

# 基于毫米波 InISAR 成像的运动目标探测与定位

刘波<sup>1,2,3</sup>, 潘舟浩<sup>1,2,3</sup>, 李道京<sup>1,2</sup>, 乔明<sup>1,2,3</sup>

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

**摘要:**介绍了基于运动补偿的运动目标 ISAR 成像方法,将雷达成像的概念引入到低信噪比运动目标探测的过程中,在成像的同时获取目标的径向和横向运动速度,采用多基线图像干涉处理的方法完成运动目标的定位和横向尺寸估计.建立了运动目标成像几何模型,给出了多天线时分复用接收机的通道间信号补偿方法,以及多基线相位解缠实现不模糊干涉测角定位的方法,分析了信噪比对图像干涉定位精度的影响.利用仿真数据和实际数据验证了本方法的有效性.

**关键词:**InISAR; ISAR; 目标探测; 目标定位; 干涉测角; 毫米波  
**中图分类号:**TN958 **文献标识码:**A

## Moving target detection and location based on millimeter-wave InISAR imaging

LIU Bo<sup>1,2,3</sup>, PAN Zhou-Hao<sup>1,2,3</sup>, LI Dao-Jing<sup>1,2</sup>, QIAO Ming<sup>1,2,3</sup>

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

**Abstract:** An inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging method based on motion compensation of a moving target was presented. The concept of radar imaging was applied to the process of moving target detection with low signal to noise ratio(SNR). The lateral and radial velocity of the target can be acquired by means of imaging processing. The location of the moving target and estimation of its cross-sectional area could be fulfilled using the multi-baseline image interferometric method. The geometric model for imaging moving target was established. A method for the compensation of signals from channels of multi- antenna time division multiplexing (TDM) receiver was proposed. The unambiguous angle orientation based on multi-baseline phase unwrapping was presented. The influence of the image SNR on interferometric orientation accuracy was analyzed. The validity of the proposed method was testified by both simulation and an example of its application.

**Key words:** InISAR; ISAR; target detection; target location; interferometric angle orientation; millimeter-wave  
**PACS:** 84.40.Xb

## 引言

目前,基于单天线的 ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) 技术在运动目标成像方面已获得广泛的应用.为获得目标的横向尺寸信息,多天线结构的 InISAR (Interferometric ISAR) 概念也被提出并相应开展了大量的研究工作<sup>[1-5]</sup>.

现阶段已有的 ISAR 和 InISAR 信号处理方法都

是在目标探测和跟踪基础上完成的,这需要雷达对目标具有较高的单脉冲信噪比,因此限制了其应用范围,需研究新的信号处理方法.

毫米波雷达体积和重量较小,其波长较短,容易获得高分辨率图像并易于观测尺寸较小的目标,具有广阔的应用前景.当 InISAR 工作在毫米波段时,较短的波长会带来严重的相位缠绕并产生测角模糊问题,因此需考虑使用多基线干涉测角技术.

收稿日期:2011-05-04,修回日期:2011-08-10

Received date: 2011-05-04, revised date: 2011-08-10

基金项目:国家863计划项目(2009AA12Z103);国家973计划项目(2009CB72400)

Foundation item: Supported by National High Technology Research and Development Program of China(2009AA12Z103); National Basic Research Program of China(2009CB72400)

作者简介:刘波(1984-),男,山东枣庄人,博士生,研究方向为毫米波雷达对运动目标探测成像. E-mail:lynnandsky@163.com.

基于三基线毫米波 InISAR 系统,本文将雷达成像的概念引入到运动目标探测和定位过程中,系统地研究了低信噪比运动目标成像、探测与定位问题,并给出了计算机仿真和实际数据的处理结果.

## 1 InISAR 成像

### 1.1 成像几何模型

系统成像几何模型如图 1 所示. 图 1 中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  表示 3 个天线, PABCD 表示目标上的散射点, 这些散射点构成了一个运动目标,  $\theta$  为天线波束扫描角,  $\varphi$  表示目标偏离天线  $T_2$  波束中心的角度. 一般来说, 目标到天线的距离远远大于天线间基线长度, 因此可认为三天线收到的回波信号波达方向相同, 也就是说  $\varphi$  也表示目标偏离天线  $T_1$ 、 $T_3$  波束中心的角度, 为了方便表述, 下文统称为目标偏角.

