

doi:10.3788/gzxb20134210.1238

自旋目标逆合成孔径激光雷达成像算法

阮航, 吴彦鸿, 贾鑫, 叶伟

(装备学院, 北京 101416)

摘 要:受激光调制技术的限制及大气湍流的影响,逆合成孔径激光雷达对自旋目标成像的过程中存在方位多普勒模糊和回波不相干的问题.同时,在成像中相邻回波脉冲间目标转角较大,回波相关性很差,现有的一些相位误差补偿算法难以补偿上述相位误差,传统方位相干积累法无法获取聚焦良好的二维图像.本文利用回波包络信息进行成像,建立了自旋目标逆合成孔径激光雷达成像的空间几何模型,分析了回波信号的特征,提出了一种基于广义 Radon 变换的自旋目标逆合成孔径激光雷达成像算法.首先采用自相关法在距离-慢时间域对距离压缩后的包络求取目标的自旋角速度,之后对距离-慢时间域的包络作广义 Radon 变换,实现对包络的非相干积累,并获得自旋目标的二维高分辨图像.由于没有利用回波相位信息,因此避免了相位误差的影响.仿真结果表明:传统距离-多普勒算法无法成像,而提出的方法在低信噪比、多普勒模糊和回波不相干条件下仍能够获得聚焦良好的图像.

关键词:逆合成孔径激光雷达;自旋目标;广义 Radon 变换;非相干积累

中图分类号:TN958

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)10-1238-6

Inverse Synthetic Aperture Ladar Imaging Algorithm for Spinning Targets

RUAN Hang, WU Yan-hong, JIA Xin, YE Wei

(The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Due to the limitation of the laser modulation technique and the interference of the atmospheric turbulence, inverse synthetic aperture ladar (ISAL) has the problems of azimuth Doppler ambiguity and echo noncoherence when imaging a spinning target. Meanwhile, the large relative rotation angle of the spinning target results in a poor correlation between adjacent echoes that makes the present phase error compensation methods fail to work. Hence, the traditional coherent integration algorithms are incapable to obtain a well-focused 2-D image. In order to solve these problems, the envelope of the echo is considered for imaging. The ISAL imaging geometry of a spinning target is established, and the characteristic of the echo is analyzed. An ISAL imaging algorithm based on the generalized radon transform (GRT) is proposed for spinning targets. Firstly, the spinning velocity of the target is estimated by autocorrelation with the range-compressed envelope in the range-slow-time domain. Then, noncoherent integration with the range-compressed envelope is realized by using the GRT, and hence the 2-D image of the spinning target with high resolution is obtained. Since the phase is not used in imaging, the phase errors are avoided. Simulation results show that, the traditional range-Doppler algorithm fails to work, while the proposed algorithm successfully obtained a well-focused ISAL image in the case of low signal-to-noise ratio, Doppler ambiguity, and echo noncoherence.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Ladar (ISAL); Spinning target; Generalized Radon Transform(GRT); Noncoherent integration

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2012AA7074001E)资助

第一作者:阮航(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为逆合成孔径激光雷达成像算法. Email:dragonhang9@163.com

导师:吴彦鸿(1971-),男,教授,博导,主要研究方向为信息获取与处理、信息对抗. Email:mail2wyh@163.com

收稿日期:2013-04-09;录用日期:2013-05-23

0 引言

由于结合了相干激光技术和合成孔径技术,光波段合成孔径成像雷达二维分辨率在距离上具有较好的一致性,是理论上可以在数千公里距离上实现厘米级分辨率的唯一光学手段^[1].与传统微波成像雷达相比,光波段合成孔径成像雷达的工作波长更短,成像分辨率更高,也因此得到越来越广泛的关注^[2-6].

