

激光雷达信号相位误差对合成孔径成像的影响和校正

胡 焯^{1,2}, 李道京¹, 田 鹤^{1,2}, 赵绪锋^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所 微波成像技术重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对合成孔径激光雷达(Synthetic Aperture Ladar, SAL), 分析了信号相位误差对合成孔径成像的影响。建立了激光信号模型, 分析了激光信号相干性对 SAL 方位分辨率的影响, 给出通过本振信号延时处理保证相干性的解决方案。分析了 LFM 信号非线性失真对距离分辨率的影响, 为同时解决激光 LFM 信号调制放大过程引入的脉冲间随机初相位问题, 提出一种基于参考通道的 LFM 信号非线性失真和脉冲间随机初相位定标校正方法。给出了实验和仿真数据处理结果。

关键词: 信号相干性; 相位误差; 合成孔径成像; 激光雷达; 非线性失真; 定标校正
中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0306001

Impact and correction of phase error in ladar signal on synthetic aperture imaging

Hu Xuan^{1,2}, Li Daojing¹, Tian He^{1,2}, Zhao Xufeng^{1,2}

(1. Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Specific to synthetic aperture ladar(SAL), the impact of signal phase error on synthetic aperture imaging was analyzed. Laser signal was modeled, the impact of laser signal coherence on SAL azimuthal resolution was analyzed, one solution by delaying the local oscillator signal was proposed. The impact of nonlinear distortion in LFM signal on range resolution was analyzed. To solve the problem of the random initial phase error introduced in the process of laser LFM signal modulation and amplification, one nonlinear distortion and phase error calibration correction method based on reference channel was proposed. Experiment and simulation results are shown.

Key words: signal coherence; phase error; synthetic aperture imaging; ladar; nonlinear distortion; calibration correction

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61771449)

作者简介: 胡焯(1992-), 男, 博士生, 主要从事雷达信号处理方面的研究。Email: m18700476546@163.com

导师简介: 李道京(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事雷达系统和雷达信号处理方面的研究。Email: lidj@mail.ie.ac.cn

0 引言

激光信号相干性的提高,使 SAL 成像成为可能。SAL 可看作合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 在激光频段的应用形式,其通过对宽带激光信号进行脉冲压缩获取斜距维高分辨率,通过合成孔径技术获取方位维高分辨率^[1-3]。

激光频率比微波频率高三个数量级以上,相对微波信号,激光信号的相干性从原理上就较差^[4]。目前激光信号相干性的评价指标远不如微波信号完备,主要为线宽且其数值在 kHz 量级,远大于微波信号的慢时频率分辨率,这使 SAL 高分辨率成像能力具有不确定性。

SAL 的宽带激光信号的调制形式可选为线性调频 (Line Frequency Modulated, LFM),其可通过激光信号源内调制直接产生,也可通过光电调制器件将宽带微波 LFM 信号外调制到激光信号上实现^[5-6]。无论通过何种方式实现,激光 LFM 信号都存在非线性失真,且在调制放大过程中会引入脉冲间随机初相位,这将严重影响 SAL 的成像能力。

从原理上讲,激光信号相干性问题,激光 LFM 信号的非线性失真以及脉冲间随机初相位问题,都可归类为激光雷达信号的相位误差问题,文中分析其对合成孔径成像的影响并给出校正方案。

1 激光信号模型及相干性分析

1.1 激光信号模型及参数

理想的激光信号为频率稳定的单频信号,真实的激光信号的频率在其标称的中心频率附近时变,由于随机频率和随机相位的影响^[7-8],其时变的瞬时谱较宽,文中假定激光信号的频率变化形式为正弦,容易表征其中心频率的时变特征,这也是微波信号描述频率稳定度的常用模型,中心频率正弦变化的幅度和频率受信号产生机理、功率大小、工作环境等因素的影响^[6-7]。

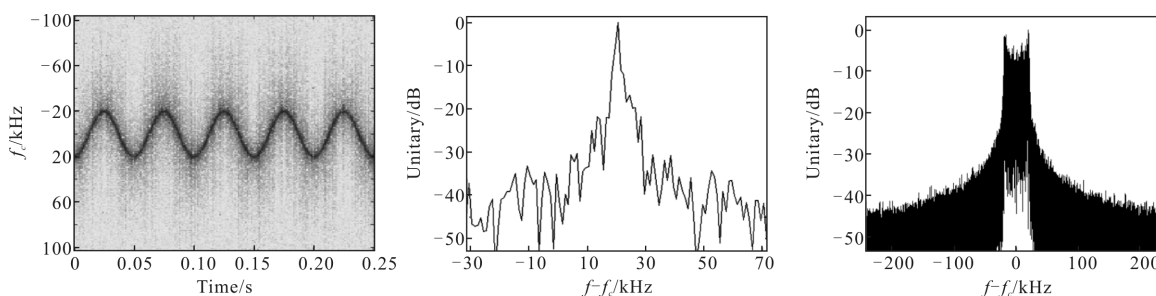
文中对激光信号建立如下模型:

$$s(t) = \exp\{j \cdot [2\pi \int (f_c + A_f \cdot \sin(2\pi f_f t)) dt + 2\pi \int f_r(t) dt + \phi_r(t)]\} \quad (1)$$

式中: $f_c + A_f \cdot \sin(2\pi f_f t)$ 为正弦变化的信号频率; f_c 为信号中心频率的标称值; A_f, f_f 分别为信号频率正弦变化的幅度和频率; $f_r(t) \in N(0, \sigma_{fr}^2)$ 为高斯分布的随机频率; $\phi_r(t) \in N(0, \sigma_{\phi_r}^2)$ 为高斯分布的随机相位。

上述模型参数为,信号频率正弦变化的幅度 A_f , 信号频率正弦变化的频率 f_f , 随机频率的标准差 σ_{fr} , 随机相位的标准差 σ_{ϕ_r} 。

此节仿真了一个时长 200 ms 的激光信号: $A_f = 20$ kHz, $f_f = 20$ Hz, $\sigma_{fr} = 25$ kHz, $\sigma_{\phi_r} = 0.1$ rad。图 1(a) 为其



(a) 时频分析结果 (a) Result of time-frequency analysis
(b) 时频分析剖面 (b) Profile of time-frequency analysis
(c) 频谱 (c) Spectrum

图 1 激光信号频谱特性

Fig.1 Frequency spectrum characters of laser signal

时频分析结果;图 1(b)为其时频分析结果在 48 ms 的剖面图,瞬时谱宽约 1 kHz 量级;图 1(c)为其频谱,频谱宽度约 50 kHz。

1.2 激光信号相干性测试方法

目前主要采用自外差实验测试激光信号的相干性^[9-10],其实验框图如图 2 所示。

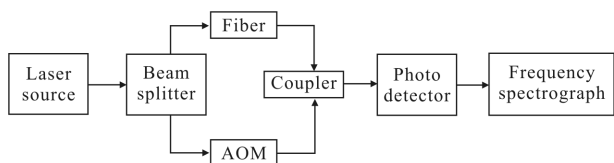


图 2 激光信号自外差实验框图

Fig.2 Block diagram of self-heterodyne experiment for laser signal

激光信号经过分束器分成两路信号，其中一路经过延时光纤，另一路经过 AOM 移频器，两路信号耦合后在光电探测器上差拍，差拍后的信号接入频谱仪。通常 AOM 移频器的频移为 150 MHz，移频的目的是使差拍后的信号与直流分离，便于使用频谱仪对其进行观测。