系统采用一发轮收模式:  $T_1$  天线发射 LFM 信号,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  三天线轮流接收, 时间间隔为  $\Delta t = 1/(3PRF)$ ,  $PRF$  表示单通道的脉冲重复频率. 由于三天线接收到的回波信号类似, 以下分析以  $T_2$  天线接收到的解调回波来进行. 回波经过距离向脉冲压缩后得到<sup>[6]</sup>

$$S(\hat{t}, t_m) = B_r \text{sinc} \left\{ k T_r \left( \hat{t} - \frac{R_1(t_m) + R_2(t_m)}{C} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j 2 \pi f_c \frac{R_1(t_m) + R_2(t_m)}{C} \right\}, \quad (1)$$

式中,  $\hat{t}$  表示快时间,  $T_r$  表示发射信号时宽,  $B_r$  表示发射信号的带宽,  $k$  为调频率,  $f_c$  表示载波频率,  $C$  为光速,  $t_m$  表示天线  $T_2$  接收时的慢时间(序列), 取值区间为  $[-T_s/2, T_s/2]$  ( $T_s$  为合成孔径时间).  $R_1(t_m)$  和  $R_2(t_m)$  分别表示  $t_m$  时刻目标到天线  $T_1$  和天线  $T_2$  的瞬时距离. 式(1)忽略了散射点回波强度等常数

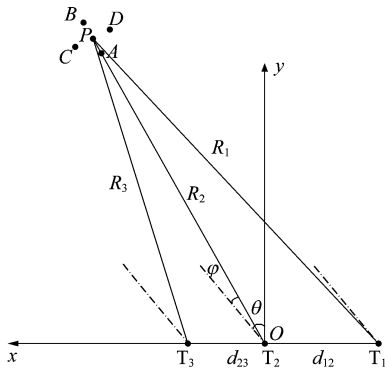


图 1 三天线 InISAR 系统成像几何模型

Fig. 1 Geometric model of three-antenna InISAR imaging system

项,只给出了一个散射点的回波解析式,这对后文没有影响.

### 1.2 ISAR 成像处理

对式(1)表示的脉压后的信号沿快时间  $\hat{t}$  进行 Fourier 变换

$$S(f, t_m) = \text{rect} \left\{ \frac{f}{B_r} \right\} \exp \left\{ -j 2 \pi (f_c + f) \frac{R_1(t_m) + R_2(t_m)}{C} \right\}. \quad (2)$$

对于  $R_2(t_m)$ , 用 Taylor 级数在  $t_m = 0$  时刻展开, 忽略 2 阶以上的高阶项:

$$R_2(t_m) \approx R_2 + v_r t_m + \frac{v_a^2}{2R_2} t_m^2, \quad (3)$$

式中,  $R_2 = R_2(0)$ , 表示中间时刻 ( $t_m = 0$ ) 时目标到天线  $T_2$  的距离,  $v_r$  和  $v_a$  分别表示中间时刻时目标对天线  $T_2$  的径向速度和横向速度. 如前文所述, 图 1 中  $R_1$  和  $R_2$  表示的线段近似平行, 因此  $v_r$  和  $v_a$  也可理解为目标对天线  $T_1$  的径向和横向速度, 即有

$$S(f, t_m) = \text{rect} \left\{ \frac{f}{B_r} \right\} \exp \left\{ -j 2 \pi \frac{(f_c + f)}{C} \left( R_1 + R_2 + 2v_r t_m + \frac{v_a^2}{R_2} t_m^2 \right) \right\}, \quad (4)$$

式中  $R_1 = R_1(0)$ . 距离频率  $f$  和方位时间  $t_m$  之间的耦合是产生距离徙动的原因. 其中,  $f$  和  $t_m$  的一阶耦合是距离走动的来源,  $f$  和  $t_m$  的二阶及二阶以上的高阶耦合是距离弯曲的来源. 式(4)只考虑到了  $t_m^2$  对距离弯曲的影响.

文献[7,8]介绍了利用 Keystone 变换消除距离走动的方法, 将 Keystone 变换作用于式(4), 得到

$$S(f, \tau) = \text{rect} \left\{ \frac{f}{B_r} \right\} \exp \left\{ -j 2 \pi \frac{f_c + f}{C} (R_1 + R_2) \right\} \cdot \exp \left\{ -j 2 \pi \frac{2v_r}{\lambda} \tau - j \pi \frac{2v_a^2}{\lambda R_2 f + f_c} \tau^2 \right\}, \quad (5)$$

式中  $\tau = (f_c + f)t_m/f_c$ . 式(5)的最后一项可理解为经过 Keystone 变换后, 运动目标相对静止目标的相位历程. 将 Keystone 变换后的信号在慢时间域进行 Fourier 变换, 可以得到运动目标慢时间的频谱: 以  $-2v_r/\lambda$  为多普勒中心 ( $\lambda$  为载波波长), 以  $-\frac{2v_a^2}{\lambda R_2 f + f_c} f_c$  为调频率. 对信号在多普勒域搜索调频率, 使图像的最大值点最大或图像的信息熵最小<sup>[9]</sup> 找到运动目标的调频率, 再用去调频的方法使回波聚焦于多普勒中心. 由多普勒中心频率和调频率可以得到目标的径向速度  $v_r$  和横向速度  $v_a$ .

