

双基地角时变下的逆合成孔径雷达越分辨单元徙动校正算法

郭宝锋 尚朝轩 王俊岭 高梅国 傅雄军

Correction of migration through resolution cell in bistatic inverse synthetic aperture radar in the presence of time-varying bistatic angle

Guo Bao-Feng Shang Chao-Xuan Wang Jun-Ling Gao Mei-Guo Fu Xiong-Jun

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 238406 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.238406

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238406>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于海面散射模型的全极化合成孔径雷达海洋环境探测关键技术参数设计仿真研究](#)

赵现斌, 严卫, 王迎强, 陆文, 马烁

2014, 63(21): 218401. 全文: [PDF](#) (1032KB)

[基于子带补偿的弹载聚束SAR成像算法](#)

江淮, 汉敏, 赵惠昌, 张淑宁

2014, 63(19): 198404. 全文: [PDF](#) (1506KB)

[合成孔径雷达反演海面风场变分模型分析](#)

姜祝辉, 周晓中, 游小宝, 易欣, 黄为权

2014, 63(14): 148401. 全文: [PDF](#) (628KB)

[高频地波雷达多站浅海水深与海流反演](#)

李伦, 吴雄斌

2014, 63(11): 118404. 全文: [PDF](#) (1097KB)

[基于分数阶傅里叶变换的弹载SAR成像算法](#)

陈勇, 赵惠昌, 陈思, 张淑宁

2014, 63(11): 118403. 全文: [PDF](#) (3268KB)

双基地角时变下的逆合成孔径雷达越分辨单元徙动校正算法*

郭宝锋^{1)2)†} 尚朝轩¹⁾ 王俊岭²⁾ 高梅国²⁾ 傅雄军²⁾

1)(军械工程学院电子与光学工程系, 石家庄 050003)

2)(北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

(2014年6月6日收到; 2014年7月13日收到修改稿)

采用双基地逆合成孔径雷达距离-多普勒算法成像时, 目标尺寸较大或累积转角过大, 会引起越分辨单元徙动现象, 影响成像质量. 针对双基地角时变下逆合成孔径雷达成像的越分辨单元徙动问题, 提出了一种校正算法. 首先, 建立了双基地逆合成孔径雷达回波模型, 分析了越分辨单元徙动的产生机理, 并通过广义的Keystone变换实现了越距离单元徙动的校正, 同时消除了目标非匀速转动对成像的影响. 然后, 基于图像对比度最大准则估计了图像的等效旋转中心位置, 并对距离向绝对定标, 进而构造补偿相位项, 完成了越多普勒单元徙动的校正. 仿真实验结果表明, 此方法能够有效地校正双基地角时变下的越分辨单元徙动, 提高成像质量.

关键词: 双基地逆合成孔径雷达, 双基地角, 越分辨单元徙动

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.63.238406

1 引言

双基地雷达是发射机和接收机分置、且基线长度与目标距离可比拟的雷达系统, 收发分置的工作方式使雷达在对抗“四大威胁”方面具有突出的优势^[1]. 双基地逆合成孔径雷达是基于双基地雷达平台的逆合成孔径雷达^[2,3] (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 系统, 在具备“四抗”特性的同时, 它利用接收的目标非后向散射回波进行成像, 能够较单基地雷达获取更加丰富的目标信息^[4,5]. 为此, 双(多)基地雷达系统日益成为现代雷达研究的热点问题之一^[6-9].

双基地 ISAR 利用距离-多普勒 (range-Doppler, RD) 算法进行成像时, 与单基地 ISAR 类似, 经理想的运动补偿后, 就转化为转台模型^[10]. 目标的旋转容易引起散射点越分辨单元徙动 (包括

越距离单元徙动和越多普勒单元徙动) 问题, 导致 ISAR 二维像散焦, 影响目标的识别效果^[11,12]. 文献^[13] 针对双基地 ISAR 的越距离单元徙动问题进行了研究, 通过 Keystone 变换实现了越距离单元徙动的校正, 但没有考虑双基地角时变对距离徙动的影响, 限制了算法的应用范围. 对越多普勒单元徙动校正的研究很少有文献涉及, 若采用时频分析的方法, 能够得到散射点的瞬时多普勒信息, 避开了多普勒单元徙动对成像质量的影响, 但时频分析存在交叉项抑制问题, 并且数据运算量和存储量都很大. 反向投影 (back projection, BP)、极坐标格式 (polar format algorithm, PFA) 等算法能够从本质上消除 ISAR 成像的越分辨单元徙动问题^[14-16]. 由于双基地雷达基线一般较长, 存在三大同步^[17-19] 的难题, 同时, 这些算法对目标的位置精度要求很高, 当前条件下, BP, PFA 等对时钟及位置等信息敏感的算法在实际成像中很难应用.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61271373) 和上海航天科技创新基金 (批准号: SAST201240) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guobao_feng870714@126.com

RD 算法物理意义明确, 操作简单, 对收发双站同步精度的要求低, 是一种有效的成像算法. 为避免越分辨单元徙动对成像质量的影响, 需要研究双基地角时变下的越分辨单元徙动校正算法.

