

文章编号:1004-4213(2010)12-2152-6

# 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法\*

臧博, 郭睿, 唐禹, 邢孟道

(西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071)

**摘 要:**逆合成孔径激光成像雷达受激光调制技术以及回波相位信息易受大气湍流破坏的限制, 采用常规的相位相干积累类方法得到目标二维高分辨图像很困难. 针对这一情况, 提出了一种基于逆 Radon 变换的实包络成像算法. 利用回波距离脉冲压缩后的实包络信息, 实现方位向的非相干积累, 最终得到二维高分辨图像. 通过该算法, 成像系统可以使用非相干激光信号, 在脉冲重复频率较低且存在大气湍流的情况下, 也可以获得高质量的成像结果. 仿真实验验证了此算法的有效性和优越性.

**关键词:**实包络成像算法; 逆 Radon 变换; 逆合成孔径激光成像雷达; 脉冲重复频率; 非相干积累

**中图分类号:** TN957

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3788/gzxb20103912. 2152

## 0 引言

由于传统光学成像系统分辨率受波长和系统孔径的限制<sup>[1]</sup>, 当工作波长一定时, 要提高系统的分辨率, 只能增加系统孔径. 在实际应用中系统孔径尺寸受众多因素限制, 且分辨率随距离的增加而恶化; 而微波合成孔径雷达分辨率不会受实际孔径的限制, 且空间分辨率与距离无关, 因此衍生了合成孔径光学技术. 合成孔径激光成像雷达 (Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar, ISAIL) 是结合相干激光技术和合成孔径技术的一种新型主动遥感探测成像技术. 与传统激光成像雷达相比, 合成孔径成像激光成像雷达的二维分辨率在距离上有很好的 consistency, 不会由于作用距离的增大而变差; 与传统的微波合成孔径雷达相比, 由于合成孔径激光成像雷达的天线孔径更小, 工作波长更短, 可以得到比微波合成孔径雷达分辨率高得多的图像, 提供更丰富、更准确的信息.

随着一些关键技术的成熟, 国内外学者先后对这一技术开展了探索和研究. 2006 年 4 月美国国防高级研究计划局 (DARPA) 资助的项目已经成功得到了机载合成孔径成像激光雷达图像. 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室、中国科学院上海光学精密机械研究所等多家单位也展开了合成孔径成像激光雷达成像理论和技术研究, 进行了各种实验, 并取得成果<sup>[2-4]</sup>.

在进行室内短距离合成孔径激光成像雷达实验的过程中, 笔者发现激光信号与微波成像雷达信号相比, 具有以下技术难点: 首先, 发射信号难以满足相干成像雷达所要求的相干性, 即每一个脉冲的第一个波前必须与前一个脉冲具有相同极性的最后一个波前相隔许多个波长的整数倍<sup>[5]</sup>; 方位分辨率取决于方位多普勒带宽, 方位分辨率越高, 多普勒带宽越大, 需要的脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 就越高, 即更快的信号调制速度, 受光信号调制技术的限制, 合成孔径激光成像雷达系统的重频率也难以提高, 且高重频率带来距离模糊以及数据量巨大的问题, 如果降低重频率, 使用方位向相干积累类算法时, 会导致方位多普勒模糊、图像散焦的问题; 其次, 与微波信号不同, 激光信号易受大气湍流的影响, 大气湍流对光束特性的影响程度同光束直径和湍流尺寸有很大关系, 最为常见的情况是光束直径远大于湍流尺寸, 光束截面内的小尺寸湍流各自对照射的那一小部分光束起衍射作用<sup>[6]</sup>, 破坏了回波信号的相位信息, 对相干积累处理也有很严重的负面影响. 以上问题的存在, 使得适用于微波逆合成孔径成像雷达的相干积累类算法难以适用于合成孔径激光成像雷达, 增加了合成孔径激光成像雷达在实际应用中的难度.

本文针对以上问题, 在逆合成孔径成像激光雷达转台模型的基础上, 提出了一种利用回波信号实包络信息进行非相干积累的成像算法. 首先在距离向上通过对大时宽带宽积信号进行距离脉压实现距离高分辨, 然后在方位向上通过逆 Radon 变换 (Inverse Radon Transform, IRT) 对距离脉压后的实包络进行非相干处理, 最终实现二维高分辨图像.