逆合成孔径激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Ladar, ISAL)可获得非合作目标的高分辨二维图像,在军事和民用上具有广泛的应用前景.由于 ISAL 成像分辨率极高,利用 ISAL 对小尺寸空间目标成像成为可能,但会遇到以下技术问题:首先,受激光调制技术的限制,ISAL 发射脉冲信号初始相位存在一定的随机误差,信号之间的相干性较差^[7];其次,在大气湍流的影响下,ISAL 信号脉冲间相干性也将恶化,这严重限制了 ISAL 在大气环境中的应用;最后,ISAL 通过发射超大带宽线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号获取距离高分辨率,但由于空间目标通常围绕主轴自旋^[8-9],成像中其方位多普勒带宽较大,受激光调制技术的限制,ISAL 在发射超大带宽 LFM 信号的同时难以实现方位无模糊脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF),且高 PRF 也会带来高数据量的问题.值得说明的是,在对高速自旋目标成像时,ISAL 相邻回波脉冲间的目标转角较大,回波相关性很差,现有的一些自聚焦算法也很难补偿上述相位误差^[10-11].

目前,在微波逆合成孔径雷达中有研究人员提出了基于广义 Radon 变换(Generalized Radon Transform, GRT)的高速自旋目标成像算法,获得了较好的效果^[12].针对上述空间自旋目标 ISAL 成像中的问题,本文采用 GRT 实现在低信噪比、非相干、方位多普勒模糊条件下的 ISAL 成像.文中对成像算法进行了理论推导,并对低信噪比条件下存在相位误差和方位多普勒模糊的情况进行了仿真分析.结果表明本文提出的方法能有效获取空间自旋目标的二维 ISAL 图像.

1 自旋目标 ISAL 回波信号模型

ISAL 成像空间几何模型如图 1.其中,XYZ 为空间目标本体坐标系,且空间目标绕 Z 轴以角速度 ω_s 进行自旋; ζ 为雷达视线(Line Of Sight, LOS)单位矢量,且位于 YZ 平面, E 与 ζ 正交; α 为雷达视线与目标自旋轴 Z 的夹角, v 为目标速度矢量.空间目

标轨道运动产生的相对雷达视线的转动角速度为 ω_r ,且假设其转动中心与自旋中心 O 点重合. t 时刻雷达到目标自旋中心 O 的瞬时距离为 $R_0(t)$.

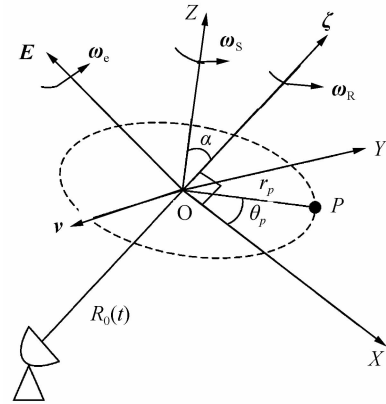


图 1 ISAL 成像空间几何

Fig. 1 Imaging geometry of ISAL

假设 ISAL 发射信号为线性调频信号,即

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

式中, $\text{rect}(t_k/T_p) = \begin{cases} 1, & |t_k| \leq T_p/2 \\ 0, & |t_k| > T_p/2 \end{cases}$, T_p 为脉冲宽度, f_c 为发射信号载频, k_r 为调频斜率, t_k 为快时间, t_m 为慢时间,全时间 t 满足 $t = t_k + t_m$.

假设 P 点位于 XY 平面内,其极坐标可表示为 (r_p, θ_p) ,因此其回波信号可表示为

$$s_r(t_k, t_m) = A_p \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c(t - \tau) + j\pi k_r(t_k - \tau)^2] \quad (2)$$

式中, A_p 为散射点强度,传输时延 $\tau = 2R_p(t)/c$.在满足平面波近似条件,即 $R_0(t) \geq r_p$ 时, P 点至雷达瞬时距离 $R_p(t)$ 可近似为

$$R_p(t) \approx R_0(t) + r_p \sin(\theta_p + \omega_s t_m) \sin(\alpha + \omega_r t_m) \quad (3)$$

参与光外差探测的参考信号为

$$s_{\text{ref}}(t_k, t_m) = A_p \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_{\text{ref}}}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c(t - \tau_{\text{ref}}) + j\pi k_r(t_k - \tau_{\text{ref}})^2] \quad (4)$$

式中, $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$, R_{ref} 为参考距离.