对于越多普勒单元徙动的校正, 需要知道目标的等效旋转中心位置. 目标等效旋转中心估计可由基于单特显点的运动补偿方法近似得到, 但该方法精度较低, 会影响后续图像的聚焦效果, 并且不是所有的图像都有理想的单特显点单元 [20]. 因此, 该方法的应用受到很大的限制. 针对平动补偿不能提供等效旋转中心的情况, 清华大学的叶春茂等 [21] 提出了利用某一散射点在两幅图像中的位置差提取目标等效旋转中心的位置, 由于成像过程视角变化一般很小, 一个散射点在两幅图像中的位置变化也很小, 该方法估计精度不高, 并且受所选散射点相对等效旋转中心的位置影响较大. 此外, 双基地角时变下, ISAR 成像结果会出现“歪斜” [22], 现有的等效旋转中心估计方法不再适用.

基于此, 本文针对 RD 算法成像时双基地 ISAR 的越分辨单元徙动问题进行了研究. 首先建立了双基地 ISAR 回波模型; 其次, 分析了双基地角时变下越分辨单元徙动的产生机理, 并通过广义的 Keystone 变换完成了越距离单元徙动的校正, 同时消除了成像期间目标非匀速转动引入的高次相位; 然后, 基于图像对比度最大准则估计了图像的等效旋转中心位置, 并构造补偿相位项, 完成了越多普勒单元徙动的校正; 最后进行了仿真验证.

2 双基地 ISAR 信号模型

图 1 为双基地 ISAR 成像模型, T 为发射站, R 为接收站, L 为雷达基线长度, E 点为双基地雷达成像系统的等效单基地雷达位置. 目标在空间平稳运动, 运动速度为 V . 成像起始时刻 t_0 , 目标质心为 O , 双基地角为 β_0 , 以目标质心为原点, 双基地角平分线为 y 轴, 建立右手直角坐标系 xOy , 散射点 P 在该坐标系中的坐标为 (x_P, y_P) , OP 长度为 d , 与 x 轴夹角为 α_0 . 在 t_m 时刻, 目标质心平移至 O_m 点, 坐标系 $x'O_m y'$ 是由坐标系 xOy 平移得到, 以 O_m 为原点, 双基地角平分线为 v 轴, 建立右手直角坐标系 $uO_m v$, 散射点 P 在该坐标系 $uO_m v$ 中记为 $P_m(x_{P_m}, y_{P_m})$, $O_m P_m$ 与 u 轴夹角为 α_m , 等效单基地雷达的视角变化为 θ_m . P_m 到发射站和接收

站的距离分别为 R_{TP_m} , R_{RP_m} , O_m 到发射站和接收站的距离分别为 R_{TO_m} , R_{RO_m} .

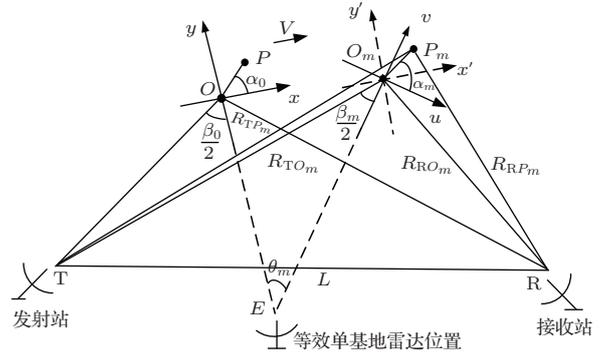


图 1 双基地 ISAR 成像模型

假设收发双站雷达理想同步, 发射站雷达以脉冲重复周期 (PRT) 发射线性调频信号

$$s_t(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \times \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu\hat{t}^2\right)\right], \quad (1)$$

其中,

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & (|u| \leq \frac{1}{2}), \\ 0 & (|u| > \frac{1}{2}); \end{cases}$$

\hat{t} 为快时间, $t_m = mPRT (m = 0, 1, 2, \dots)$, 为发射时刻, 称作慢时间, t 为全时间, 三者之间的关系为 $\hat{t} = t - mPRT$; f_c 为载波频率, T_p 为脉冲宽度; μ 为调频率. 其基频信号为

$$s_b(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j\pi\mu\hat{t}^2). \quad (2)$$

设 P 点的散射系数为 σ_P , t_m 时刻, P_m 到收发双站的距离和为 R_{P_m} , 即 $R_{P_m} = R_{TP_m} + R_{RP_m}$, 则接收站雷达接收到的回波信号为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sigma_P \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_{P_m}/c}{T_p}\right) \times \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{R_{P_m}}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(\hat{t} - \frac{R_{P_m}}{c}\right)^2\right]\right\}. \quad (3)$$