\* 国家重点基础研究发展计划 (2010CB731903) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (K50510050008) 资助

Email: zangbotiger@163.com

收稿日期: 2010-06-23

修回日期: 2010-08-10

针对 ISAIL 系统低重频、信号非相干等特性,提出并分析基于逆 Radon 变换的实包络成像算法(Real Envelope Imaging Algorithm, REIA);最后,通过仿真验证了基于逆 Radon 变换的实包络成像算法的有效性.

## 1 ISAIL 转台模型及信号分析

ISAIL 是逆合成孔径技术与相干激光技术相结合的产物,在成像几何模型和成像原理上与常规逆合成孔径成像雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)相似.但受波长影响,成像范围较小,适合于与 ISAR 相结合,进行目标的精细观测,并通过与微波雷达的结合,实现目标的平动补偿,从而将目标运动转换为散射点模型下的二维平面转动<sup>[7]</sup>.

本文仅考虑经平动补偿后的二维转台目标成像.假设系统的脉冲重复频率为 PRF,运动补偿后,目标以均匀的速度相对雷达转动,其转动频率为  $f_{\text{rot}}$ ,在“一步一停”的近似条件下,ISAIL 回波的录取过程可描述为:

1) 雷达在方位角  $n\Delta\theta$  ( $n=1\cdots N$ ) 处发射激光信号,对目标进行扫描,并接收目标回波,回波对应目标在此方位角处的一维高分辨距离像,距离向上每点的回波相当于垂直雷达视线平面上目标空间分布函数的二维积分.其中,  $\Delta\theta=2\pi f_{\text{rot}}/\text{PRF}$ ,  $N$  为目标观测时间内回波总次数;

2) 目标以  $O$  为中心,转动  $\Delta\theta$ ,方位角变为  $(n+1)\Delta\theta$  ( $n+1=1\cdots N$ ),重复 1) 的过程,直至目标观测完毕.此时目标相对雷达共转过  $\theta=N\Delta\theta$ ;

3) 以距离为纵坐标、方位为横坐标,将不同方位角的回波数据排列,形成二维数据阵列.

以上过程类似于微波成像雷达中的聚束式成像模式,根据中心切片定理,相当于对二维平面内的目标区域进行 Radon 变换的过程<sup>[8]</sup>.故对成像平面上散射点空间分布的重建相当于对回波信号进行逆 Radon 变换的过程.

对于一个距离单元中的散射点分布情况,可粗略地分为三种情况:第一类为一个距离单元中仅存在一个特显点,其余为杂波;第二类为不存在特显点,只有杂波;第三类为存在多个特显点,以及部分杂波<sup>[7]</sup>.某次回波强度由不同散射点回波的自身项及散射点回波的交叉项共同决定,由于两次相邻回波间,目标和雷达的相对转动角度极小,可以认为交叉项的变化也极小,且为快变的零均值随机变量,从而忽略交叉项影响,认为某距离单元的回波强度为相互独立的散射点回波强度之和.

逆 ISAIL 转台模型见图 1.

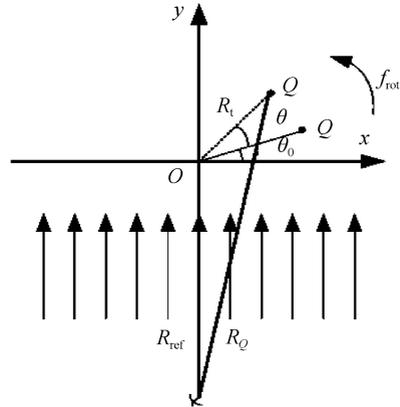


图 1 ISAIL 转台模型

Fig. 1 Rotating platform model of ISAIL

假设合成孔径激光雷达发射带宽为  $B$  的线性调频信号(此处认为信号线性度很好,对信号的线性度无需补偿),信号形式为

$$s(\hat{t}, t_m) = a_{T_p}(\hat{t}) e^{j2\pi(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2)} \quad (1)$$

式中

$$a_{T_p}(u) = \begin{cases} 1 & (u \leq \tau/2) \\ 0 & (u > \tau/2) \end{cases}$$

$T_p$  为发射信号宽度,  $\gamma$  为信号调频率,  $f_c$  为载频,  $\hat{t}$  为快时间,  $t_m$  为慢时间,全时间  $t = \hat{t} + t_m$ .