目前评价激光信号相干性的主要参数为线宽 Δf ，其定义为激光信号瞬时光谱的 -3 dB 宽度。由于光谱仪的频率分辨率低，不足以对激光信号线宽进行测量，通常通过激光信号自外差处理转化成的电信号以后，用微波频谱仪观测，并用电信号的 -3 dB 频谱宽度对其线宽进行表征，自外差处理中的延时可根据光源的相干性进行调整，对于 kHz 量级的窄线宽激光器，激光信号自外差处理的延时长度通常设置为 25 km^[9]。

与线宽对应的参数为相干长度：

$$R_{coh} = \frac{C}{\Delta f} \quad (2)$$

式中： C 为光速。激光种子源信号的线宽在 1 kHz 量级，对应的相干长度为 300 km。相干长度仅是能够实现激光相干探测的极限长度，由于合成孔径成像分辨率对峰值旁瓣比与积分旁瓣比等参数有严格要求，并不意味着对相干长度内的目标进行激光合成孔径成像都能达到其理论分辨率。

根据文中信号模型，经过 AOM 移频器的信号为：

$$s_1(t) = \exp\{j \cdot [2\pi \int (f_c + f_{mid} + A_F \cdot \sin(2\pi f_f t)) dt + 2\pi \int f_r(t) dt + \phi_r(t)]\} \quad (3)$$

式中： f_{mid} 为 AOM 移频器的频移。

经过光纤延时的信号为：

$$s_2(t) = \exp\{j \cdot [2\pi f_c \left(t - \frac{R}{C}\right) + 2\pi \int A_F \cdot \sin\left(2\pi f_f \left(t - \frac{R}{C}\right)\right) dt + 2\pi \int f_r \left(t - \frac{R}{C}\right) dt + \phi_r \left(t - \frac{R}{C}\right)]\} \quad (4)$$

式中： R 为延时光纤的长度。

在光电探测器上差拍后的信号为：

$$s_h(t) = s_1(t) \cdot s_2^*(t) = \exp\{j \cdot [2\pi f_c \frac{R}{C} + 2\pi f_{mid} t + 2\pi \int A_F \cdot \left(\sin(2\pi f_f t) - \sin\left(2\pi f_f \left(t - \frac{R}{C}\right)\right)\right) dt + 2\pi \int \left(f_r(t) - f_r \left(t - \frac{R}{C}\right)\right) dt + \left(\phi_r(t) - \phi_r \left(t - \frac{R}{C}\right)\right)]\} \quad (5)$$

令 $f_r'(t) = f_r(t) - f_r(t - R/C)$ 为差拍后信号的随机频率，则有 $f_r'(t) \in N(0, \sigma_{fr}^2)$ ，其高斯分布的均值和标准差与 $f_r(t)$ 一致；令 $\phi_r'(t) = \phi_r(t) - \phi_r(t - R/C)$ ， $\phi_r'(t) \in N(0, \sigma_{br}^2)$ 为差拍后信号的随机相位，其高斯分布的均值和标准差与 $\phi_r(t)$ 一致；公式(5)可化简为：

$$s_h(t) = \exp\{j \cdot [2\pi f_c \frac{R}{C} + 2\pi f_{mid} t + 2\pi \int f_r'(t) dt + \phi_r'(t) + 2\pi \int A_F \cdot \sqrt{2 - 2\cos\left(2\pi f_f \frac{R}{C}\right)} \cdot \sin(2\pi f_f t + \varphi_0) dt]\} \quad (6)$$

不考虑随机相位的影响，由公式(6)可得差拍后信号的频率为：

$$f_h(t) = f_{mid} + f_r'(t) + A_F \cdot \sqrt{2 - 2\cos\left(2\pi f_f \frac{R}{C}\right)} \cdot \sin(2\pi f_f t + \varphi_0) \quad (7)$$

公式(7)表明，差拍后信号的频率仍然正弦变化。假定信号时长超过一个正弦变化周期，差拍后信号的频谱中，可用于相干探测的期望信号的频谱宽度展宽为：

$$\Delta f_h = 2A_F \cdot \sqrt{2 - 2\cos\left(2\pi f_f \frac{R}{C}\right)} \quad (8)$$

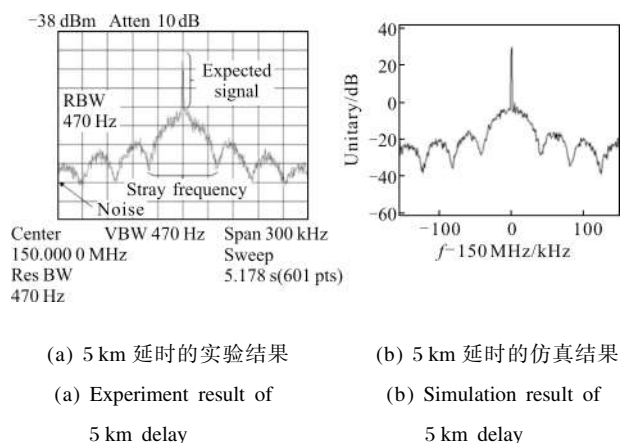
在 $f_f \cdot R/C \leq 0.5$ 的情况下， $\Delta f_h \propto A_F, f_f, R$ 说明激光信号频率正弦变化的幅度与频率 A_F, f_f 以及自外差实验的延时长度 R 越小，激光信号的相干性越好。

高斯分布的随机频率会导致差拍后信号的频谱中出现强度呈高斯分布的杂散频率分量，随机频率高斯分布的标准差 ϕ_{br} 越小，该杂散频率分量的强度越小，激光信号的相干性越好。

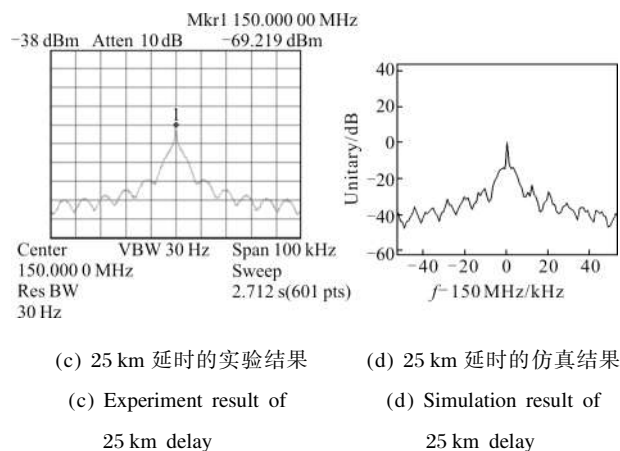
根据文中信号模型，当随机相位标准差较小时，对公式(8)所示频谱宽度的影响相对较小，实际数据的分析结果也表明其随机相位的变化范围较小。为简化频谱宽度的分析过程，在由公式(6)推导公式(7)的过程中忽略了随机相位。事实上，随机相位将影响差拍后信号频谱中的远区噪声电平，随机相位的标准差越小，远区噪声电平越小，激光信号的相干性越好^[11-18]。