经过相参本振下变频至零中频, 并使用匹配滤波器 $H(f) = S_b^*(f)$ 对目标回波进行脉冲压缩, 脉冲压缩后散射点 P_m 的回波及其频谱分别为

$$s_c(\hat{t}, t_m) \approx \sigma_P T_p \text{sinc}\left[\mu T_p\left(\hat{t} - \frac{R_{P_m}}{c}\right)\right]$$

$$\times \exp\left(-j2\pi f_c \frac{R_{P_m}}{c}\right), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_c(f, t_m) &= S_{if}(f, t_m) H(f) \\ &= \sigma_P |S_b(f)|^2 \\ &\quad \times \exp\left[-j2\pi(f_c + f) \frac{R_{P_m}}{c}\right], \quad (5) \end{aligned}$$

其中, $S_{if}(f, t_m)$ 表示基带回波信号的频域形式, (4) 式即为一维距离像. 双基地雷达系统中, 目标尺寸远小于目标到收发双站距离, 即 $d \ll R_{TO}, R_{RO}$, 由于 $\alpha_m = \theta_m + \alpha_0$, 则 P_m 到发射站和接收站的距离可分别表示为

$$\begin{aligned} R_{TP_m} &= R_{TO_m} \\ &\quad + d \cos\left[\frac{\pi}{2} - \frac{\beta_m}{2} - (\alpha_0 + \theta_m)\right], \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{RP_m} &= R_{RO_m} \\ &\quad + d \cos\left[\frac{\pi}{2} + \frac{\beta_m}{2} - (\alpha_0 + \theta_m)\right]. \quad (7) \end{aligned}$$

由 (6) 和 (7) 式可得 P_m 到收发双站距离和为

$$\begin{aligned} R_{P_m} &= (R_{TO_m} + R_{RO_m}) \\ &\quad + 2(x_P \sin \theta_m + y_P \cos \theta_m) \cos \frac{\beta_m}{2}. \quad (8) \end{aligned}$$

令 $R_{O_m} = R_{TO_m} + R_{RO_m}$, 为目标质心到收发双站的距离和, 则散射点 P_m 到收发双站距离和与目标质心到收发双站距离和之差为

$$\begin{aligned} \Delta R_{P_m} &= R_{P_m} - R_{O_m} \\ &= 2(x_P \sin \theta_m + y_P \cos \theta_m) \cos \frac{\beta_m}{2}. \quad (9) \end{aligned}$$

由于旋转角度 θ_m 、双基地角 β_m 均是慢时间的函数, 可分别记为 $\theta(t_m)$, $\beta(t_m)$. 经过理想的运动补偿后, 回波的一维距离像 (4) 式可表示为

$$\begin{aligned} s_c(\hat{t}, t_m) &= \sigma_P T_p \text{sinc}\left[\mu T_p \left(\hat{t} - \frac{\Delta R_{P_m}}{c}\right)\right] \\ &\quad \times \exp\left(-j2\pi f_c \frac{\Delta R_{P_m}}{c}\right) \\ &= \sigma_P T_p \text{sinc}\left[\mu T_p \left(\hat{t} - \frac{2(x_P \sin \theta(t_m) + y_P \cos \theta(t_m)) \cos \frac{\beta(t_m)}{2}}{c}\right)\right] \\ &\quad \times \exp\left[-j4\pi f_c \frac{x_P \sin \theta(t_m) + y_P \cos \theta(t_m)}{c}\right] \\ &\quad \times \cos \frac{\beta(t_m)}{2}. \quad (10) \end{aligned}$$

3 双基地 ISAR 越距离单元徙动校正

3.1 越距离单元徙动校正机理及 Keystone 变换

从一维距离像时域看, 由于 ΔR_{P_m} 是慢时间的函数, 使成像期间散射点的峰值位置相对目标质心位置发生变化, 由此产生了越距离单元徙动, (10) 式的频域形式可写为

$$\begin{aligned} S_c(f, t_m) &= \sigma_P |S_b(f)|^2 \exp\left[-j4\pi(f_c + f)\right. \\ &\quad \times \frac{(x_P \sin \theta(t_m) + y_P \cos \theta(t_m))}{c} \\ &\quad \left. \times \cos \frac{\beta(t_m)}{2}\right]. \quad (11) \end{aligned}$$

(11) 式的指数项中, 快时间频率 f 与慢时间 t_m 存在耦合, 该耦合项使其在逆快速傅里叶变换 (IFFT) 之后散射点峰值位置是慢时间的函数关系, 若能消除两者之间的耦合关系, 就可以消除散射点的越距离单元徙动.