目标点  $Q$  的回波信号表达形式为

$$s_Q(\hat{t}, t_m) = A_Q a_{T_p} \left( \hat{t} - \frac{2R_Q}{c} \right) \cdot e^{j2\pi(f_c(t - \frac{2R_Q}{c}) + \frac{1}{2}\gamma(t - \frac{2R_Q}{c})^2)} \quad (2)$$

式中,  $A_Q$  为目标点  $Q$  的后向散射系数,  $R_Q$  为在慢时间  $t_m$  时目标点  $Q$  到雷达的距离.

考虑到逆合成孔径激光雷达具有极宽的信号带宽,而观测目标尺寸较小,由于外差接收信号(即,雷达中的 Dechirp 接收方式)的带宽与目标场景的大小成正比,因此系统一般采用外差接收的方式接收回波信号,从而降低信号采样率. Dechirp 接收后,信号表示为

$$s_Q(\hat{t}, t_m) = A_Q a_{T_p} \left( \hat{t} - \frac{2R_Q}{c} \right) \cdot e^{-j\frac{1}{2}\gamma \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) R_{\Delta}} e^{-j\frac{1}{2}\gamma f_c R_{\Delta}} e^{j\frac{1}{2}\gamma R_{\Delta}^2} \quad (3)$$

式中,雷达到目标中心  $O$  的距离设定为参考距离  $R_{\text{ref}}$ ,定义  $R_{\Delta} = R_Q - R_{\text{ref}}$ .

对 Dechirp 接收后的信号做距离脉压,即沿  $\hat{t}$  做傅里叶变换,得

$$s_Q(f_r, t_m) = A_Q T_p \text{sinc} \left[ T_p(f_r + 2\frac{\gamma}{c} R_{\Delta}) \right] \cdot e^{-j\frac{1}{2}\gamma f_c R_{\Delta}} e^{-j\frac{1}{2}\gamma R_{\Delta}^2} e^{-j\frac{1}{2}\gamma f_c R_{\Delta}} \quad (4)$$

在三个相位项中,第一项为多普勒项,与散射点到雷达的距离成正比,用于方位向相干积累,实现目标二维高分辨图像;第二项为 Dechirp 接收特有的残余

视频相位项(RVP项);第三项为 $R_{\Delta} \neq 0$ 时的回波包络斜置项. 补偿掉第二、三项后,得到最终距离压缩结果为

$$s_Q(f_r, t_m) = A_Q T_p \operatorname{sinc} \left[ T_p (f_r + 2 \frac{\gamma}{c} R_{\Delta}) \right] e^{-j \frac{2\pi}{c} f_r R_{\Delta}} = A T_p \operatorname{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (\frac{c f_r}{2\gamma} + R_{\Delta}) \right] e^{-j \frac{2\pi}{c} f_r R_{\Delta}} \quad (5)$$

式中,带宽 $B = \gamma T_p$ ,波长 $\lambda = c / f_c$ .

距离脉压后,对于微波合成孔径雷达,只需对式(5)进行方位向相干积累即可重构目标二维图像. 逆合成孔径成像的数据采集过程相当于对二维目标区域进行 Radon 变化的过程,基于此思想,在微波成像雷达算法中有一种基于逆 Radon 变换的后向投影算法(Back Projection, BP),但是此算法是基于相干积累的过程,当回波相位信息受到破坏又无法补偿时,此算法的成像效果会大幅度下降. 对于 ISAIL,发射信号的一个严重的缺点就是每次激光脉冲的初相都是随机的,即各个脉冲间是非相干的<sup>[9-10]</sup>. 另外,回波信号相位也易受大气湍流的破坏. 上述原因造成了激光信号难以在方位向实现相干积累,因此常规的 BP 算法使用在 ISAIL 成像中,成像质量将大幅度下降,甚至失效.

