

基于 UWB SAR 图像 ROI 切片的运动目标成像和参数估计方法

常玉林 周红 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 本文提出了一种基于 UWB SAR 图像 ROI (Region of Interest) 切片的运动目标成像和参数估计方法。该方法作为图像域 GMTD 算法的后续步骤, 可在检测出运动目标并提取其多通道图像域 ROI 切片之后, 对运动目标进行聚焦成像并估计目标相对载机的运动速度, 然后基于运动目标的多通道聚焦像估计其距离向速度, 在此基础上, 估计运动目标的方向向速度、方位向位置、距离向位置等参数, 从而获得运动目标的二维速度和位置参数。基于半实测数据的实验证明了本文所提方法的有效性。

关键词: 运动目标指示; 超宽带 SAR; 感兴趣区域; 参数估计

中图分类号: TN957.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)01-0086-09

Moving Target Imaging and Parameter Estimation Method Based on ROI of Multi-channel UWB SAR Images

CHANG Yu-lin ZHOU Hong HUANG Xiao-tao ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, China)

Abstract: This paper propose a method for moving target imaging and parameter estimation, which is based on ROI of multi-channel UWB SAR images. As the consequent step after GMTD of image domain, the proposed method firstly focuses the moving target and estimates its relative velocity using its ROI. Secondly, the method estimates the range velocity of the moving target based on its focused multi-channel images. Finally, the method estimates other parameters, including azimuth velocity, azimuth position and range position. The method has been proved to be valid based on half real data.

Key words: GMTI; UWB SAR; ROI; Parameter Estimation

1 引言

超宽带合成孔径雷达(Ultra Wide Bandwidth Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)是一种结合了超宽带技术和合成孔径技术的成像雷达,它具有大波束角和大相对带宽的特点,能够获得方位向和距离向高分辨力,且具有穿透叶簇或浅地表成像的能力[1-3]。在飞行平台上沿航迹向放置多个 UWB SAR 接收天线,可对 UWB SAR 系统的功能进行扩展和延伸,使之同时具有地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)功能,这样得到的 UWB SAR/GMTI 系统可以获得战场静态和动态信息,可以对较大范围内的目标——

无论是开阔平坦地区还是树丛隐蔽、多山地区目标,无论是静止还是运动目标——进行全方位的侦察、监视及成像。

基于多通道 UWB SAR 系统的 GMTI 方法有其自身的特点。由于 UWB SAR/GMTI 系统发射的信号波长较长,运动目标的多普勒频偏较小,这样即使快速运动目标对应的信号也能反映在 UWB SAR 图像上,因此若基于多通道 UWB SAR 图像域进行 GMTI 也能收到较好的效果[4-6]。目前的图像域运动目标检测已有较多文献进行了研究,如图像域 DPCA[7]、ATI[4]、图像域 STAP[5,6]等方法,在图像域运动目标参数估计方法,较多的局限于对距离向速度和方位向位置的估计[8-

10], 对方向向速度和距离向位置估计方法研究的较少。而实际上, 只有在检测出运动目标的基础上, 对其二维运动参数进行估计, 获取其实时二维位置参数, 并根据运动目标速度参数对其进行聚焦成像, 以实现运动目标的分类识别, 才能获得有实际军事应用价值的运动目标情报。

本文提出了一种基于运动目标多通道 UWB SAR 图像 ROI 切片的运动目标成像和参数估计方法。该方法作为多通道图像域 GMTD 算法的后续步骤, 可在检测出运动目标并提取其多通道图像域 ROI 切片之后, 对运动目标进行聚焦成像并获得运动目标的二维速度和位置参数。该方法包括以下几个步骤: 第一, 根据本文提出的在运动目标 ROI 二维波数域进行散焦补偿的算法, 依不同合成速度对运动目标的 ROI 进行散焦补偿, 并根据最佳聚焦准则估计运动目标相对载机的运动速度(以下简称为合成速度), 同时得到运动目标的聚焦像; 第二, 根据本文提出的基于多通道聚焦像估计其距离向速度的方法, 估计其距离向速度; 第三, 在估计出合成速度、距离向速度的基础上, 计算运动目标的方位向速度; 第四, 根据聚焦像的位置和方位向、距离向速度, 对运动目标的二维初始位置和实时位置等参数进行估计。

本文的结构安排如下: 作为全文的理论基础, 本文第二部分对运动目标在 UWB SAR 图像及其二维波数域的表达式进行了推导; 本文第三部分提出了基于多通道 UWB SAR 图像 ROI 切片的运动目标聚焦和参数估计方法, 该方法首先基于最佳聚焦准则对运动目标进行聚焦, 获得运动目标的多通道聚焦像, 并估计其合成速度, 然后基于多通道聚焦像对运动目标的距离向速度进行估计, 最后对运动目标的方位向速度和位置参数进行估计; 本文第四部分给出了基于半实测数据的实验结果。

2 运动目标在 UWB SAR 图像及其二维波数域上的表征

对于低波段 UWB SAR 系统而言, 运动目标引起的多普勒频偏相对较小, 在 UWB SAR 成像过程中若采用带宽稍宽的多普勒滤波器, 即可使运动目标和静止目标的信号均表现在 UWB SAR 图像上(虽然运动目标的图像可能发生散焦及位置偏移)。

Jao 在文献[11]中推导了运动目标在单通道 UWB SAR 图像中的表征, 他是基于 BP 成像算法推导的; 本节结合 ω - k 成像算法, 对运动目标在 UWB SAR 图像上的表征规律进行重新推导。本节首先对运动目标对阵

列天线的距离迁徙曲线进行分析, 并将其等效表示为类似为静止目标距离迁徙曲线的形式, 在此基础上, 结合波数域成像过程推导得出运动目标在 UWB SAR 图像二维波数域的表达式, 然后得出了运动目标的时域表达式。