1.3 实验与仿真结果

波长 1.55 μm 的 4 mW 激光种子源信号自外差实验结果如图 3(a)与图 3(c)所示,延时分别为 5 km 和 25 km,信号时长分别为 2 ms 和 33 ms,图 3(b)与图 3(d)分别给出了对应的仿真结果,激光信号参数与图 1 所示激光信号的仿真参数相同: $A_F=20$ kHz, $f_r=20$ Hz, $\sigma_{fi}=25$ kHz, $\sigma_{\phi r}=0.1$ rad。



(a) 5 km 延时的实验结果 (a) Experiment result of 5 km delay
(b) 5 km 延时的仿真结果 (b) Simulation result of 5 km delay



(c) 25 km 延时的实验结果 (c) Experiment result of 25 km delay
(d) 25 km 延时的仿真结果 (d) Simulation result of 25 km delay

图 3 激光种子源信号自外差实验结果与仿真结果

Fig.3 Experiment results and simulation results of seed laser signal self-heterodyne

图 3 中实验结果和仿真结果的频谱形态一致,且频谱的基本要素:中心频率、带宽、杂散、噪声电平、频率范围等均基本一致,验证了 1.1 节建立的激光信号模型的有效性,且说明激光种子源信号参数与仿真参数基本一致。实验结果显示,4 mW 激光种子源信号的线宽约 1 kHz。

对比图 3(a)与图 3(c),在信号时长增加约 16 倍的情况下,延时从 5 km 增加到 25 km,可用于相干探测的期望信号相对杂散频率分量的功率仍然下降了

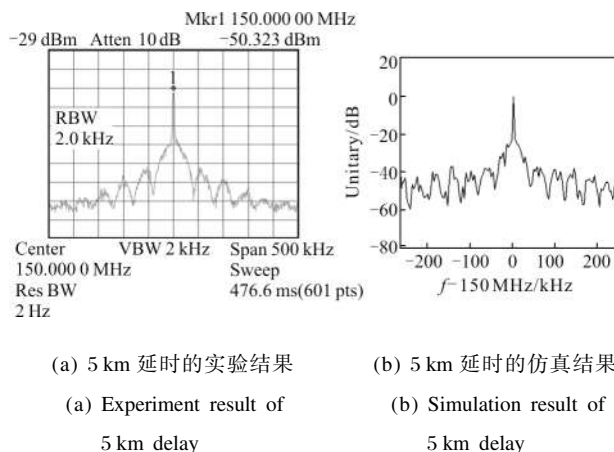
20 dB,说明对近距离目标,激光相干探测的效果更好。

以上实验中激光信号的功率较小在 mW 量级,只能当做本振信号使用。实际 SAL 中,为保证作用距离,小功率激光种子源信号至少需要放大到 20 W 量级。在放大过程中,即使频率正弦变化的幅度与频率不变,放大器也会在激光信号中进一步引入独立的随机频率与随机相位,所以放大后激光信号的模型可写为:

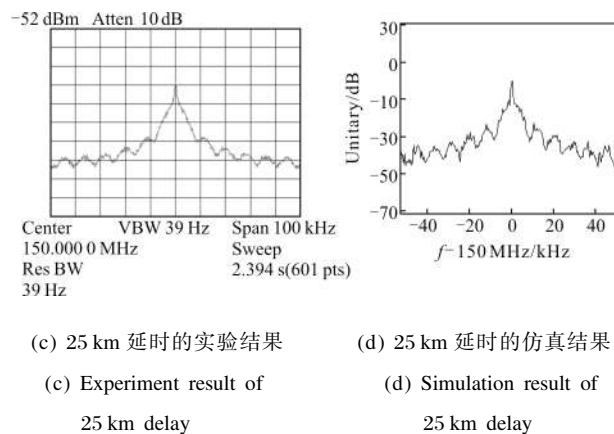
$$s(t)=\exp\{j\cdot[2\pi\int(f_c+A_F\cdot\sin(2\pi f_r t))dt+2\pi\int f_a(t)dt+\phi_a(t)+2\pi\int f_a(t)dt+\phi_a(t)\} \quad (9)$$

式中: $f_a(t) \in N(0, \sigma_{fa})$ 为放大器引入的高斯分布的随机频率; $\phi_a(t) \in N(0, \sigma_{\phi a}^2)$ 为放大器引入的高斯分布的随机相位。

图 4 给出了波长 1.55 μm 的 20 W 激光信号自外差实验结果及其对应的仿真结果,仿真中假定放大



(a) 5 km 延时的实验结果 (a) Experiment result of 5 km delay
(b) 5 km 延时的仿真结果 (b) Simulation result of 5 km delay



(c) 25 km 延时的实验结果 (c) Experiment result of 25 km delay
(d) 25 km 延时的仿真结果 (d) Simulation result of 25 km delay

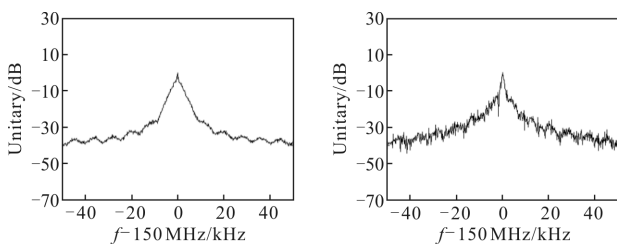
图 4 20 W 激光信号自外差实验结果与仿真结果

Fig.4 Experiment results and simulation results of 20 W laser signal self-heterodyne

器引入的随机频率的标准差为 $\sigma_{\omega}=1$ kHz, 随机相位的标准差为 $\sigma_{\phi}=0.15$ rad。仿真结果与实验结果基本一致, 说明公式(9)中放大后激光信号模型及仿真参数的正确性。实验结果显示 20 W 激光信号线宽约 2 kHz。

对比图 3 与图 4, 相对激光种子源信号, 放大后激光信号自外差频谱中, 远区噪声电平上升约 10 dB, 说明增大功率的同时引入了相位噪声, 会对激光合成孔径图像信噪比造成影响。

图 5 给出了波长 1.55 μm 的 20 W 激光信号与种子源激光信号外差实验结果及其对应的仿真结果, 仿真参数与图 3、图 4 的仿真参数基本相同, 信号时长约 10 ms。仿真结果与实验结果基本一致, 进一步说明公式(1)与公式(9)所示信号模型及仿真参数的正确性。20 W 激光信号与种子源激光信号外差频谱宽度约为 3 kHz, 大于种子源激光信号自外差频谱宽度和 20 W 激光信号自外差频谱宽度。



(a) 25 km 延时的实验结果 (b) 25 km 延时的仿真结果
(a) Experiment result of 25 km delay (b) Simulation result of 25 km delay

图 5 20 W 激光信号与种子源激光信号外差实验结果与仿真结果
Fig.5 Experiment results and simulation results of heterodyne between 20 W laser signal and seed laser signal

此节实验结果与仿真结果表明 1.1 节建立的激光信号模型可以对激光信号进行描述, 下面分析与仿真均基于 1.1 节建立的激光信号模型进行。

2 激光信号相干性对 SAL 方位分辨率的影响

激光信号的相干性直接影响 SAL 的方位分辨率, 该影响可通过激光信号自外差实验中差拍后信号的频谱体现。

差拍后信号的频谱等同于 SAL 与目标相对静止时, 激光回波信号的慢时谱; 进一步可理解为 SAL 沿理想航迹运动情况下, 对激光回波信号方位去斜后的方位谱, 该方位谱即为目标在方位多普勒域的