本文提出了同样基于逆 Radon 变换的实包络成像算法. 此算法忽略了回波的相位信息,利用回波信号的实包络信息,在方位向进行非相干积累,实现目标二维成像. 本文所提算法的另一个优势就是可以大幅度降低系统的 PRF.

根据文献[11]可知,在方位向相干积累过程中,多普勒不模糊的充分条件是

$$\operatorname{PRF} \geq 4r\omega/\lambda \quad (6)$$

式中 $r$ 为目标转动半径, $\omega$ 为目标转动角速度, $\lambda$ 为发射信号中心波长. 假设目标半径为 $r = 10$  m,转动角速度为 $\omega = 0.02\pi$  rad/s,发射信号中心波长为 $10.6 \mu\text{m}$ ,则 $\operatorname{PRF}_{\min} = 237.1$  kHz,受限于激光调制技术,如果发射大带宽的线性调频信号,系统难以满足成像要求. 而较低的 PRF 导致方位多普勒模糊,成像散焦.

## 2 基于逆 Radon 变换的实包络成像算法

不同于常规微波成像雷达中使用的 BP 算法,对式(5)取实包络,得

$$s_Q(f_r, t_m) = A_Q T_p \left| \operatorname{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (\frac{c f_r}{2\gamma} + R_{\Delta}) \right] \right| \quad (7)$$

$$R_{\Delta} = R_Q - R_{\text{ref}} = \sqrt{R_{\text{ref}}^2 + R_t^2 - 2R_{\text{ref}}R_t \cos \left( \frac{\pi}{2} + \theta_0 + \theta \right)} \approx x_Q \sin(\theta) + y_Q \cos(\theta) = R_t \sin(\theta_0 + \theta) \quad (8)$$

式中 $R_t = \sqrt{x_Q^2 + y_Q^2}$ , $(x_Q, y_Q)$ 为零时刻散射点 Q 坐标, $\theta_0$ 为零时刻散射点 Q 初始角.

为便于分析,将转台模型由直角坐标系转到极坐标系,有

$$s_Q(s, \theta) = A_Q T_p \left| \operatorname{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (s + R_t \sin(\theta_0 + \theta)) \right] \right| \quad (9)$$

式中, $s = \frac{c f_r}{2\gamma} = x \sin(\theta) + y \cos(\theta)$ , $s \in [-R_t, R_t]$ .

对式(9)做逆 Radon 变换,得

$$I(x, y) = \int_{-\theta/2}^{\theta/2} s_Q(s, \theta) d\theta = A_Q T_p \int_{-\theta/2}^{\theta/2} \left| \operatorname{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (s + R_t \sin(\theta_0 + \theta)) \right] \right| d\theta \quad (10)$$

当 $s = x_Q \sin(\theta) + y_Q \cos(\theta)$ 时,式(7)取最大值. 因此 $x-y$ 直角坐标系中峰值点的位置即为目标散射点的位置. 由于目标回波强度可近似为各个散射点回波强度的线性叠加,故此方法适用于多散射点目标的情况.

在实际操作中,如果直接使用逆 Radon 变换,会导致成像中心能量集中,多个散射点成像结果重叠,成像结果整体模糊. 为此,在对式(9)做逆 Radon 变换前,先做滤波处理. 对式(9)沿 $s$ 域做傅里叶变换,得

$$s_Q(\xi, \theta) = A_Q T_p \int_{-R_t}^{R_t} \left| \operatorname{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (s + R_t \sin(\theta_0 + \theta)) \right] \right| \cdot e^{-j\xi s} ds = A_Q T_p \int_{-\infty}^{+\infty} a_{2R_t}(s) \left| \operatorname{sinc} \left[ \frac{2B}{c} (s + R_t \sin(\theta_0 + \theta)) \right] \right| \cdot e^{-j\xi s} ds = A_Q T_p e^{j\xi R_t \sin(\theta_0 + \theta)} \left\{ F[a_{2R_t}(s)] \otimes F \left[ \left| \operatorname{sinc} \left( \frac{2B}{c} s \right) \right| \right] \right\} \quad (11)$$

式中 $\xi \in [-\pi, \pi]$ .

