,利用固定子波束和分组变化扫描子波束分别实现通信功能和雷达感知.文献[9,10]将通信信息嵌入雷达信号中,该方式利用单一波形能够有效提高雷达通信一体化系统的集成度.为了提高目标探测性能和实现高速数据通信,需要产生高频率、大带宽、可调谐的雷达通信一体化波形^[3].然而,基于传统电子技术产生雷达通信一体化信号^[5-7,9],面临电子器件速率低、工作带宽小、可重构性差等问题,难以更好地服务于新一代雷达通信一体化系统^[11].

微波光子学因具有低损耗、大带宽、抗电磁干扰等优势,被广泛应用于雷达和通信系统中^[12-20],许多基于微波光子技术的雷达通信一体化系统方案被提出^[15-20].文献[15,16]基于时分复用方式在电域产生低频段的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)信号和线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号,经微波光子上变频实现了W波段和THz波段的OFDM信号和LFM信号生成,信号的带宽分别是10 GHz和15 GHz,能够实现厘米级的距离分辨率和高速数据通信.这类方案的不足在于需要在电域分别产生两种信号,并通过时分复用对其进行融合,信号生成难度和复杂度高,相关实验使用了复杂且昂贵的高速任意波形发生器.为了进一步提高系统工作带宽,文献[17]基于时分复用方式利用微波光子四倍频技术实现了工作带宽20 GHz的W波段正交相移键控信号和LFM信号的生成,实现的距离分辨率为0.94 cm,码元传输速率为5 Gbaud.文献[18]利用光电振荡器将两路基带信号调制到光载波上,经偏振复用、微波光子变频后实现中心频率为24 GHz、带宽为2 GHz

的雷达通信一体化信号生成,实现的距离分辨率为7.5 cm,通信速率为335.6 Mbps.文献[19]研究了基于光子扩频相位编码信号的雷达通信一体化系统,目标距离分辨率和通信速率分别优于3.5 cm和1 Gbps.上述两种雷达通信一体化系统^[18,19]未采用线性调频体制的信号,在接收端需要获取完整信号波形后利用互相关算法实现目标距离测量,对接收机带宽和采样率有较高要求.文献[20]提出了一种基于信号共享的雷达通信一体化系统,将幅度键控(Amplitude Shift Keying, ASK)信号调制到宽带LFM光边带上,经光电转换产生四倍频的幅度键控线性调频(Amplitude Shift-Keying Linearly Frequency-Modulated, ASK-LFM)信号,逆合成孔径雷达(Inverse-Synthetic-Aperture-Radar, ISAR)成像分辨率为1.8 cm×2.0 cm,通信速率为100 Mbps.然而,上述方案^[17,19,20]产生的信号的倍频因子和频段与系统复杂度相互制约.此外,基于马赫-曾德尔调制器的结构存在工作点漂移的问题.光注入半导体激光器存在丰富的非线性动力学状态,利用单周期振荡态能够灵活调整产生微波信号的工作频段.文献[21]利用单周期振荡态实现了V波段和W波段的正交幅度调制信号的生成,信号工作频段为40~110 GHz,可灵活调整.文献[22]基于光注入半导体结构实现了倍频因子为4的LFM信号生成,利用该方法能够实现超过100 GHz的雷达信号生成.目前,基于光注入半导体激光器的微波信号生成通常围绕雷达和通信两种系统独立展开,较少开展雷达通信一体化的研究.

在上述方案^[15-20]中,基于时分复用的雷达通信一体化系统需要在电域产生雷达信号和通信信号且要用到两个独立的激光器,这将增大系统硬件复杂度并对两个激光器的相干性提出了更高要求;另外,基于马赫-曾德尔调制器的信号生成存在工作点漂移问题且信号倍频因子和频段与系统复杂度密切相关.为解决上述问题,本文提出了一种基于光注入半导体激光器的雷达通信一体化方案,采用相位调制器来生成宽带光边带而无需考虑调制器工作点漂移问题,利用注入光信号的 N 阶调制光边带锁定从激光器以提高主从激光器之间的相干性,通过改变从激光器单周期振荡频率和注入光信号以产生工作频段和倍频因子均可调谐的ASK-LFM信号并进行了雷达和通信功能的测试.实验结果表明,对于带宽为1 GHz的ASK-LFM信号,目标距离测量误差优于3.2 cm,多个探测目标成像结果可分辨且能够同时实现通信数据的正确传输.

2 基本原理

2.1 基于光注入半导体激光器的宽带倍频原理

光注入半导体激光器结构包含一对主从激光器.