将式(5)表示的快频率-慢时间域信号乘以相位补偿项

$$\exp\left\{j4\pi \frac{(f_c + f)}{C} \left(v_r t_m + \frac{v_a^2 t_m^2}{2R_2}\right)\right\}, \quad (6)$$

可以有效地消除距离走动和距离弯曲. 将距离徙动校正后的信号反变换回时域后, 沿慢时间  $t_m$  做 Fourier 变换可得到目标在  $t_m = 0$  时刻距离-多普勒域的图像<sup>[2]</sup>.

由于本系统是时分复用一个接收机, 对于天线  $T_1$  而言, 其慢时间(序列)应为  $t_m - \Delta t$ . 借用式(3)的形式得到目标到天线  $T_1$  的距离为

$$R_1(t_m - \Delta t) \approx R_1 + v_r(t_m - \Delta t) + \frac{v_a^2}{2R_2}(t_m - \Delta t)^2. \quad (7)$$

为了消除时分复用的影响, 使图像相关性更强, 天线  $T_1$  通道成像做运动补偿时乘的补偿相位应为

$$\exp\left\{j4\pi \frac{(f_c + f)}{C} \left(v_r(t_m - \Delta t) + \frac{v_a^2}{2R_2}(t_m - \Delta t)^2\right)\right\}, \quad (8)$$

这也为相干处理前的图像配准做了一定的工作.

类似地, 有天线  $T_3$  的相位补偿表达式

$$\exp\left\{j4\pi \frac{(f_c + f)}{C} \left(v_r(t_m + \Delta t) + \frac{v_a^2}{2R_2}(t_m + \Delta t)^2\right)\right\}. \quad (9)$$

由于本系统合成孔径时间较短, 式(4)只考虑到  $t_m$  二次方对成像以及后续干涉定位工作的影响. 当合成孔径时间增加时, 对  $t_m$  高阶项的补偿工作需要考虑进来. 这里可以参考 Perry 等提出的高阶相位拟合技术<sup>[7]</sup>, 或者 PGA(Phase Gradient Autofocus) 算法.

需要指出的是, 以上的成像分析是对目标的一个散射点进行的, 成像位置在天线  $T_2$  图像的多普勒零频处. 用该点得到的补偿函数作用于整个图像时, 目标横向分布的其他散射点将在多普勒零频左右分散成像. 这里隐含的假定是运动目标为刚体且体积不会很大. 以上讨论的散射点可以看成讨论目标转动的参考点, 即转动中心. 对于多散射点时, 聚焦完成后, 将横向的哪个散射点选作参考点会影响目标径向速度的估计值, 但当目标体积较小时, 该影响可忽略. 参考点在  $T_1$  和  $T_3$  天线图像上的位置并不在多普勒零频处, 这将在下一节中进行详细分析.

### 1.3 图像配准

根据上节介绍的成像方法可以得到三幅图像, 但是目标在各图像中的位置是不相同的. 对没有很好配准的图像进行干涉定位将带来相位噪声, 造成图像相干性变差, 干涉结果将受到影响. 对于毫米波干涉雷达而言, 由于波长较短, 系统具有高精度的同时对噪声和配准精度也有较高要求.

配准工作要从获取图像的过程中着手. 以下

的分析主要是将成像过程中忽略的细节重新考虑进来. 下文将介绍把  $T_1$  天线图像配准到  $T_2$  天线图像上来的方法. 上节对成像工作的介绍是基于点目标, 而实际目标是多散射点构成的, 这里引入坐标  $(x_n, y_n)$  表示目标上第  $n$  个散射点在图 1 中的位置. 对于天线  $T_2$  成像而言, 目标到天线  $T_2$ 、 $T_1$  的距离分别为

$$\begin{aligned} R_2(t_m) &= \sqrt{(x_n + v_x t_m)^2 + (y_n + v_y t_m)^2} \\ R_1(t_m) &= \sqrt{(x_n + v_x t_m + d_{12})^2 + (y_n + v_y t_m)^2}, \quad (10) \\ &\approx R_2(t_m) + \frac{x_n + v_x t_m}{R_2(t_m)} d_{12} + \frac{d_{12}^2}{2R_2(t_m)} \end{aligned}$$

式中  $v_x$  和  $v_y$  分别表示中间时刻目标速度在图 1 所示直角坐标系下对坐标轴  $x$ 、 $y$  的投影. 将式(10)代入式(2)

$$\begin{aligned} S_2(f, t_m) &= \text{rect}\left\{\frac{f}{B_r}\right\} \exp\left\{-j2\pi(f_c + f) \frac{2R_2(t_m)}{C}\right\} \\ &\quad \exp\left\{-j2\pi(f_c + f) \left(\frac{x_n + v_x t_m}{R_2(t_m)} d_{12} + \frac{d_{12}^2}{2R_2(t_m)}\right)\right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

