

## 多通道逆合成孔径激光雷达成像探测技术和实验研究

李道京<sup>1\*</sup>, 周凯<sup>1,2</sup>, 崔岸婧<sup>1,2</sup>, 乔明<sup>1</sup>, 吴淑梅<sup>1</sup>, 王烨菲<sup>3</sup>, 姚园<sup>3</sup>, 吴疆<sup>1,2</sup>, 高敬涵<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 合成孔径激光雷达是实现计算成像的一种重要途径。首先,介绍了多通道逆合成孔径激光雷达(ISAL)样机、成像探测实验及信号处理方法。然后,阐述了样机系统组成和关键技术解决途径。接着,利用基于一发多收脉冲体制和全光纤光路的相干激光雷达样机,给出了地面运动车辆目标的成像探测实验结果。最后,在收发扩束宽视场条件下,验证了多通道 ISAL 的高分辨率成像能力和顺轨干涉运动补偿成像方法的有效性。

**关键词** 成像系统; 逆合成孔径激光雷达; 相干成像; 干涉处理; 激光扩束; 运动补偿

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811017

## Multi-Channel Inverse Synthetic Aperture Ladar Imaging Detection Technology and Experimental Research

Li Daojing<sup>1\*</sup>, Zhou Kai<sup>1,2</sup>, Cui Anjing<sup>1,2</sup>, Qiao Ming<sup>1</sup>, Wu Shumei<sup>1</sup>, Wang Yefei<sup>3</sup>, Yao Yuan<sup>3</sup>, Wu Jiang<sup>1,2</sup>, Gao Jinghan<sup>1,2</sup><sup>1</sup>National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;<sup>3</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Synthetic aperture ladar is an important way to realize computational imaging. Firstly, a multi-channel inverse synthetic aperture ladar (ISAL) prototype, imaging detection experiment and signal processing method are introduced. Then, the composition of the prototype system and key technical solutions are described. Moreover, the experimental results of imaging detection of moving vehicle targets on ground are given by a coherent ladar prototype based on a one-transmit multiple-receive pulse system and an optical path with all fiber. Finally, under the wide view field conditions of expanding transmitting and receiving beams, the high-resolution imaging capabilities of multi-channel ISAL and the effectiveness of the along-track interferometry motion compensation imaging method are verified.

**Key words** imaging systems; inverse synthetic aperture ladar; coherent imaging; interference processing; laser beam expansion; motion compensation

**OCIS codes** 110.1758; 280.3640; 100.3175; 200.4560

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 中科院重点部署项目(E03701010F)

通信作者: \*lidj@mail.ie.ac.cn

## 1 引言

合成孔径成像包括雷达平台运动目标静止成像和雷达平台静止目标运动成像,后者通常称为逆合成孔径成像。两者均利用相对运动产生的大等效孔径来获得高横向分辨率,该横向分辨率的形成也可用信号在慢时间频域中的多普勒带宽来解释,其基本条件是信号具备高相干性,故合成孔径成像在原理上适用于微波、毫米波和激光信号。

激光信号相干性的提高已使合成孔径激光雷达(SAL,也称激光 SAR)和逆合成孔径激光雷达(ISAL,也称激光 ISAR)的技术实现成为可能。与合成孔径微波成像雷达技术的发展情况类似,SAL成像的研究工作也是从地基激光雷达对运动目标的 ISAL(激光 ISAR)成像<sup>[1]</sup>开始的。

ISAL 方面的研究工作一直在继续,其应用方向已经扩展到了对地球静止轨道(GEO)目标的成像观测。2013 年,美国国防部与 Raytheon 公司签订合同<sup>[2]</sup>,宣布由 Raytheon 公司来研制远距离成像激光雷达。该高功率激光雷达将被集成到 Maui 空间监视站上以对地球同步轨道目标进行 ISAL 成像。2018 年,美国报道了 EAGLE 计划中,工作在 GEO 的天基 ISAL 的成功发射,天基 ISAL 的发射再次表明了此项技术的重大意义。文献[3-6]也对 ISAL 开展了相关研究工作。

从原理上讲,SAL/ISAL 成像可在大前斜视角条件下以高数据率对远距离目标实现准前视高分

辨率成像。由于 SAL/ISAL 成像是基于相干探测的,在原理上可通过频域滤波提高 SAL/ISAL 的探测灵敏度,因此,二者的探测性能远优于目前的单光子探测器。故二者一直是近年来的研究热点<sup>[7-13]</sup>。

与传统的光学成像方式不同,SAL/ISAL 在距离-多普勒域的图像由计算机生成。由于二维图像中的一维在多普勒域,其成像质量易受到平台和目标振动及激光信号相干性的影响,因此平台和目标的振动抑制、激光信号的相干性保持一直是重点研究内容。基于全光纤光路和单元探测器实现宽视场激光收发高分辨率成像,也一直备受关注。研究人员已对上述问题展开了广泛的研究,但同时涉及系统设计和成像处理的研究工作不多,针对实际真实目标开展的实验研究也不多。因此,本文介绍了多通道逆合成孔径相干激光雷达样机的研制过程及其相关的成像探测实验。

## 2 样机组成与参数

相干激光雷达样机采用全光纤光路,中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ ,其被放置在通用三轴稳定平台上。为便于观测目标,实验中还配置了短波红外相机,其波段覆盖  $1.55 \mu\text{m}$ 。相干激光雷达样机系统如图 1 所示。在图 1(a)中,OMOS 为一发多收光学系统,LD 为激光器,TSP 为三轴稳定平台,SGSD 为信号生成与采集模块,IC 为红外相机,IPDI 为红外图像显示界面,HCCI 为主机控制界面。

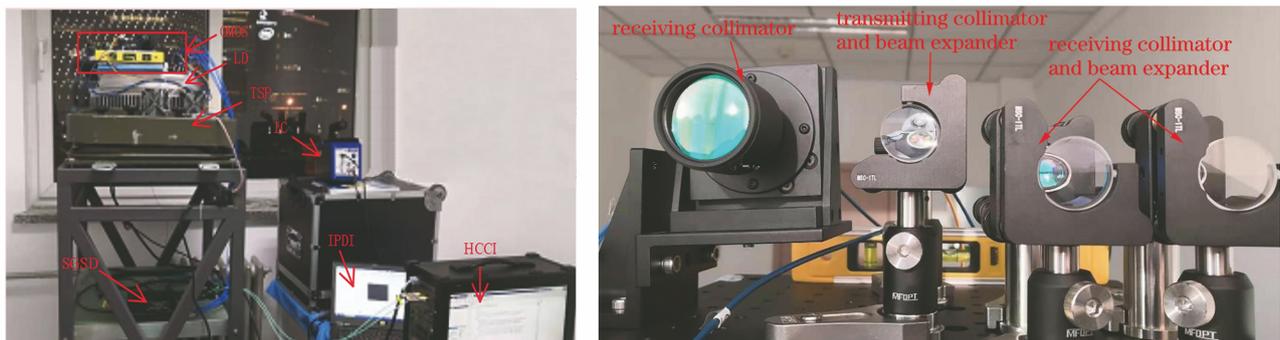


图 1 相干激光雷达样机系统。(a)样机实验照片;(b)光学系统照片

Fig. 1 System of coherent lidar prototype. (a) Experimental photo of prototype; (b) photo of optical system

