

逆合成孔径成像激光雷达高分辨成像算法

何 劲¹, 张 群^{1,2}, 杨小优¹, 罗 迎¹, 朱小鹏¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077;

2. 复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 逆合成孔径成像激光雷达发射的激光信号具有极高载频、超大带宽和极短波长的特性, 传统的距离-多普勒算法不再适用。在对回波信号特征进行分析的基础上, 利用重排 Wigner 分布和 Radon 变换对光外差探测后的信号进行时频分析, 估计出目标的径向速度, 实现对回波信号的精确运动补偿。最后利用改进的距离-多普勒算法, 完成对目标的超高分辨二维成像。仿真验证了成像算法的有效性, 并通过与微波波段逆合成孔径雷达的比较, 证明了逆合成孔径成像激光雷达可以实现对运动目标更快速、更高分辨的成像。

关键词: 逆合成孔径成像激光雷达; 运动目标; 成像算法; 时频分析; 运动补偿

中图分类号: TN 958

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.14

High resolution imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging LADAR

HE Jin¹, ZHANG Qun^{1,2}, YANG Xiao-you¹, LUO Ying¹, ZHU Xiao-peng¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education),
Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: As the laser signal of inverse synthetic aperture imaging LADAR (ISAIL) has high frequency, large bandwidth and short wavelength, conventional range-Doppler can not be used again. This paper analyzes the characteristic of echo signals, finishes time-frequency analysis for the signal after optical heterodyne processing with reassign smoothed pseudo WVD and Radon transform. The velocity of targets is estimated and the echo signal is compensated accurately, and the high resolution two dimensional imaging can be realized. The simulation shows that this method is effective, and the images achieved by the ISAIL system have higher quality than the microwave inverse synthetic radar system.

Keywords: inverse synthetic aperture imaging LADAR; moving target; imaging method; time-frequency analysis; motion compensation

0 引 言

成像激光雷达通过发射具有极高工作频率、良好相干性和极大带宽的激光信号, 能够获得高分辨的目标图像, 并具有良好的“四抗”能力(抗电子战能力、抗反辐射导弹攻击能力、抗低空超低空突防能力和抗隐身目标能力)^[1]。因此, 在军事侦察和遥感测绘等领域得到了广泛的应用。现有的成像激光雷达可以分为扫描式雷达和非扫描式雷达。对于扫描式成像激光雷达而言, 要实现对运动目标的实时成像, 必须提高扫描速率, 这存在较大的困难; 而普通的基于焦平面阵列组件与激光泛光照明的非扫描式成像激光雷达虽然能实现对运动目标的快速成像, 但是成像分辨率受

到阵元个数的限制, 这制约了它在运动目标探测与识别领域的应用。因此, 将合成孔径技术引入光波波段, 研究光波波段的合成孔径雷达成为近年来的热点问题^[2-8]。2002 年, 美国海军研究实验室用波长为 1.55 μm , 功率为 5 mW 的单模可调谐激光源在实验室中完成了对目标的二维成像^[9]。2006 年, 美国的诺斯罗普·格鲁门公司电子系统部用二氧化碳激光器在加州爱德华兹空军基地也独立地得到了激光雷达合成孔径图像^[10]。近年来, 国内也开展了相关技术的研究^[11-12]。但是这些国内外的研究主要针对的是场景目标或固定目标, 对运动目标成像的研究还没有深入开展。因此, 根据运动目标的特性, 研究基于逆合成孔径成像激光雷达(inverse synthetic aperture imaging LADAR, ISAIL)的

收稿日期: 2010-05-13; 修回日期: 2011-01-13。

基金项目: 国家自然科学基金(60971100); 陕西省电子信息系统集成重点实验室基金(200903B)资助课题

作者简介: 何劲(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理与合成孔径激光雷达。E-mail: hjelva@163.com