假设双基地 ISAR 成像期间, 双基地角不变, 恒为 β , 且累积转角均匀变化, 转动角速度恒为 ω , 则 $\sin \theta(t_m) = \omega t_m$, $\cos \theta(t_m) \approx 1$, (11) 式可表示为

$$\begin{aligned} S_c(f, t_m) &= \sigma_P |S_b(f)|^2 \exp\left[-j4\pi(f_c + f)\right. \\ &\quad \times \frac{(x_P \omega t_m + y_P)}{c} \cos \frac{\beta(t_m)}{2}\left. \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

Keystone 变换是一种尺度变换, 常用于越距离单元徙动的校正中. 通过定义虚拟慢时间 τ_m , 使其满足

$$(f_c + f)t_m = f_c \tau_m. \quad (13)$$

将 (13) 式代入 (12) 式, 可得

$$\begin{aligned} S_c(f, t_m) &= \sigma_P |S_b(f)|^2 \exp\left\{-j4\pi\left[f_c \frac{x_P \omega}{c} \tau_m \cos \frac{\beta}{2}\right.\right. \\ &\quad \left.\left.+ (f_c + f) \frac{y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2}\right]\right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

经过 Keystone 变换, 快时间频率 f 与慢时间 t_m 不再存在耦合, 对 (14) 式的快频率 f 做 IFFT 变换可得

$$s_c(\hat{t}, t_m) = \sigma_P T_p \text{sinc} \left[\mu T_p \left(\hat{t} - \frac{2y_P}{c} \cos \frac{\beta}{2} \right) \right] \times \exp \left[j \frac{4\pi f_c}{c} (x_P \omega \tau_m - y_P) \cos \frac{\beta}{2} \right]. \quad (15)$$

这样, 散射点峰值出现的位置保持恒定, 不再存在越距离单元徙动问题, 同时, 慢时间 τ_m 只含有一次项, 直接对慢时间做快速傅里叶变换 (FFT) 即可提取出散射点的多普勒信息, 也就得到了散射点的方位坐标.

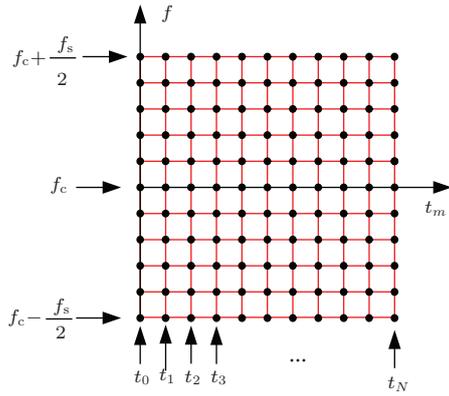


图2 Keystone 变换重采样前数据平面

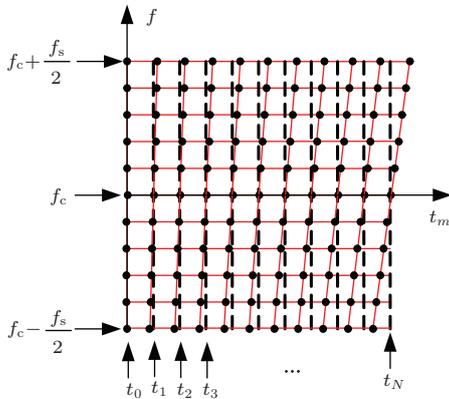


图3 Keystone 变换重采样后数据平面

Keystone 变换实质上是对慢时间 t_m 的尺度变换, 变换的尺度与快时间频率 f 有关, 通过变换, 完成数据的重采样. 从 (13) 式可以看出, 重采样时刻 τ_m 可表示为

$$\tau_m = (1 + f/f_c) t_m. \quad (16)$$

原始数据 (对一维距离像的每次回波 FFT 的数据) 是在 t_m - f 平面以矩形采样的, 如图 2 所示. 但经过 (13) 式的变换, 即得到了在重采样时刻 τ_m

的数据, 数据矩阵在 τ_m - f 平面转换为梯形, 如图 3 所示. 重采样时刻 τ_m 的斜率与 t_m 成正比, 随着 t_m 的增加, 每次回波采样斜率变大.

3.2 双基地角时变下的越距离单元徙动校正

双基地 ISAR 中, 双基地角变化以及等效转速不均匀都会引入慢时间的高次项, 此时, 快时间与慢时间的耦合项不只是慢时间的一次函数, 仍采用 (13) 式进行 Keystone 变换不能完全消除快慢时间的耦合关系, 导致图像的散焦, 因此需要针对双基地 ISAR 的特点对算法进行改进.

(11) 式的指数项体现了双基地 ISAR 快时间频率与慢时间的耦合, 其相位可记为

$$\phi = -4\pi (f_c + f) \times \frac{x_P \sin \theta(t_m) + y_P \cos \theta(t_m)}{c} \times \cos \frac{\beta(t_m)}{2}. \quad (17)$$

该耦合项包含了散射点的径向与方位向坐标, 且都受双基地角的余弦函数的调制. 从越距离单元徙动的机理上看, 双基地角的余弦项使分辨率变化. 导致散射点投影距离单元位置的变化. 因此, 应先进行一次变换, 消除双基地角时变对距离走动的影响.