成像结果; 从多普勒域投影到空间域, 可以得到目标在空间域的成像结果:

$$\frac{S(f)}{K_a} \cdot V \quad (10)$$

式中: $S(f)$ 为激光信号自外差实验中差拍后信号的频谱; K_a 为 SAL 沿理想航迹运动时激光回波信号的方位调频率; V 为 SAL 运动速度。

定义 $S(f)$ 中可用于相干探测的期望信号的频谱宽度 Δf_h 为慢时频率分辨率, 根据合成孔径成像分辨率的定义, SAL 在空间域的方位分辨率为:

$$\rho_a = \frac{\Delta f_h \lambda R_b}{2V} \quad (11)$$

式中: λ 为激光信号的波长; R_b 为目标到 SAL 理想航迹的垂直距离。

公式(11)说明 SAL 可实现的方位分辨率与激光信号慢时频率分辨率有关, 公式(8)说明, 可通过本振信号延时处理的方法, 减少回波信号和本振信号的延时误差 ΔR , 提高激光信号的慢时频率分辨率, 进而提高 SAL 的方位分辨率。

激光信号的相干性同时影响 SAL 方位成像的峰值旁瓣比和积分旁瓣比, 该影响同样可通过激光信号自外差实验中差拍后信号的频谱体现。峰值旁瓣比受正弦调频的幅度与频率的影响, 正弦调频的频率 f_f 越高、幅度 A_f 越大, 峰值旁瓣比越高。积分旁瓣比决定于激光信号的随机频率与随机相位的大小, 随机频率与随机相位的标准差 σ_{ω} , σ_{ϕ} 越大, 远区噪声电平越高, 积分旁瓣比越高, 等效降低图像信噪比^[11]。

3 激光 LFM 信号失真对 SAL 成像的影响

3.1 LFM 信号非线性边界条件及其仿真验证

在激光波段, 无论通过何种方式产生实现 LFM 信号, 都存在非线性失真问题, 并影响 SAL 成像质量。文中以非线性度^[12-13]定义激光 LFM 信号频率调制的非线性失真程度:

$$\delta = \frac{\Delta f_b}{B} \quad (12)$$

式中: Δf_b 为激光 LFM 信号相对于理想 LFM 信号的最大频率偏移; B 为激光 LFM 信号的带宽。

LFM 信号非线性失真主要影响 SAL 的快时间成像结果, 激光信号频率稳定度差引入的相位误差主要影响 SAL 的慢时间成像结果, 当激光线宽在 kHz 量级时, 对 SAL 快时间成像结果的影响基本可

以忽略^[1],为简化分析,此节假设激光信号为频率稳定的单频信号,激光 LFM 信号为:

$$s_s(\hat{t}) = \exp\{j \cdot [2\pi f_c \cdot \hat{t} + \pi \gamma \cdot \hat{t}^2 + \varepsilon(\hat{t})]\} \quad (13)$$

式中: γ 为快时间调频率; $\varepsilon(\hat{t})$ 为非线性失真相位。

不失一般性,本节采用数字去斜^[14]的方式进行斜距维成像,去斜后的信号为:

$$s_s(\hat{t}) = \exp\{j \cdot [-2\pi f_c \cdot \hat{t}_0 - \pi \gamma \cdot (2\hat{t} - \hat{t}_0) \cdot \hat{t}_0 + \varepsilon(\hat{t} - \hat{t}_0)]\} \quad (14)$$

式中: \hat{t}_0 为目标激光回波信号的延时。该信号变到频域:

$$s_s(f_r) = \{ \exp[j \cdot (-2\pi f_c \cdot \hat{t}_0 + \pi \gamma \cdot (\hat{t}_0)^2)] \cdot \text{sinc}(f_r + \gamma \cdot \hat{t}_0) \} \otimes \text{FT}\{ \exp[j \cdot (\varepsilon(\hat{t} - \hat{t}_0))] \} \quad (15)$$

去斜后的信号频谱即为目标的斜距成像结果,该频谱宽度决定于 $\text{FT}\{ \exp[j \cdot (\varepsilon(\hat{t} - \hat{t}_0))] \}$,若 $\text{FT}\{ \exp[j \cdot (\varepsilon(\hat{t} - \hat{t}_0))] \}$ 的 -3 dB 谱宽 Δf_B 对应的分辨率大于信号带宽对应的斜距分辨率,即需要对 LFM 信号的非线性失真进行校正:

$$\frac{\Delta f_B}{\gamma} \cdot \frac{C}{2} > \frac{C}{2B} \quad (16)$$

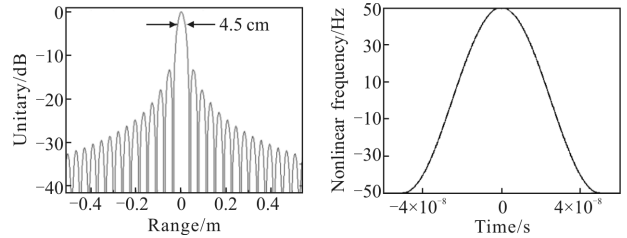
结合公式(12)与公式(16),LFM 信号非线性失真需要校正的边界条件为:

$$\delta > \frac{1}{B \cdot T_r} \quad (17)$$

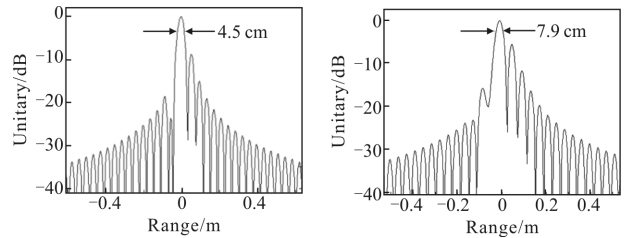
式中: T_r 为脉冲宽度。当 $B=4 \text{ GHz}$, $T_r=10 \mu\text{s}$ 时,由公式(17),激光 LFM 信号的非线性度大于 1/40 000 就会对成像造成影响。目前微波 LFM 信号的非线性度难以达到 1/10 000,考虑到激光 LFM 信号的产生需要微波 LFM 信号和激光信号共同作用于光电调制器件,光电调制器件会进一步引入非线性失真,激光 LFM 信号的非线性度必然大于 1/10 000,所以需要频率调制的非线性失真进行校正。

为验证公式(17)所示的边界条件,此节进行了相关仿真,仿真中使用的 LFM 信号 $B=4 \text{ GHz}$, $T_r=10 \mu\text{s}$,由公式(17),非线性度大于 1/40 000 时(对应最大频偏 100 kHz),其非线性失真即需要进行校正。图 6(a)给出了非线性度为 0 时的脉冲压缩结果,图 6(b)给出了非线性度 1/40 000 时的频率偏移图,图 6(c)给出了非线性度为 1/40 000 的脉冲压缩结果,图 6(d)给出了非线性度 1/20 000 时的脉冲压缩结果。对比图 6(a)和图 6(c),非线性度达到 1/40 000 时,脉冲压

缩结果出现旁瓣不对称的情况,但分辨率仍然和非线性度为 0 时的脉冲压缩结果相同,为 4.5 cm;对比图 6(a)和图 6(d),非线性度增大至 1/20 000,脉冲压缩结果的分辨率降低到 7.9 cm。



(a) 非线性度为 0 时的脉冲压缩结果 (b) 频率偏移图
(a) Pulse compression result while nonlinear ratio is 0 (b) Frequency offset