经过光外差接收后(等效于雷达中的 Dechirp 接收方式),信号可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{s}(t_k, t_m) = & s_r(t_k, t_m) s_{\text{ref}}^*(t_k, t_m) = \\ & A_p \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau}{T_p}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{c} k_r \left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right) R_\Delta\right) \cdot \\ & \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_\Delta\right) \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2} k_r R_\Delta^2\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $R_\Delta = R_p(t) - R_{\text{ref}}$, λ 为发射信号中心波长.

由于空间目标相对雷达运动速度较大,且 ISAL 距离分辨率很高,在 ISAL 成像中需要考虑脉冲持续时间内目标运动的影响,此时“一步一停”的

信号模型不再成立,需要对回波信号进行速度补偿后才能进行后续处理.在此可以用文献[13]中方法进行速度补偿,并完成光外差接收后的去斜处理及对剩余视频相位(Residual Video Phase,RVP)项的补偿^[14],在平动补偿后,可得距离压缩后的信号为

$$\begin{aligned} \tilde{s}(f_i, t_m) = & A_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_i + 2 \frac{k_r}{c} r_p \sin(\theta_p + \omega_s t_m) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \sin(\alpha + \omega_i t_m) \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r_p \sin(\theta_p + \right. \\ & \left. \omega_s t_m) \sin(\alpha + \omega_i t_m) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

一般情况下,目标在没有自旋时可满足小角度近似条件,即

$$\begin{cases} \cos \omega_i t_m \approx 1 \\ \sin \omega_i t_m \approx \omega_i t \end{cases} \quad (7)$$

因此,式(6)可近似为

$$\begin{aligned} \tilde{s}(f_i, t_m) = & A_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_i + 2 \frac{k_r}{c} (x'_p \omega_i t_m + y'_p) \right) \right] \cdot \\ & \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} (x'_p \omega_i t_m + y'_p) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $x'_p = y_p \cos \alpha$, $y'_p = y_p \sin \alpha$, (x_p, y_p) 为 P 点在 XY 平面的直角坐标.可见,此时回波信号在方位向为一单频信号,利用 Fourier 变换便可直接实现方位成像.而对于空间自旋目标,其在观测时间内可能已转过若干个周期,小角度近似的条件不再满足,同时距离压缩后的回波信号存在严重的越距离单元徙动和越多普勒单元徙动,利用传统的距离-多普勒(Range-Doppler,RD)算法无法成像.对此,在微波成像雷达中,有研究人员提出了一种基于广义 Radon 变换的高速自旋目标成像算法,获得了较好的效果^[12].上述方法忽略了相对转动角速度 ω_i 的影响,认为雷达视线与目标自旋轴夹角 α 是恒定的.实际上,由于 ISAL 距离分辨率很高,在一定条件下,式(6)包络中的调制项 $\sin(\alpha + \omega_i t_m)$ 会对包络产生一定的影响.取式(6)中包络项并将 $\sin(\alpha + \omega_i t_m)$ 展开,将式(7)代入(6)中可得

$$\begin{aligned} |\tilde{s}(f_i, t_m)| = & \left| A_p \operatorname{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2k_r r_p}{c} \sin(\theta_p + \omega_s t_m) \cdot \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \sin \alpha \right) \right) \left| + \right| A_p \operatorname{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2k_r r_p}{c} \sin(\theta_p + \omega_s t_m) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \omega_i t_m \cos \alpha \right) \right) \left| \right. \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)中可见,相对转动运动的存在将使得 ISAL 距离压缩后的回波包络振幅随慢时间展宽,而最大展宽量为

$$\Delta r = r_p \omega_i T_{sa} \cos \alpha \quad (10)$$

当目标尺寸较大时,式(10)中的最大展宽量会超过一个距离分辨单元,此时若用文献[12]中方法会影响成像分辨率.当满足以下条件时,相对转动引起的包络振幅展宽可忽略

$$r_p < \frac{c}{2B\omega_i T_{sa} \cos \alpha} \quad (11)$$

式中, c 为光速, B 为发射信号带宽.