样机主要由光学望远镜组、激光收发单元、信号产生和采集数字单元组成,系统设计方案与文献[14]相同,系统框图如图 2 所示。其中,AD 代表模拟转数字。

光学望远镜组包括 4 个接收光纤准直器和 1 个发射光纤准直器。此外,在光学望远镜组中配置二

阶相位柱面扩束镜,用于实现宽视场接收。激光收发单元主要由窄脉冲激光器、4 通道激光本振平衡探测器、发射和本振参考通道组成。

信号产生和采集数字单元的形式为移动服务器,主要用于系统脉冲的定时同步、窄脉冲调制电信号和基准频率电信号的产生,以及 4 通道回波信号、

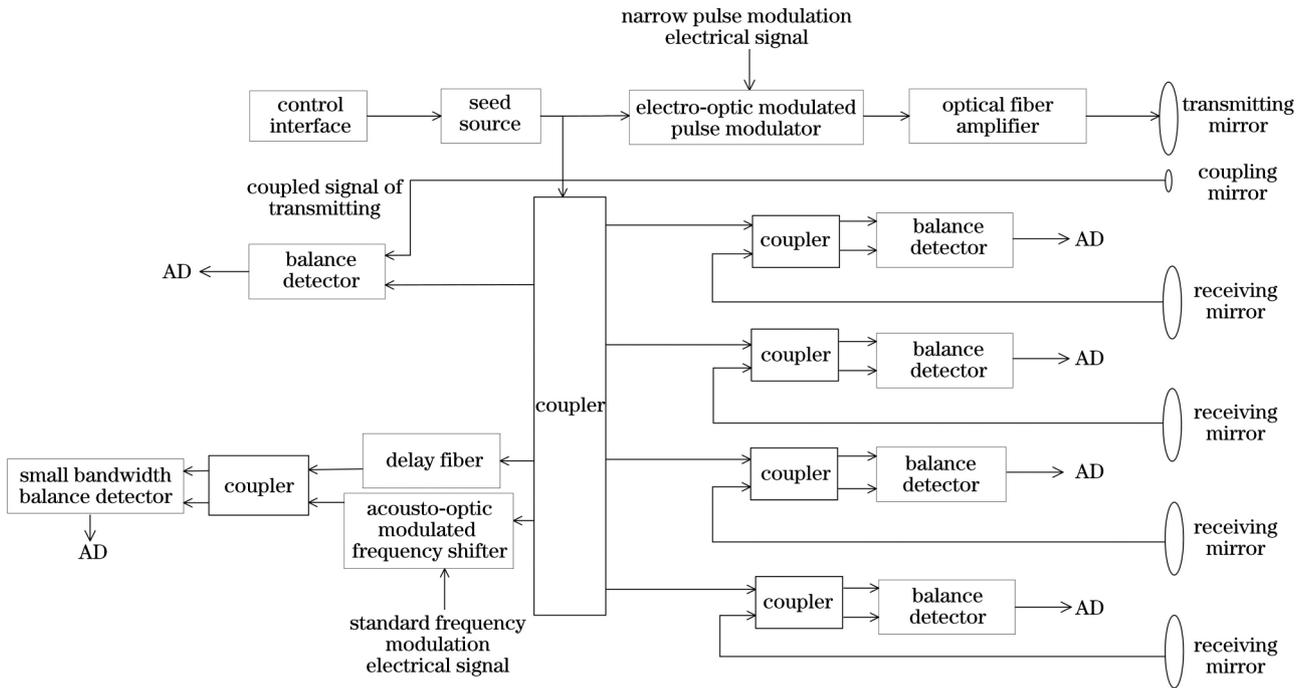


图 2 样机系统框图

Fig. 2 Block diagram of prototype system

发射和本振参考信号的采集,同时作为激光器控制上位机。样机系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 样机系统参数

Table 1 Parameters of prototype system

Parameter	Value	Parameter	Value
Wavelength	1.55 $\mu\text{m}$	Analog-to-digital quantization bit	12 bit
Average power	10 W	Analog-to-digital sampling rate	4 GS/s
Peak power	20 kW	Analog-to-digital channel number	6
Pulse Width	5 ns	Collimated transmit beam width	1.2 mrad
Pulse Repetition frequency	100 kHz	Collimated receive beam width	0.3 mrad
Adjustment range of wavelength	0.8 nm	Collimated beam diameter	7 mm
Line width of seed source	1 kHz	Pitch/azimuth beam expansion angle	1°
Standard frequency	100 MHz	Number of receiving echo channel	4 or 2(in this paper)
Coherent processing time	1.28-40.96 ms	Baseline length of along-track interferometry	2.5 cm

样机的脉冲宽度为 5 ns,其距离分辨率优于 0.8 m。为简化系统,将 4 通道回波信号和发射参考通道信号直接在基带混频,通过非正交单路采样的方式将模拟信号转换为数字信号,然后数字信号经希尔伯特变换后形成后续成像探测所需的复信号。

样机使用的平衡探测器内部集成有电阻值为 50  $\Omega$  的电阻,平衡探测器的输出信号即为电压信号,且后面可直接与射频放大器连接。样机的实际接收灵敏度测量分别是在平衡探测器后无射频放大器和有射频放大器条件下进行的。样机的成像探测

实验是在无射频放大器条件下进行的。

### 3 关键技术解决途径

#### 3.1 激光信号相干性保持

由于激光频率比微波频率高三个数量级以上,因此激光信号的相干性从原理上就比微波信号差。目前激光信号相干性的评价指标远不如微波信号完备,其评价指标主要为线宽。然而,激光信号的线宽在 kHz 量级,远大于微波信号的慢时频率分辨率,这严重制约了激光 SAR 对远距离目标的高分辨率

成像能力。

在本文的样机研制过程中,采用发射参考通道来校正大功率发射信号的相位误差<sup>[15]</sup>,同时采用本振参考通道来实现本振信号数字延时处理时激光相干性的保持<sup>[16]</sup>。

### 3.2 振动相位误差的估计与补偿

由于激光波长短至  $\mu\text{m}$  量级,因此雷达或目标  $\mu\text{m}$  量级的振动都会在激光 SAR/激光 ISAR 的回波信号中引入较大的振动相位误差,该误差会导致成像结果散焦。对激光覆盖波段而言,几乎任何目标表面都是粗糙的,难以存在孤立的强散射点,这使得传统的自聚焦方法缺乏使用条件。

在本文的样机研制过程中,采用顺轨干涉处理方法来估计振动相位误差并实施补偿<sup>[5, 17-19]</sup>,其基本思路是:首先,利用顺轨两通道信号的干涉相位来反演振动相位误差的梯度。接着,对振动相位误差的梯度进行积分以获得振动相位误差估计结果。最后,在振动相位误差估计结果的基础上实施相位补偿。本文用外视场中的多个望远镜来实现样机的多通道。

### 3.3 宽视场收发高分辨率成像

如何基于全光纤光路和单元探测器实现宽视场激光收发高分辨率成像,一直是讨论的热点问题。在文献<sup>[20]</sup>中,研究人员结合激光 SAR 成像特点,

提出了在光学系统中引入高阶相位的方法来实现宽视场成像。该方法的原理可用收发互易原理来解释。在本文设计的样机中,利用柱面镜向光学系统中引入二阶相位,进而在收发波束扩束条件下,实现了宽视场收发高分辨率成像。俯仰波束扩束可在条带成像方式下实现宽幅成像;方位波束扩束有利于实现宽视场子孔径高数据率成像。