(c) 非线性度为 1/40 000 时的脉冲压缩结果 (d) 非线性度为 1/20 000 时的脉冲压缩结果
(c) Pulse compression result while nonlinear ratio is 1/40 000 (d) Pulse compression result while nonlinear ratio is 1/20 000

图 6 边界条件验证结果

Fig.6 Verification result of boundary condition

3.2 参考通道设置及定标校正

激光信号对温度等环境因素较为敏感,在 LFM 信号调制放大过程中引入的非线性失真相位和脉冲间随机初相均可能时变,为此需考虑设置参考通道^[15],实现非线性失真相位与随机初相的定标校正。

图 7 给出了 SAL 系统框图,其中上方虚点方框为参考通道:激光种子源信号与发射信号耦合后在光电探测器上差拍,对差拍后的信号 AD 采样,再经过信号处理在数字域提取发射信号的非线性失真及随机初相,在参考通道可采用数字去斜技术降低 AD 采样率^[14]。下方虚点方框为回波通道:激光种子源信号作为本振信号,经过延时光纤后,与回波信号在光电探测器上差拍,对差拍后的信号 AD 采样并进行信号处理。回波通道中本振信号进行延时处理的目的在于提高回波信号与本振信号的相干性,降低激光信号相干性差对 SAL 方位成像的影响。

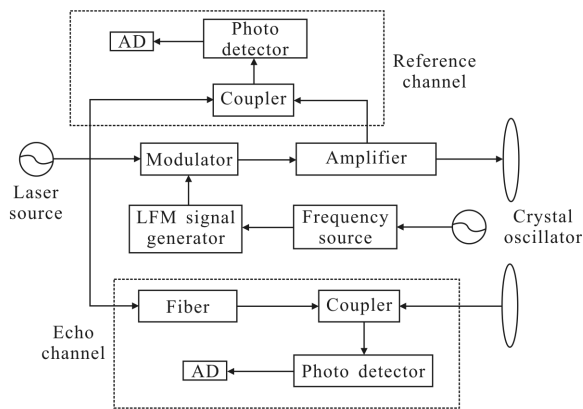


图 7 SAL 系统框图

Fig.7 Block diagram of SAL system

发射信号:

$$s_3(\hat{t}, t_k) = \exp\{j \cdot [2\pi \int (f_c + A_f \cdot \sin(2\pi f_f(t_k + \hat{t}))) dt + 2\pi \int f_r(t_k + \hat{t}) dt + 2\pi \int f_a(t_k + \hat{t}) dt + \phi_r(t_k + \hat{t}) dt + \phi_a(t_k + \hat{t}) dt]\} \cdot \exp\{j \cdot [\pi \gamma \hat{t}^2 + \varepsilon(\hat{t}, t_k) + \theta(t_k)]\} \quad (18)$$

式中: $\theta(t_k) \in N(0, \sigma_\theta^2)$ 为发射信号的随机初相, 其在 LFM 信号调制放大过程中引入, 文中假设其服从高斯分布; $\varepsilon(\hat{t}, t_k)$ 为非线性失真相位。

种子源激光信号:

$$s_4(\hat{t}, t_k) = \exp\{j \cdot [2\pi \int (f_c + A_f \cdot \sin(2\pi f_f(t_k + \hat{t}))) dt + 2\pi \int f_r(t_k + \hat{t}) dt + \phi_r(t_k + \hat{t}) dt]\} \quad (19)$$

差拍后的信号:

$$s(t_k, \hat{t}) = s_3(t_k, \hat{t}) \cdot s_4^*(t_k, \hat{t}) = \exp\{j \cdot [2\pi \int f_a(t_k + \hat{t}) dt + \phi_a(t_k + \hat{t}) dt]\} \cdot \exp\{j \cdot [\pi \gamma \hat{t}^2 + \varepsilon(\hat{t}, t_k) + \theta(t_k)]\} \quad (20)$$

忽略放大器引入的随机频率与随机相位, 在数字域去除已知相位项 $\pi \gamma \cdot \hat{t}^2$, 即可得到 $\theta(t_k)$ 和 $\varepsilon(\hat{t}, t_k)$, 在目标回波信号中去除 $\theta(t_k)$ 后, 由 $\varepsilon(\hat{t}, t_k)$ 构造校正函数^[14-15]对回波信号进行校正即可消除激光 LFM 信号非线性失真对 SAL 成像的影响。

对随机初相和非线性失真相位进行校正后的单散射点回波信号为:

$$s'(\hat{t}, t_k) = \exp\{j \cdot [2\pi \int (A_f \cdot \sin(2\pi f_f(t_k + \hat{t} - \frac{2R'}{C}))) dt -$$

$$A_f \cdot \sin(2\pi f_f(t_k + \hat{t} - \frac{2R(t_k)}{C}))\} dt + 2\pi \int (f_r(t_k + \hat{t} - \frac{2R'}{C}) - f_r(t_k + \hat{t} - \frac{2R(t_k)}{C})) dt + (\phi_r(t_k + \hat{t} - \frac{2R'}{C}) - \phi_r(t_k + \hat{t} - \frac{2R(t_k)}{C}))\} \cdot \exp\{j \cdot [2\pi \int f_a(t_k + \hat{t} - \frac{2R(t_k)}{C}) dt + \phi_a(t_k + \hat{t} - \frac{2R(t_k)}{C})]\} \cdot \exp\{j \cdot \pi \gamma (\hat{t} - \frac{2R(t_k)}{C})^2\} \cdot \exp\{-j \cdot \frac{2\pi R(t_k)}{\lambda}\} \quad (21)$$

式中: R' 为本振信号延时距离; $R(t_k)$ 为散射点到 SAL 相位中心的距离。公式(21)表明, 对 LFM 信号非线性失真和随机初相进行校正后, SAL 的成像分辨率主要受制于本振信号的相干性, 其主要体现在公式(21)前两个指数项, 第一个指数项是本振信号相干性差造成的, 其会降低 SAL 方位分辨率并提高峰值旁瓣比和积分旁瓣比, 为主要影响, 可通过缩短本振信号延时长度 R' 与目标距离 $R(t_k)$ 的误差降低该影响; 第二个指数项来源于放大器引入的随机频率与随机相位, 其会使 SAL 方位成像的积分旁瓣比上升。

4 成像仿真

基于第 3 节的实验结果与仿真结果, 假定 SAL 采用 20 W 激光信号, 本振信号参数应为 $A_f=20$ kHz, $f_f=20$ Hz, $\sigma_{ff}=25$ kHz, $\sigma_{\phi r}=0.1$ rad, 放大器参数应为 $\sigma_{fa}=1$ kHz, $\sigma_{\phi a}=0.15$ rad。基于图 7 所示系统框图与表 1 中的系统参数, 此节对一个天基 SAL^[17]进行了二维成像仿真。

表 1 SAL 系统参数

Tab.1 SAL system parameters			
Parameters	Value	Parameters	Value
Wavelength/ μ m	1.55	PRF/kHz	20
Squint angle/($^\circ$)	0	Range resolution/cm	4.5
Center range/km	100	Nonlinear ratio/band of LFM signal/GHz	0.000 1/4
Relative speed between SAL and object/ $m \cdot s^{-1}$	100	Standard deviation of LFM signal rand initial phase/rad	$\pi/2$
Azimuth resolution/cm	1	Pulse width/ μ s	10
Synthetic aperture time/ms	77.5	Delay error/km	0/1/5