若目标尺寸满足式(11),则式(6)可重写为

$$\begin{aligned} \tilde{s}(f_i, t_m) = & A_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_i + 2 \frac{k_r}{c} r_p \sin(\theta_p + \omega_s t_m) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \sin \alpha \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} r_p \sin(\theta_p + \omega_s t_m) \cdot \right. \\ & \left. \sin(\alpha + \omega_i t_m) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

可见,此时回波包络是变化频率为 ω_s 的正弦曲线,如图 2.为此,可采用文献[15]中基于自相关的方法估计自旋角速度.利用自相关对距离压缩后的回波包络求相关系数,则第一个峰值点的位置对应的就是目标的自旋周期.上述方法的具体过程可参考文献[15].

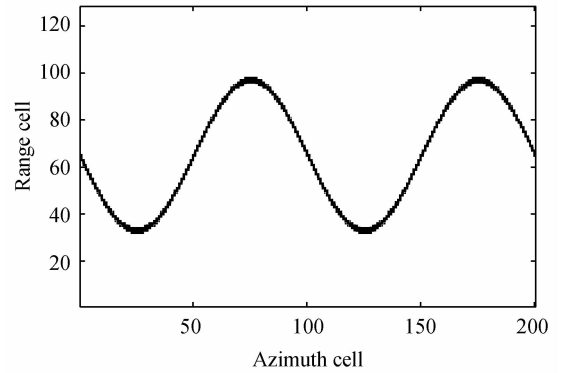


图 2 单点自旋目标回波包络
Fig. 2 Envelope of a single spinning point

2 基于 GRT 的自旋目标成像算法

ISAL 成像时,方位相干积累过程中多普勒无模糊需满足的条件为

$$\text{PRF} \geq 4\omega r / \lambda \quad (13)$$

式中, ω 为目标转动角速度, r 为目标转动半径, λ 为发射信号波长.对于 ISAL 而言,假设其发射信号中心波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,目标转动半径 $r = 0.01 \text{ m}$,自旋角速度 $\omega_s = 2\pi \text{ rad/s}$ (即每秒转一圈),通过式(13)可算出无模糊 PRF 为 162.15 kHz.实际上,受激光调制技术的限制,ISAL 在发射超大带宽 LFM 信号的同时,无法实现如此高的 PRF,这必然会产生方位多普勒模糊的情况,采用相干积累的方位成像方法将会造成图像方位向散焦.

其次,受激光调制技术的限制,ISAL 发射脉冲的初始相位存在一定的随机误差.同时,在大气环境中,ISAL 信号受大气湍流的影响较为严重,回波脉冲间的相干性也会恶化.

此外,由于发射信号波长极短,在成像过程中即使微小的运动误差也将造成极大的相位误差.同时对于自旋运动目标,由于其自旋角速度较大,在 PRF 较低的情况下,相邻回波脉冲间相关性很差.现有的相位误差校正算法(如相位梯度自聚焦算法)不能准确估计相邻回波脉冲间的相位误差^[10-11],回波脉冲间是非相干的.

综合上述分析可见,在对空间自旋目标成像过程中,必须克服方位多普勒模糊和相位误差的双重影响.为此,本文提出一种基于 GRT 的空间自旋目标 ISAL 成像算法.该算法只利用距离压缩后的回波包络进行方位成像,同时,在低 PRF、低信噪比情况下仍然具有良好的性能.

GRT 具备对任意形状曲线的检测能力,可将图像中的曲线转换为多维离散参量域,参量域中的峰值位置对应于一条曲线,且即使存在曲线轨迹交叉、断裂等现象,GRT 仍具有较好的检测性能.

在估计得到目标自旋角速度后,式(12)中包络表征的正弦曲线由 P 点直角坐标 (x_p, y_p) 唯一决定其在距离-慢时间域中的形状及位置.因此,利用 GRT 对距离-慢时间域中的正弦曲线进行检测后,在参量平面 $x-y$ 中的峰值点位置就是目标点的位置,由此便可完成对自旋目标的二维成像.