定义虚拟快频率 f_1 , 使其满足

$$f \cos \frac{\beta(t_m)}{2} = f_1 \cos \frac{\beta_A}{2}, \quad (18)$$

其中, β_A 为成像期间的平均双基地角. 将 (18) 式代入 (11) 式, 得

$$S_c(f, t_m) = \sigma_P |S_b(f)|^2 \exp \left[-j4\pi \left(f_c \cos \frac{\beta(t_m)}{2} + f_1 \cos \frac{\beta_A}{2} \right) \times \frac{x_P \sin \theta(t_m) + y_P \cos \theta(t_m)}{c} \right]. \quad (19)$$

这样, 双基地角变化引起的慢时间项与快时间频率不再有耦合关系, 剩余的快慢时间耦合就转化为快时间与累积转角的耦合.

定义虚拟时间 τ_m , 使其满足:

$$\left(f_c \cos \frac{\beta(t_m)}{2} + f_1 \cos \frac{\beta_A}{2} \right) \sin \theta(t_m) = f_c \omega_A \cos \frac{\beta_A}{2} \tau_m, \quad (20)$$

其中, ω_A 为成像期间的平均等效旋转角速度. 将 (20) 式代入 (19) 式可得

$$S_c(f, t_m) = \sigma_P |S_b(f)|^2 \exp\left(-j4\pi f_c \frac{x_P \omega_A \tau_m}{c} \cos \frac{\beta_A}{2}\right) \times \exp\left[-j4\pi\left(f_c \cos \frac{\beta(t_m)}{2} + f_1 \cos \frac{\beta_A}{2}\right) \times \frac{y_P \cos \theta(t_m)}{c}\right]. \quad (21)$$

此时, 快时间频率与慢时间的耦合只有 $f_1 \cos \theta(\tau_m)$ 项, 由于 $\theta(\tau_m) \ll 1$, 散射点不会出现距离单元徙动现象. (18) 和 (20) 式的两步操作, 可通过一次广义的 Keystone 变换实现, 该变量代换可记为

$$\begin{aligned} & (f_c + f) \sin \theta(t_m) \cos \frac{\beta(t_m)}{2} \\ &= f_c \omega_A \cos \frac{\beta_A}{2} \tau_m, \end{aligned} \quad (22)$$

则广义 Keystone 变换的重采样时刻

$$\tau_m = \frac{(f_c + f) \cos(\beta(t_m)/2) \sin \theta(t_m)}{f_c \cos(\beta_A/2) \omega_A}. \quad (23)$$

基本 Keystone 变换 ((16) 式) 数据采样平面与本文的广义 Keystone 变换数据采样平面对比如图 4 和图 5 所示. 从图 5 可以看出, 频率 f_c 处, 重采样时间间隔不再是均匀的, 而与累积转角和双基地角变化有关, 该不均匀性消除了双基地角时变及目标转速不均匀对成像的影响.

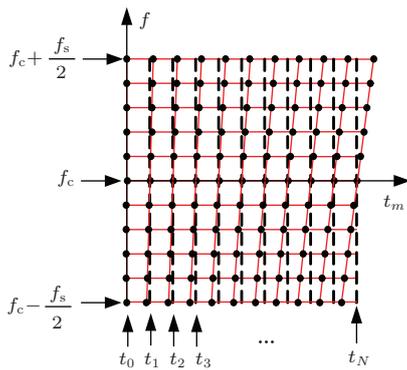


图 4 基本 Keystone 变换采样平面

经过 (22) 式的变量代换, 由 (11) 式可得到 (21) 式. IFFT (21) 式到快时间域即可得到越距离单元徙动校正后的一维距离像:

$$s_{R_c}(\hat{t}, \tau_m)$$

$$\begin{aligned} &= \sigma_P T_p \text{sinc} \left[\mu T_p \left(\hat{t} - \frac{2y_P}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} \right) \right] \\ &\times \exp \left[-j2\pi \left(f_c \frac{2x_P \omega_A \tau_m}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} \right. \right. \\ &\left. \left. + f_c \frac{2y_P \cos \theta(\tau_m)}{c} \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

此时, 一维距离像包络峰值始终出现在 $\hat{t} = \frac{2y_P}{c} \cos \frac{\beta_A}{2}$ 的位置, 不存在越距离单元徙动现象. 观察 (24) 式中的指数项, 散射点的方位坐标 x_P 的系数是慢时间的一次函数, 即通过提出的广义 Keystone 变换校正了越距离单元徙动, 同时消除了目标不均匀转动、双基地角变化引入的高次项对方位压缩的影响. 但校正后的一维距离像相位中, 散射点的距离坐标 y_P 含有慢时间的高次项, 该项的存在同样会导致方位散焦, 这需要通过越多普勒单元徙动进行校正, 使相位项只是方位坐标单频函数.