在 $\xi \sim \theta$ 域对式(11)滤波处理,即

$$s_Q(\xi, \theta) = A_Q T_p e^{j\xi R_t \sin(\theta_0 + \theta)} a_{2\pi}(\xi) |\xi| \cdot \left\{ F[a_{2R_t}(s)] \otimes F \left[ \left| \operatorname{sinc} \left( \frac{2B}{c} s \right) \right| \right] \right\} \quad (12)$$

令 $G(\xi) = e^{j\xi R_t \sin(\theta_0 + \theta)} a_{2\pi}(\xi) |\xi|$ ,则对 $G(\xi)$ 沿 $\xi$ 域做傅里叶逆变换,得

$$G(s) = F^{-1}[G(\xi)] = F^{-1} \left\{ e^{j\xi R_t \sin(\theta_0 + \theta)} \cdot a_{2\pi}(\xi) |\xi| \right\} = \pi \operatorname{sinc} [R_t \sin(\theta_0 + \theta) + s] - \frac{\pi}{2} \operatorname{sinc}^2 \left\{ \frac{1}{2} [R_t \sin(\theta_0 + \theta) + s] \right\} \quad (13)$$

将式(13)带入式(12),并做傅立叶变换,得

$$s_Q(s, \theta) = A_Q T_p G(s) \otimes \left\{ a_{2R_t}(s) \left| \operatorname{sinc} \left( \frac{2B}{c} s \right) \right| \right\} \quad (14)$$

对式(14)进行后向投影,即,逆 Radon 变换,得

$$I_{\text{IRT}}(x, y) = \int_{-\theta/2}^{\theta/2} (s_Q(s, \theta)) d\theta \quad (15)$$

当 $s = x_Q \sin(\theta) + y_Q \cos(\theta)$ 时,式(12)取最大值.

$x-y$ 直角坐标系中峰值点的位置即为目标散射点的位置。

通过文献[12]可知,本文所提成像算法的方位分辨率与距离无关,但是信号带宽和目标与雷达之间的相对转动角度对方位分辨率有影响,即信号带宽越大、观测时间内目标相对雷达视线转过的角度越大,方位分辨率越高。

由于此算法利用  $s\sim\theta$  域包络进行非相干积累成像,方位向分辨率较相干积累处理方法会降低,且当信噪比低于某门限时算法可能失效<sup>[13]</sup>。但通常雷达系统接收机的信噪比可满足该算法要求。同时,该算法不易受到相位扰动以及方位向多普勒混迭的影响,在实际应用中是有效的。

正如上述分析,此成像算法方位分辨率与信号带宽和目标相对雷达视线转过的角度有关,因此为得到较高的方位分辨率,通常要增加目标观测时间,即增加目标相对雷达视线转过的角度,但是由于 ISAIL 的发射信号带宽极高(文献[3]中的室内验证系统带宽达到了近 1.25 THz,而常规的微波成像雷达带宽只有几百 MHz),因此可以对通过大转角实现方位高分辨的缺陷进行弥补。

### 3 仿真数据成像及分析

以低重频下的简单点目标和低重频、低信噪比并存在大气湍流的情况下复杂目标(Yake42 飞机模型)仿真,对基于 Radon 变换的实包络成像算法和微波中 ISAR 算法中基于回波相干积累的 BP 算法进行比较。为降低仿真中的数据量,在不影响仿真实验效果的前提下,缩小了成像目标尺寸,略微降低了发射信号带宽,其中发射信号为理想的线性调频激光信号。