对式(12)取实包络并写为直角坐标系下形式

$$|\tilde{s}(f_i, t_m)| = \left| A_p \operatorname{sinc} \left[T_p \left(f_i + 2 \frac{k_r}{c} (\hat{x}_p \sin \omega_s t_m + \hat{y}_p \cos \omega_s t_m) \right) \right] \right| \quad (14)$$

式中, $\hat{x}_p = x_p \sin \alpha$, $\hat{y}_p = y_p \sin \alpha$. 为便于分析,将式(14)改写为

$$|\tilde{s}(s, t_m)| = \left| A_p \operatorname{sinc} \left[\frac{2B}{c} (s + \hat{x}_p \sin \omega_s t_m + \hat{y}_p \cos \omega_s t_m) \right] \right| \quad (15)$$

式中, $s = cf_i/2k_r = x \sin \omega_s t_m + y \cos \omega_s t_m$.

对式(15)作 GRT,这一过程可以表示为

$$I(x, y) = \sum_{t_m} \left| A_p \operatorname{sinc} \left[\frac{2B}{c} (s + \hat{x}_p \sin \omega_s t_m + \hat{y}_p \cos \omega_s t_m) \right] \right| \quad (16)$$

式(16)中,当 $s = -\hat{x}_p \sin \omega_s t_m - \hat{y}_p \cos \omega_s t_m$,也即在参量平面 $x-y$ 中当 $x = \hat{x}_p$, $y = \hat{y}_p$ 时存在峰值点,

该点对应的坐标 (\hat{x}_p, \hat{y}_p) 即为 P 点坐标在二维成像平面的投影.由于目标回波信号为所有散射点回波信号的线性叠加,因此,上述方法适用于多散射点目标的情况.

从上述过程可见,该算法利用距离-慢时间域包络进行非相干积累实现方位成像,只要在 Dechirp 接收后的距离向采样率满足无模糊要求(ISAL 成像中比较容易满足),回波脉冲间的相位误差和方位多普勒模糊并不会影响上述算法的性能.

3 仿真实验

通过仿真实验来验证本文方法在低信噪比、低 PRF 和回波不相干情况下的性能.参量设置为:激光啁啾范围 1 549 ~ 1 553 nm,波长扫描速率 100 nm/s,啁啾速率 1.2674×10^{13} Hz/s^[6],激光脉冲宽度为 4 ms,则调频带宽约为 50.7 GHz,理论距离分辨率为 0.003 m;目标自旋频率为 2 Hz,相对转动角速度 $\omega_r = 0.01$ rad/s.目标在二维成像平面的散射点模型如图 3 所示,其中散射点“1”、“2”横向坐标相同,径向相差 0.01 m,散射点“3”、“4”径向坐标相同,横向坐标相差 0.01 m.目标的最大旋转半径为 0.1 m,由式(13)计算可得其无模糊 PRF 为 3.245 MHz.为验证本文方法在低 PRF 时的性能,在仿真中实际所用 PRF 取为 200 Hz.仿真中截取了时长为 0.995 s 的回波脉冲串,且将输入信噪比设置为 SNR=0 dB.将上述仿真参量代入式(10)可求出包络振幅最大展宽量为 0.31 mm,远小于距离分辨率,因此可忽略相对转动对回波包络的影响.

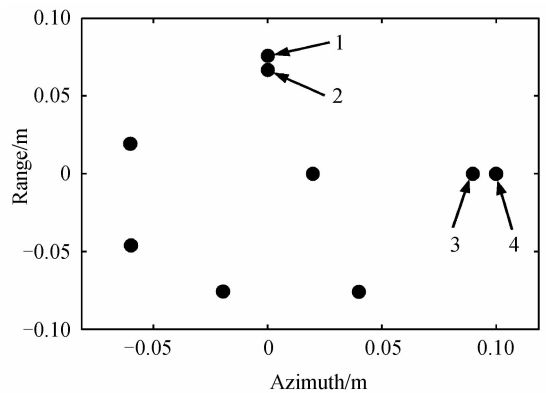


图3 目标散射点模型

Fig. 3 Target model

为模拟成像过程中存在的目标运动误差、发射脉冲信号初始相位误差,以及大气湍流产生的相位误差,仿真中加入了高斯分布的随机相位误差,设置其均方根为 π .图 4 所示为该相位误差随慢时间的变化情况.