运动目标成像理论和技术具有重要意义。

ISAIL 是针对运动目标成像的光波波段合成孔径雷达,它利用合成孔径原理来提高成像的方位向分辨率,同时通过发射大带宽的激光信号提高成像的距离向分辨率。因此,既克服了传统微波成像雷达不能为远距离目标、小目标的成像提供足够距离分辨率的缺点,又克服了传统成像激光雷达无法实现对运动目标高分辨实时成像的问题,具有广泛的应用前景^[13]。ISAIL 的成像原理与微波波段的逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)相似,但是,由于采用了具有极高的载频、极大的带宽和极短的波长的激光信号作为信号源,传统 ISAR 成像中的距离-多普勒算法将不再适用于 ISAIL 成像。本文在对 ISAIL 回波信号特征进行分析的基础上,建立了基于调频连续波的 ISAIL 回波信号模型,并针对信号的特点,利用重排维格纳分布和 Radon 变换相结合的时频分析方法,准确估计出目标运动的径向速度,并完成了对回波信号的精确运动补偿,最后采用改进的距离-多普勒算法,实现了对运动目标的超高分辨实时二维成像。仿真实验验证了本文所提算法的有效性,并通过与 ISAR 成像结果的比较,证明了 ISAIL 的成像优势。

1 ISAIL 回波信号分析

通常 ISAR 采用线性调频信号作为信号源,而 ISAIL 主要通过发射极大带宽的线性调频连续波激光信号实现对目标成像,发射信号的形式如图 1 所示,假设 i 为目标上任一散射点,信号表达式可以写为

$$s_i(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t_k^2\right)\right) \quad (1)$$

式中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数,当 $|t| \leq T_p/2$ 时, $\text{rect}(t/T_p) = 1$, $|t| > T_p/2$ 时, $\text{rect}(t/T_p) = 0$; f_c 表示信号的载频; $\mu = \Delta f/T_p$ 表示信号的调频斜率; T_p 表示脉冲重复间隔;信号带宽 $B = \mu T_p$; t_k 表示快时间采样序列,即脉内时间; t_m 是合成孔径上慢时间采样序列,即脉间时间, $t_m = mT_p$ ($m = 1, 2, \dots, M$); $t = t_m + t_k$ 。

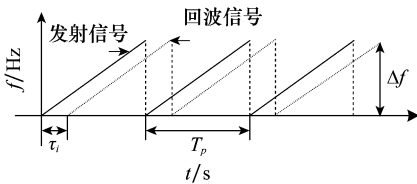


图 1 调频连续波信号形式

假设初始时刻目标与雷达的距离为 R_0 ,并以径向速度 v 远离雷达匀速运动,则 t 时刻雷达收到的第 i 个散射点的回波信号是在 $t - \tau_i$ 时刻发射的,而照射到目标上的时间是 $t' = t - (1/2)\tau_i$,照射时目标距离可表示为

$$R_i = R_0 + vt' \quad (2)$$

由于 $t = t_m + t_k$,令 $R(t_m)$ 表示不考虑快时间情况下第 m 个脉冲的回波信号,则 $R(t_m) = R_0 + vt_m$, $R_i = R_0 + vt = R(t_m) + vt_k$ 。因此, t 时刻第 i 个散射点回波信号的时延

$\tau_i = 2R_i/c$ 。结合式(2)可得

$$\tau_i = \frac{2R_i}{c+v} = \frac{2(R(t_m) + vt_k)}{c+v} \quad (3)$$

时延 τ_i 后,第 i 个散射点回波信号为

$$\begin{aligned} s_{ir}(t_k, t_m) &= A \cdot \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \cdot \\ &\exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_i) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_i)^2\right)\right) = \\ &A \cdot \text{rect}\left(\frac{t_k - 2(R(t_m) + vt_k)/(c+v)}{T_p}\right) \cdot \\ &\exp\left(j2\pi f_c\left(t - \frac{2(R(t_m) + vt_k)}{c+v}\right)\right) \cdot \\ &\exp\left(j2\pi\left(\frac{1}{2}\mu\left(t_k - \frac{2(R(t_m) + vt_k)}{c+v}\right)^2\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, A 表示目标反射信号的幅度变化。