2.1 运动目标的距离迁徙曲线的等效

假设阵列孔径 SAR 工作于正侧视模式, 阵列天线工作对地观测几何如图 1 所示。载机距地面高度 h 以速度 $(v_a, 0, 0)$ 沿 X 轴作匀速直线运动, 收发天线构成了 N 个等效相位中心, 天线相位中心之间的间距为 d 。

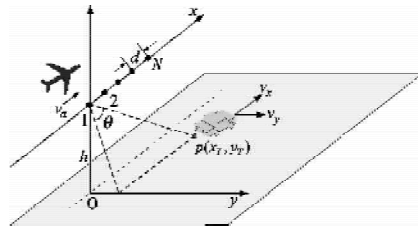


图 1 阵列天线对地观测几何

在零时刻, 第一个相位中心位于 $(x_a, 0, h)$, 在地面 $(x_T, y_T, 0)$ 处存在一点目标 P , 其运动速度为 $(v_x, v_y, 0)$ 。

那么任意 t_m 时刻第 n 个相位中心至地面目标的瞬时斜距可表示为:

$$R_n(t_m) = \{h^2 + [(x_T + v_x t_m) - (x_a + v_a t_m + (n-1)d)]^2 + (y_T + v_y t_m)^2\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{令 } X = \frac{(x_T - x_a)(v_a - v_x) - y_T v_y}{V}, Y = \frac{y_T(v_a - v_x) + (x_T - x_a)v_y}{V},$$

$V = \sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2}$, 于是有:

$$R_n(t_m) = \{h^2 + [Y - (n-1)d \sin \alpha]^2 + [V t_m - X + (n-1)d \cos \alpha]^2\}^{1/2} \quad (2)$$

其中 α 满足: $\sin \alpha = v_y/V$, $\cos \alpha = (v_a - v_x)/V$ 。令

$$\begin{cases} X_n = X - (n-1)d(\cos \alpha - \gamma) \\ R_{sn} = \sqrt{h^2 + [Y - (n-1)d \sin \alpha]^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\gamma = V/v_a$, 称之为相对速度系数。(2)式可进一步表示为:

$$R_n(t_m) = \sqrt{R_{sn}^2 + (V t_m - X_n)^2} \quad (4)$$

由(4)式可以看出: 运动目标的距离迁徙曲线被等效表示为了类似静止目标距离迁徙曲线的形式; 两者略为不同的是静止目标对应距离迁徙曲线的形状由载机速度 v_a 决定, 而运动目标对应距离迁徙曲线的形状由载机和运动目标之间的合成速度 V 决定。这一等效为接下来的推导提供了方便。

2.2 运动目标在 UWB SAR 图像二维波数域的表征

上一节将运动目标的距离迁徙曲线等效表示为了类似静止目标距离迁徙曲线的形式, 本节结合波数域 SAR 成像过程推导运动目标在 UWB SAR 图像二维波

数域的表达式。

设 UWB SAR 系统所发射的信号为:

$$p(t) = \exp(j2\pi f_c t + j\pi K t^2) \quad t \in [-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}] \quad (5)$$

其中 f_c 代表发射信号的载频, T 代表发射信号的脉宽, K 为调频率。那么第 n 个通道所接收到的信号经正交解调后可以表示为:

$$\begin{aligned} s_n(t, t_m) &= \exp\{-j\frac{2R_n(t_m)}{c} + j\pi K[t - \frac{2R_n(t_m)}{c}]^2\} \\ &= \exp\{-j\frac{2\sqrt{R_{sn}^2 + (Vt_m - X_n)^2}}{c} \\ &\quad + j\pi K[t - \frac{2\sqrt{R_{sn}^2 + (Vt_m - X_n)^2}}{c}]^2\} \quad (6) \end{aligned}$$

对 $s_n(t, t_m)$ 作二维傅立叶变换, 根据驻定相位定理^[12], 可得正交解调后的运动目标回波频谱为:

$$\begin{aligned} s_n(f, f_a) &= \frac{\exp(-j\pi/4) \exp(-j\frac{\pi f^2}{K})}{\gamma \sqrt{[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]^2 - (\frac{2\pi f_a}{V})^2}} \\ &\quad \exp(-j2\pi f_a \frac{X_n}{V}) \\ &\quad \exp(-jR_{sn} \cdot \sqrt{[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]^2 - (\frac{2\pi f_a}{V})^2}) \quad (7) \end{aligned}$$

根据波数域 SAR 成像算法^[13], 对正交解调后的回波进行 SAR 成像处理, 可认为对其依次进行了: a. ramp 滤波^[5] b. 距离压缩 c. stolt 插值 d. 二维逆傅立叶变换。运动目标回波经 ramp 滤波和距离压缩之后的频谱可以表示为:

$$\begin{aligned} s_{n_rpc}(f, f_a) &= s_n(f, f_a) \cdot \exp(j\frac{\pi f^2}{K}) \exp(j\pi/4) \cdot \frac{4\pi}{c}(f_c + f) \\ &= \frac{\frac{4\pi}{c}(f_c + f)}{\gamma \sqrt{[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]^2 - (\frac{2\pi f_a}{V})^2}} \exp(-j2\pi f_a \frac{X_n}{V}) \\ &\quad \exp(-jR_{sn} \cdot \sqrt{[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]^2 - (\frac{2\pi f_a}{V})^2}) \quad (8) \end{aligned}$$

在二维频域对 $s_{n_rpc}(f, f_a)$ 进行 Stolt 插值, 可认为对 $s_{n_rpc}(f, f_a)$ 进行了变量替换:

$$\begin{cases} k_x = \frac{2\pi f_a}{v_a} \\ k_r = \sqrt{[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]^2 - k_x^2 - k_c} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $k_c = 4\pi f_c/c$, 得 SAR 图像的频谱为:

$$\begin{aligned} G_n(k_x, k_r) &= \frac{\sqrt{(k_r + k_c)^2 + k_x^2}}{\gamma \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}} |J_{ST}| \exp(-j\frac{X_n}{\gamma} \cdot k_x) \\ &\quad \exp(-jR_{sn} \cdot \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}) \quad (10) \end{aligned}$$