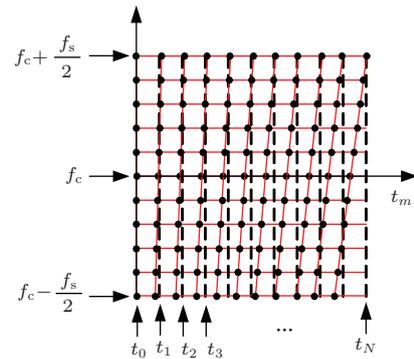


图 5 广义 Keystone 变换采样平面

4 双基地 ISAR 越多普勒徙动校正

4.1 越多普勒单元徙动校正

距离徙动校正后的双基地 ISAR 一维距离像如 (24) 式所示, 记其相位项为

$$\begin{aligned} \varphi_{Bi} = & -2\pi \left(f_c \frac{2x_P \omega_A \tau_m}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} \right. \\ & \left. + f_c \frac{2y_P \cos \theta(\tau_m)}{c} \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

方位压缩的目的在于提取目标的方位多普勒信息, 式中 x_P 的系数项

$$\varphi_1 = -4\pi \frac{f_c}{c} x_P \omega_A \tau_m \cos \frac{\beta_A}{2},$$

是慢时间的一次函数, 另一项

$$\varphi_2 = -4\pi \frac{f_c}{c} y_P \cos \theta(\tau_m) \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2},$$

含有慢时间的高次函数, φ_2 的存在会引起散射点越多普勒单元徙动的发生.

根据 (25) 式可求得散射点的多普勒为

$$f_{D_Bi} = \frac{2f_c}{c} x_P \omega_A \cos \frac{\beta_A}{2} - \frac{2f_c}{c} \times y_P \theta'(\tau_m) \sin \theta(\tau_m) \times \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} - \frac{f_c}{c} y_P \beta'(\tau_m) \times \sin \frac{\beta(\tau_m)}{2}. \quad (26)$$

(26) 式共有三项组成: 第一项用于提取散射点的多普勒, 得到目标方位信息; 第二项会产生多普勒徙动; 第三项是图像的“歪斜”项, “歪斜”量与距离坐标成正比, 散射点离散射中心越远, “歪斜”量越大, 并且该项也可能引入多普勒徙动. 校正多普勒徙动时, 理论上可以直接将 φ_2 补偿掉, 完全消除越多普勒单元的徙动, 剩余慢时间的单频信号, 但这样会引起散射点的分裂. 因此, 在构造补偿相位项时, 还不能破坏图像的“歪斜”特性.

在距离单元 y_P 处, 散射点“歪斜”量的均值为

$$-\frac{f_c}{c} y_P \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2},$$

其中 $\bar{\beta}'$ 为成像期间 $\beta'(\tau_m)$ 的均值, 在构造相位补偿项时, 若将 φ_2 补偿掉, 则需加入多普勒

$$-\frac{f_c}{c} y_P \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2}$$

对应的相位项. 因此, 可以构造如下补偿相位:

$$\Phi_{\text{comp}} = \exp \left[j4\pi \frac{f_c}{c} \left(y_P \cos \theta(\tau_m) \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} + \frac{y_P}{2} \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2} t_m \right) \right]. \quad (27)$$

τ_m 可由 (23) 式得到, 这样, $\theta(\tau_m)$ 和 $\beta(\tau_m)$ 可通过对 $\theta(t_m)$ 和 $\beta(t_m)$ 插值得到. 相位补偿后的一维距离像为

$$s_{D_c}(\hat{t}, \tau_m) = \sigma_P T_p \text{sinc} \left[\mu T_p \left(\hat{t} - \frac{2y_P}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} \right) \right] \times \exp \left[j2\pi \left(-f_c \frac{2x_P \omega_A \tau_m}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} + \frac{y_P}{2} \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2} t_m \right) \right]. \quad (28)$$

对慢时间做方位压缩可得 ISAR 二维像:

$$\text{ISAR}(\hat{t}, f_D) = A \text{sinc} \left[\mu T_p \left(\hat{t} - \frac{2y_P}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} \right) \right] \times \text{sinc} \left(f_D + \frac{2f_c \omega_A x_P}{c} \cos \frac{\beta_A}{2} \right)$$

$$- \frac{y_P}{2} \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2} \Big), \quad (29)$$

其中 A 代表幅度. 这样, 通过相位补偿的方式, 就完成了散射点越多普勒单元徙动的校正. 从方位信息上可以看出, 图像仍是“歪斜”的, 可通过文献 [22] 求出“歪斜”的角度, 而后进行插值细化, 并通过物理平移的方法进行图像的“歪斜”校正, 这样就不会导致散射点的分裂.