## 4 实验和信号处理

### 4.1 接收灵敏度测量

在平衡探测器后无射频放大器的条件下,激光信号源输出的连续波信号(输出功率为 30 mW,约为 15 dBm)在经过光纤衰减器后进入激光接收单元。随后,经衰减后的连续波信号与激光本振信号在耦合器中进行混频并利用平衡探测器探测混频后的差频信号。接着,利用数字单元对差频信号进行 AD 采样,同时滤除直流以及杂波干扰。最后,利用快速傅里叶变换(FFT)来分析系统的接收灵敏度。该方法可同时检查 4 个接收通道的噪声电平。

图 3 为当输入信号衰减是 55 dB,差频约为 279.3 MHz 时,AD 采样信号及其信噪比(SNR)。当采样时宽为  $2 \mu\text{s}$  时,FFT 处理后的 SNR 约为 39 dB,对应的接收灵敏度约为  $-79 \text{ dBm}$ 。

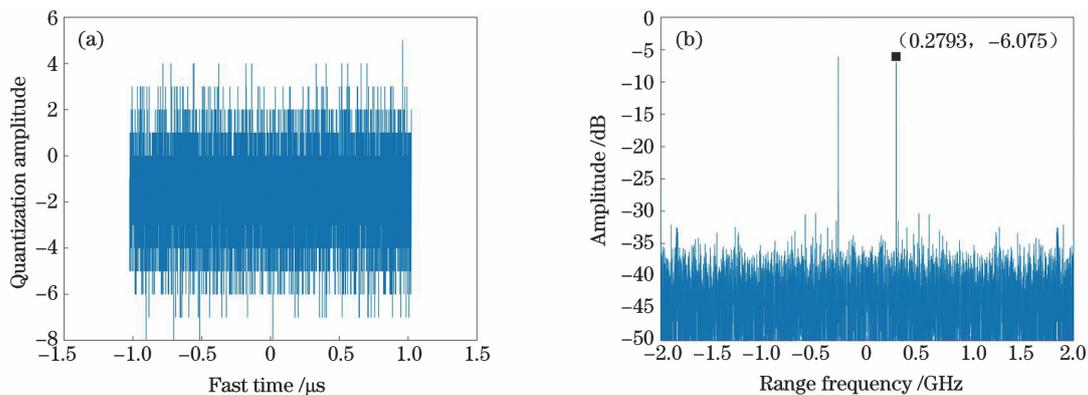


图 3 当输入信号衰减是 55 dB,差频约为 279.3 MHz 时,(a)AD 采样信号及(b)SNR

Fig. 3 (a) AD sampling signal and (b) SNR when attenuation of input signal is 55 dB and difference frequency is about 279.3 MHz

激光散粒噪声功率对应的接收灵敏度理论值 ( $P_s$ ) 的表达式为

$$P_s = h\nu B_s, \quad (1)$$

式中: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  为普朗克常数; $\nu$  为激光频率; $B_s$  为信号带宽。当激光波长  $\lambda$  为  $1.55 \mu\text{m}$ , 采样时宽为  $2 \mu\text{s}$  时, $B_s$  为 500 kHz。此时, $P_s$  为  $-102 \text{ dBm}$ 。

由于光电探测器的光电转换效率为 0.5(损失为

3dB),AD 输入端信号耦合损失为 7 dB、光缆电缆损失为 3 dB、电子学噪声系数为 3 dB 和非正交单路采样测试损失为 3dB,等效损失共计 19 dB,因此灵敏度实测值与理论值相差 4 dBm。

在平衡探测器后有射频放大器条件下,对接收灵敏度进行了测量,实测值与理论值相差 2 dBm,这在样机设计误差控制范围内。该测试表明,在 AD 前端设置射频放大器,对保证系统回波通道接收灵

敏度具有重要意义。

### 4.2 发射信号的相位误差校正

通过空间耦合的方式,利用发射参考通道采集并记录激光发射信号的时变相位,然后通过校正处

理的方式来保持信号的相干性。图 4 为发射信号和与激光雷达样机相距 86 m 处高反射率静止目标的回波信号中间相邻距离门信号的慢时相位曲线、相位差曲线以及解缠后的相位曲线。

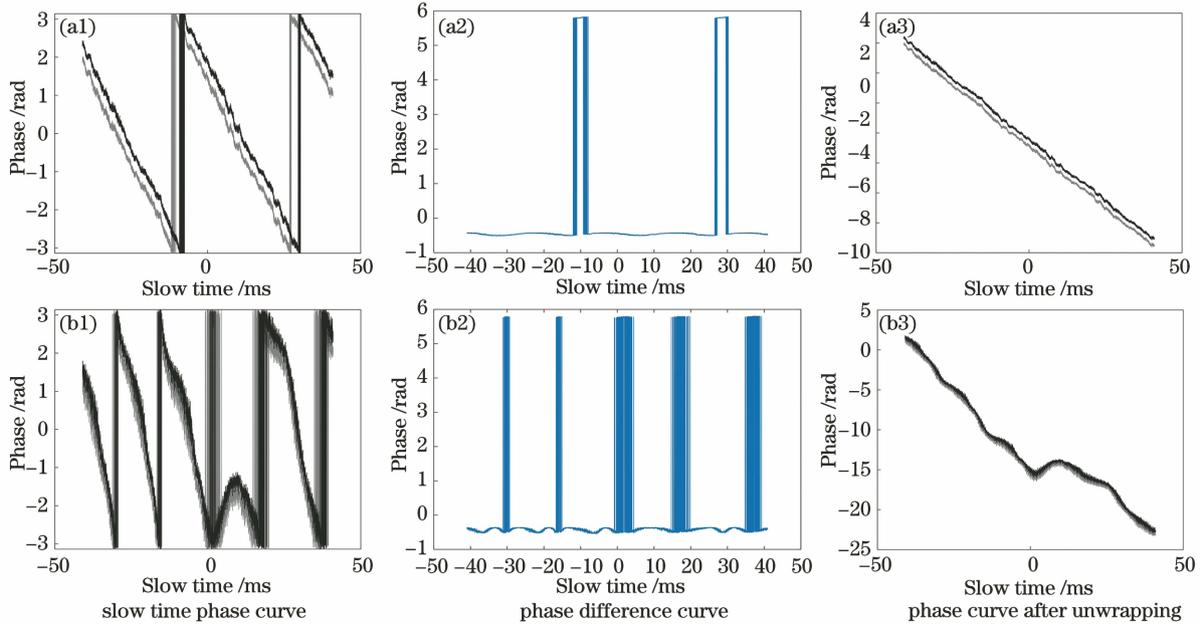


图 4 (a1)~(a3)发射信号和(b1)~(b3)静止目标的回波信号中间相邻距离门信号的相位曲线

Fig. 4 Phase curves of signals of adjacent range gates in middle of (a1)–(a3) emission signal and (b1)–(b3) echo signal of stationary target

从图 4 可以看出,发射信号的快时和慢时相位都存在非线性变化,这将影响系统信号的相干性和回波信号的成像性能。以发射信号构造匹配滤波器,将发射信号与回波信号都变换至快时间频域,两者共轭相乘后再反变换回快时域,由此可实

现发射信号的相位误差校正。一个距离门回波信号校正处理前后的慢时频谱和校正处理后的慢时相位变化曲线如图 5 所示。图 5(a)、(b)中标注点反映出了校正前后回波信号的 -3 dB 频谱宽度。