成像仿真的合成孔径时间 77.5 ms, 若要达到

1 cm 方位分辨率, 激光信号的慢时频率分辨率应达到 13 Hz。首先基于第 2 章的激光信号模型进行了 77.5 ms 的本振信号与 20 W 激光信号自外差仿真, 图 8 给出了仿真结果。图 8(a) 示出, 在不延时情况下, 慢时频率分辨率能够达到 13 Hz, 说明在本振信号延时误差为 0 的情况下, 应能够达到 1 cm 方位分

辨率。图 8(b) 示出, 在光纤延时长度 1 km 情况下, 慢时频率分辨率达到 13 Hz, 但是旁瓣上升约 1 dB, 说明在本振信号延时误差 1 km 的情况下, 由于方位旁瓣上升, 不能认为达到 1 cm 方位分辨率。图 8(c) 示出, 在光纤延时 5 km 情况下, 由于旁瓣上升较多, 慢时频率分辨率下降到 100 Hz 左右, 说明在本振信号

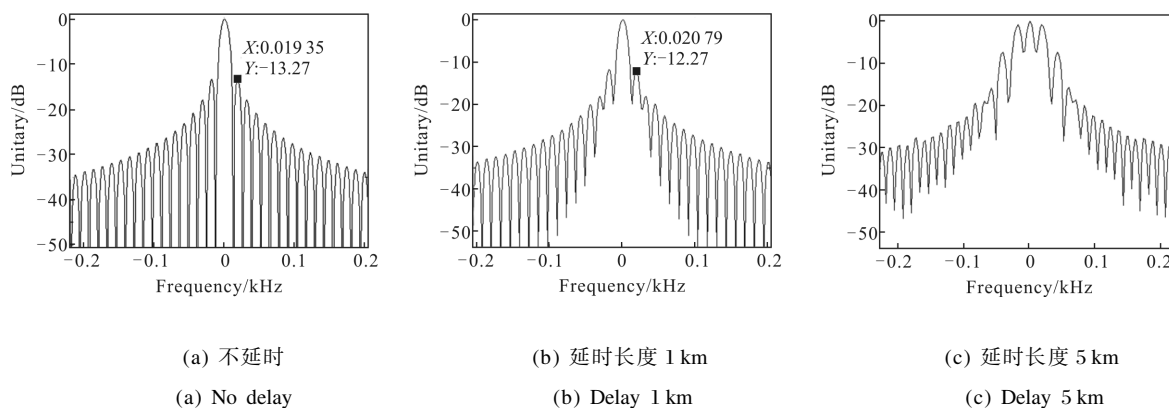


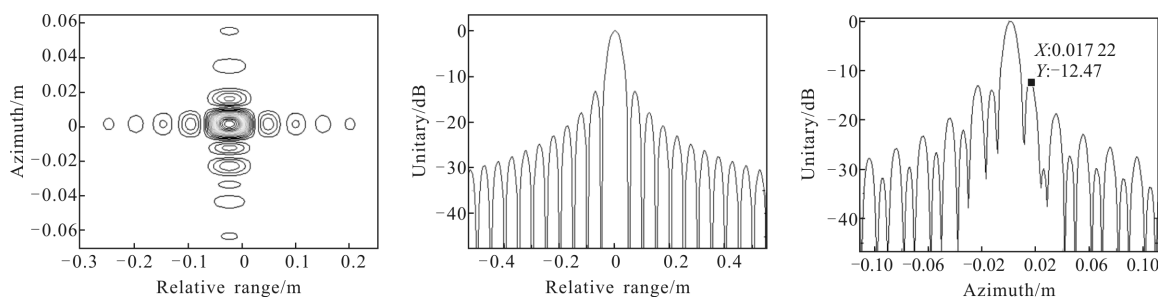
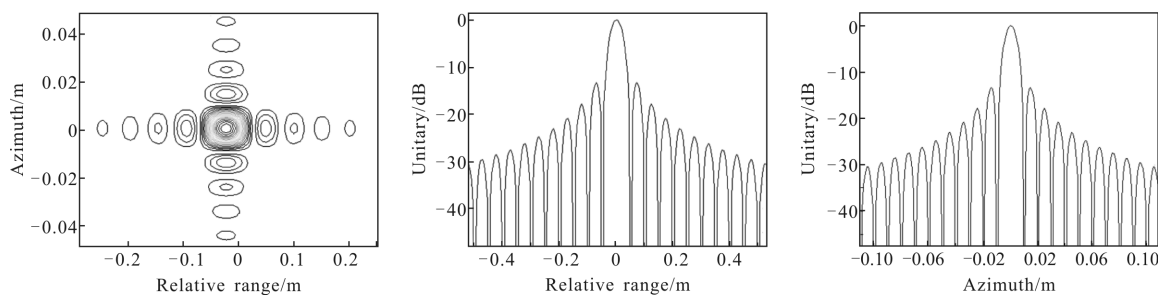
图 8 外差仿真结果

Fig.8 Result of laser signal heterodyne simulation

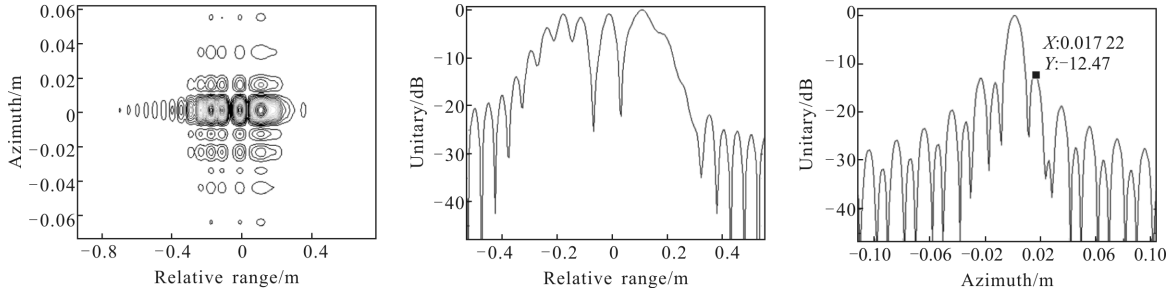
延时误差 5 km 的情况下, 已不可能达到 1 cm 方位分辨率, 且会出现虚假目标。

4.1 点目标仿真结果

图 9 给出了单点目标仿真结果, 表 2 给出了单

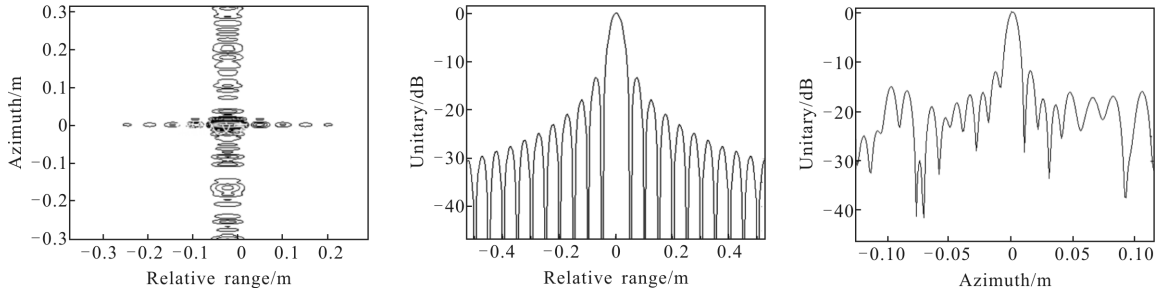


(b) Imaging result with 1 km delaying error, nonlinear phase error and random initial phase are corrected using reference channel