4.2 等效旋转中心估计

构造多普勒徙动的补偿相位项 Φ_{comp} ((27) 式), 需要知道散射点相对目标旋转中心的距离向坐标、双基地角、等效旋转角速度等信息. 其中, 双基地角、等效旋转角速度可通过目标与双基地雷达的三角几何关系得到, 而距离的绝对定标需要估计图像的等效旋转中心位置.

由于双基地角时变下 ISAR 图像发生“歪斜”, 已有的旋转中心估计方法受限, 本文提出了一种基于图像对比度最大的等效旋转中心估计方法. 该方法首先假定某一距离单元为等效旋转中心位置, 然后对距离向绝对定标, 构造补偿相位项, 并对一维距离像进行补偿, 而后进行方位压缩, 计算图像对比度. 假定另一距离单元为等效旋转中心位置, 重复以上操作, 计算图像对比度, 如此循环. 当假定的等效旋转中心位置就是实际的等效旋转中心时, 图像对比度最大, 据此, 通过搜索就可以找到等效旋转中心位置.

设对距离绝对定标时, 实际等效旋转中心位于第 M 个距离单元上, 此时散射点 P 的距离坐标为 y_P . 若假定的等效旋转中心位于第 \widehat{M} 个距离单元上, 定标时, P 点的距离坐标为 \widehat{y}_P , 误差 $\Delta y_P = y_P - \widehat{y}_P$. 进行相位补偿时, 构造的补偿相位项为

$$\phi_{\text{Bi_comp}} = \exp \left[j4\pi \frac{f_c}{c} \left(\widehat{y}_P \cos \theta(\tau_m) \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} + \frac{\widehat{y}_P}{2} \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2} t_m \right) \right], \quad (30)$$

补偿的多普勒为

$$f_{D_comp} = \frac{2f_c}{c} \widehat{y}_P \theta'(\tau_m) \sin \theta(\tau_m) \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} + \frac{f_c}{c} \widehat{y}_P \left(\beta'(\tau_m) \sin \frac{\beta(\tau_m)}{2} - \bar{\beta}' \sin \frac{\beta_A}{2} \right). \quad (31)$$

散射点实际多普勒如(26)式所示. 经补偿后, 散射点多普勒为

$$\begin{aligned}
 f_D &= f_{D_Bi} + f_{D_comp} \\
 &= \frac{2f_c}{c} x_P \omega_A \cos \frac{\beta_A}{2} + \frac{2f_c}{c} (\hat{y}_P - y_P) \theta'(\tau_m) \\
 &\quad \times \sin \theta(\tau_m) \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} \\
 &\quad + \frac{f_c}{c} (\hat{y}_P - y_P) \beta'(\tau_m) \sin \frac{\beta(\tau_m)}{2} \\
 &\quad - \frac{f_c}{c} \hat{y}_P \beta' \sin \frac{\beta_A}{2}, \tag{32}
 \end{aligned}$$

并令

$$\begin{aligned}
 f_{D1} &= \frac{2f_c}{c} x_P \omega_A \cos \frac{\beta_A}{2} - \frac{f_c}{c} \hat{y}_P \beta' \sin \frac{\beta_A}{2}, \tag{33} \\
 f_{D2} &= \frac{2f_c}{c} (\hat{y}_P - y_P) \theta'(\tau_m) \sin \theta(\tau_m) \\
 &\quad \times \cos \frac{\beta(\tau_m)}{2} + \frac{f_c}{c} (\hat{y}_P - y_P) \beta'(\tau_m) \\
 &\quad \times \sin \frac{\beta(\tau_m)}{2}. \tag{34}
 \end{aligned}$$

距离坐标估计不准确时, f_{D1} 为常数项, 会引起散射点在方位上的整体偏移, 不会引起越方位分辨单元的徙动; 而 f_{D2} 是慢时间的函数项, 该项的存在会使多普勒单元上发生散焦现象. 基于此, 可以在零多普勒轴上搜索等效旋转中心位置, 当估计的旋

转中心与实际旋转中心符合时, 距离绝对定标没有偏差, 此时 $f_{D2} = 0$, 图像聚焦效果最好, 对应的图像对比度最大.

5 成像流程

双基地 ISAR RD 成像及越分辨单元徙动校正流程如图 6 所示. 具体步骤如下:

- 1) 将回波数据转换到频域, 并与参考信号频域共轭相乘, 完成数据的频域匹配滤波, 对快时间 IFFT 即得到了 ISAR 的一维距离像;
- 2) 对一维距离像进行运动补偿, 包括包络对齐和相位校正两个步骤;
- 3) 对运动补偿后的一维距离像直接做慢时间的 FFT 即可完成方位压缩, 得到 ISAR 二维像, 这是经典的 RD 算法成像过程;
- 4) 将运动补偿后的一维距离像的快时间做 FFT, 变换到快频域, 通过广义的 Keystone 变换完成越距离单元徙动校正;
- 5) 假定等效旋转中心位置, 并构造多普勒补偿相位项, 对一维距离像的频域数据进行相位补偿, 而后方位压缩得到 ISAR 二维像, 计算图像的对比度;