在不同的注入参数下,从激光器会表现出不同的非线性动力学状态,例如:稳态锁定、单周期振荡、倍周期振荡、混沌振荡等状态^[23,24].从激光器的工作状态主要由注入光信号的强度和主从激光器自由振荡时两者间的失谐频率 f_1 决定.图1是基于光注入半导体激光器的宽带倍频原理图,图1上半部分展示了光注入半导体激光器产生单周期振荡的过程.当半导体激光器自由振荡时波长为 λ_{s1} ,注入光信号波长为 λ_m 时,调整注入光信号的强度和失谐频率 f_1 ,使半导体激光器工作于单周期振荡态,半导体激光器的波长将从 λ_{s1} 红移到 λ_{s2} .半导体激光器输出的光信号经光电探测后将产生一个单频微波信号,其频率等于单周期振荡频率 f_2 .在半导体激光器工作于单周期振荡态时.若单频光载波 λ_m 被低频、窄带宽 LFM 信号相位调制后作为注入光信号,此时,调节 LFM 信号的频率使得注入光信号的 $-N$ 阶调相光边带落入红移后的波长 λ_{s2} 附近, $-N$ 阶调相光边带将锁定半导体激光器且被放大.注入光信号和半导体激光器输出光信号的光谱示意图如图1下半部分所示.由于经放大后的 $-N$ 阶调相光边带和光载波在输出光信号中居于主要地位,其他光边带可被忽略.经光电探测后,将产生 N 倍频的 LFM 信号.

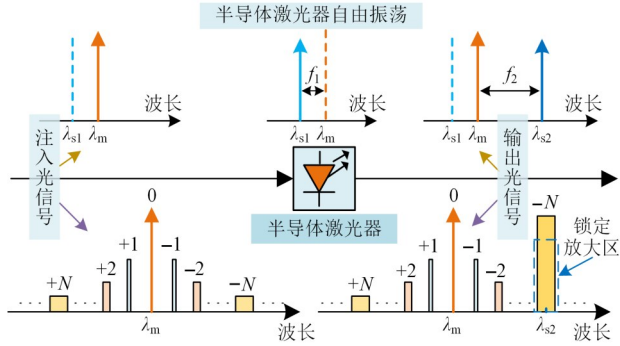


图1 基于光注入半导体激光器的宽带倍频原理图

2.2 雷达通信一体化原理

图2为本文提出的基于光注入半导体激光器的雷达通信一体化系统方案图.主激光器是一个连续波激光器,其输出的单频光载波可表示为

$$E_{ML}(t) = E_0 \exp(j2\pi f_m t) \quad (1)$$

其中, E_0 和 f_m 分别是光载波的电场幅度和频率.单频光载波通过偏振控制器1后与相位调制器相连.当相位调制器未施加调制信号时,使用光衰减器改变注入光信号的强度,注入光信号的偏振态通过偏振控制器2进行调节以便获得最大注入效率.从激光器是一个半导体激光器,调节注入光信号的强度和主从激光器间的失谐频率使从激光器工作于单周期振荡态.在此基础上,使用任意波形发生器产生一

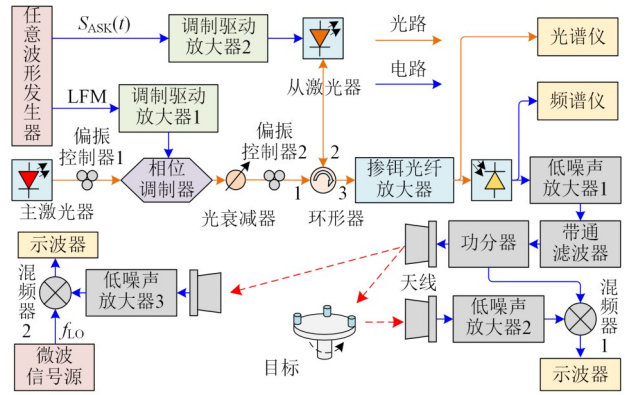


图2 基于光注入半导体激光器的雷达通信一体化系统方案图

路带宽为 B 、周期为 T 的连续波 LFM 信号,该信号经调制驱动放大器1后调制单频光载波,相位调制后的光信号注入到从激光器.若使用二进制基带信号 $S_{ASK}(t)$ 对注入光信号进行调制,则调制后的光信号可以表示为

$$E_{PM}(t) = E_0 \sqrt{S_{ASK}(t)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m) \exp \left[j2\pi f_m t + j2\pi n \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) + j \frac{n\pi}{2} \right] \quad (2)$$

其中, m 是相位调制指数, f_0 和 $k=B/T$ 分别是连续波 LFM 信号的起始频率和啁啾率, $J_n(\cdot)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数.调整任意波形发生器输出 LFM 信号的频率,使注入光信号的 $-N$ 阶调制光边带落入从激光器红移后的波长附近, $-N$ 阶调制光边带将锁定从激光器且被放大.放大后的 $-N$ 阶调制光边带和光载波在从激光器输出的光信号中起主要作用,此时,从激光器输出的光信号可表示为

$$E_{Total}(t) \approx E_0 \sqrt{S_{ASK}(t)} J_0(m) \exp(j2\pi f_m t) + G_{SL} E_0 \sqrt{S_{ASK}(t)} J_{-N}(m) \exp \left[j2\pi f_m t - j2\pi N \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) - j \frac{N\pi}{2} \right] \quad (3)$$