#### 3.1 低重频简单点目标成像

发射信号中心波长  $10.6\ \mu\text{m}$ ,带宽 400 GHz,距离 10 km,目标由九个散射点组成,目标场景半径  $r=0.05\ \text{m}$ ,目标转动角度为  $10^\circ$ ,相对雷达的转动角速度为  $\omega=0.02\pi\ \text{rad/s}$ ,如果使用相干积累成像算法,系统重频率应该满足  $\text{PRF}\geq 1.186\ \text{kHz}$ ,为了说明本文方法对低重频率的有效性,仿真中 PRF 设定为 100 Hz。图 2(a)为简单点目标分布图,相邻点间隔为 0.03 m;图 2(b)为滤波 BP 成像结果,图中方位向严重混迭,基本看不出目标特征;图 2(c)为基于 Radon 变换的实包络成像结果,在低重频的情况下,采用本方法仍可以对每个散射点聚焦,且散射点位置确定精确。

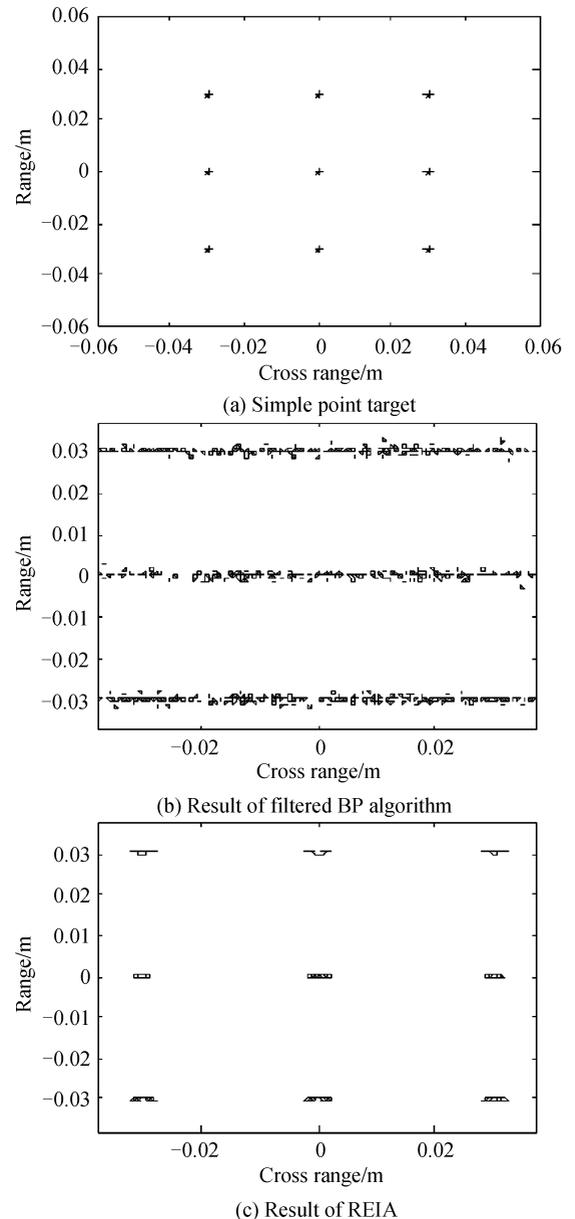


图 2 低重频简单点目标成像

Fig. 2 Low PRF imaging of simple point target

#### 3.2 存在大气湍流情况下,低信噪比、低重频率的复杂目标成像

成像激光信号中心波长为  $10.6\ \mu\text{m}$ ,带宽为 400 GHz,距离为 10 km,为降低数据量,目标设定为等比例缩小的 Yake42 飞机模型,尺寸为  $0.6\ \text{m}\times 0.8\ \text{m}$ ,目标场景半径选为  $r=1.5\ \text{m}$ ,目标相对雷达转动角速度为  $\omega=0.02\pi\ \text{rad/s}$ ,则满足方位不模糊的 PRF 应该为  $4r\omega/\lambda\approx 35.6\ \text{kHz}$ ,仿真中 PRF 选为 500 Hz,约为方位多普勒不模糊时的重频率的 1.4%;相位屏为  $1\ 024\ \text{点}\times 1\ 024\ \text{点}$ ,大气相干长度为  $r_0=0.1\ \text{m}$ ,大气湍流外尺寸为  $L_0=10\ \text{m}$ ;回波信号中加入信噪比为  $\text{SNR}=0$  的噪音。