$S_2(f, t_m)$  的下标“2”表示天线  $T_2$  的信号, 该标号是为了把不同通道的信号区分开. 同理有

$$\begin{aligned} S_1(f, t_m) &= S_2(f, t_m) \exp\left\{-j2\pi \frac{f_c + f}{C} \left(\frac{v_x t_m}{R_2(t_m)} d_{12} + \frac{d_{12}^2}{2R_2(t_m)}\right)\right\} \\ &\quad \exp\left\{-j2\pi \frac{f}{C} \frac{x_n}{R_2(t_m)} d_{12}\right\} \exp\left\{-j2\pi \frac{f_c}{C} \frac{x_n}{R_2(t_m)} d_{12}\right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

在成像的工作中, 时间不同步的影响已经通过式(8)消除, 因此, 式(12)可以使用  $t_m$  作为慢时间(序列). 式(12)的第 4 项包含了目标的位置信息; 第 2 项中的  $\frac{f_c + f}{C} \frac{v_x t_m}{R_2(t_m)} d_{12}$  是造成目标在  $T_1$  图像和  $T_2$  图像间横向错位的来源, 错位量和基线长度以及目标的  $v_x$  有关; 第 2 项中的  $\frac{f_c + f}{C} \frac{d_{12}^2}{2R_2(t_m)}$  会造成一定的距离向错位<sup>[4]</sup>; 第 3 项是距离向错位的主要来源, 是目标到天线  $T_1$  和天线  $T_2$  距离不等导致的, 来自天线扫描的几何模型<sup>[3]</sup>.

通过上述分析可以知道, 利用图像干涉获取动目标的位置所做的配准工作就是设法消除式(12)的中间两项. 其中包含的未知量有  $v_x$  和  $x_n$ , 这里  $x_n$  的出现仿佛使配准工作无法推进. 实际上配准的目的是使同一个散射点出现在两幅图像的不同位置, 也就是说配准的精度要求是像素级的. 文献[1-2]认为, 距离差远小于距离向分辨率时, 图像在距离向可

以不用配准。

由于扫描角的存在,不同天线到目标的距离存在差异.当基线较长、扫描角较大导致系统距离向分辨率和基线带来的距离差处于同一个数量级时,距离向配准工作需要.一般来说,毫米波天线具有较小的波束宽度,当扫描角  $\theta$  和斜距  $R_2$  (成像时利用时延即可测出) 已知时,目标位置  $x_n$  可以用  $\hat{x}_n = R_2 \sin(\theta)$  来近似表示.该近似用在距离向配准时可以达到较高的精度.同理,对于  $v_x$  可以用

$$\hat{v}_x = v_a \cos\theta + v_r \sin\theta, \quad (13)$$

来近似.将天线  $T_1$  的图像配准到  $T_2$  的图像上可以通过把补偿项

$$\exp\left\{j2\pi \frac{f_c + f}{C} \left( \frac{\hat{v}_x t_m}{R_2(t_m)} d_{12} + \frac{d_{12}^2}{2R_2(t_m)} \right)\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{f}{C} \frac{\hat{x}_n}{R_2(t_m)} d_{12}\right\}, \quad (14)$$

和式(12)相乘实现.配准工作是在快频率-慢时间域进行的.也就是说运动补偿完成后即可利用式(14)进行配准工作,而不是在成像之后进行.

将天线  $T_3$  的图像配准到  $T_2$  图像上的方法类似,不再赘述.

#### 1.4 干涉测角

经过配准以后,3幅图像同一位置的像素对应目标的同一小块区域,保证了图像的相干性.图像间共轭相乘即可提取目标干涉相位信息

$$\begin{aligned} S_1(i, f_a) \cdot S_2^*(i, f_a) &= |S_2^*(i, f_a)|^2 \exp\left\{-j2\pi \frac{\sin(\theta + \varphi_n) d_{12}}{\lambda}\right\} \\ S_2(i, f_a) \cdot S_3^*(i, f_a) &= |S_2^*(i, f_a)|^2 \exp\left\{-j2\pi \frac{\sin(\theta + \varphi_n) d_{23}}{\lambda}\right\}, \\ S_1(i, f_a) \cdot S_3^*(i, f_a) &= |S_2^*(i, f_a)|^2 \exp\left\{-j2\pi \frac{\sin(\theta + \varphi_n) d_{13}}{\lambda}\right\} \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $S_1(i, f_a)$ 、 $S_2(i, f_a)$  和  $S_3(i, f_a)$  分别表示天线  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  获得的距离-多普勒域图像,“\*”表示复共轭,  $\varphi_n$  表示散射点  $(x_n, y_n)$  对应的  $\varphi$ ,  $d_{13} = d_{12} + d_{23}$ , 表示天线  $T_1$ 、 $T_3$  间的基线长度.通过式(15)可以看出,相位和目标偏角一一对应.

毫米波干涉具有高精度的同时,由于波长比较短,其相位缠绕问题也异常突出,因此图像干涉不能直接得到真实的干涉相位.但对体积较小的同一目标的不同散射点而言,虽然真实相位均得不到,但可以根据相位缠绕值之差推导出干涉相位之差.由式(15)可知,位于波束中心的散射点 ( $\varphi_n = 0$ ) 其真实相位及其缠绕值是可求的,取为参考点.利用其他各

散射点和参考点的干涉相位缠绕值之差推导出目标各散射点的  $\varphi_n$ . 散射点到天线的距离可以利用回波时延得到.距离和角度 ( $\theta + \varphi_n$ ) 均已知,至此实现目标(或目标上的散射点)定位.