式中 $\varepsilon = 1 - 1/\gamma^2$, J_{ST} 为 Stolt 变换的 Jacobian 矩阵:

$$\begin{aligned} J_{ST} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]}{\partial k_r} & \frac{\partial[\frac{4\pi}{c}(f_c + f)]}{\partial k_x} \\ \frac{\partial(\frac{2\pi f_a}{v_a})}{\partial k_r} & \frac{\partial(\frac{2\pi f_a}{v_a})}{\partial k_x} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{k_r + k_c}{\sqrt{(k_r + k_c)^2 + k_x^2}} & \frac{k_x}{\sqrt{(k_r + k_c)^2 + k_x^2}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11) \end{aligned}$$

由(11)可知 J_{ST} 的行列式为:

$$|J_{ST}| = \frac{k_r + k_c}{\sqrt{(k_r + k_c)^2 + k_x^2}} \quad (12)$$

将(12)代入(10)式中得

$$\begin{aligned} G_t(k_x, k_r) &= \frac{k_r + k_c}{\gamma \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}} \exp(-j\frac{X_n}{\gamma} \cdot k_x) \\ &\quad \exp(-jR_{sn} \cdot \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}) \quad (13) \end{aligned}$$

$G_t(k_x, k_r)$ 即为运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像二维波数域的表达式。

2.3 运动目标在 UWB SAR 图像上的表征

在得到运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像波数域表达式的基础上, 对其作二维逆傅立叶变换, 即可得到运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像上的表达式。

i) 若 $\varepsilon = 0$

此时 $\gamma = 1$, 于是

$$G_n(k_x, k_r) = \exp(-jX_n \cdot k_x) \exp(-jR_{sn} \cdot (k_r + k_c)) \quad (14)$$

对 $G_n(k_x, k_r)$ 作二维逆傅立叶变换, 得

$$g_n(x, r) = psf_x(x - X_n) \cdot psf_r(r - R_{sn}) \cdot \exp(-jR_{sn} \cdot k_c) \quad (15)$$

(15)式表明: 当 $\varepsilon = 0$ 时, 运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像上聚集于 (X_n, R_{sn}) 处。

ii) 若 $\varepsilon \neq 0$

此时对 $G_n(k_x, k_r)$ 作二维逆傅立叶变换, 根据驻定相位原理, 可得运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像上的信号为 $g_n(x, r)$:

$$\begin{aligned} g_n(x, r) &= psf_r(r - \sqrt{R_{sn}^2 - \frac{1}{\varepsilon}(x - X_n/\gamma)^2}) \\ &\quad \exp[-j\frac{4\pi f_c}{c} \sqrt{R_{sn}^2 - \frac{1}{\varepsilon}(x - X_n/\gamma)^2}] \quad (16) \end{aligned}$$

(16)式中 x 的范围可以表示为:

$$\begin{aligned} & |\varepsilon| \cdot R_{sn} \cdot \max\left[\gamma \tan\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right), -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon + \frac{1}{\tan^2 \frac{\Theta}{2}}}}\right] \leq \\ & x - \frac{X_n}{\gamma} \leq |\varepsilon| \cdot R_{sn} \cdot \min\left[\gamma \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right), \frac{1}{\sqrt{\varepsilon + \frac{1}{\tan^2 \frac{\Theta}{2}}}}\right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中 Θ 为 SAR 成像所选择的积累角, β 为波束角的大小。(17)式表征了运动目标的散焦轨迹范围。为了保证能对所有速度的运动目标成像,需要保证所选择的成像积累角较大,此时(17)式可变形为:

$$\gamma |\varepsilon| R_{sn} \tan\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \leq x - \frac{X_n}{\gamma} \leq \gamma |\varepsilon| R_{sn} \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \quad (18)$$

从(16)式可看出:当 $\varepsilon \neq 0$ 时,运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像上的成像轨迹为:

$$\frac{\left(x - \frac{X_n}{\gamma}\right)^2}{\varepsilon} + r^2 = R_{sn}^2 \quad (19)$$

综合(15)(19)可得出如下结论:

1) 当 $V > v_a$ 时($\varepsilon > 0$),运动目标在 SAR 图像上的轨迹为向近端弯曲的一段椭圆;

当 $V < v_a$ 时($\varepsilon < 0$),运动目标在 SAR 图像上的轨迹为向远端弯曲的一段双曲线;

当 $V = v_a$ 时($\varepsilon = 0$),运动目标在 SAR 图像上的轨迹为一个点,且聚焦位置为(X_n, R_{sn})。

2) 经过 SAR 成像过程之后,运动目标信号能量的散布范围相比回波域大大减小,且 $|\varepsilon|$ 越小,运动目标信号能量在 SAR 图像上的散布范围越小,即散焦程度越小。

3) 运动目标在不同通道间的成像轨迹是相似的,它们之间仅存在一定的平移。第 n 个通道运动目标散焦轨迹的顶点为($\frac{X_n}{\gamma}, R_{sn}$),第 1 个通道运动目标散焦轨迹的顶点为($\frac{X_1}{\gamma}, R_{s1}$),两者在方位向的平移量为 $-(n-1)d(\cos\alpha - \gamma)$,在斜距离向的平移量为 $-(n-1)d$

$\frac{Y}{\sqrt{h^2 + Y^2}} \sin\alpha$ 。

3 基于运动目标 UWB SAR 图像 ROI 的运动目标聚焦和参数估计方法

上节给出了运动目标在多通道 UWB SAR 图像域

的表达式,根据运动目标和静止目标在多通道 UWB SAR 图像上包络和相位的差异,可采用基于图像域 DP-CA、ATI、图像域 STAP 方法对运动目标进行检测。假设已经检测出运动目标,并通过掩模处理提取了它在 UWB SAR 图像上的 ROI 切片,本节研究如何基于运动目标的 ROI 切片对其进行聚焦成像,并估计运动目标的位置和速度参数。