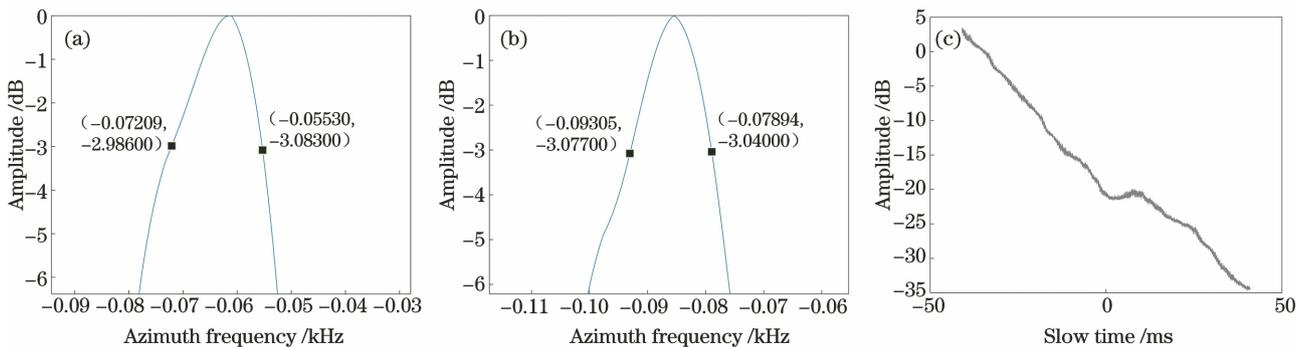


图 5 补偿前后距离门回波信号慢时频谱宽度和补偿后的相位变化曲线。(a)补偿前慢时频谱宽度;(b)补偿后慢时频谱宽度;(c)补偿后相位曲线

Fig. 5 Slow time spectrum widths of echo signal of range gate before and after compensation and phase curve after compensation. (a) Slow time spectrum width before compensation; (b) slow time spectrum width after compensation; (c) phase curve after compensation

从图 5(a)和(b)中可以看出,校正处理后,时宽为 81.92 ms 的回波信号的慢时频谱宽度从 17 Hz 变为 14 Hz。图 5(c)与图 4(b3)相比,该距离门信

号中大部分非线性相位被去除,信号的相干性得到改善。

此外,还测试了样机中设置的本振参考通道功

能,由于目标距离较近,本振参考通道的激光相干性保持作用尚不明显。

### 4.3 回波信号干涉处理

通过干涉处理可考察通道间的相干性,为后续

基于干涉处理的运动补偿提供支持。图 6 给出了与激光雷达样机相距 86 m 处高反射率静止目标的两通道回波的相干系数二维图、信号区域的相干系数直方图、干涉相位图。

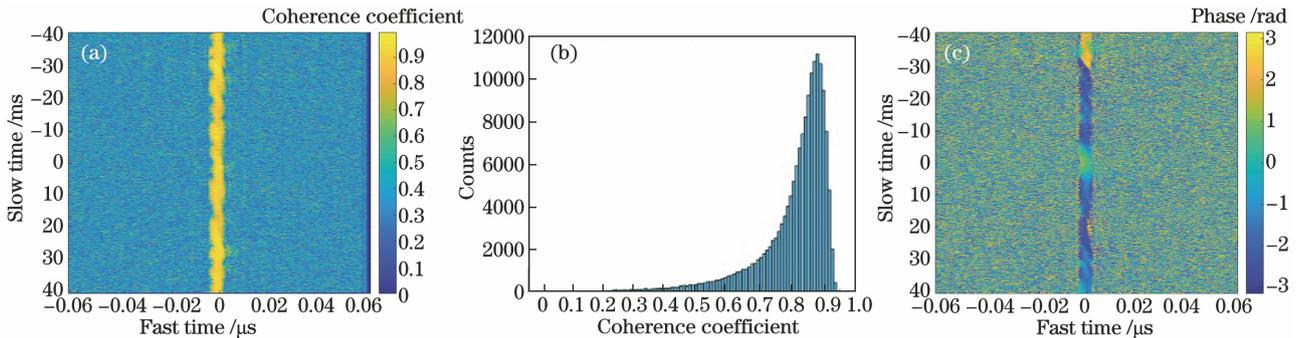


图 6 两通道回波的(a)相干系数图、(b)信号区域相干系数直方图和(c)干涉相位图

Fig. 6 (a) Coherence coefficient diagram, (b) coherence coefficient histogram of signal area and (c) interferometry phase diagram of two-channel echo

从图 6 中可以看出,两通道回波的相干系数较高,集中在 0.9 附近,且干涉相位在短时间内也较为稳定,这表明两通道回波具有较好的相干性。

### 4.4 合作运动目标成像

#### 4.4.1 在俯仰扩束条件下的合作运动目标成像

发射和接收俯仰波束扩束情况如图 7 所示。其中,图 7(a)为红外相机拍摄的激光器发射的波长为

1550 nm 激光光斑,图 7(b)为通过接收望远镜发射的波长为 650 nm 的可见红光光斑。

在收发俯仰扩束正侧视条件下,通过回波信号估计带有方位向宽约为 1.5 cm 的高反射率条(上下布设两行)的合作目标(小轿车)与样机的距离为 83 m,横向速度约为 8 m/s,样机方位波束覆盖宽度(实孔径分辨率)约为 5 cm。

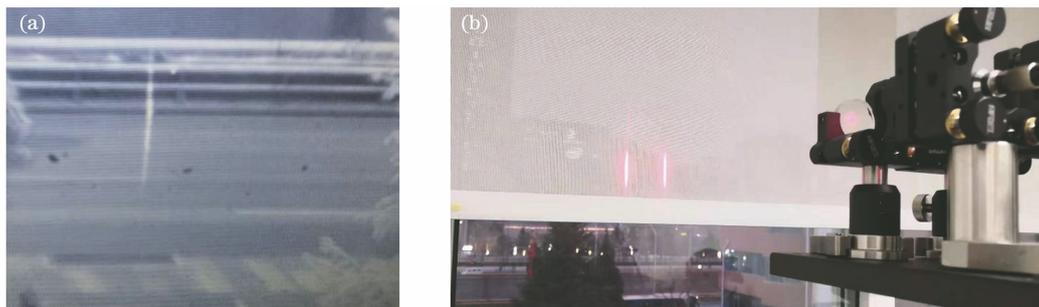


图 7 发射和接收俯仰波束扩束情况。(a)红外相机拍摄的激光器发射的波长为 1550 nm 的激光光斑;(b)通过接收望远镜发射的 650 nm 的可见红光光斑

Fig. 7 Expansion situations of emitting and receiving lateral beams. (a) Laser spot with wavelength of 1550 nm emitted by laser taken by infrared camera; (b) visible red light spot with wavelength of 650 nm emitted by laser emitted by receiving telescope

信号慢时调频率( $K$ )、慢时带宽( $B$ )和横向分辨率( $\rho_c$ )的表达式分别为

$$K = \frac{2V^2}{\lambda R}, \quad (2)$$

$$B = KT, \quad (3)$$

$$\rho_c = \frac{V}{B}, \quad (4)$$

式中: $V$  为目标横向速度; $\lambda$  为激光波长; $T$  为合成孔径时间; $R$  为目标斜距。

由(2)~(4)式可知,该目标信号慢时调频率为 995 kHz/s,当合成孔径时间为 5.12 ms 时,其横向分辨率在 2 mm 量级。按照 5.12 ms 的合成孔径时间间隔划分分子孔径,采用顺轨干涉处理<sup>[17-18]</sup>可估计目标运动引起的相位误差并对其补偿。