即使目标没有散射点位于波束中心,可以在波束中心虚拟一个散射点作为参考点,以上分析同样成立.

#### 1.5 测角去模糊

以上分析要求目标体积较小是为了保证所有散射点的干涉相位在以参考点为中心的  $[-\pi, \pi)$  范围内,即满足  $-\lambda/2 \leq d \sin(\theta + \varphi_n) - d \sin\theta < \lambda/2$  ( $d$  表示基线长度),实现测角无模糊.可求得测角的不模糊范围

$$\arcsin\left(\frac{d \sin\theta - \lambda/2}{d}\right) - \theta \leq \varphi_n < \arcsin\left(\frac{d \sin\theta + \lambda/2}{d}\right) - \theta. \quad (16)$$

若目标较大或目标不位于波束中心导致有些散射点偏离波束中心的角度大于式(16)规定的测角范围,则相应的干涉图像不能准确得到目标(相应散射点)的位置.也就是说,若测角不模糊范围均小于波束宽度,则有可能存在测角模糊,对目标的定位不一定是准确的.

该问题可以使用多基线来解决.在毫米波段雷达天线波束较窄的前提下,若两基线长度分别为  $d_{12}$  和  $d_{23}$ ,二者以  $m$  和  $n$  互质,利用中国余数定理,则基线  $d_{12}$  的测角不模糊范围可以扩大到原先的  $m$  倍,基线  $d_{23}$  的测角不模糊范围可以扩大到原先的  $n$  倍.利用式(16)并适当选择两基线的互质关系来确定基线长度,使扩展后的测角不模糊范围可覆盖整个波束宽度,即可实现测角去模糊.

需要指出的是,图1所示的多基线除了能实现测角去模糊以外,天线  $T_1$  和天线  $T_3$  之间的基线  $d_{13}$  最长,也能提高测角的精度.

## 2 仿真数据处理

### 2.1 仿真参数设置

根据以上的介绍,进行仿真验证.设置一个由5个散射点构成的刚体目标.目标和天线的几何关系如图1所示.

该刚体的5个散射点在合成孔径时间的中间时刻布局如下: $P$ 为中心点,以 $PO$ 连线为参考,在 $P$ 点的前后左右各4 m处分布 $ABCD$ 四点,目标中心点 $P$ 的偏角 $\varphi = -1.3^\circ$ , $P$ 到天线 $T_2$ 的距离为2.4 km,以25 m/s的径向速度远离天线,以40 m/s的横向速度穿越波束.目标自身不存在自转.仿真中系统的主要

参数见表 1. 基线长度和利用式(16) 计算得到的测角不模糊范围如表 2 所示:

表 1 系统主要参数

Table 1 System parameters

项目	参数	项目	参数
中心频率	35 GHz	采样率	600 MHz
LFM 时宽	12 $\mu$ S	单脉冲信噪比	-15 dB
LFM 带宽	180 MHz	扫描角 $\theta$	35°
单通道 PRF	4 kHz	相干脉冲数	1024
收发特性	$T_1$ 发, $T_1 T_2 T_3$ 轮收	合成孔径时间 $T_s$	0.256 s
通道接收时间间隔	$1/(3PRF)$	天线波束宽度	$3^\circ \times 3^\circ$

表 2 不同基线时的测角不模糊范围

Table 2 Unambiguous range of angular orientation for each baseline

天线	基线长度/m	测角范围/°
天线 $T_1$ 和天线 $T_2$	0.6	$[-0.4981, 0.5011]$
天线 $T_2$ 和天线 $T_3$	0.4	$[-0.7460, 0.7529]$
天线 $T_3$ 和天线 $T_1$	1	$[-0.2992, 0.3003]$

0.6 m 基线和 0.4 m 基线以 3 和 2 互质, 因此可以将 0.6 m 基线的测角不模糊范围扩大 3 倍, 0.4 m 基线的测角不模糊范围扩大 2 倍, 分别为  $-1.4943^\circ \sim 1.5033^\circ$  和  $-1.4920^\circ \sim 1.5058^\circ$ , 此时系统的测角不模糊范围已和天线波束宽度相等, 实现测角去模糊.

## 2.2 处理过程和仿真结果分析

信号处理过程主要分为以下几步

(1) 距离走动校正. 天线  $T_2$  的回波信号脉压之后的结果如图 2(a) 所示, 由于信噪比较低, 信号被噪声湮没. 但 Keystone 变换是基于数据处理的, 不依靠图像效果的优劣. 然而 Keystone 变换要求回波信号慢时间域采样满足 Nyquist 定理<sup>[8]</sup>. 本仿真参数  $PRF = 4$  kHz, 也就是说目标的径向速率也只有被约束在  $\pm 8.6$  m/s 以内时才能使用 Keystone 变换. 文献[10]提出的双频共轭处理的方法可以有效地解决多普勒模糊问题.