其中, G_{SL} 表示从激光器对 $-N$ 阶调制光边带的放大系数.从激光器输出的光信号经掺铒光纤放大器进行放大,然后使用光电探测器将放大后的光信号转换为电信号,该电信号可表示为

$$i_{PD}(t) = \eta |G_{EDFA} E_{Total}(t)|^2 = \eta E_0^2 G_{EDFA}^2 [J_0^2(m) + G_{SL}^2 J_{-N}^2(m)] S_{ASK}(t) + 2\eta G_{SL} G_{EDFA}^2 E_0^2 J_0(m) J_{-N}(m) S_{ASK}(t) \times \cos \left[2\pi N \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) + \frac{N\pi}{2} \right] \quad (4)$$

其中, η 表示光电探测器的响应度, G_{EDFA} 表示掺铒光纤

放大器对从激光器输出光信号的放大系数. 从式(4)可知,光电探测后输出的电信号由基带信号 $S_{\text{ASK}}(t)$ 以及 N 倍频的ASK-LFM信号组成. 在系统发射端,分别使用低噪声放大器1和带通滤波器对 N 倍频的ASK-LFM信号进行放大和滤波后,作为雷达通信一体化信号. 该信号经功分器分成两路:一路作为雷达接收端的参考信号用于实现目标回波信号的去斜处理,另一路经天线辐射到空间中用于目标探测和数据通信. 系统产生的ASK-LFM信号可表达为

$$E_{\text{T}}(t) = A_1 S_{\text{ASK}}(t) \cos \left[2\pi N \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) + \frac{N\pi}{2} \right] \quad (5)$$

其中, A_1 是ASK-LFM信号的幅度. 在雷达接收端,目标反射的雷达回波经 $\Delta\tau$ 延时后由接收天线接收并使用低噪声放大器2进行放大,放大后的回波信号与参考信号进行去斜处理,去斜处理后的信号可表示为

$$E_{\text{LRF}}(t) = A_2 S_{\text{ASK}}(t) S_{\text{ASK}}(t - \Delta\tau) \times \cos \left\{ 2\pi N \left[f_0 \Delta\tau + \frac{1}{2} k t^2 - \frac{1}{2} k (t - \Delta\tau)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

其中, A_2 是去斜处理后的信号幅度. 使用ISAR成像算法,可得到目标的形状信息;依据去斜处理后信号的瞬时频率可提取目标的距离信息,该距离信息可表达为

$$R = \frac{c}{2} \Delta\tau = \frac{c}{2Nk} f_d \quad (7)$$

其中, R 是目标与天线之间的距离, c 是真空中光速, f_d 是去斜处理后信号的瞬时频率.

在通信接收端,首先使用低噪声放大器3对天线接收到的ASK-LFM信号进行放大;然后,利用微波信号源产生的本振信号对放大后的信号进行下变频,下变频后的信号可表达为

$$E_{\text{Down}}(t) = A_3 S_{\text{ASK}}(t) \cos \left[2\pi N \left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2 \right) - 2\pi f_{\text{LO}} t + \frac{N\pi}{2} \right] \quad (8)$$

其中, A_3 是下变频后信号的幅度, f_{LO} 是本振信号的频率. 下变频后的信号使用示波器进行采样,经数字域解调后,可恢复基带信号 $S_{\text{ASK}}(t)$.

3 实验结果与分析

基于图2所示方案图搭建了如图3所示的实验链路. 实验中主激光器和从激光器分别是连续波激光器(ID Photonics CoBriteDX1-1-C-H01-FA)和直调分布反馈式半导体激光器(Actech DCZ0002). 其中,从激光器的阈值电流是7 mA,从激光器的工作电流和温度分别由直流源和温度控制器(Thorlabs ITC4001)控制. 使用任意波形发生器(Keysight M8195A)产生两路电信号:

一路是周期为4 μs 的连续波LFM信号,该信号经调制驱动放大器1(Aeroflex AMPF-107MDA-09, 50 kHz~13 GHz)放大后与相位调制器(iXblue MPZ-LN-10)的射频输入端相连;另一路是传输速率为50 Mbps的二进制基带信号 $S_{\text{ASK}}(t)$,该信号经调制驱动放大器2(Multilink MTC5515, 30 kHz~11 GHz)放大后与从激光器的射频端口相连. 强度和偏振态可调的相位调制信号由环形器端口2注入从激光器,从激光器输出的光信号通过环形器端口3输出并采用掺铒光纤放大器(Amonics AEDFA-PA-35-B-FA)对其放大,放大后的光信号使用光电探测器(u2t MPRV1331A)进行光电转换产生 N 倍频的ASK-LFM信号. 为了提高 N 倍频信号的功率并消除带外干扰信号,分别采用低噪声放大器1(CLM 145-5023-293, 5.85~14.5 GHz)和带通滤波器(KGL YA356-2, 10.4~14.1 GHz)进行放大和滤波后作为雷达通信一体化信号. 带通滤波器输出的ASK-LFM信号经功分器(Narda MODEL 4456, 2~18 GHz)分成两路:一路作为雷达接收端的参考信号,另一路经天线辐射到空间中用于目标探测和数据通信.