3.1 基于 UWB SAR 图像 ROI 的运动目标聚焦和合成速度估计

A. 原理分析

设某运动目标相对载机的速度为 V ,若 $V \neq v_a$,该运动目标在 UWB SAR 图像上是散焦的,设在 GMTD 步骤已经提取了该运动目标在第 n 个通道 UWB SAR 图像上的 ROI 切片,记为 $g_n(x, R)$,根据(13),将该 ROI 切片变换到波数域,得

$$\begin{aligned} G_n(k_x, k_r) = & \frac{k_r + k_c}{\gamma \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}} \exp\left(-j \frac{X_n}{\gamma} \cdot k_x\right) \\ & \exp\left(-j R_{sn} \cdot \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

若已知运动目标和载机之间的合成速度 V ,那么 ε 和 γ 已知,在波数域对 $G_n(k_x, k_r)$ 进行散焦补偿,然后反变换到时域,即可得运动目标的聚焦图像:

$$\begin{aligned} g_{focus_n}(x, r) = & \mathcal{F}_{k_x, k_r \rightarrow x, r}^{-1} \left\{ G_n(k_x, k_r) \cdot \frac{\gamma \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}}{k_r + k_c} \right. \\ & \left. \exp\left[-j R_{sn}'(k_r + k_c) + j R_{sn}' \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon k_x^2}\right] \right\} \\ = & psf_x\left(x - \frac{X_n}{\gamma}\right) \cdot psf_r\left(r - R_{sn}\right) \cdot \exp\left(-j R_{sn}' \cdot k_c\right) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $psf_x(\cdot)$ 为方位向点扩散函数, $psf_r(\cdot)$ 为距离向点扩散函数。

实际中, R_{sn} 和合成速度 V 都是无法事先获知的,因此需要对它们进行估计。由于运动目标在 UWB SAR 图像上散焦轨迹的斜距变化程度很小,特别是对于正侧视 SAR 系统,可认为用运动目标散焦轨迹的斜距中值 R_{sn}' 作为对等效斜距 R_{sn} 的估计是足够精确的。

合成速度 V 的估计则更为复杂,若取运动目标的合成速度估值为 V' ,根据 V' 在波数域对 $G(k_x, k_r)$ 进行散焦补偿,然后将其反变换到时域,可得散焦补偿后的运动目标图像为:

$$\begin{aligned} g'_n(x, r; V') = & \mathcal{F}_{k_x, k_r \rightarrow x, R}^{-1} \left\{ G_n(k_x, k_r) \cdot \frac{\gamma' \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon' k_x^2}}{k_r + k_c} \right. \\ & \left. \exp\left[-j R_{sn}'(k_r + k_c) + j R_{sn}' \sqrt{(k_r + k_c)^2 + \varepsilon' k_x^2}\right] \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

式中 $\gamma' = \frac{V'}{v_a}$, $\varepsilon' = 1 - \frac{1}{\gamma'^2}$ 。只有当 V' 等于运动目标的真实合成速度 V 时,运动目标引起的散焦才被完全补偿,运动目标图像才能获得最大幅度。

根据这一性质,本节提出了基于最佳聚焦的准则

来对 V 进行估计,即在运动目标可能的合成速度范围内等间隔取若干个值 V'_i ,对每一个 V'_i ,据(22)式得到相应的 $g'_n(x, R; V'_i)$,根据 V'_i 与 V 越接近,聚焦程度越好,散焦补偿后运动目标 ROI 峰值越大的原理,选择峰值最大的 $g'_n(x, R; V'_i)$ 所对应的 V'_i 作为对 V 的估计:

$$\hat{V} = \arg \max_{V'_i} \{ \text{abs}(g'_{\text{focus}_n}(x, r; V'_i)) \} \quad (23)$$

其中 V'_i 的选取间隔根据对合成速度估计精度的需要而定。当 V'_i 的选取间隔足够小时,可认为 \hat{V} 和 V 是足够接近的, $g'_n(x, r; \hat{V})$ 是可作为运动目标的聚焦像,聚焦后的 ROI 图像切片在 $(X_n/\gamma, R_m)$ 处取得最大值。

需要指出的是,当 ROI 图像切片尺寸太小时,若直接对 $G_n(k_x, k_r)$ 进行补偿,对理想补偿函数进行离散量化时存在较大的量化误差。为避免这种情况的发生,对于尺寸较小的 ROI 图像切片,可先对其进行补零,然后变换到波数域,并在波数域根据 V 设计相应的补偿函数。

本节所提的合成速度估计方法,可看做是一种匹配滤波器组的方法^[8]。和一般的匹配滤波器组法在回波域进行匹配滤波估计 V 不同,本节所提方法基于运动目标的图像域 ROI 估计 V ,由于 SAR 成像处理对运动目标有一定的方位压缩作用(即使它可能出现散焦),因此,基于运动目标的图像 ROI 估计 V 的数据量更小,运算效率更高。

B、合成速度估计性能的分析

Petterson 在文献[14]中,分析了运动目标信号匹配滤波时参数失配对输出信噪比的影响。他的结论对图像域的运动目标信号匹配滤波依然有效。

根据他的结论,合成速度失配引起的输出信噪比损失为:

$$\text{SINRLoss} = \frac{1}{2Q} \int_{-Q}^Q \exp(-jp^2) \sin c\left(\frac{B}{f_c} p^2\right) dp \quad (24)$$

其中 B 为雷达信号带宽, Q 为与合成速度失配有关的量:

$$Q = L \sqrt{\frac{\pi f_c}{2c} \frac{1}{R_s} \cdot \left| \left(\frac{V'}{V}\right)^2 - \left(\frac{V}{v_a}\right)^2 \right|} \quad (25)$$