(2) 速度估计. 对去除距离走动之后的信号在距离-多普勒域用搜索调频率的方法去调频, 使回波在距离-多普勒域聚焦, 结果如图 2(b) 所示, 搜索调频率时采用的是图像最大值的方法. 通过这步处理可以估到目标的径向和横向速度, 分别为 25.0742 m/s, 39.2651 m/s.

(3) 成像处理和图像配准. 用估计得到的速度对回波进行运动补偿, 慢时间域 Fourier 变换得到距

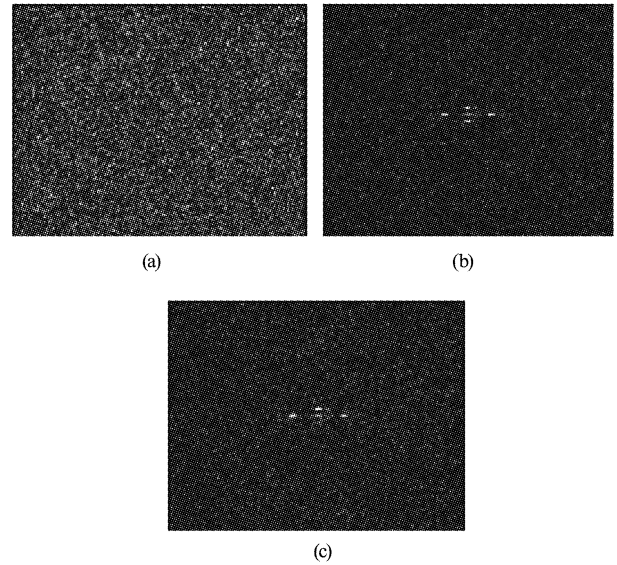


图 2 对天线  $T_2$  仿真成像结果(a) 脉压后的回波, (b) 去调频后的聚焦结果, (c) 距离-多普勒域图像

Fig. 2 Imaging results of antenna  $T_2$  (a) Signal after pulse compression, (b) Focused image after dechirping, (c) Image in range-Doppler domain

离-多普勒域的图像, 如图 2(c) 所示. 另外两个通道处理后的成像效果和图 2(c) 类似.

(4) 干涉测角定位. 将配准后的图像过归一化门限(-3 dB) 处理然后两两干涉得到的干涉相位图. 干涉相位图在多普勒方向上亮度的渐变反映了目标散射点的横向散布情况. 图 3 给出了天线  $T_1 T_2$  的干涉结果. 由于距离向位置可以通过回波延时得到, 因此定位工作主要是对目标偏角  $\varphi$  的测量. 表 3 给出了目标不同散射点的测角结果, 即散射点偏离波束中心指向的角度. 目标横向两端的散射点的干涉相位差对应目标的横向尺寸. 利用图 3 计算得到的目标横向尺寸为 7.8 m, 和设定值基本吻合.

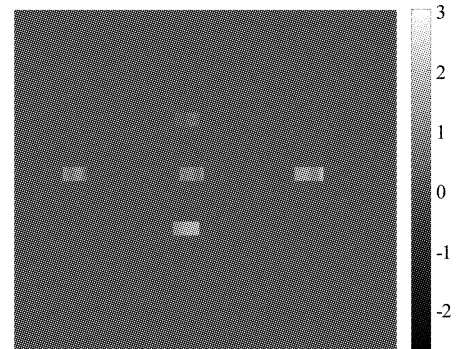


图 3 天线  $T_1 T_2$  干涉相位图

Fig. 3 Interferogram of antenna  $T_1$  and  $T_2$

图 4 给出了三条基线的测角均方差和单脉冲信噪比的关系曲线. 从图 4 可以看出,长基线可以获得较高的测角精度.

表 3 干涉测角结果(单位:°)

Table 3 Interferometric angle orientation results( unit: °)

散射点	0.4 m 基线	0.6 m 基线	1 m 基线	理论值
P	-1.2613	-1.3367	-1.3065	-1.3
A	-1.2894	-1.2683	-1.2767	-1.3
B	-1.3233	-1.2789	-1.2967	-1.3
C	-1.1652	-1.2421	-1.2114	-1.2045
D	-1.4220	-1.3817	-1.3979	-1.3955

仿真参数中,值得注意的是单脉冲信噪比. 较低的信噪比会使距离向脉压之后的回波依然湮没在噪声中,如图 2(a)所示. 因此,普通的基于单脉冲回波的目标探测在这种情况下不适用. 本文提出的动目标探测方法是基于图像的. 多普勒域去调频理论上就是脉冲间的相干叠加. 本仿真采用了 1024 个脉冲,因此距离-多普勒域的目标信号将获得 30 dB 的增益,达到 15 dB. 图 2(c)的信噪比为 14.8 dB,和理论分析近似.