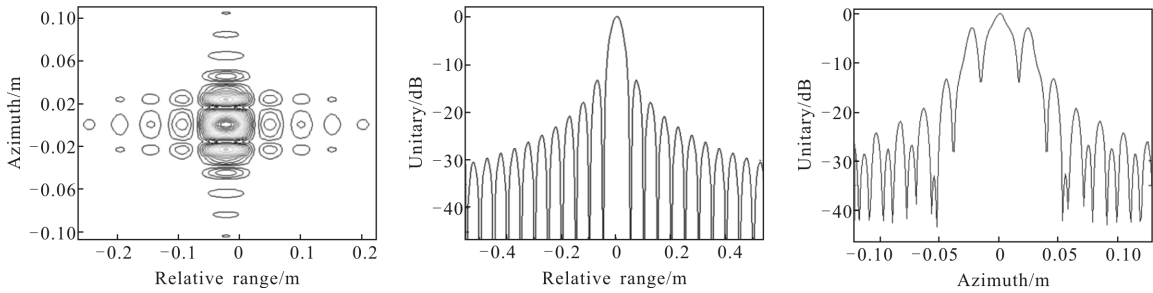
(c) 成像结果(1 km 延时误差、用参考通道仅对随机初相进行校正)

(c) Imaging result with 1 km delaying error, only random initial phase is corrected using reference channel



(d) 成像结果(1 km 延时误差、用参考通道仅对非线性失真进行校正)

(d) Imaging result with 1 km delaying error, only nonlinear phase error is corrected using reference channel



(e) 成像结果(5 km 延时误差、用参考通道对非线性失真和随机初相进行校正)

(e) Imaging result with 5 km delaying error, nonlinear phase error and random initial phase are corrected using reference channel

图 9 点目标成像仿真结果

Fig.9 Imaging simulation result of point target

表 2 点目标成像仿真结果的相关参数

Tab.2 Related parameters of imaging simulation result of point target

	PSLR along range/dB	ISLR along range/dB	Range resolution/cm	PSLR along azimuth/dB	ISLR along azimuth/dB	Azimuth resolution/cm	Far field noise level along azimuth/dB
Fig.9(a)	-13.2	-9.68	4.5	-13.2	-9.68	1	-64
Fig.9(b)	-13.2	-9.68	4.5	-12.47	-8.45	1	-60
Fig.9(c)	-	-	-	-12.47	-8.45	1	-60
Fig.9(d)	-13.1	-9.65	4.5	-11.92	11.14	-	-15
Fig.9(e)	-13.1	-9.65	4.5	-3.5	1.9	-	-60

点目标仿真结果的相关参数。

对比图 9(a)与图 9(b),若延时误差被控制在 1 km 以内,且通过参考通道对非线性失真相位和随机初相进行定标校正,信号相位误差对 SAL 成像的影响较小,仅使得峰值旁瓣比和积分旁瓣比上升约 1 dB,可通过方位向多视处理对旁瓣进行抑制,此时方位分辨率将下降为 5 cm 左右。说明即便延时误差被控制在 1 km (事实上很难将延时误差控制在 1 km),由于激光信号相干性较差,能实现的方位分辨率也难以优于 5 cm。

对比图 9(b)与图 9(c),若通过参考通道仅对随机初相进行定标校正,斜距向成像已完全散焦,此时难以判定斜距向分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比;对比图 9(b)与图 9(d),若通过参考通道仅对非线性失真进行定标校正,方位成像的远区噪声电平上升至 -15 dB,积分旁瓣比上升至 11.14 dB,降低图像信噪比降低较多,此时不能判定达到 1 cm 方位分辨率。仿真结果验证了参考通道的有效性。与必要性。

对比图 9(b)与图 9(e),当延时误差由 1 km 增大至 5 km,方位成像的峰值旁瓣比上升至 -3.5 dB,积分旁瓣比上升至 1.9 dB,出现虚假目标(该虚假目标来自激光信号频率的正弦变化引入的相位误差,正弦变化的频率 f_f 越高,虚假目标距离真实目标越远,正弦变化的范围 A_f 越大,虚假目标的强度越大),在此情况下进行方位分辨率的判定失去其意义。仿真结果说明了 SAL 能实现的最高方位分辨率决定于本振信号的相干性,同时验证了本振信号延时处理的有效性。与必要性。

4.2 卫星目标仿真结果

图 10 给出了仿真使用的卫星目标,图 11 给出了卫星目标仿真结果,表 3 给出了卫星目标仿真结果的相关参数。

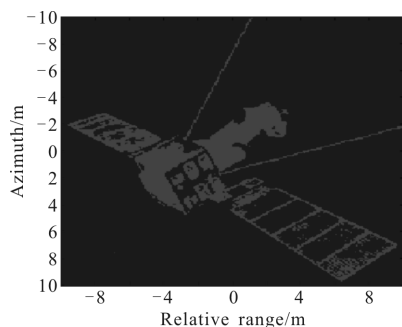
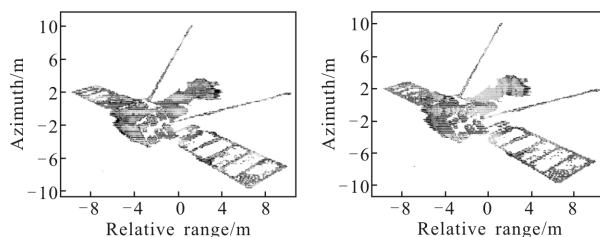


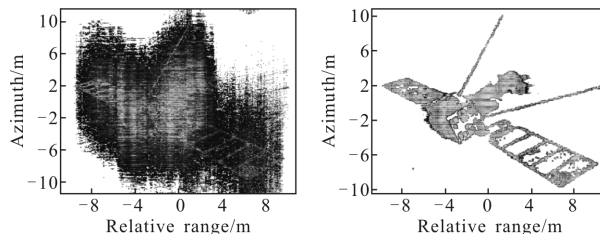
图 10 卫星目标

Fig.10 Satellite object



(a) 成像结果(不存在延时误差、非线性失真和随机初相) (b) 成像结果(1 km 延时误差、用参考通道对非线性失真和随机初相进行校正)

(a) Imaging result without delaying error, nonlinear phase error or random initial phase (b) Imaging result with 1 km delaying error, nonlinear phase error and random initial phase are corrected using reference channel



(c) 成像结果(1 km 延时误差、不对非线性失真和随机初相进行校正) (d) 成像结果(5 km 延时误差、用参考通道对非线性失真和随机初相进行校正)

(c) Imaging result with 1 km delaying error, nonlinear phase error and random initial phase are not corrected (d) Imaging result with 5 km delaying error, nonlinear phase error and random initial phase are corrected using reference channel

图 11 卫星目标成像仿真结果

Fig.11 Imaging simulation result of satellite

表 3 卫星目标成像仿真结果的相关参数

Tab.3 Related parameters of imaging simulation result of satellite target

	Fig.11(a)	Fig.11(b)	Fig.11(c)	Fig.11(d)
Entropy	13.77	13.8	14.14	13.9
Contrast ratio	2.95	2.89	1.3	2.47