式(25)中, L 为 SAR 成像时所对应的积累孔径长度。

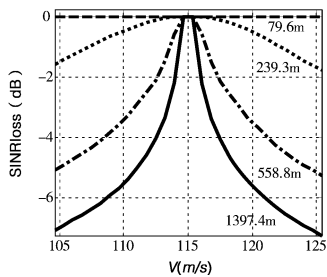


图2 不同积累孔径下合成速度失配引起的 SINRLoss

设信号中心频率为 400MHz,带宽为 200MHz,目标等效斜距 R_s 为 10000m,目标的真实合成速度 V 为 115m/s,绘出不同 L 下, V' 与 SINRLoss 之间的关系,如图 2 所示。可看出当 V' 和目标真实合成速度 V 偏离越

远时,所引起的 SINRLoss 就越大;且当积累孔径长度 L 越长时, SINRLoss 对合成速度失配就越敏感,速度估计精度就越更高。

根据合成速度失配引起的 SINRLoss,可对合成速度分辨率进行估计。记 SINRLoss = -3dB 所对应的 V' 为 V'_{-3dB} ,其中 V'_{-3dB} 可根据(24)(25)式计算,于是合成速度分辨率 ΔV_{res} 可表示为:

$$\Delta V_{res} = \left| V'_{-3dB} - V \right| \quad (26)$$

合成速度分辨率 ΔV_{res} 可作为合成速度估计性能的评价指标。图 3 绘出了不同积累孔径长度 L 所对应的合成速度分辨率,可看出积累孔径长度 L 越长,合成速度分辨率越佳。

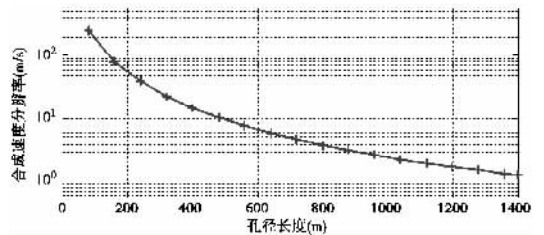


图3 不同积累孔径下的合成速度分辨率

C、搜索策略

为了加快搜索速度,我们采用从粗到精的分级搜索策略。即先采用较为稀疏的搜索间隔,对 V' 进行粗搜索;然后在 V' 的粗略估计值附近,采用较为密集的搜索间隔,对 V' 进行精搜索。这一搜索策略使得:

1) V' 的总搜索次数减少;

2) 精搜索步骤的运算量减少。这是因为经过粗聚焦之后,运动目标的散焦程度进一步降低,精搜索步骤可以基于更小的 ROI 进行。

因此,相比直接对 V' 进行搜索,粗到精的分级搜索策略可减少运算量,加快搜索速度。

搜索步长的选取根据(24)(25)式确定:设粗搜索和精搜索时允许的 SINRLoss 分别为 SINRLoss_1 和 SINRLoss_2 ,根据(24)式,可计算与 SINRLoss_1 和 SINRLoss_2 对应的 Q_1 和 Q_2 ,根据(25)式,则可确定速度搜索间隔 ΔV_1 和 ΔV_2 。

D、和回波域匹配滤波器组法的运算量比较

在前面已经指出:本文所提的合成速度估计方法,实际上是一种图像域的匹配滤波器组法,它和回波域匹配滤波法的相比,其优势在于运算量更低。下面比较两者的运算量。

首先分析基于回波域匹配滤波器组法估计合成速度 V 的运算量。

设包含了运动目标信号的回波矩阵大小为 $M_1 \times N_1$,匹配滤波器组的数目为 K ,基于该回波对运动目标

进行 K 次成像处理,所需的运算量可表示为:

$$T_1 = KM_1N_1 \log_2(M_1N_1) \quad (27)$$

运动目标距离迁徙曲线的对应的范围越大, M_1 和 N_1 的取值就越大,回波域匹配滤波器组法的运算量就越大。分两种情况,对运动目标的回波域距离迁徙曲线范围进行讨论:

1) 若 $0 \in [-\frac{\beta}{2} + \alpha, \frac{\beta}{2} + \alpha]$, 运动目标回波域距离迁徙曲线的范围可以表示为:

$$\begin{cases} \left| x - \frac{X_n}{\gamma} \right| \leq R_{sn} \cdot \max\left[\tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right), \tan\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \right] \\ \left| r - R_{sn} \right| \leq R_{sn} \cdot \max\left[\sqrt{1 - \tan^2\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right)}, \sqrt{1 - \tan^2\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right)} \right] \end{cases} \quad (28)$$

2) 若 $0 \notin [-\frac{\beta}{2} + \alpha, \frac{\beta}{2} + \alpha]$, 运动目标回波域距离迁徙曲线的范围可以表示为:

$$\begin{cases} \left| x - \frac{X_n}{\gamma} \right| \leq R_{sn} \cdot \left| \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right) - \tan\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \right| \\ \left| r - R_{sn} \right| \leq R_{sn} \cdot \left| \sqrt{1 - \tan^2\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right)} - \sqrt{1 - \tan^2\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right)} \right| \end{cases} \quad (29)$$

接下来分析基于图像域 ROI 估计合成速度 V 的运算量。

设运动目标图像域 ROI 的大小为 $M_2 \times N_2$, 若图像域匹配滤波器的 K , 需要基于运动 ROI 进行 $K-1$ 次散焦补偿和一次成像处理, 所需的运算量为:

$$T_2 = M_1N_1 \log_2(M_1N_1) + (K-1) \cdot M_2N_2 \log_2(M_2N_2) \quad (30)$$

设成像时所选择的合成速度为 V_{img} , 显然, 当 V_{img} 和 V 偏差越大时, 运动目标在 SAR 图像上的散焦程度越大, 运动目标的 ROI 就越大, 即 M_2 和 N_2 越大, 这样一次散焦补偿所需的运算量就越大。运动目标的散焦轨迹的方位向范围如 (18) 式所示。联合 (18) (19) 式, 可以确定运动目标散焦轨迹的方位向和距离向范围。分如下两种情况讨论:

1) 若 $0 \in [-\frac{\beta}{2} + \alpha, \frac{\beta}{2} + \alpha]$, 那么散焦轨迹的距离向范围为:

$$\begin{cases} \left| x - \frac{X_n}{\gamma} \right| \leq \gamma |\varepsilon| R_{sn} \cdot \max\left[\tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right), \tan\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \right] \\ \left| r - R_{sn} \right| \leq R_{sn} \cdot \max\left[\sqrt{1 - (\gamma^2 - 1) \tan^2\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right)}, \sqrt{1 - (\gamma^2 - 1) \tan^2\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right)} \right] \end{cases} \quad (31)$$

2) 若 $0 \notin [-\frac{\beta}{2} + \alpha, \frac{\beta}{2} + \alpha]$, 那么散焦轨迹的距离向范围为:

$$\begin{cases} \left| x - \frac{X_n}{\gamma} \right| \leq \gamma |\varepsilon| R_{sn} \cdot \left| \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right) - \tan\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right) \right| \\ \left| r - R_{sn} \right| \leq R_{sn} \cdot \left| \sqrt{1 - (\gamma^2 - 1) \tan^2\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right)} - \sqrt{1 - (\gamma^2 - 1) \tan^2\left(-\frac{\beta}{2} + \alpha\right)} \right| \end{cases} \quad (32)$$

综合 (31) (32) 和 (28) (29), 可知基于图像域 ROI 的方法和回波域匹配滤波器组法的运算量之比 η 为:

$$\eta = \frac{T_2}{T_1} \approx \frac{(K-1)\gamma^3\varepsilon^2 + 1}{K} \quad (33)$$

取 $K=10$, 计算 $\gamma \in [0.7, 1.3]$ 范围内的 η , 如可看出 η 越接近 1, 基于图像域 ROI 的运算量降低就越明显。

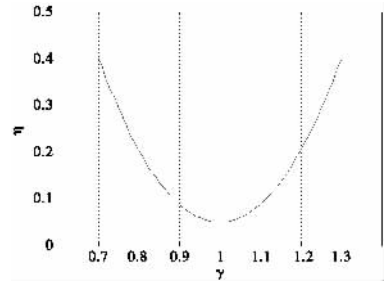


图 4 $\gamma \sim \eta$ 曲线图

3.2 基于运动目标多通道聚焦像的距离向速度估计

目前一般的图像域距离向速度参数估计方法往往直接对 SAR 图像上进行, 由于运动目标易在 UWB SAR 图像上散焦, 散焦运动目标的信杂比和信噪比都较低, 这影响该类方法的距离向速度估计精度。本节提出基于运动目标的多通道聚焦像的距离向速度估计方法。

在上一节估计得到的运动目标的合成速度, 可以得到运动目标多通道聚焦像, 且运动目标在第 n 个通道上聚焦位置为 $(X_n/\gamma, R_{sn})$ 。在第 1 个和第 n 个通道上的聚焦位置差为:

$$\begin{cases} \Delta X_{1n} = X_1 - X_n = (n-1)d(\cos\alpha - \gamma) \\ \Delta R_{1n} = R_{s1} - R_{sn} = (n-1)d \frac{Y}{\sqrt{h^2 + Y^2}} \frac{v_y}{V} \end{cases} \quad (34)$$

ΔX_{1n} 和 ΔR_{1n} 都远小于基线长, 因此对于机载系统(基线不可能太长), 可认为运动目标在第 1 个和第 n 个通道图像上的聚焦位置差不超过一个分辨率单元, 故可以将运动目标在第 1 个和第 n 个通道图像上的聚焦像进行干涉, 干涉相位为:

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi f_c}{c} \frac{d \sin\varphi}{V} v_y \quad (35)$$

于是可根据干涉相位确定距离向速度:

$$v_y = \frac{c}{4\pi f_c} \frac{V}{d \sin\varphi} \Delta\phi \quad (36)$$

由于距离向速度根据多通道聚焦像进行,且通过掩模处理大大减小了杂波信号的影响,信杂比和信噪比都得以大幅提高,因此距离向速度估计精度更高。

3.3 方位向速度和二维位置参数估计方法

在已知合成速度 V 和距离向速度 v_y 之后,即可估计出运动目标的方位向速度:

$$v_x = v_a - \sqrt{V^2 - v_y^2} \quad (37)$$

根据(21),运动目标在聚焦后的第1个通道 ROI 图像切片聚焦于 $(X/\gamma, R_s)$,因此根据 $g_1'(x, R; \hat{V})$ 中最大值出现的位置可确定运动目标的等效位置参数 (X, R_s) 。

假设载机飞行高度 H 已知,于是 $Y = \sqrt{R_s^2 - H^2}$,根据

$$\begin{cases} x_T = x_a + \frac{X(v_a - v_x) + Yv_y}{\sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2}} \\ y_T = \frac{Y(v_a - v_x) - Xv_y}{\sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2}} \end{cases} \quad (38)$$

可求得运动目标的初始位置 (x_T, y_T) 。

在求得运动目标的初始位置 (x_T, y_T) 和速度 (v_x, v_y) 的基础上,可求得任意 t_m 时刻运动目标的方位向位置 $x(t_m)$ 和距离向位置 $y(t_m)$:

$$\begin{cases} x(t_m) = x_T + v_x t_m \\ y(t_m) = y_T + v_y t_m \end{cases} \quad (39)$$