### 3 实际数据处理

利用 1 毫米波三基线 InSAR 录取了某飞机的回波数据. 该雷达系统参数和表 1 所给的参数基本相同,处理过程中使用的脉冲数为 4096,对应的合成孔径时间为 1.024 s.

实际数据处理时,距离走动校正、调频率估计、运动补偿和距离-多普勒域成像等处理方法和流程与仿真数据的处理步骤类似,不再赘述. 处理结果见图 5,搜索调频率时采用的是图像最大值的方法. 目

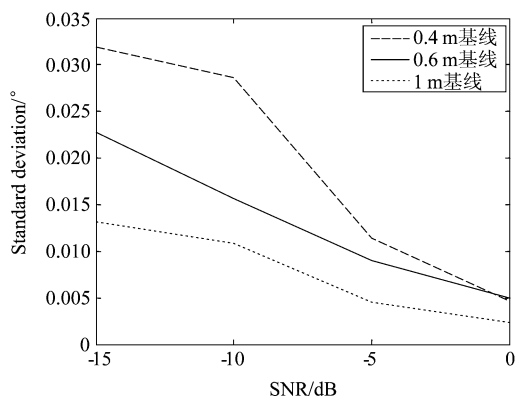


图 4 不同单脉冲信噪比下的测角均方差  
Fig. 4 Standard deviation of angle orientation with different SNR of single pulse

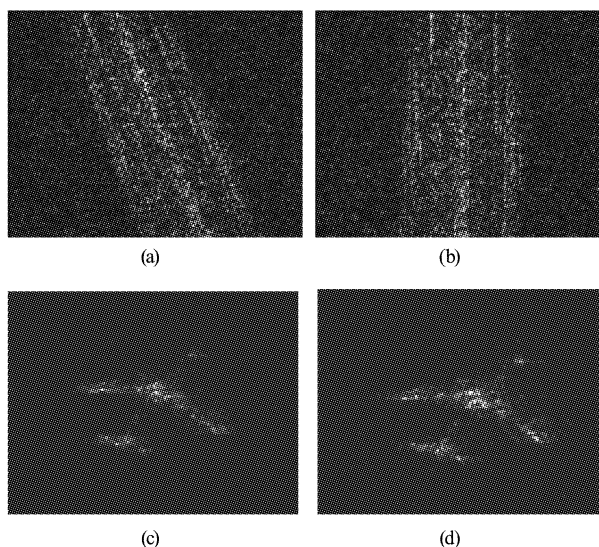


图 5 实际数据处理结果 (a) 脉压后的回波信号, (b) Keystone 变换后的结果, (c) 去调频后的聚焦结果, (d) 距离多普勒域成像结果

Fig. 5 Imaging results for real data (a) Signal after pulse compression, (b) Signal after Keystone transform, (c) Focused image after dechirping, (d) Image in range Doppler domain

标的径向和横向速度的估计值分别为 36.7866 m/s 和 -77.5132 m/s.

图 6 给出了配准后的图像经过归一化门限 (-8 dB) 后两两相干得到的干涉相位图. 从图 6 可以看出,除了因为信号强度较弱受噪声干扰明显导致的部分野点以外,信号的干涉相位由上而下的变

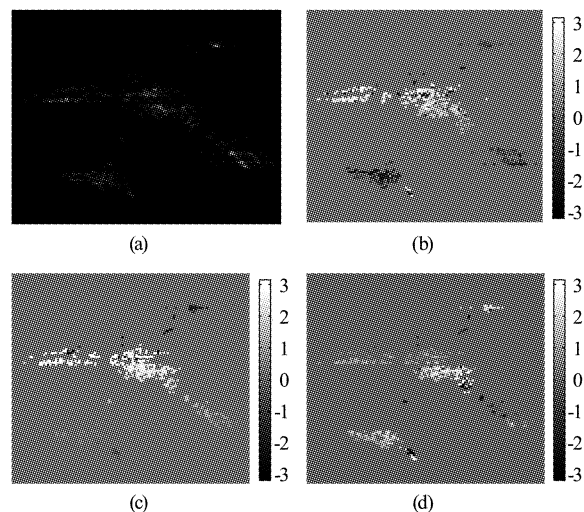


图 6 干涉相位图 (a) 天线  $T_3$  图像过门限后的结果, (b) 天线  $T_1 T_2$  干涉相位图, (c) 天线  $T_2 T_3$  干涉相位图, (d) 天线  $T_3 T_1$  干涉相位图

Fig. 6 Interferograms (a) Antenna  $T_3$  image over threshold, (b) Interferogram of antenna  $T_1$  and  $T_2$ , (c) Interferogram of antenna  $T_2$  and  $T_3$ , (d) Interferogram of antenna  $T_3$  and  $T_1$

化趋势比较明显. 根据相位的变化情况可以计算出目标的横向尺寸约为 58 m.