为降低信号采样的压力,本文采样光外差相干探测的方法探测回波信号。假设目标的质心点为参考点,用激光信号对 t 时刻雷达与目标的距离进行估计,得到的雷达到参考点的参考距离为 R_{ref} ,则参考时延 $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/(c+v)$,参考信号可以写为

$$\begin{aligned} s_{\text{ref}}(t_k, t_m) &= \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_{\text{ref}}}{T'_p}\right) \cdot \\ &\exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_{\text{ref}})^2\right)\right) = \\ &\text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_{\text{ref}}/(c+v)}{T'_p}\right) \cdot \\ &\exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c+v}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c+v}\right)^2\right)\right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, T'_p 比 T_p 略大。外差探测后可以得到

$$\begin{aligned} s_{\text{if}}(t_k, t_m) &= s_i(t_k, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(t_k, t_m) = \\ &A \cdot \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_i/(c+v)}{T_p}\right) \cdot \\ &\exp(-j2\pi \cdot (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= f_c \cdot \frac{2(R(t_m) - R_{\text{ref}})}{c+v}; \\ \Phi_2 &= -\mu \cdot \frac{2(R(t_m)^2 - R_{\text{ref}}^2)}{(c+v)^2}; \\ \Phi_3 &= \left(\frac{2v}{c+v}f_c + \mu \frac{2(R(t_m) - R_{\text{ref}})}{c+v} - \frac{4\mu R(t_m)v}{(c+v)^2}\right)t_k; \\ \Phi_4 &= \left(\mu \frac{2v}{c+v} - \frac{1}{2}\mu \frac{4v^2}{(c+v)^2}\right)t_k^2 \end{aligned}$$

如果采用微波信号作为发射源,当 $v \ll c$ 时,可以忽略 v 的影响,而且可以认为在连续的两个回波脉冲之间^[14],目标到雷达的距离维持不变。根据这个假设,对式(6)的差频信号进行简化,可以得到

$$\begin{aligned} s'_{\text{if}}(t_k, t_m) &= \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R(t_m)/c}{T_p}\right) \cdot \\ &\exp(-j2\pi \cdot (\Phi'_1 + \Phi'_2 + \Phi'_3)) \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \Phi'_1 &= f_c \cdot \frac{2(R(t_m) - R_{ref})}{c}; \\ \Phi'_2 &= -\mu \cdot \frac{2(R(t_m)^2 - R_{ref}^2)}{c^2}; \\ \Phi'_3 &= \left(\mu \cdot \frac{2(R(t_m) - R_{ref})}{c} \right) t_k \end{aligned}$$

式(6)与式(7)存在以下几点区别:

(1) 忽略了速度 v 的影响。由于目标的飞行速度 $v \ll c$, 所以这不会对信号的处理造成实质性的影响。

(2) Φ_3 与 Φ'_3 存在差异。令 $\varphi_1 = \Phi_3 - \Phi'_3 \approx (2vf_c/c - 4\mu R(t_m)v/c^2)t_k$, 在采用微波信号时, f_c 较小, 当 $v \ll c$ 时, 相位 φ_1 可以忽略。但是, 由于激光信号的载频要高出普通的微波信号 3~5 个数量级, 相位 φ_1 的第一项 $2vf_c/c$ 会导致距离像的平移。因此, 必须进行补偿(相位 φ_1 的第二项中, 分母 c^2 极大, 因此可以忽略。)

(3) 式(7)中忽略了相位 Φ_1 。忽略了 Φ_1 以后, $s'_{if}(t_k, t_m)$ 可以近似看作一个单频信号, 只需要对 t_k 进行一次傅里叶变换, 就能得到目标的一维距离像。但是, 只有当信号的时宽带宽积 BT_p 非常小时, 对式(6)直接进行 t_k 的傅里叶变换, 振幅的频谱才能表现为一根直线。而激光信号的时宽带宽积 $BT_p \gg 1$, 如果对式(6)直接进行距离向压缩, Φ_1 将会导致一维距离像展宽, 并进而影响二维成像的结果。所以 Φ_1 的第一项不能忽略(Φ_1 的第二项中, 分母 c^2 极大, 因此也可以忽略。)

因此, 在 $v \ll c$ 的情况下, 式(7)可写为

$$\begin{aligned} s_{if}(t_k, t_m) &= A \cdot \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_t/c}{T_p}\right) \cdot \\ &\exp(-j2\pi \cdot (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4)) \end{aligned} \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= f_c \cdot \frac{2(R(t_m) - R_{ref})}{c}; \Phi_2 = -\mu \cdot \frac{2(R(t_m)^2 - R_{ref}^2)}{c^2}; \\ \Phi_3 &= \left(\frac{2vf_c}{c} + \mu \frac{2(R(t_m) - R_{ref})}{c} \right) t_k; \Phi_4 = \mu \frac{2v^2 t_k^2}{c} \end{aligned}$$