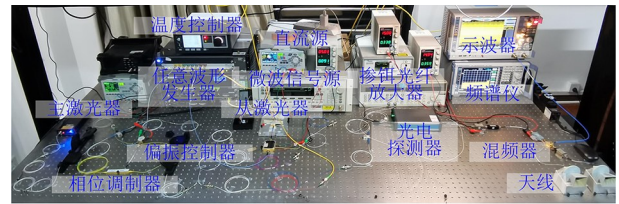


图3 雷达通信一体化系统实物图

在接收端,采用分时方式对雷达和通信功能进行验证. 在雷达接收端,目标反射的回波信号由接收天线进行接收,经低噪声放大器2(CLM 145-7039-293B, 5.85~14.5 GHz)后输入混频器1(M/A-COM M14A)的射频端口,回波信号与参考信号去斜处理后的信号由示波器(R&S RTO2032)进行采样用于实现雷达目标距离测量和ISAR成像. 在通信接收端,经低噪声放大器3(CLM 145-7039-293B, 5.85~14.5 GHz)放大后输入到混频器2(M/A-COM M14A),然后使用微波信号源(Agilent 83630B)产生的频率为 f_{LO} 的本振信号对接收到的ASK-LFM信号进行下变频,下变频后的信号由示波器进行采样并用于恢复所传输的基带数据. 实验中,光信号的光谱和电信号的频谱分别使用光谱分析仪(Ando AQ6137B)和频谱分析仪(R&S FSP-40)进行观测.

3.1 雷达通信一体化信号生成

实验研究了雷达通信一体化ASK-LFM信号的生成. 设置从激光器的工作电流为44 mA,工作温度为24.12 $^{\circ}\text{C}$,输出功率和波长分别为3.9 dBm和1 550.05 nm. 当注入单频光载波的功率为0.2 dBm、主从激光器间的失谐频率约为6.25 GHz时,从激光器工作于单周期振

荡态,如图4(a)所示.从激光器的波长发生了红移,红移后的波长1550.21 nm与再生的光载波之间的频率差为13.05 GHz.在单周期振荡态的基础上,使用中心频率为4.35 GHz、带宽为0.5 GHz的连续波LFM信号调制单频光载波,以产生一系列的宽带调相光边带,然后注入到从激光器,被基带信号 $S_{ASK}(t)$ 调制.当-3阶调制光边带恰好处于从激光器红移后的波长附近时,该调制光边带将锁定从激光器且被放大.图4(b)展示了从激光器的注入光信号和从激光器输出光信号的光谱图,注入光信号的-3阶调制光边带的功率提高了16.4 dB,且在从激光器输出光信号的光谱中,放大后的-3阶调制光边带和光载波居于主要地位.经光电转换后,测量了光电探测器输出端信号衰减10 dB后的频谱.如图4(c)所示,不同频段和带宽的信号都可产生,其中倍频因子为3的ASK-LFM信号功率远高于基频和二倍频信号且处于主导地位.与输入的带宽为0.5 GHz的LFM信号相比,居于主导地位的ASK-LFM信号的频率和带宽都提高到系统输入LFM信号的三倍.为了进一步提高三倍频ASK-LFM信号的功率并消除基频和二倍频信号对雷达和通信性能的影响,该信号经放大、滤波后作为需要的雷达通信一体化信号.需要说明的是,ASK-LFM信号的频谱相比于LFM信号的频谱在不同频率处出现了明显的功率大范围起伏,这是由于该信号被基带信号 $S_{ASK}(t)$ 调制导致部分频谱分量缺失.

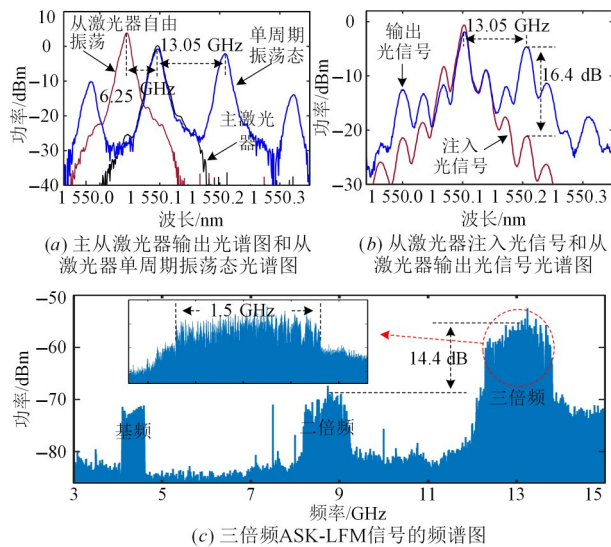


图4 激光器输出光信号的光谱图及三倍频信号的频谱图

3.2 系统功能验证

利用上述系统产生的中心频率为13.05 GHz、带宽为1.5 GHz的ASK-LFM信号开展了雷达功能的验证.首先进行了多个物体的ISAR成像实验.如图5(a)所示,将三个圆柱体放置于转台上.沿着雷达视线方向,转台中心与天线之间的距离为1.65 m,转台每秒旋转角

度为 14.7° .依据式(7)可知,转台目标的回波信号与参考信号去斜处理后的信号频率不超过8 MHz.设置示波器采样率为40 MSa/s,采样时间为0.5 s.在ISAR成像中,距离向的分辨率由发射信号的工作带宽决定,方位向的分辨率由发射信号的中心频率和目标在一帧图像内的旋转角度决定.理论上ISAR成像的距离分辨率和方位分辨率分别为10 cm和9 cm.图5(b)展示了ISAR成像结果,三个探测目标清晰可辨.