至此,已求得运动目标的二维速度和二维位置参数。

4 实验结果

4.1 半实测数据产生方法介绍

由于目前还没有可利用的实测多通道 UWB SAR 回波数据,本文利用已有的单通道实际回波数据模拟多通道杂波,然后在多通道杂波的基础上叠加全仿真的多通道运动目标信号,得到包含了运动目标信号和杂波信号的多通道回波数据。

其中利用单通道回波数据模拟多通道杂波数据的依据是空时等效原理,设多通道天线位置参数如2.1所述,那么对于零时刻位于 (x, y) 处的静止目标而言,该静止目标在任意 t_m 时刻至第 n 个相位中心的瞬时斜距和该静止目标在 $t_m + d/v_a$ 时刻至第1个相位中心的瞬时斜距相等:

$$\begin{aligned} R_{s2}(t_m) &= R_{s1}(t_m + d/v_a, 0) \\ &= \sqrt{h^2 + y^2 + [v_a t_m + d - (x - x_a)]^2} \quad (40) \end{aligned}$$

且(40)式对于所有 (x, y) 均成立,因此第 n 个通道在 t_m 时刻接收到的静止地面场景回波可用第一个通道在 $t_m + d/v_a$ 时刻接收到的该静止目标地面场景回波代替,故可用一段载机飞行平稳时录取的实测单通道地面场景回波数据模拟得到多通道静止杂波数据。

4.2 基于半实测数据的实验结果

利用国防科技大学某次机载飞行实验中录取的单通道 P 波段 SAR 实测回波数据模拟多通道杂波,其中 P 波段 SAR 系统带宽为 200MHz,载机飞行高度为 5400 米,中心斜距 12600 米,选取一段载机飞行平稳的单通道回波数据模拟产生间隔为 3 米的三通道杂波数据,载机飞行速度为 106 米/秒;然后通过全仿真生成四个运动目标的双通道回波数据,其中运动目标的方位向速度和距离向速度分别为 $[-2, 2]$ m/s, $[1, 12]$ m/s, $[2, 6]$ m/s, $[0, 9]$ m/s。将三通道杂波数据和运动目标回波数据叠加,然后对叠加后的每一通道数据添加 -35 dB 独立同分布的高斯白噪声,得到包含了运动目标信号、杂波、噪声的双通道回波数据。利用三通道回波数据进行成像处理,其中第一个通道 SAR 图像显示如图 5 所示。

在获得三通道 UWB SAR 图像数据之后,采用图像域 DPCA + ATI 的方法对运动目标进行检测,即先基于一二通道,二三通道图像数据进行 DPCA 处理抑制杂波,然后利用一二通道 DPCA 处理结果和二三通道 DPCA 处理结果进行 ATI 处理检测运动目标,图 6 为目标检测后结果和图 5 掩模输出结果,可看出掩模输出后的图像上仅保留了四个运动目标的图像。从掩模输出后的多通道图像中提取各运动目标的 ROI,然后基于多通道 ROI 切片进行运动目标参数估计。

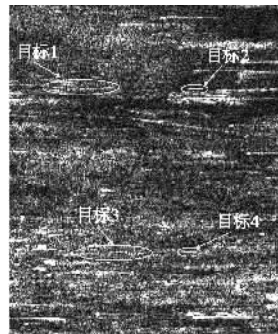


图5 UWB SAR 图像(第一个通道) 图6 目标检测后结果和图5掩模输出结果

图7给出了第一个运动目标的 ROI 图像以及依不同合成速度进行散焦补偿的结果,从各图中可看出:以 $V' = 108$ m/s 进行散焦补偿时,运动目标能达到了相对最好的聚焦效果,于是运动目标一和载机之间的合成

速度 V 可被估计为 108m/s 。类似地,可对运动目标二、三、四的合成速度进行估计。

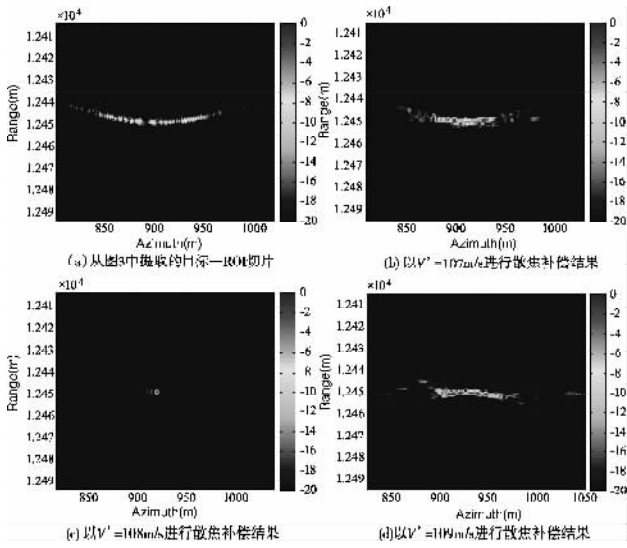


图 7 第一个运动目标 ROI 图像及依不同合成速度进行散焦补偿的结果

在估计出各运动目标的合成速度并得到运动目标的多通道聚焦像之后,可对不同通道间的运动目标聚焦

像进行干涉处理,然后如(36)式所示,根据干涉相位对运动目标的距离向速度进行估计。图 8 所示为运动目

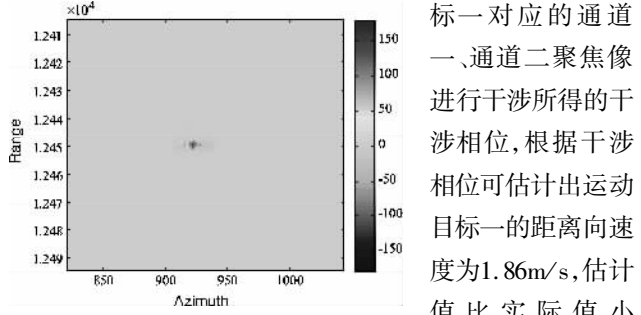


图 8 运动目标一通道一、通道二聚焦像干涉图

标一对应的通道一、通道二聚焦像进行干涉所得的干涉相位,根据干涉相位可估计出运动目标一的距离向速度为 1.86m/s ,估计值比实际值小 0.14m/s ,达到了较好的估计精度。