当慢时间时长为 163.84 ms(对应 16384 点)时,两通道目标回波信号和相位误差补偿前后用距离-多普勒成像算法获得的距离-方位单视图如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,两个通道处理结果从左到

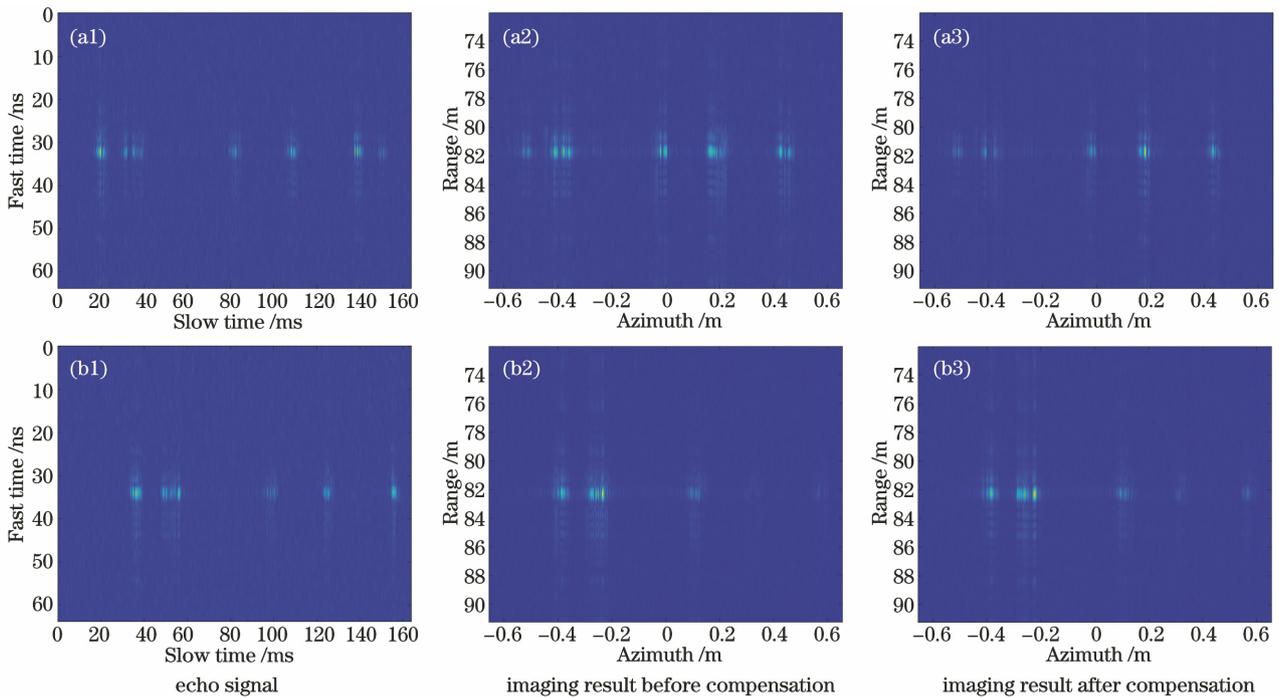


图 8 两通道目标回波信号图和相位误差补偿前后的两通道成像结果。(a1)~(a3)通道 1;(b1)~(b3)通道 2

Fig. 8 Diagrams of two-channel target echo signal and two-channel imaging results before and after phase error compensation. (a1)~(a3) Channel 1; (b1)~(b3) channel 2

右 6 个标注点对应间距分别为 10, 5, 36, 20, 26 cm, 其与实际小轿车上的高反射率条间隔和分布范围相符,位置误差最大为 1.4 cm。

图 9 为顺轨干涉处理估计的相位误差曲线和相位误差补偿前后的成像剖面。可以看出,相位误差补偿后,可得到聚焦良好的成像结果。

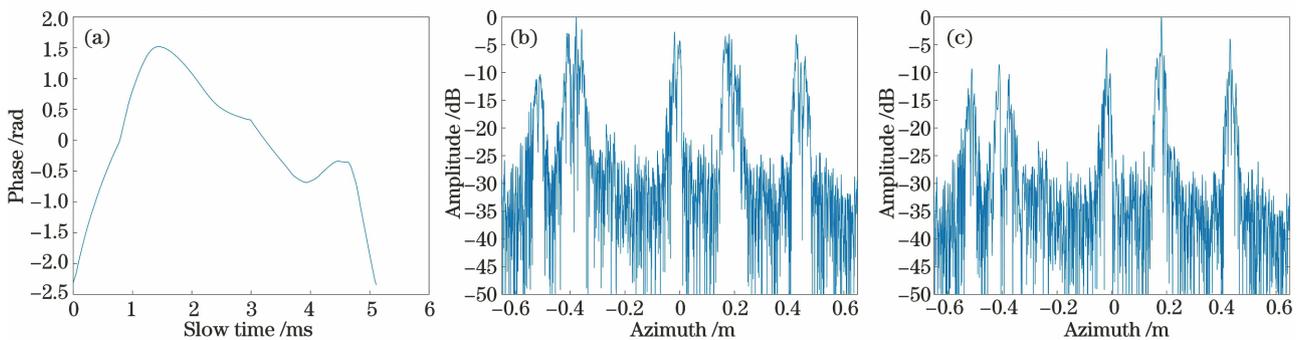


图 9 顺轨干涉处理估计的相位误差曲线和相位误差补偿前后的成像剖面。(a)顺轨干涉处理估计的相位误差曲线;(b)相位误差补偿前的成像剖面;(c)相位误差补偿后的成像剖面

Fig. 9 Phase error curve estimated by the along-track interferometry processing and imaging profiles before and after phase error compensation. (a) Phase error curve estimated by the along-track interferometry processing; (b) imaging profile before phase error compensation; (c) imaging profile after phase error compensation

#### 4.4.2 在方位扩束条件下的合作运动目标成像

在收发方位扩束正侧视条件下,通过回波信号估计带有高反射率条(单行)的合作目标(小轿车)与样机的距离为 83 m,横向速度为 3.7 m/s。在两通道中,采用慢时间去斜和时频分析结合的子孔径成像方法对一个距离门信号进行处理,该信号在距离-多普勒域(距离-方位频率域)的成像结果图 10

所示。

图 10 中相干处理时间为 81.92 ms(对应 8192 点),基于短时傅里叶变换的时频分析窗长为 128 点(对应时宽为 1.28 ms),信号慢时间调频率约为 200 kHz/s,方位向成像分辨率约为 1.4 cm。从时频分析结果可知,车辆目标自身的振动幅度为 10  $\mu\text{m}$ 量级,振动频率为 30 Hz 量级,表明车辆目标