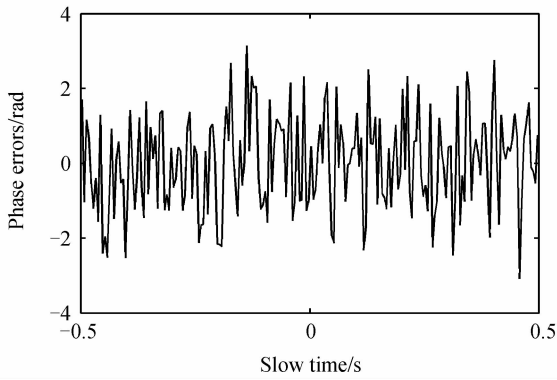


图4 随机相位误差
Fig. 4 Random phase errors

图5为对目标回波进行距离压缩和速度补偿后的距离慢时间图像.由于目标上散射点自旋角速度相同,因此,采用文献[15]中方法对回波包络慢时间序列做自相关以获得其自旋角速度,其结果如图6.图6中右侧第一峰值点位置为100,二者的时间间隔即为目标自旋周期 $T_s=0.5\text{s}$,而自旋角速度 $\omega_s=2\pi/T_s=4\pi$,这与实际值一致.

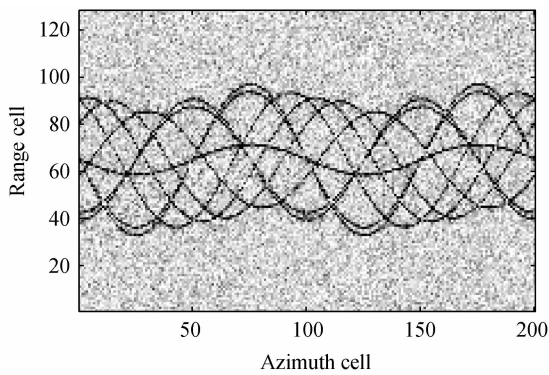


图5 距离-慢时间图像
Fig. 5 Range-Slow-time image

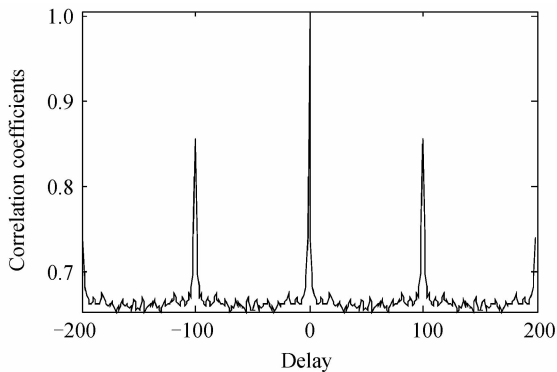
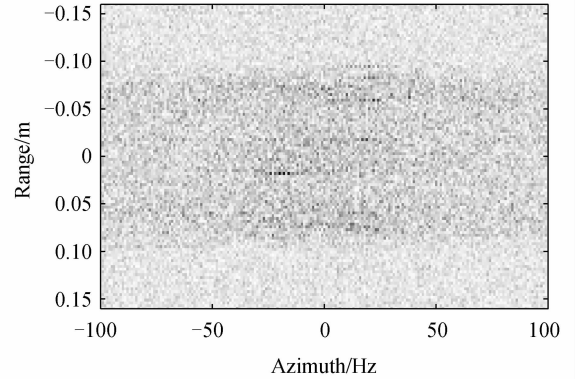