从式(8)中可以看出, $s_{if}(t_k, t_m)$ 是一个以 $4v\mu/c$ 为调频斜率的线性调频信号。其中, Φ_1 为线性相位项; Φ_2 是解线性调频方法所特有的残余时频相位(RVP), 可以通过补偿去除^[12]; Φ_3 的第一项是由激光信号的高载频引起的多普勒中心偏移项, Φ_3 的第二项是距离项, 表征了目标和参考点的相对距离; Φ_4 是由激光信号的大带宽带来的, 会导致一维距离像的频谱扩散。因此, 在进行成像之前, 必须先补偿 Φ_3 的第一项和 Φ_4 。通过分析可以发现, Φ_3 的第一项和 Φ_4 都与目标相对于雷达的径向运动速度 v 相关, 只要估计出 v , 就能构造有效的补偿因子完成对信号 $s_{if}(t_k, t_m)$ 的补偿。由于激光信号的波长极短, 成像所需要的时间较短, 在整个成像过程中可以近似认为 v 是恒定不变的。这样就能将对 v 的估计问题转化为对信号 $s_{if}(t_k, t_m)$ 调频斜率的估计。假设 $s_{if}(t_k, t_m)$ 的调频斜率为 K_s , 可以通过估计 K_s 得到目标相对于雷达的径向运动速度 v 。

2 ISAIL 回波信号补偿方法

从上一节的分析中可以看出, 只要估计出 K_s , 就可以推出目标的运动速度 v 。由于线性调频信号的维格纳分布体现为直线特征, 直线的斜率就是线性调频信号的调频斜率, 所以考虑首先获得信号 $s_{if}(t_k, t_m)$ 的维格纳分布。而 Radon 变换能够有效检测直线的参数, 并且具有优良的鲁棒性和容错性, 所以可以进一步通过 Radon 变换检测得到直线的参数。因此, 这里采用基于重排维格纳分布(reassign smoothed pseudo wigner ville distribution, RSPWVD)和 Radon 变换相结合的时频分析方法来估计 K_s 。

首先对信号 $s_f(t_k, t_m)$ 进行 Wigner 变换, 线性调频信号 $s(t) = \exp[j2\pi(f_c t + Kt^2/2)]$ 的 Wigner 分布可以表示为

$$\begin{aligned} \text{WVD}_s(t, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot \exp(-j2\pi f\tau) d\tau = \\ &\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[j2\pi\left(f_c\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + \frac{1}{2}K\left(t + \frac{\tau}{2}\right)^2\right)\right] \cdot \\ &\exp\left[-j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{\tau}{2}\right) + \frac{1}{2}K\left(t - \frac{\tau}{2}\right)^2\right)\right] \cdot \\ &\exp(-j2\pi f\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[j2\pi(f_c + K)\tau] \cdot \\ &\exp(-j2\pi f\tau) d\tau = \delta[f - (f_c + Kt)] \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 线性调频信号在经过 WVD 变换后, 在时频面上分布的幅值集中出现在表示信号的瞬时频率变化率的直线上, 信号的起始频率和调频斜率分别为直线的截距和斜率。因此, 对 $s_{if}(t_k, t_m)$ 进行 WVD 变换后, 可以得到一条直线, 只需求出直线的斜率, 就可以推出目标的运动速度。但是由于目标包含的散射点数量很多, 因此回波信号是由多个不同散射点的回波组成的一组具有相同的调频斜率, 不同起始频率的多分量线性调频信号, 不同分量之间的 WVD 变换会存在交叉项, 这会给基于 Radon 变换的调频斜率估计带来困难。因此, 这里采样 RSPWVD 分布来抑制交叉项。

对信号进行 WVD 变换后, 采用平滑处理可以抑制不同分量之间的交叉项^[15], 即

$$P_s(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t', f') \text{WVD}_s(t - t', f - f') dt' df' \quad (10)$$