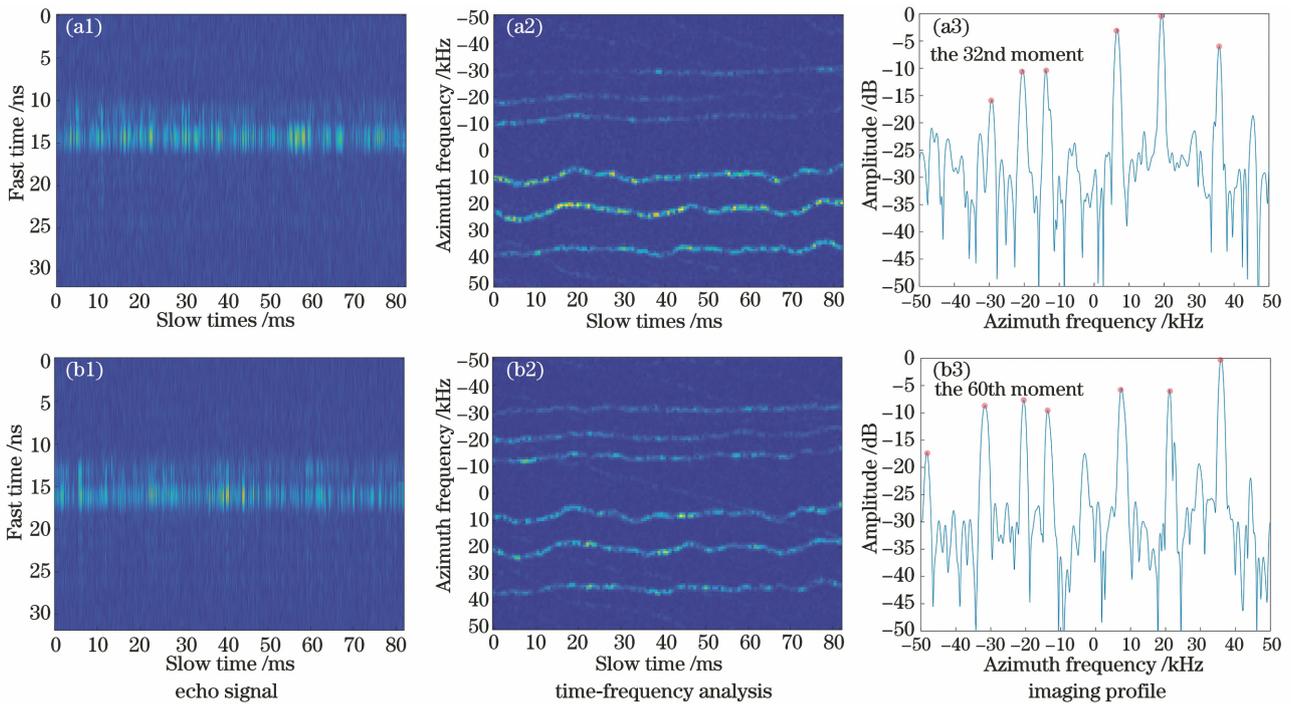


图 10 距离门的两通道信号的回波信号图、时频分析和成像剖面。(a1)~(a3)通道 1; (b1)~(b3)通道 2

Fig. 10 Diagrams of echo signals, time-frequency analyses and imaging profiles of two-channel signal at a range gate.

(a1)–(a3) Channel 1; (b1)–(b3) channel 2

并不是理想刚体。

从图 10(a3)、(b3)中标出的圆点可以发现,通道 1 处理结果从左到右 6 个标注点对应间距分别为 10, 5, 36, 20, 26 cm。通道 2 处理结果从左到右 7 个标注点对应间距分别为 46, 10, 5, 36, 20, 26 cm, 分布范围约 1.5 m, 与实际小轿车上的高反射率条间

隔和分布范围相符。

从图 10 的两通道信号中截取时长为 20.48 ms 的两通道信号并进行粗补偿, 采用顺轨干涉处理估计运动车辆的回波信号的相位误差并对通道 2 信号实施补偿, 基于窗长为 128 点的时频分析获得的距离-多普勒域成像结果如图 11 所示。

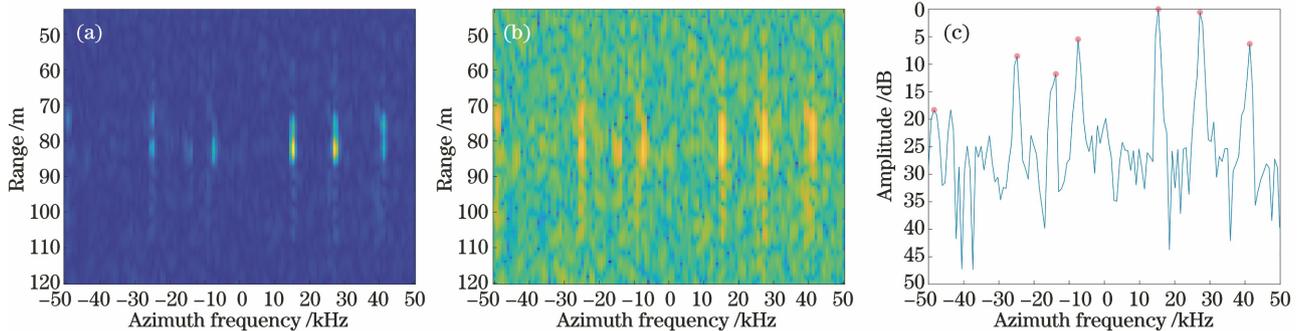


图 11 基于顺轨干涉处理运动补偿和时频分析获得的通道 2 的信号的距离-多普勒域成像结果。(a) 成像结果;

(b) 取对数后的成像结果; (c) 第 68 时刻的成像剖面

Fig. 11 Range-Doppler domain imaging results of signal of channel 2 obtained by motion compensation based on along-track interferometry processing and time-frequency analysis. (a) Imaging result; (b) imaging result after taking logarithm; (c) imaging profile at the 68th moment

#### 4.5 非合作运动目标探测

在收发非扩束条件下, 对非合作车辆目标进行了前斜视探测实验。通过回波信号估计车辆目标和样机的距离为 165 m (与发射波束宽度对应的光斑尺寸

为 20 cm, 与接收波束宽度对应的光斑尺寸为 5 cm), 运动速度约 8.5 m/s (横向运动速度约为 4 m/s, 径向运动速度约为 7.43 m/s), 前斜视角约为 62°。在 40.96 ms 相干处理时间内, 目标存在约 8 个距离门的

距离向走动,信号慢时间调频率约为 125 kHz/s。

如图 12 所示,回波信号 SNR 约为 6 dB,从经距离徙动校正和聚焦处理后的信号在距离-多普勒

域的成像结果可知,4096 个脉冲信号经相干成像处理使目标 SNR 提升至约 40 dB,其横向成像分辨率远优于 1 cm。

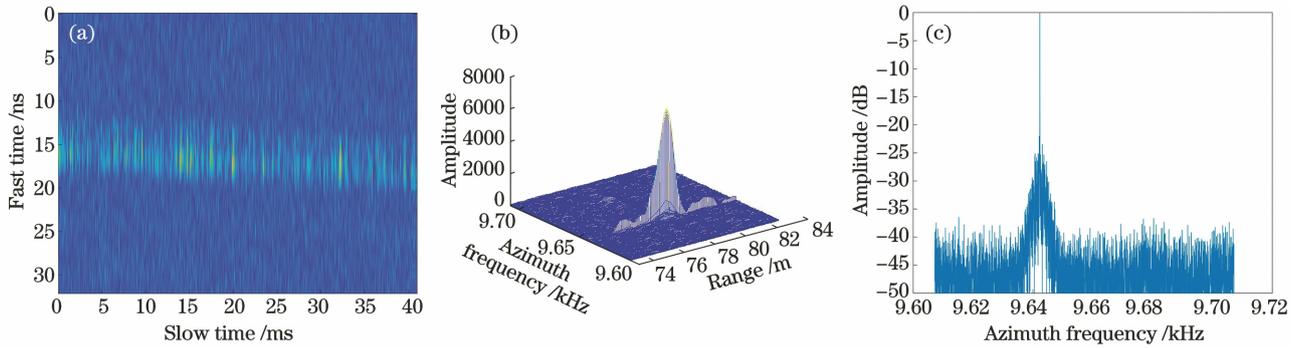


图 12 非合作运动目标的回波信号和距离-多普勒域成像处理结果。(a)回波信号;(b)距离-多普勒域成像结果;(c)多普勒频域中峰值 SNR

Fig. 12 Echo signal and Range-Doppler domain imaging processing result of uncooperative moving target. (a) Echo signal; (b) Range-Doppler domain imaging result; (c) peak SNR in Doppler frequency domain