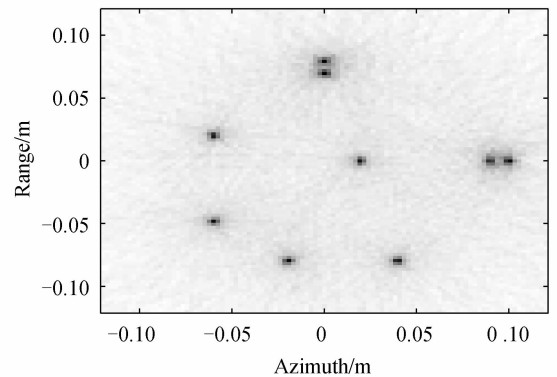
图6 自旋周期估计结果
Fig. 6 Result of the estimation of spinning period

图7为成像结果,其中,图7(a)为传统RD算法的成像结果,且采用了文献[10]中的PGA算法进行相位误差校正.从图7(a)可见,图像在方位向严重散焦,目标已无法识别.图7(b)为本文方法的成像结果,可见,即使在低重频、低信噪比,并且回波信号不相干的情况下,本文中方法也能够获取聚焦良

好的图像.同时,图像中散射点“1”、“2”能够清晰分辨,说明本文算法具有较好的距离分辨率保持特性;图像中散射点“3”、“4”同样可以清晰分辨,说明本文算法也具有较好的方位分辨能力.



(a) Image obtained via RD algorithm



(b) Image obtained via the proposed algorithm

图7 成像结果
Fig. 7 Imaging results

4 结论

逆合成孔径激光雷达相比微波逆合成孔径雷达具有更高的空间分辨率,因此在对空间目标监视与识别中有巨大的应用前景.利用逆合成孔径激光雷达对空间自旋目标进行成像过程中,存在方位多普勒模糊和多种相位误差等不利因素的影响,传统的相干积累算法不能适用.针对上述问题,本文提出一种基于广义Radon变换的成像算法,在距离压缩和速度补偿后,在距离-慢时间域只利用包络信息进行方位成像,因此可不受回波相位误差的影响.此外,该算法在低信噪比和低重频下仍然具有很好的性能,适用于对空间自旋目标的二维成像.

参考文献

- [1] LIU Li-ren. Synthetic aperture Laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997-1000.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 997-1000.
- [2] BASHKANSKY M, LUCKE R L, FUNK E, *et al.* Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(22): 1983-1985.

- [3] KRAUSE B W, BUCK J, RYAN C, *et al.* Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. 2011 Conference on Laser and Electro-Optics, 2011, 1-2.
- [4] GUO Liang, XING Meng-dao, ZENG Xiao-dong, *et al.* Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(4): 637-642.
郭亮, 邢孟道, 曾晓东, 等. 室内实测数据的逆合成孔径激光雷达成像 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(4): 637-642.
- [5] LIU L. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(4): 579-599.
- [6] LIU Li-ren, ZHOU Yu, ZHI Ya-nan *et al.* A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900112.
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900112.
- [7] ZANG Bo, GUO Rui, TANG Yu, *et al.* Real envelope imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging Lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2152-2157.
臧博, 郭睿, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2152-2157.
- [8] WANG Q, XING M D, LU G Y, *et al.* Single range matching filtering for space debris radar imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(4): 576-580.
- [9] LI J, QIU C W, ZHANG L, *et al.* Time-frequency imaging algorithm for high-speed spinning targets in two dimensions [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2010, **4**(6): 806-817.
- [10] WAHL D E, EICHEL P H, GHIGLIA D C, *et al.* Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1994, **30**(3): 827-835.
- [11] ATTIA E H. Data-adaptive motion compensation for synthetic aperture LADAR [C]. 2004 *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, **3**: 1782-1787.
- [12] WANG Q, XING M D, LU G Y, *et al.* High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(1): 22-30.
- [13] HE Jin, ZHANG Qun, YANG Xiao-you, *et al.* Imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging LADAR [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 1094-1100.
何劲, 张群, 杨小优, 等. 逆合成孔径成像激光雷达成像算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 1094-1100.
- [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 24-30.
- [15] SATO T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(2): 1000-1005.