式中, $\Phi(t', f')$ 是时频平面的二维低通滤波器, 它能使信号 WVD 中的交叉项将会衰减, 但同时信号分量也会扩散, 时频聚集性将降低。可以通过改变平均点的归属, 重新分配它到时频分布的能量的引力重心来解决这一问题。引力重心对应的坐标为^[16-17]

$$\begin{aligned} \hat{t}(t, f) &= t - \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t' \Phi(t', f') \text{WVD}_s(t - t', f - f') dt' df'}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t', f') \text{WVD}_s(t - t', f - f') dt' df'} \\ \hat{f}(t, f) &= f - \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f' \Phi(t', f') \text{WVD}_s(t - t', f - f') dt' df'}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t', f') \text{WVD}_s(t - t', f - f') dt' df'} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)称为重排算子,重排后的时频分布为

$$RSP_s(t', f') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_s(t, f) \delta(t' - \hat{t}(t, f)) \cdot \delta(f' - \hat{f}(t, f)) dt df \quad (12)$$

RSPWVD 保持了时移不变和能量守恒性质,对线性调频信号也有理想的聚集性。得到信号的 RSPWVD 后,进一步通过 Radon 变换求解直线的斜率。假设二维平面 (x, y) 上的任意二维函数 $f(x, y)$, 则它的 Radon 变换可以表示为

$$Ra(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dv \quad (13)$$

这相当于将原来的直角坐标系 (x, y) 旋转 α 角后转换到一个新的坐标系 (u, v) , 然后平行于 v 轴以不同的 u 值沿直线积分。 (x, y) 与 (u, v) 的对应关系为

$$x = u \cos \alpha - v \sin \alpha, y = u \sin \alpha + v \cos \alpha \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)后,可以得到

$$Ra(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u \cos \alpha - v \sin \alpha, u \sin \alpha + v \cos \alpha) dv \quad (15)$$

可以看出, Radon 变换是 u 和 α 的二维函数。令 $K = -\cos \alpha, f_c = u/\sin \alpha$, 在 Radon 平面上, 参数 (K, f_c) 处将会呈现尖峰, 而其他地方, 积分能量会减小。因此, 可以通过 Radon 变换得到直线的斜率。利用得到的调频斜率估计出目标径向速度 v , 就能构造补偿因子 H 对回波信号进行补偿。 H 可写为

$$H = \exp \left[j2\pi \left(\frac{2vf_c}{c} t_k + \frac{2\mu v}{c} t_k^2 \right) \right] \quad (16)$$

经过补偿后, 可以得到

$$s'_{if}(t_k, t_m) = s_{if}(t_k, t_m) \times H = A \cdot \text{rect} \left(\frac{t_k - 2R_i/c}{T_p} \right) \cdot \exp \left(-j2\pi \left(f_c \cdot \frac{2(R_i - R_{ref})}{c} - \mu \cdot \frac{2(R_i^2 - R_{ref}^2)}{c^2} + \mu \frac{2(R_i - R_{ref})}{c} t_k \right) \right) \quad (17)$$

在此基础上, 只要进一步对信号 $s'_{if}(t_k, t_m)$ 进行距离向压缩、运动补偿和方位向压缩, 就能实现对运动目标的二维成像。因此, ISAIL 的成像算法步骤可以概述如下:

- (1) 利用激光信号完成距离粗测, 通过光外差探测完成回波信号接收及差频处理, 得到差频信号 $s_{if}(t_k, t_m)$;
- (2) 对差频信号 $s_{if}(t_k, t_m)$ 进行 RSPWVD 和 Radon 变换, 完成目标径向速度估计;
- (3) 利用估计速度构造补偿因子 H , 完成对信号的精确补偿;
- (4) 对信号在快时间域 t_k 上进行傅里叶变换, 完成距离压缩, 并通过包络对齐和相位校正, 完成对信号的运动补偿;
- (5) 对信号在慢时间域 t_m 上进行傅里叶变换, 实现对运动目标的 ISAIL 二维成像。

算法流程如图 2 所示。

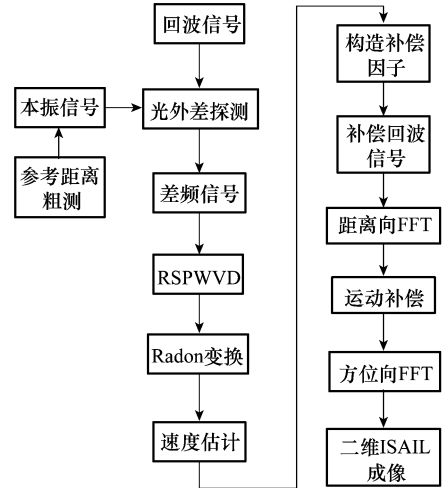


图 2 ISAIL 成像算法流程

3 仿真实验

目标为如图 3 所示的飞机模型, 由范围在 $[-1.5 \text{ m}, 1.5 \text{ m}]$ 内的 34 个散射点组成。假设目标与雷达的初始距离为 10 km, 目标沿距离向的飞行速度为 200 m/s, 沿方位向的飞行速度为 300 m/s, 雷达具体参数如表 1 所示。