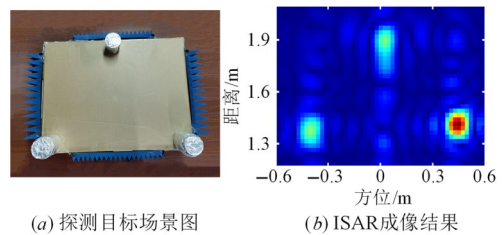


图5 目标场景图和成像结果

然后,采用系统产生的ASK-LFM信号验证了通信功能.在通信接收端,使用频率为11.5 GHz的本振信号对ASK-LFM信号下变频.图6(a)展示了采样后单个周期内归一化ASK-LFM信号的时域波形,可以看出,该信号存在两个不同的幅值.使用短时傅里叶变换对图6(a)所示的时域波形进行时频分析,结果如图6(b)所示.可以看到,下变频后ASK-LFM信号具有类似LFM信号的时频曲线,但由于基带信号 $S_{ASK}(t)$ 调制的作用,时频曲线出现了由基带信号码元决定的离散间断部分,这正验证了ASK-LFM信号的成功产生与传输.1 μ s内归一化ASK信号包络如图6(c)中的蓝色曲线所示.与原基带信号 $S_{ASK}(t)$ (红色虚线)相比,通过幅度键控恢复的基带信号与原基带信号一致.为了进一步评估系统通信性能,绘制了归一化ASK信号的眼图,如图6(d)所示.眼图端正且眼张开度较大,说明系统传输性能优良,能够很好地实现数据传输功能.

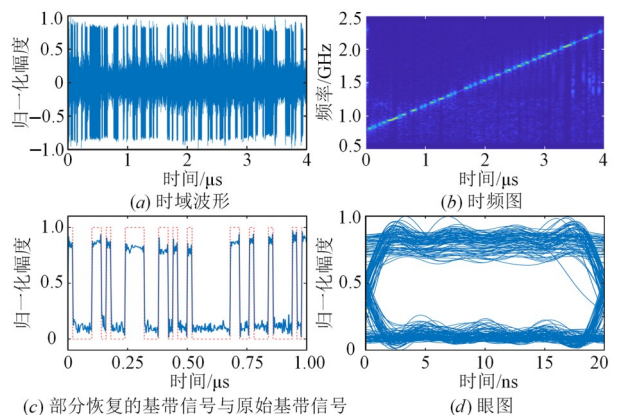


图6 通信端实验结果

3.3 系统可调谐性验证

为了验证该系统的可调谐性,调节主从激光器的工作参数和任意波形发生器输出信号的频率,使其产生二倍频的ASK-LFM信号.设置从激光器的工作电流为40 mA,工作温度为23.86 °C,自由振荡时从激光器输出功率和波长分别为3.7 dBm和1 550.01 nm.当注入单频光载波的功率为0.4 dBm、主从激光器间的失谐频率约为6.25 GHz时,从激光器工作于单周期振荡态.在此基础上,使用中心频率为6.375 GHz、带宽为0.5 GHz的连续波LFM信号对单频光载波进行相位调制,然后注入到从激光器被基带信号 $S_{ASK}(t)$ 调制.当-2阶调制光边带恰好处于从激光器红移后的波长1 550.16 nm附近时,该调制光边带锁定从激光器且被放大.图7(a)展示了从激光器注入光信号和从激光器输出光信号的光谱,-2阶调制光边带的功率提高了16.5 dB,且在从激光器输出光信号的光谱中,-2阶调制光边带和光载波居于主要地位.经光电探测后,二倍频的ASK-LFM信号功率远大于其他频率分量处的功率,实现了频率和带宽均倍增的微波信号生成.图7(b)是衰减10 dB后的二倍频ASK-LFM信号的频谱.经放大和滤波后,二倍频的ASK-LFM信号作为雷达通信一体化信号并用于实现目标探测和数据传输.