图 3(a)为 Yak42 等比例缩小模型散射点分布图;图 3(b)为随机相位屏,用于模拟实际中的大气

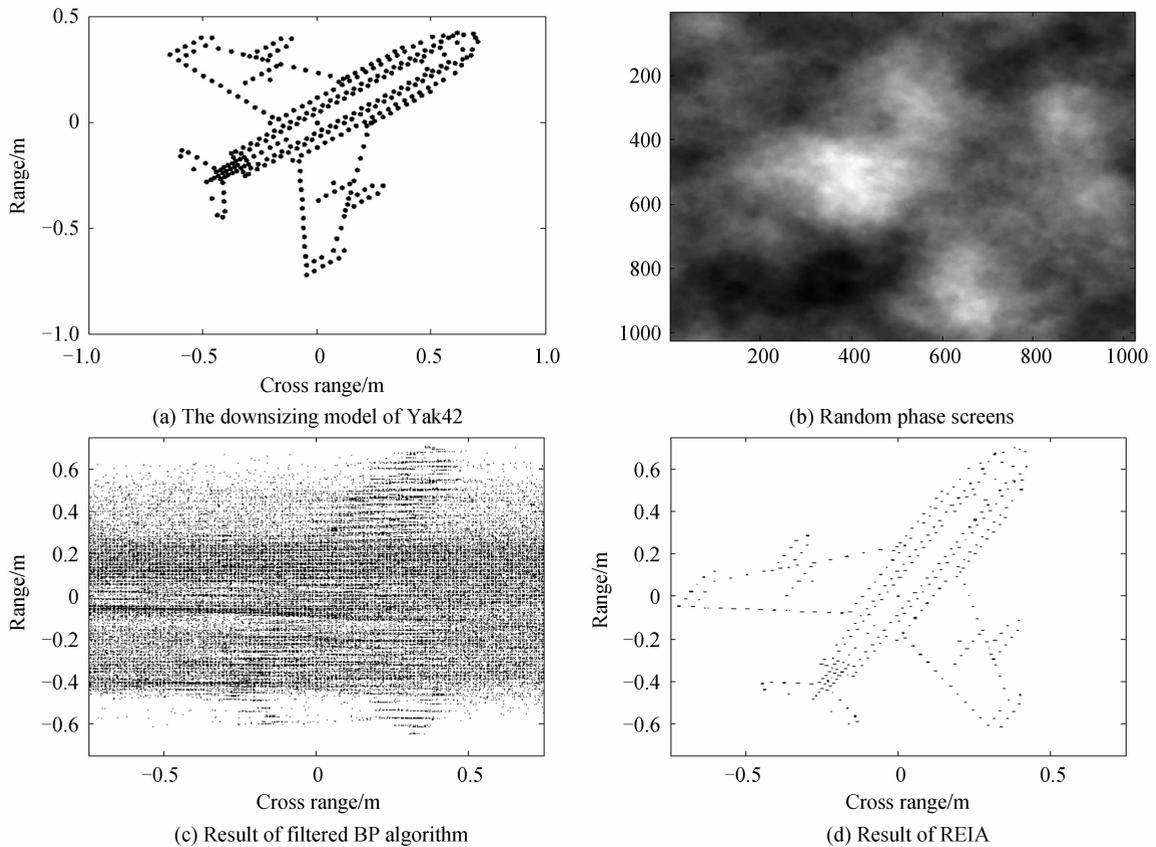


图3 大气湍流下的低信噪比、低重频率复杂目标成像

Fig. 3 Complicated target imaging (under the condition of low SNR and low PRF and atmospheric turbulence)

层;图 3(c)为滤波 BP 成像结果,方位向散焦严重;图 3(d)为实包络成像结果,方位聚焦良好.可见,利用低重频率系统,当存在大气湍流时,在低信噪比的情况下,基于逆 Radon 变换的实包络成像算法对复杂目标成像效果远好于基于方位向相干积累的滤波 BP 算法.