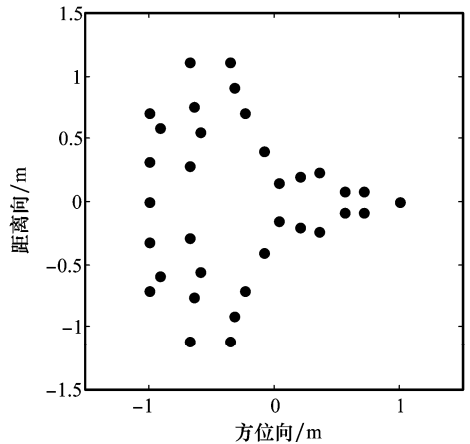


图 3 目标模型

表 1 仿真实验参数

参数	ISAR	ISAIL
信号载频 f_c/Hz	3×10^{10}	3×10^{13}
信号带宽 B/GHz	2	20
脉冲持续时间 $T_p/\mu\text{s}$	3	300
理论距离分辨率 Δ_R/m	0.75	0.007 5
理论方位分辨率 Δ_A/m	0.75	0.007 5

图 4(a) 为第 5 次回波的 RSPWVD 变换结果, 图 4(b) 表示图 4(a) 中各直线在 Radon 变换检测出的峰值点。理论上, 每一个散射点的回波都能对应 WVD 变换后的一条直线, 但从图 4(b) 中可以看出, Radon 变换并没有检测出所有直线, 主要检测出了两条直线, 分别为图 4(a) 中最上沿和

最下沿的两条直线,这是因为中间各条直线之间的间距较近,经过 RSPWVD 变换后,能量被平滑并重新分布了。但是这并不影响对调频斜率的判断,因为各个散射点的回波信号具有相同的调频斜率,所以只需要计算出任意一条直线的斜率,就可得到回波信号的调频斜率并进而推导出目标相对于雷达的径向速度。

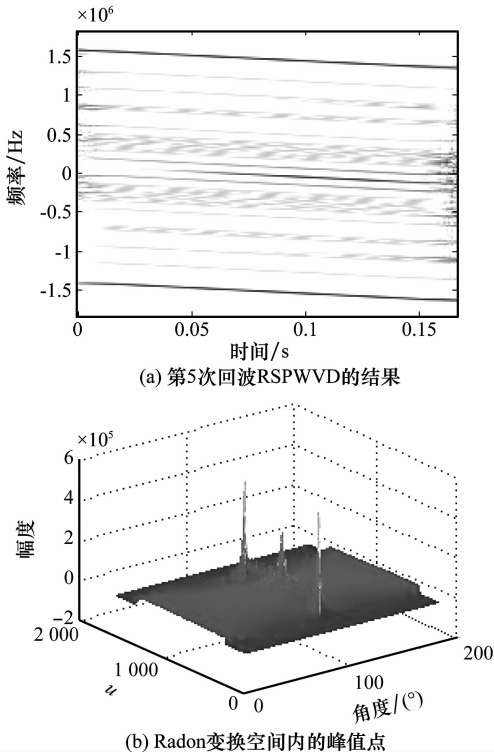


图 4 时频分析结果

为确保得到的结果更加准确,可以对求得的每一次回波的调频斜率进行加权平均。通过计算,估计出目标沿 Z 轴的运动速度为 303.8 m/s,误差为 1.26%。利用这个估计速度对回波信号进行补偿后,已基本能够满足成像的需求。这也证明了这种速度估计方法在 ISAIL 成像过程中的有效性。

图 5 和图 6 分别为补偿前后距离向压缩和第 200 次回波的一维距离像的结果,从图中可以看出,由于受到激光信号极大带宽和极高载频的影响,目标的一维距离像出现严重的展宽和明显的移位,在距离压缩后各个散射点已经不能很好区分,这将导致无法获得清晰的二维图像。而经过补偿后,不同距离单元内各个散射点的峰值都十分尖锐,成像结果得到了很大的改善。