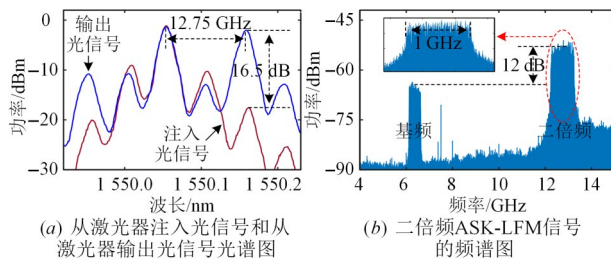


图7 光谱图和电谱图

利用系统产生的中心频率为12.75 GHz、带宽为1 GHz的ASK-LFM信号进行了物体测距和ISAR成像.如图8(a)所示,两个待测长方体的距离为15 cm.图8(b)展示了被测物体的距离测量结果,能够观测到两个峰值,且峰值之间的距离为18.2 cm,可计算出测量值与真实值之间的绝对测量误差为3.2 cm.理论上,带宽为1 GHz的ASK-LFM信号对应的距离分辨率为15 cm.需要指出的是,去斜处理后信号的旁瓣较高,这主要是由于去斜结果受到ASK调制影响.在ISAR成像实验中,被测物体及相对位置如图5(a)所示.沿着雷达视线方向,转台中心与天线之间的距离为1.65 m,转台每秒旋转角度为14.7°.在目标旋转过程中,使用示波器对去斜处理后的信号进行多次采样,每次采样时间为0.5 s.图8(c)和(d)展示了探测目标处于不同位置下的成像结果,3个探测目标能够被区分.

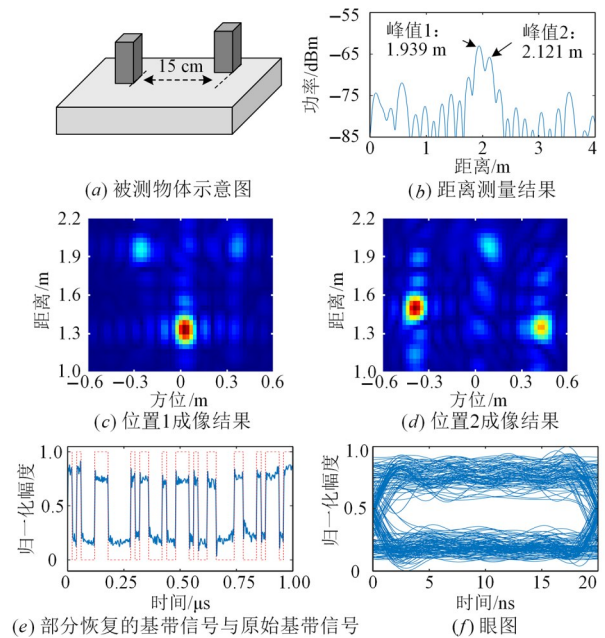


图8 雷达和通信实验结果

然后,进行了通信功能验证.使用频率为11 GHz的本振信号对高频处的ASK-LFM信号进行下变频并使用示波器采样.1 μ s内归一化ASK信号包络如图8(e)中的蓝色曲线.与原始基带信号 $S_{ASK}(t)$ (红色虚线)相比,同样能够准确恢复出通过ASK调制传递的基带信号.图8(f)为归一化ASK信号的眼图,可以看到眼张开度与图6(d)相比较小,但仍可以在合适的判决门限下无误码地恢复出原始基带信号.

4 讨论

4.1 信号参数可调谐

设置任意波形发生器输出的连续波LFM信号的中心频率为10 GHz、带宽为0.5 GHz,调节注入从激光器光信号的强度和主从激光器之间的失谐频率,使从激光器工作在单周期振荡态,单周期振荡频率分别为10 GHz、20 GHz和30 GHz.当从激光器的射频端口未施加基带信号 $S_{ASK}(t)$ 时,从激光器输出的光信号经光电转换产生LFM信号;当使用速率为50 Mbps的基带信号 $S_{ASK}(t)$ 对注入从激光器的光信号进行调制时,从激光器输出的光信号经光电转换产生ASK-LFM信号,如图9所示.可以看出,系统能够产生基频、二倍频和三倍频的LFM信号和ASK-LFM信号,信号的中心频率分别为10 GHz、20 GHz和30 GHz,工作带宽分别是0.5 GHz、1 GHz和1.5 GHz.利用该结构,进一步调整单周期振荡频率,该系统能够进一步提高倍频因子和工作频段,具备产生W波段微波信号的潜力.

4.2 系统性能分析

与传统的LFM信号相比,ASK-LFM信号在LFM信

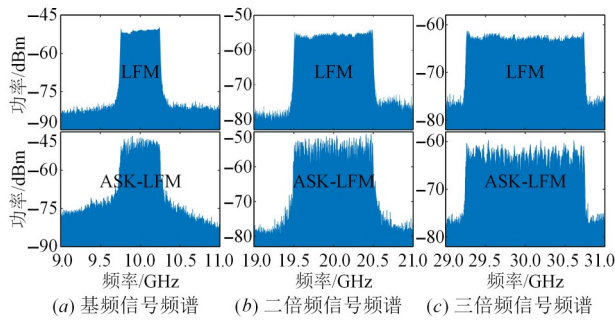


图9 LFM信号和ASK-LFM信号的频谱

号的包络上附加了ASK调制. 如式(6)所示, ASK-LFM信号的去斜处理结果与传统的LFM信号的去斜处理结果相比,其幅度上附加了由传输信息决定的 $S_{ASK}(t) \cdot S_{ASK}(t-\Delta\tau)$ 项. 因此,去斜处理后信号的幅度不仅与回波延时和信道响应有关,还与基带信号 $S_{ASK}(t)$ 有关.