通过多脉冲积累可提高非合作运动目标探测 SNR,通过直接探测的方式可实现非相干积累,通过相干探测的方式可实现相干积累。当脉冲数为  $N$  时,相干积累和非相干积累能将 SNR 分别提高  $N$  倍和  $\sqrt{N}$  倍。由于目前的单光子探测器在本质上还是直接探测器,因此在此基础上形成的光子计数探测方法,仍属于一种非相干积累方式,这可用基于微波雷达的二进制检测<sup>[21]</sup>方法予以解释。

对图 12 中的回波信号先做取幅处理(等效包络检波直接探测),然后在慢时域中对取幅后的信号进行 FFT 处理,即可等效实现直接探测下的多脉冲非相干积累,在距离-多普勒域处理结果,如图 13 所示。可以发现,非相干积累后的目标 SNR 提高到 24 dB。这表明通过频域滤波的方式可以提高基于激光本振的相干探测和相干成像处理的灵敏度,进而相干系统的探测性能远优于单光子探测器。

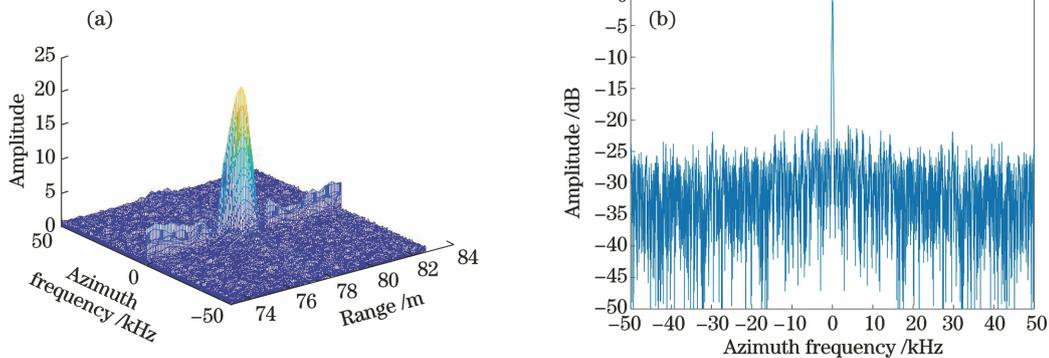


图 13 在距离-多普勒域中的非相干积累结果。(a)距离-多普勒域处理结果;(b)多普勒频域中峰值 SNR

Fig. 13 Incoherent accumulation results in Range-Doppler domain. (a) Range-Doppler domain processing result; (b) peak SNR in Doppler frequency domain

#### 4.6 距离向压缩感知超分辨处理

##### 4.6.1 距离-方位图像处理

俯仰扩束条件下的回波信号经过顺轨干涉运动补偿后的成像结果如图 8 (a3)和(b3)所示,发射信号脉宽为 5 ns,原成像结果的距离向分辨率约为 80 cm。通过构建冗余字典,对该成像结果进行距离向压缩感知超分辨<sup>[22]</sup>操作,提高一倍分辨率后,其超分辨结果如图 14 所示。可以发现,超分辨处理

使距离向分辨率优于 40 cm。与此同时,其距离向的副瓣和其他干扰也大幅减少。

##### 4.6.2 距离-多普勒图像处理

对图 11 的距离-多普勒图像做距离向压缩感知超分辨处理,提高一倍分辨率后,其结果如图 15 所示。显然,除最右侧标注点距离向有部分错位外,图像距离分辨率有明显提高。

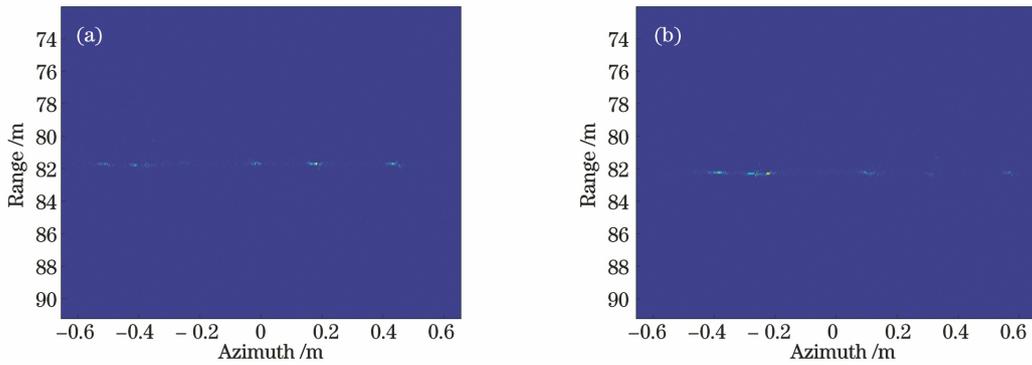


图 14 距离-方位图像的距离超分辨处理结果。(a)通道 1;(b)通道 2

Fig. 14 Range super-resolution processing results of range-azimuth image. (a) Channel 1; (b) channel 2

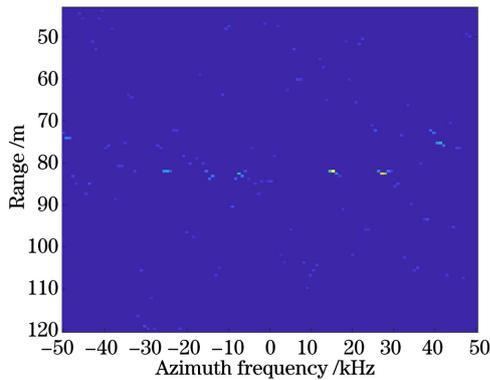


图 15 距离-多普勒图像距离超分辨结果

Fig. 15 Range super-resolution result of range-Doppler image

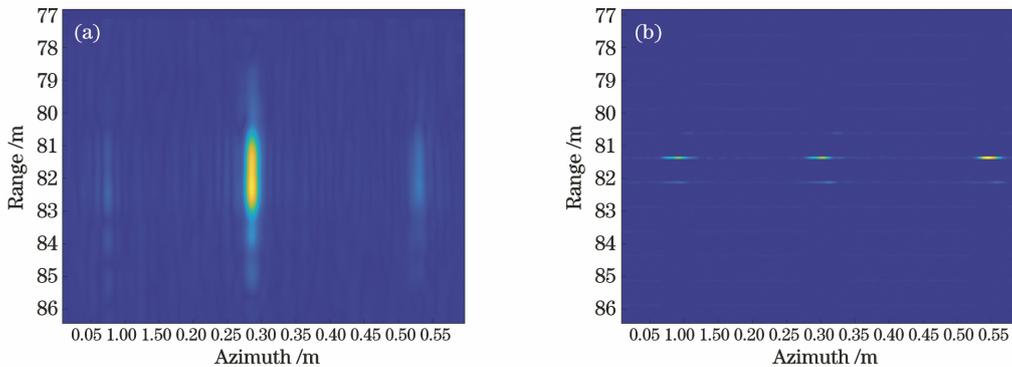


图 16 回波的距离超分辨结果。(a) 未经距离超分辨处理的成像结果;(b) 经距离超分辨处理的成像结果

Fig. 16 Range super-resolution results of echo signal. (a) Image result without range super-resolution processing;