图 7 为补偿前后的二维成像结果。可以看出,在补偿之前,二维像出现了严重的混叠,间距较近的散射点都已经因重合而无法分辨,这给目标识别带来了很大的困难。经过补偿后的结果如图 7(b) 所示,目标已经被较为清晰地还

原,基本不会影响目标识别的结果。图 8 为 ISAR 的二维成像结果,可以看出,ISAIL 的成像结果要明显好于 ISAR,这也证明了 ISAIL 在高分辨成像上的优势。

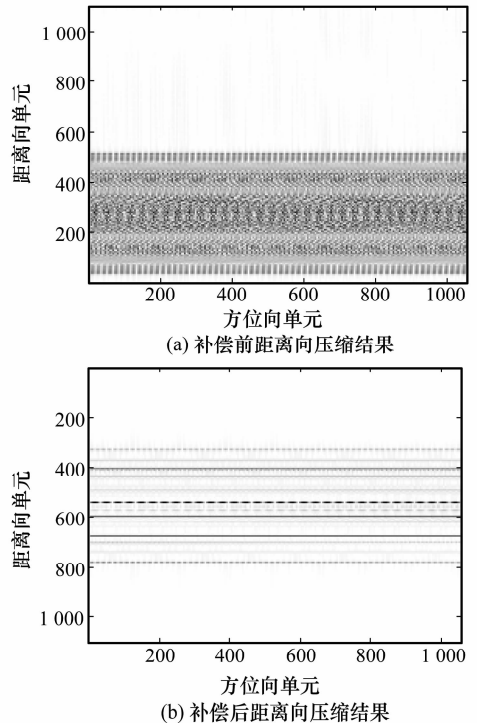


图 5 距离向压缩结果

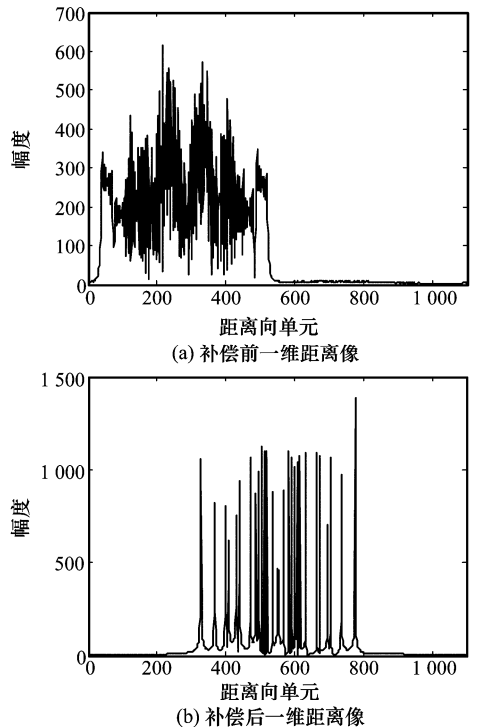


图 6 第 200 次回波的一维距离像结果

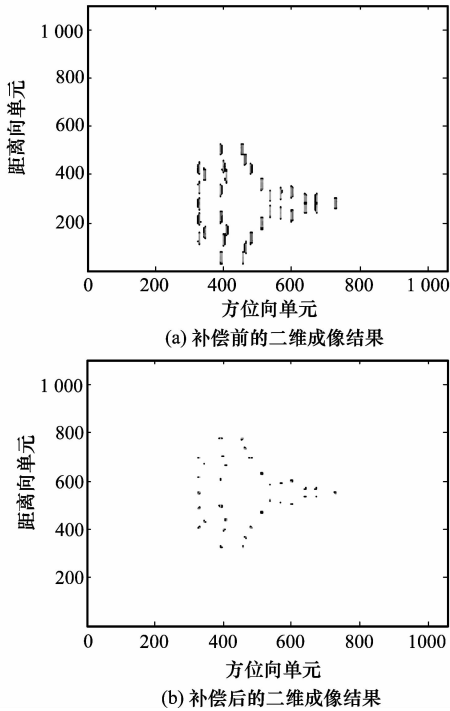


图7 补偿前后二维成像结果

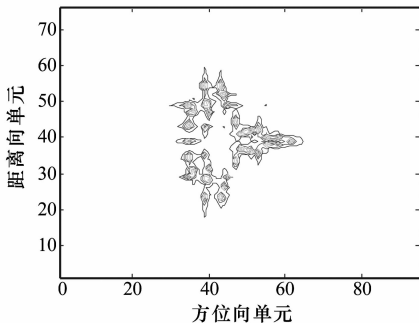


图8 ISAR 二维成像结果

4 结论

ISAIL 是一种能够实现对运动目标的实时高分辨成像的新体制雷达。本文针对 ISAIL 的信号特点,提出了一种适合于 ISAIL 的成像算法,对回波信号进行了有效的补偿,解决了激光信号极高载频和极大带宽带来的问题,并取得了良好的成像效果。

由于 ISAIL 的成像分辨率很高,所以在对小目标成像上具有极大的优势,在大型活动的安全保障等方面具有广泛的应用前景。但由于成像分辨率极高,当目标尺寸较大时,成像过程中还会发生越距离单元徙动,这在下一步工作中需要解决。而且,激光信号在大气传输的过程中往往会受到大气湍流扰动的影响,这会导致回波信号的相位相干性降低,本文在仿真实验中没有考虑这一问题。因此,如何有效地完成对回波信号的相位补偿,也是下一步工作中需考虑的。

参考文献:

[1] 郭亮, 马瑜杰, 邢孟道, 等. 合成孔径成像激光雷达旋转目标成像[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 637 - 642. (Guo L, Ma Y J,

Xing M D, et al. Rotating objects imaging of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (4): 637 - 642.)

[2] 洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirped 强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 229 - 234. (Hong G L, Wang J Y, Meng Z H, et al. Chirped amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2009, 28(3): 229 - 234.)

[3] 郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1183 - 1190. (Guo L, Xing M D, Liang Y, et al. Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging lidar data processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1183 - 1190.)

[4] Marcus S, Barry D C, Thomas J G. Solid-state laser synthetic aperture radar [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960 - 964.

[5] Cao C Q, Zeng X D, Feng Z J, et al. Study on key techniques for synthetic aperture lidar system [J]. *Proceeding of SPIE*, 2007, 6829: 01 - 10.

[6] Zang B, Guo L, Xing M D, et al. Study on synthetic aperture imaging lidar based in a laboratory-scale sliding guide system [C]// *Proc. of the Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2009: 48 - 50.