开展了LFM信号和ASK-LFM信号在雷达性能方面的仿真对比研究. 设置连续波LFM信号和ASK-LFM信号的中心频率为12.75 GHz、带宽为1 GHz、信号周期为4 μ s,二进制基带信号 $S_{ASK}(t)$ 的比特率为50 Mbps. LFM信号和ASK-LFM信号的区别在于LFM信号的幅度恒定为1,而ASK-LFM信号的幅度由 $S_{ASK}(t)$ 决定,在距离测量仿真实验中,设置目标与天线之间的距离 L 分别为3 m和10 m,忽略传输损耗和噪声干扰,两种信号得到的距离测量仿真结果如图10所示. 使用这两种信号得到的距离测量值是相同的,但信号强度和周围旁瓣均不同,这是由于ASK-LFM信号的幅值存在离散间断部分,导致去斜处理后信号的频谱展宽. 在ISAR成像仿真实验中,设置被测物体由两个点目标组成,两个点目标在距离向和方位向的距离差分别为0.6 m和0.8 m,物体中心与天线之间的距离分别为3.3 m和10.3 m. 图11展示了LFM信号和ASK-LFM信号的ISAR成像仿真结果,使用这两种信号都能实现被测物体成像,但成像结果强度不同,这一方面是由于LFM信号经ASK调制后功率会降低引起的,另一方面,ASK-LFM信号去斜处理后由于附加了高速的数据调制导致部分功率转移到信号旁瓣上. 需要说明的是,仿真中忽略了传输损耗和噪声干扰,目标的强度也未归一化处理. 从图10和图11可知,采用ASK-LFM信号能够实现目标距离测量和ISAR成像,但相对于LFM信号而言,距离测量和ISAR成像的质量均有所下降.

在本文的实验研究中,仅测试了通信速率为50 Mbps的ASK-LFM信号传输. 在仿真研究中,对不同通信速率对ISAR成像结果的影响进行了验证. 设置二进制基带信号 $S_{ASK}(t)$ 的比特率 R_B 分别为100 Mbps和200 Mbps,系统其他参数不变. 图12展示了不同通信速率下目标强度未归一化处理的ASK-LFM信号的成像

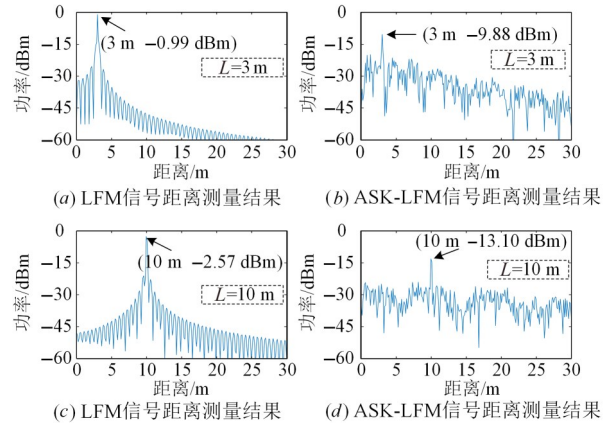


图10 距离测量仿真结果

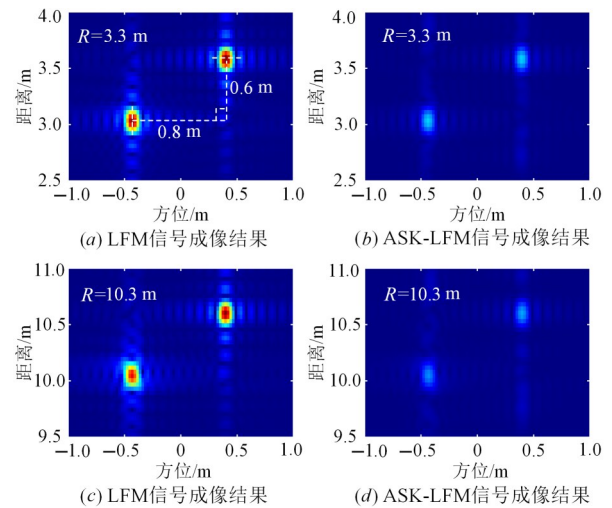


图11 ISAR成像仿真结果

仿真结果,两个目标能够被区分,但目标强度略有不同,这是由于基带信号码元宽度不同引起的. 不同通信速率下的ISAR成像仿真结果表明本文所提出的雷达通信一体化系统的通信速率可以进一步提高.