#### 4 结论

系统地研究了毫米波 InSAR 的运动目标成像、探测与定位问题, 并给出了计算机仿真和实际数据的处理结果. 实现了对低信噪比运动目标成像的同时完成目标探测并获取目标速度, 进一步利用干涉处理获取目标的高精度位置信息. 该方法在微弱运动目标成像探测、尺寸估计和航迹预测方面具有重要的应用价值.

#### REFERENCES

- [1] ZHANG Qun, Yeo T S. Three-Dimensional SAR Imaging of a Ground Moving Target Using the InSAR Technique[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004, **42**(9): 1818 - 1828.
- [2] WANG Gen-Yuan, XIA Xiang-Gen, Chen V C. Three-Dimensional ISAR Imaging of Maneuvering Targets Using Three Receivers [J]. *IEEE Trans. Imaging Processing*. 2001, **10**(3): 436 - 447.
- [3] GAO Zhao-Zhao, XING Meng-Dao, ZHANG Shou-Hong. 3D Image Reconstruction Using the InSAR Technique[J]. *Journal of Xidian University*(高昭昭, 邢孟道, 张守宏. 基于 InSAR 技术的三维成像. *西安电子科技大学学报*), 2008, **35**(5): 883 - 888.
- [4] TANG Li-Bo, LI Dao-Jing, HONG Wen, *et al.* Three-dimensional Imaging of Moving Ship with 3D Motion Based on Three Antennas InSAR; *EUSAR2006*[C], April 2006, Germany.
- [5] LI Dao-Jing, LIU Bo, YIN Jian-Feng, *et al.* Analysis and Design of Spaceborne MMW Radar for Space Debris Observation System[J]. *Journal of Astronautics*(李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计. *宇航学报*), 2010, **31**(12): 2746 - 2753.
- [6] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House Inc, 2005: 84 - 90.
- [7] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR Imaging of Moving Targets[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*. 1999, **35**(1): 88 - 199.
- [8] YIN Jian-Feng. Research on the Method of SAR High-Speed Moving Target Detection and Imaging[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (尹建凤. SAR 高速运动目标检测与成像方法研究. 北京: 中国科学院电子学研究所), 2009.
- [9] XING Meng-Dao, BAO Zheng. Motion Parameter Estimation Based SAR Imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*(邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像. *电子学报*), 2001, **29**(12): 1824 - 1828.
- [10] YIN Jian-Feng, LI Dao-Jing, WU Yi-Rong. Space Targets Detection and Imaging Based on Spaceborne Millimeter-wave Radar[J]. *Journal of Astronautics*(尹建凤, 李道京, 吴一戎. 基于星载毫米波雷达的空间目标探测与成像. *宇航学报*), 2007, **28**(6): 1683 - 1688.
- [2] Gross R W F, Bott J F. Handbook of Chemical Laser[M]. Yin Houming, Xie Xingbin, Luo Jingyuan, Transl. Beijing: Science Press, 1987.
- [3] Davis S J, Rawlins W T, Oakes D B, *et al.* Dynamics of HF(v, j) chemiluminescence and lasing by infrared hyperspectral imaging[C]. *34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Orlando; AIAA, 2003, 1 - 7.
- [4] Basov N G, Bashkin A S, Igoshin V I, *et al.* *Chemical lasers*[M]. Berlin; Springer-Verlag, 1990.
- [5] Manke II G C, Hager G D. A Review of Recent Experiments and Calculations relevant to the kinetics of the HF Laser[C]. *33rd AIAA Plasmadynamics and Lasers conference*, Hawaii; AIAA, 2002, 1 - 10.
- [6] Kompa K L. *Chemical lasers*[M]. Berlin; Springer-Verlag, 1973.
- [7] Rowlins W T, Oakes D B, Mulhall P A, *et al.* Imaging spectroradiometer for HF laser studies[C]. *SPIE Proceedings, Gas and Chemical Lasers and Intense Beam Applications III*, San Jose: SPIE, 2002, 1 - 8.
- [8] Injeyan H, Wang H S. CW HF R-branch laser; U. S., 4598409[P]. July 1, 1986.
- [9] Kerber R L, Cohen N, Emanuel G. Kinetic Model and Computer Simulation for a pulsed DF-CO<sub>2</sub> Chemical Transfer Laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, **9**(1): 94 - 113.
- [10] Detweiler G L, Sentman L H, Carroll D L, The Possibility of Hot Reaction Enhancement of CW HF Laser Performance [C]. *AIAA 36th Plasma Dynamics and Lasers Conference*, Toronto; AIAA, 2005, 1 - 14.
- [11] LUO Wei, YUAN Shengfu, YAN Baozhu, *et al.* Kinetics Analysis of the Chemiluminescence in Discharge Driven HF Chemical Lasers [J]. *Chin. Opt. Lett*, 2011, **9**(8): 081403.

(上接 242 页)