此节用图像熵与图像对比度对卫星目标成像仿真结果进行评价:

$$\begin{cases}
 H(\text{image}) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p(n, m) \cdot \ln p(n, m), p(n, m) = \frac{|\text{image}(n, m)|}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\text{image}(n, m)|} \\
 C(\text{image}) = \frac{1}{u} \cdot \sqrt{\frac{1}{NM} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (|\text{image}(n, m)| - u)^2}, u = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\text{image}(n, m)|}{NM}
 \end{cases} \quad (22)$$

式中： $H(\text{image})$ 、 $C(\text{image})$ 分别为图像熵和图像对比度； image 为复图像； N, M 分别为图像的二维像素点数。图像熵越小，说明图像信息量越大，聚焦效果越好，图像对比度越大，说明图像边缘越清晰，聚焦效果越好。

对比图 11(a)与图 11(b)，若延时误差被控制在 1 km 以内，且通过参考通道对非线性失真相位和随机初相进行定标校正，成像质量与不存在延时误差、非线性失真和随机初相时的成像质量基本接近。对比图 11(b)与图 11(c)，若不对 LFM 信号非线性失真和随机初相进行定标校正，成像质量有明显下降。对比图 11(a)与图 11(d)，若延时误差 5 km，即使通过参考通道对随机初相和非线性失真相位进行定标校正，成像质量也存在较大下降，主要体现在方位分辨率的降低。

对卫星目标的成像仿真进一步验证了本振延时处理和参考通道定标校正的有效性与必要性。

5 结束语

文中分析了激光雷达信号相位误差对合成孔径成像的影响，从分析结果看，要在激光波段对远距离目标实现高分辨率合成孔径成像还有相当的难度，其核心是要解决好本振信号的相干性和发射的大功率激光信号相位误差校正问题。发射的大功率激光信号相位误差可通过设置参考通道进行定标校正，所以 SAL 能实现的最高方位分辨率决定于本振信号的相干性，在此过程中，减少本振信号延时误差具有重要意义。根据现阶段的技术水平，天基 SAL 对 100 km 处运动目标，本振信号和回波信号通过延时处理对准有很大困难，实现高分辨率成像并非易事，由于延时误差难以被控制在 1 km 以内，达到 5 cm 分辨率仍有相当难度。

文中主要使用了 LFM 信号，要特别说明的是，使用相位编码信号^[6]虽不能采用去斜接收技术降低

AD 的采样速率，但其不要求信号相位连续变化的特点，使其可能更适用于激光信号高功率放大后存在较大相位失真的场合，相关的研究工作也值得关注。
致谢：中国科学院西安光学精密机械研究所薛明园博士、高存孝副研究员、朱少岚研究员，为文中研究工作提供了激光信号自外差实验数据，感谢他们对文中研究工作的无私帮助！

参考文献：

- [1] Li Daojing, Zhang Qingjuan, Liu Bo. Key technology and implementation scheme analysis of air-borne synthetic aperture lidar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 143–151. (in Chinese)
李道京, 张清娟, 刘波. 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.
- [2] Wu Jin. On the development of synthetic aperture lidar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 353–360. (in Chinese)
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.
- [3] Guo Liang, Xing Mengdao, Zhang Long. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. *Science China E-Technological Sciences*, 2009, 39(10): 1678–1684. (in Chinese)
郭亮, 邢孟道, 张龙. 室内距离向合成孔径激光雷达成像的实验研究 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(10): 1678–1684.
- [4] Pu Tao, Wen Chuanhua. Principle and Adaption of Microwave Photonics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
蒲涛, 闻传花. 微波光子学原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [5] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Research on forming method of wide-band signal of SAL [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1114003. (in Chinese)
杜剑波, 李道京, 马萌. 激光雷达宽带信号产生方法研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1114003.

- [6] Du Jianbo, Li Daojing, Ma Meng. Performance analysis and image processing of phase-modulated signal on airborne synthetic aperture lidar [J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1): 111–118. (in Chinese)
杜剑波, 李道京, 马萌. 机载合成孔径激光雷达相位调制信号性能分析和成像处理 [J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 111–118.
- [7] Yan Deke, Zhong Zhen, Sun Chuandong. Mathematical model of the laser frequency shift modulated by small signal low frequency current[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1465–1468. (in Chinese)
闫得科, 钟镇, 孙传东. 小信号低频电流调制下激光频移信号模型[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1465–1468.
- [8] Su Hang. Research about phase noise test technology of continuous wave [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
苏航. 连续波信号相位噪声测试技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [9] An Panlong, Zhao Ruijuan, Zheng Yongqiu, et al. Linewidth rapid measurement of narrow fiber laser by spectrum analyzer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 897–900. (in Chinese)
安盼龙, 赵瑞娟, 郑永秋, 等. 频谱仪快速测定窄线宽激光器线宽[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 897–900.
- [10] Lu Yuanfu, Xie Shiyong, Li Yan, et al. High power narrow linewidth microsecond pulse 1 064 nm ring laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 35–40. (in Chinese)
鲁远甫, 谢仕永, 刘艳, 等. 高功率窄线宽微秒脉冲1 064 nm 环形腔激光[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 35–40.
- [11] Li Daojing, Pan Zhouhao, Qiao Ming. Airborne Millimeter Wave InSAR Technology Based on Three Baseline Antenna [M]. Beijing: Publishing House of Science, 2015: 56–57. (in Chinese)
李道京, 潘舟浩, 乔明. 机载毫米波三基线 InSAR 技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 56–57.
- [12] Liang Yi. Signal processing of LFM CW SAR [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
梁毅. 调频连续波 SAR 信号处理[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [13] Yu Wen, Zhao Siwei, Song Xiaoquan. A FS imaging method for chirp signal correcting in SAL [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 072801. (in Chinese)
于雯, 赵思伟, 宋小全. 一种适用于合成孔径激光雷达非线性啁啾校正的频率变标成像方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 072801.
- [14] Hu Xuan, Li Daojing, Zhou Jianwei. Image processing of SAL based on low sampling rate digital dechirp [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(5): 664–668. (in Chinese)
胡炫, 李道京, 周建卫. 基于低采样率数字去斜的合成孔径激光雷达成像处理 [J]. 中国科学院大学学报, 2016, 33(5): 664–668.
- [15] Pan Zhouhao, Liu Bo, Li Daojing. System error correcting and signal analysis of micro-wave InSAR with three baseline antennas [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2011, 33(10): 2464–2470. (in Chinese)
潘舟浩, 刘波, 李道京. 毫米波三基线 InSAR 系统误差校正和信号分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2464–2470.
- [16] Krause B W, Buck J, Ryan C, et al. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]//OSA/CLEO/IQEC, 2011.
- [17] Li Daojing, Du Jianbo, Ma Meng, et al. The system analysis of spaceborne synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 269–276. (in Chinese)
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): 269–276.
- [18] Quegan S. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms [M]. Cai Yongjie, translated. Nanjing: Nanjing Research Institute of Electronic Technology, 1997: 158–162. (in Chinese)
Quegan S. 聚束照射合成孔径雷达的信号处理算法[M]. 才永杰, 译. 南京: 南京电子技术研究所, 1997: 158–162.