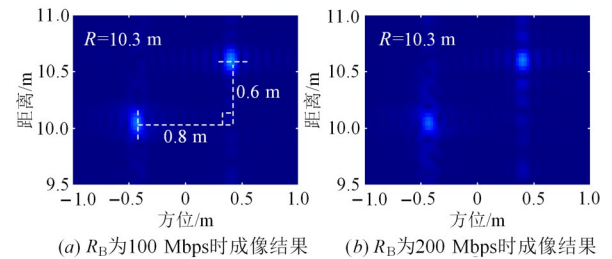


图12 不同通信速率下的ISAR成像仿真结果

5 结论

本文提出并研究了一种基于光注入半导体激光器的雷达通信一体化方案. 该方案结构简单紧凑,只需要在电域产生低频、窄带宽的LFM信号和基带信号,利用注入光信号的 N 阶调制光边带锁定从激光器以提高主

从激光器之间的相干性. 通过改变从激光器单周期振荡频率和注入光信号, 可以实现工作频段和倍频因子均可调谐的 ASK-LFM 信号生成. 利用该信号进行了雷达和通信功能的验证, 理论和实验分析表明, 对于带宽为 1 GHz 的 ASK-LFM 信号, 目标距离测量误差优于 3.2 cm, 3 个探测目标成像结果可分辨且能够同时实现通信数据的正确传输. 本文提出的方案可以为雷达通信一体化系统提供新的技术途径和解决方案.

参考文献

- [1] 黎湘, 范梅梅. 认知雷达及其关键技术研究进展[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1863-1870.
LI X, FAN M M. Research advance on cognitive radar and its key technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(9): 1863-1870. (in Chinese)
- [2] JAMEEL F, HAMID Z, JABEEN F, et al. A survey of device-to-device communications: Research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2133-2168.
- [3] 伍光新, 姚元, 祁琳琳. 雷达通信波形一体化发展综述[J]. 现代雷达, 2021, 43(9): 37-45.
WU G X, YAO Y, QI L L. An overview on radar-communication integration of waveform[J]. Modern Radar, 2021, 43(9): 37-45. (in Chinese)
- [4] MA D Y, SHLEZINGER N, HUANG T Y, et al. Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 85-97.
- [5] HAN L, WU K. Multifunctional transceiver for future intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(7): 1879-1892.
- [6] HAN L, WU K. 24-GHz integrated radio and radar system capable of time-agile wireless communication and sensing [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(3): 619-631.
- [7] MA D Y, SHLEZINGER N, HUANG T Y, et al. Spatial modulation for joint radar-communications systems: Design, analysis, and hardware prototype[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(3): 2283-2298.
- [8] ZHANG J A, HUANG X J, GUO Y J, et al. Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 671-685.
- [9] BEKAR M, BAKER C J, HOARE E, et al. Realization of a joint MIMO radar and communication system using a PSK-LFM waveform[C]//2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.
- [10] DOU Z, ZHONG X K, ZHANG W X. Radar-communication integration based on MSK-LFM spread spectrum signal[J]. International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2017, 10(8): 108-117.
- [11] 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.
- [12] PAN S L, ZHANG Y M. Microwave photonic radars[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5450-5484.
- [13] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature, 2014, 507(7492): 341-345.
- [14] ZOU X H, BAI W L, CHEN W, et al. Microwave photonics for featured applications in high-speed railways: Communications, detection, and sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4337-4346.
- [15] WANG Y Y, LI W P, DING J J, et al. Integrated high-resolution radar and long-distance communication based-on photonic in terahertz band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2731-2738.
- [16] WANG Y Y, DONG Z, DING J J, et al. Photonics-assisted joint high-speed communication and high-resolution radar detection system[J]. Optics Letters, 2021, 46(24): 6103-6106.
- [17] WANG Y Y, DING J J, WANG M X, et al. W-band simultaneous vector signal generation and radar detection based on photonic frequency quadrupling[J]. Optics Letters, 2022, 47(3): 537-540.
- [18] XUE Z J, LI S Y, XUE X X, et al. Photonics-assisted joint radar and communication system based on an optoelectronic oscillator[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22442-22454.
- [19] BAI W L, ZOU X H, LI P X, et al. Photonic millimeter-wave joint radar communication system using spectrum-spreading phase-coding[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(3): 1552-1561.
- [20] NIE H J, ZHANG F Z, YANG Y, et al. Photonics-based integrated communication and radar system[C]//2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [21] TSENG C H, LIN C T, HWANG S K. V- and W-band microwave generation and modulation using semiconduc-

tor lasers at period-one nonlinear dynamics[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6819-6822.

- [22] TSENG C H, HUNG Y H, HWANG S K. Frequency-modulated continuous-wave microwave generation using stabilized period-one nonlinear dynamics of semiconductor lasers[J]. Optics Letters, 2019, 44(13): 3334-3337.
- [23] CHAN S C. Analysis of an optically injected semiconductor laser for microwave generation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(3): 421-428.
- [24] SIMPSON T B, LIU J M, HUANG K F, et al. Nonlinear dynamics induced by external optical injection in semiconductor lasers[J]. Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B, 1997, 9(5): 765-784.

作者简介



梁丁丁 男,1996年5月生,河南周口人.华东师范大学通信与电子工程学院博士研究生.主要研究方向为微波光子雷达.
E-mail: 51191214019@stu.ecnu.edu.cn



陈 阳(通讯作者) 男,1986年7月生,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.华东师范大学通信与电子工程学院教授、博士生导师.主要研究方向为微波光子学、光载无线系统.
E-mail: ychen@ce.ecnu.edu.cn