[7] Liu L R. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar [J]. *Proc. of the SPIE*, 2008, 7094: 1 - 13.

[8] Chen H, Wu Y H, Yin C B, et al. Inverse synthetic aperture lidar imaging with the range instantaneous Doppler algorithm [C]// *Proc. of the International Conference on Signal Processing*, 2010: 2027 - 2030.

[9] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Opt Letter*, 2002, 27(22): 1983 - 1985.

[10] 王省伟, 侯天晋, 周鼎富. 合成孔径激光雷达[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 4 - 7. (Wang S W, Hou T J, Zhou D F, et al. Synthetic aperture lidar [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 4 - 7.)

[11] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2009, 39(10): 1678 - 1684. (Guo L, Xing M D, Zhang L, et al. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. *Scientia Sinica E: Technologica*, 2009, 39(10): 1678 - 1684.)

[12] 邢孟道, 郭亮, 唐禹, 等. 合成孔径成像激光雷达实验系统研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 128 - 132. (Xing M D, Guo L, Tang Y, et al. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 128 - 132.)

[13] He J, Luo Y, Feng T A, et al. Inverse synthetic imaging lidar: no targets can hide [C]// *Proc. of the Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics*, 2009: 177 - 181.

[14] Richards M. *Fundamentals of radar signal processing* [M]. New York: McGraw-Hill, 2005.

[15] Kodera K, Villedary D C, Gendrin R. A new method for the numerical analysis of non-stationary signal [J]. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 1976, 12: 142 - 150.

[16] Auger F, Flandrin P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method [J]. *IEEE Trans. on SP*, 1995, 43(5): 1068 - 1089.

[17] Zhang Y A, Zhang D C, Chen W D, et al. ISAR imaging of multiple moving targets based on RSPWVD-Hough transform [C]// *Proc. of the Asia Pacific Microwave Conference*, 2008: 1 - 3.