(b) image result with range super-resolution processing

合成孔径相干激光成像方位分辨率在 1 cm 量级,但距离分辨率较低,约为 80 cm。采用压缩感知方法,在距离向做超分辨处理使成像结果的距离向分辨率优于 40 cm。下一步将采用脉冲压缩技术,将系统的距离分辨率提高至 cm 量级。此外,在本次实验中,双通道干涉是通过外视场 2 个望远镜来实现的,由于干涉基线较长,因此目标运动相位误差估计和补偿中的信号配准过程较为复杂。下一步将选

#### 4.6.3 回波距离超分辨处理

截取图 8 通道 1 图像对应的部分数据,经距离向压缩感知超分辨<sup>[23-24]</sup>处理,提高一倍分辨率后,用距离-多普勒算法获得的成像结果如图 16(b)所示。从左到右有三个方位间距为 20 cm 和 26 cm 的标注点。与图 16(a)相比,显然,超分辨提高了距离分辨率。

## 5 结 论

介绍了多通道相干激光雷达样机和逆合成孔径成像探测实验,并验证了相干激光的高分辨率成像能力以及顺轨干涉运动补偿成像方法的有效性。逆

用口径为 10 cm 的衍射光学系统,且使用内视场短基线干涉对远距运动目标进行成像探测。

致谢 感谢上海科乃特激光科技有限公司和北京耐数信息有限公司对本文样机研制工作的支持和帮助。感谢中国科学院空天信息创新研究院吴谨研究员、宋子奇和王然副研究员对本文样机试验工作的支持和帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Gschwendtner A B, Keicher W E. Development of coherent laser radar at lincoln laboratory[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 383-394.
- [2] U.S. Department of Defense. Contracts [EB/OL]. <http://archive.defense.gov/Contracts/Contract.aspx?ContractID=5140>.
- [3] Li D J, Du J B, Ma M, et al. System analysis of spaceborne synthetic aperture lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1130002.  
李道京, 杜剑波, 马萌, 等. 天基合成孔径激光雷达系统分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1130002.
- [4] Hu X, Li D J, Fu H C, et al. System analysis of ground-based inverse synthetic aperture lidar for geosynchronous orbit object imaging[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0601003.  
胡焯, 李道京, 付瀚初, 等. 地球同步轨道空间目标地基逆合成孔径激光雷达系统分析[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0601003.
- [5] Hu X, Li D J. Vibration phases estimation based on multi-channel interferometry for ISAL[J]. Applied Optics, 2018, 57(22): 6481-6490.
- [6] Hu X, Li D J, Du J B. Image processing for GEO object with 3D rotation based on ground-based InISAL with orthogonal baselines [J]. Applied Optics, 2019, 58(15): 3974-3985.
- [7] Barber Z W, Dahl J R. Synthetic aperture lidar imaging demonstrations and information at very low return levels[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5531-5537.
- [8] Crouch S, Barber Z W. Laboratory demonstrations of interferometric and spotlight synthetic aperture lidar techniques [J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24237-24246.
- [9] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C] // CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications, May 1-6, 2011, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1-2.
- [10] Li G Z, Wang N, Wang R, et al. Imaging method for airborne SAL data[J]. Electronics Letters, 2017, 53(5): 351-353.
- [11] Lu Z Y, Zhou Y, Sun J F, et al. Airborne down-looking synthetic aperture imaging lidar field experiment and its flight testing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110001.  
卢智勇, 周煜, 孙建峰, 等. 机载直视合成孔径激光成像雷达外场及飞行实验[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110001.
- [12] Li G Y, Lu Z Y, Zhou Y, et al. Outdoor experiment of down-looking inverse synthetic aperture imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0401001.  
李光远, 卢智勇, 周煜, 等. 直视逆合成孔径激光成像雷达外场实验[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0401001.
- [13] Wu J. On the development of synthetic aperture lidar imaging[J]. Journal of Radars, 2012, 1(4): 353-360.  
吴谨. 关于合成孔径激光雷达成像研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 353-360.
- [14] Li D J, Hu X, Zhou K, et al. Synthetic aperture lidar imaging detection based on conformal diffractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0428001.  
李道京, 胡焯, 周凯, 等. 基于共形衍射光学系统的合成孔径激光雷达成像探测[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0428001.
- [15] Li D J, Zhang Q J, Liu B, et al. Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. Journal of Radars, 2013, 2(2): 143-151.  
李道京, 张清娟, 刘波, 等. 机载合成孔径激光雷达关键技术和实现方案分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 143-151.
- [16] Hu X, Li D J, Zhao X F. Maintaining method of signal coherence in synthetic aperture lidar based on local oscillator digital delay[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510003.  
胡焯, 李道京, 赵绪锋. 基于本振数字延时的合成孔径激光雷达信号相干性保持方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510003.
- [17] Ma M, Li D J, Du J B. Imaging of airborne synthetic aperture lidar under platform vibration condition[J]. Journal of Radars, 2014, 3(5): 591-602.  
马萌, 李道京, 杜剑波. 振动条件下机载合成孔径激光雷达成像处理[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 591-602.
- [18] Du J B, Li D J, Ma M, et al. Vibration estimation and imaging of airborne synthetic aperture lidar based on interferometry processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910003.  
杜剑波, 李道京, 马萌, 等. 基于干涉处理的机载合成孔径激光雷达振动估计和成像[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910003.
- [19] Zhao Z L, Wu J, Wang H T, et al. Experimental demonstration of differential synthetic aperture lidar imaging at very low return level [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 276-283.  
赵志龙, 吴谨, 王海涛, 等. 微弱回波条件下差分合成孔径激光雷达成像实验演示[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 276-283.

- [20] Li D J, Hu X. Optical system and detection range analysis of synthetic aperture ladar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 263-274.  
李道京, 胡焜. 合成孔径激光雷达光学系统和作用距离分析[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 263-274.
- [21] Sklonik M I. Introduction to radar systems[M]. Lin M Y, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1992: 325-326.  
Sklonik M I. 雷达系统导论[M]. 林茂庸, 译. 北京: 国防工业出版社, 1992: 325-326.
- [22] Wang G, Zhou R F, Zou Y K. Research on image optimization technology based on compressed sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2020, 42(1): 222-233.  
王钢, 周若飞, 邹映琨. 基于压缩感知理论的图像优化技术[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 222-233.
- [23] Li L C, Li D J, Zhang Q J. Three-aperture millimeter-wave SAR side-looking three-dimensional imaging based on compressed sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(3): 552-558.  
李烈辰, 李道京, 张清娟. 基于压缩感知的三孔径毫米波合成孔径雷达侧视三维成像[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 552-558.
- [24] Chen C. Research of two-dimensional compressive sensing based high-resolution SAR imaging [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.  
陈超. 基于二维压缩感知的高分辨 SAR 成像研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.