在估计出各运动目标的合成速度和距离向速度之后,即可对运动目标的方位向速度,方位向初始位置,距离向初始位置进行估计。

根据本文介绍的方法可对四个运动目标的二维速度和位置进行估计。结果显示如表 1 所示。从图中可看出各参数的估计均达到了较高精度,这也说明本文所提算法是有效的。

表 1 四个仿真运动目标的二维速度和位置参数估计结果

单位:m 或者 m/s

	合成速度 V			距离向速度 V_y			方位向速度 V_x			距离初始位置 y_T			方位初始位置 x_T		
	实际值	估计值	误差	实际值	估计值	误差	实际值	估计值	误差	实际值	估计值	误差	实际值	估计值	误差
目标一	108.02	108.00	-0.02	2	1.86	-0.14	-2	-1.98	-0.02	11193.7	11199.3	5.6	1194.0	1193.9	0.1
目标二	105.68	105.50	-0.18	12	11.94	-0.06	1	1.18	0.18	11027.3	11022.7	-4.6	2321.4	2323.2	1.8
目标三	104.17	104.00	-0.17	6	5.30	-0.70	2	2.14	0.14	11478.7	11487.8	9.1	1581.0	1582.1	1.1
目标四	106.38	106.50	0.12	9	8.94	-0.06	0	-0.12	0.12	11418.5	11417.8	-0.7	2051.3	2050.1	-1.2

5 结论

本文提出了一种基于运动目标多通道 UWB SAR 图像 ROI 切片的运动目标成像和参数估计方法。该方法作为多通道图像域 GMTD 算法的后续步骤,可在检测出运动目标的基础上,通过掩模方法提取运动目标的多通道图像域 ROI 切片,然后基于 ROI 切片对运动目标进行聚焦成像并估计目标相对载机的运动速度;本文改进了距离向速度的估计方法,提出了基于运动目标的多通道聚焦像的距离向速度估计方法;结合合成速度和距离向速度估计结果以及聚集像出现的位置,对运动目标的方位向速度、方位向位置、距离向位置等参数进行估计,从而获得运动目标的二维速度和位置参数。本文最后提出了基于单通道实测回波数据的多通道半实测回波数据产生方法,并基于产生的

多通道半实测回波数据验证了本文所提的方法的有效性。

参考文献

[1] Tian Jin and Zhimin Zhou, "Ultrawideband synthetic aperture radar landmine detection," *IEEE Transaction On Geoscience and Remote Sensing*, pp. 3561-3573, 2007.

[2] Tian Jin and Zhimin Zhou, "Fraction and dispersion effects on compensation for UWB SAR subsurface object imaging," *IEEE Transaction On Geoscience and Remote Sensing*, pp. 4059-4066, 2007.

[3] 王亮, "机载超宽带合成孔径雷达实测数据成像处理技术研究," 长沙:国防科技大学博士学位论文, 2007.

[4] Mehrdad Soumekh, "Moving target detection in foliage using along track monopulse synthetic aperture radar imaging," *IEEE Transactions On Image Processing*, vol. 6, pp.

1148 ~ 1163, 1997.

- [5] A. F. Yegulalp, "Fast back projection algorithm for synthetic aperture radar," 1999.
- [6] MATS I. PETERSSON, "Detection of moving targets in wideband SAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, pp. 780 ~ 795, July 2004.
- [7] Christoph H. Gierull and Ishuwa C. Sikaneta, "Raw data based two-aperture SAR ground moving target indication," presented at IGARSS'03, Toulouse, France, 2003.
- [8] Christoph H. Gierull, "Ground moving target parameter estimation for two-channel SAR," *IEE Proc-Radar Sonar Navig.*, vol. 153, pp. 224 ~ 233, 2006.
- [9] S. Chiu, "Clutter effects on ground moving target velocity estimation with SAR along-track interferometry," presented at IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Space-Based Radar Group, Defence R&D Canada, Ottawa, Ont., Canada, 2003.
- [10] C. H. Gierull, "Azimuth positioning of moving targets in two-channel SAR by direction-of-arrival estimation," *Electronics Letters, Canada*, pp. 1380 ~ 1381, 2004.
- [11] J. K. Jao, "Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target," *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, pp. 1984 ~ 1991, 2001.
- [12] Ian G. Gunning and Frank H. Wong, "合成孔径雷达成像——算法与实现," 电子工业出版社[译著], 2007.
- [13] R. Balmer, "A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms," *IEEE Transaction*

on Geoscience and Remote Sensing, pp. 706-713, 1992.

- [14] M. I. PETERSSON, "Optimum relative speed discretisation for detection of moving objects in wide band SAR," *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 1, pp. 213-220, June, 2007.

作者简介



常玉林,男,湖北宜昌人,1980年3月出生,现为国防科学技术大学电子科学与工程学院在读博士研究生,主要从事 SAR 成像、多通道 SAR 运动目标检测、SAR 图像后处理(特征提取、图像配准、信息融合)等方面的研究。

E-mail: tsingle_cyl@yahoo.com.cn



周红,女,1982年生于广西桂林,现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生,研究方向为 SAR 成像、SAR/GMTI。

E-mail: hongzhou118@yahoo.com.cn



黄晓涛,男,1972年生于湖北武汉,现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师,IEEE 会员、中国电子学会高级会员,研究方向为 SAR/GMTI、SAR 信号处理、SAR 阵列信号处理、SAR 系统设计。已在国内外期刊和会议发表学术论文

70 余篇,获得国家科技进步二等奖 1 项。

E-mail: hxtdh@yahoo.com