## 4 结论

传统的微波逆合成孔径成像雷达是通过发射大带宽线性调频信号,在方位向上对回波信号进行相干积累实现目标二维高分辨的.但对于逆合成孔径激光成像雷达,由于系统脉冲重频率低、信号相干性差、且回波相位信息易受大气湍流破坏,因此传统的相干积累算法失效.针对这些问题,本文提出基于逆 Radon 变换的回波实包络成像算法,由于方位上采取包络非相干积累,没有使用回波相位信息,因此发射信号的非相干及大气湍流对回波信息的破坏对成像没有影响.另外,此算法在低重频逆合成孔径激光成像雷达系统上仍然有效,且具有一定的抗干扰能力.实包络成像算法要求目标相对雷达要有较大转角,因此如何将实包络成像算法应用于小转角目标是今后需要进一步探索的一个方向.

### 参考文献

[1] 波恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978;

541-545.

- [2] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(35): 7621-7629.
- [3] GUO L, XING M D, ZHANG L, *et al.* Research on indoor experimentation of range SAL imaging system[J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, **52**(10): 3098-3104.
- [4] HONG Guang-lie, WANG Jian-yu, MENG Zhao-hua, *et al.* Chirped AM and near infrared synthetic aperture ladar range dimension processing [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2009, **28**(3): 229-234.
- 洪光烈, 王建宇, 孟昭华, 等. Chirp 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.
- [5] 斯廷森 G W. 吴汉平, 译. 机载雷达导论(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 19-21.
- [6] YANG Lian-chen, SHEN Mang-zuo, GUO Yong-hong. The speckle imaging simulation of space objects [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1108-1111.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 19-45.
- [8] STERGIPOULOS S. Advanced signal processing handbook: theory and implementation for radar, sonar, and medical imaging real-time[M]. Florida: CRC Press LLC, 2001: 547-594.
- [9] GUO Liang, XING Meng-dao, LIANG Yi, *et al.* Synthetic aperture imaging ladar imaging algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 448-452.
- 郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 448-452.
- [10] GUO Liang. Study on experiment and algorithm of synthetic aperture imaging lidar[D]. Xi'an: Xidian University, 2009;

- 85-115.  
郭亮. 合成孔径成像激光雷达实验与算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 85-115.
- [11] WANG Qi. Study of ISAR imaging for space targets[D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 91-104.  
王琦. 空间目标 ISAR 成像的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007: 91-104.
- [12] LÜ Tong-guang, LU Zhong-liang, SU Yi, *et al.* The analysis of the azimuth resolution of impulse signal SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(6): 40-43.  
吕彤光, 陆仲良, 粟毅, 等. 冲激信号 SAR 成像的方位分辨率分析[J]. 电子学报, 2000, **28**(6): 40-43.
- [13] TOFT P A. Using the generalized Radon transform for detection of curves in noisy images[C]. *Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1996, **4**: 2219-2222.

## Real Envelope Imaging Algorithm for Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar

ZANG Bo, GUO Rui, TANG Yu, XING Meng-dao

(National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Limited by laser modulation technology and the phase information that is easily damaged by atmospheric turbulence, it is difficult to obtain the 2-D high-resolution image using traditional coherent integration algorithms for Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar (ISAIL). To solve this problem, a real envelope imaging algorithm was proposed based on inverse Radon transform. Using the proposed method, the ISAIL system can transmit noncoherent laser pulses and high-quality image can also be obtained under the condition of atmospheric turbulence with low pulse repetition frequency. The ISAIL imaging experiment with numerical data validates the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Real Envelope Imaging Algorithm (REIA); Inverse Radon Transform (IRT); Inverse Synthetic Aperture Imaging Lidar (ISAIL); Pulse Repetition Frequency (PRF); Noncoherent integration



**ZANG Bo** was born in 1983, and received the M. S. degree from Xidian University, in 2009. Now he is pursuing the Ph. D. degree at National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, and his research interests focus on SAIL imaging and real-time signal processing system design for SAR.



**XING Meng-dao** was born in 1975, and received the Ph. D. degree from Xidian University in 2002. Now he is a professor at National Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, and his research interests focus on radar imaging, target recognition and over the horizon radar (OTHR) signal processing.