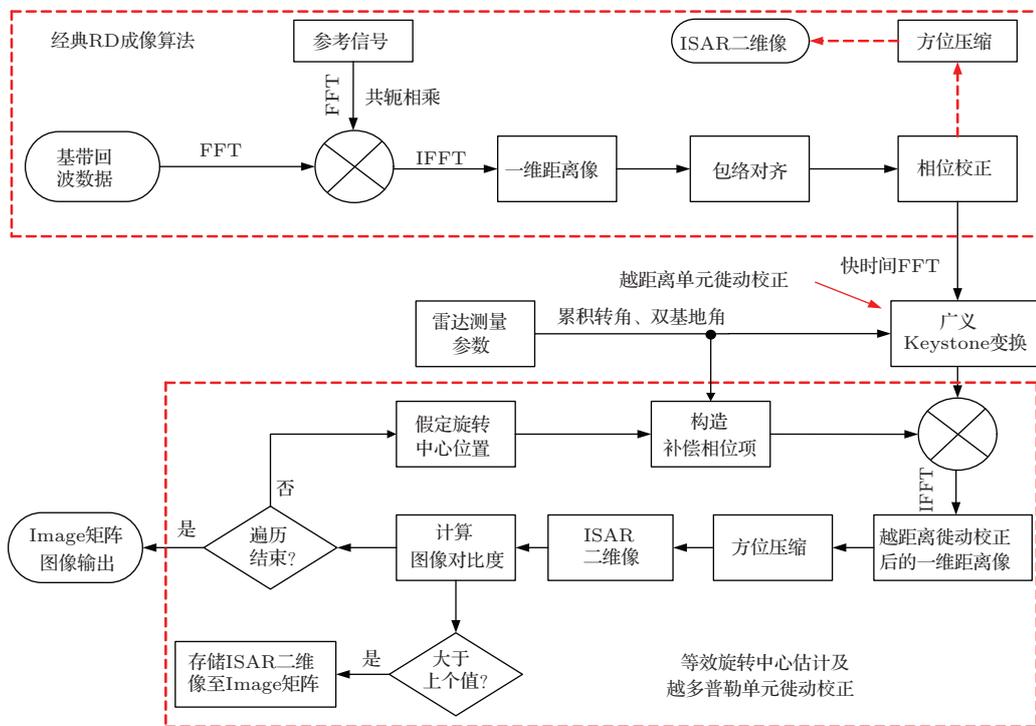


图 6 双基地 ISAR RD 成像及越分辨单元徙动校正流程图

6) 假定新的等效旋转中心位置, 重复步骤5), 并将此时的图像对比度与之前的对比, 将图像对比度较大的ISAR二维像存储到Image矩阵, 如此循环, 直到将可能的等效旋转中心位置遍历结束;

7) 当遍历结束, 存储到Image矩阵的ISAR二维像对应的图像对比度最大, 直接输出Image矩阵就是最优的越多普勒单元徙动校正后的ISAR图像.

6 仿真实验

为验证算法的有效性, 进行了越分辨单元徙动校正的仿真实验. 仿真场景如图7所示, 其中, 蓝色“◇”为发射站位置, 绿色“○”为接收站位置, 雷达基线长度约为1550 km, 图中红线为目标运动轨迹, 蓝色“△”为选择的雷达成像区域. 仿真散射点模型如图8所示, 仿真参数设置如表1所列.

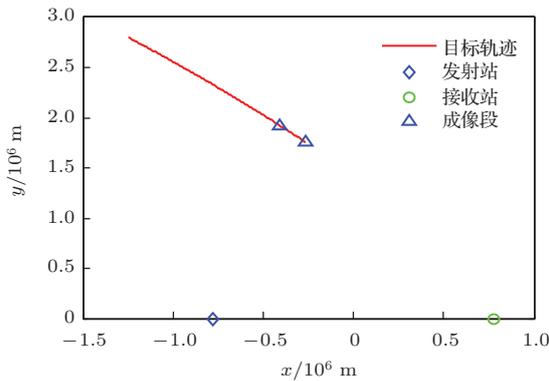


图7 (网刊彩色) 仿真场景

使用RD成像算法对目标成像, 包络对齐后的一维距离像如图9所示. 从图9可以看出, 由于目标尺寸较大, 并且成像累积转角也较大, 目标上的散射点出现明显的越距离单元徙动现象. 对相位校正后的一维距离像进行方位压缩, 得到RD直接成像结果, 如图10所示. 图10中, 除中心点外, 各个散射点都出现了散焦现象, 并且距离中心越远, 散焦越严重. 同时, 该图像较散射点模型有“歪斜”情况, 这就是双基地角时变引起的图像畸变.

对运动补偿后的一维距离像进行Keystone变换, 得到距离徙动校正后的距离像如图11所示. 与图9相比, Keystone变换对越距离单元徙动有明显

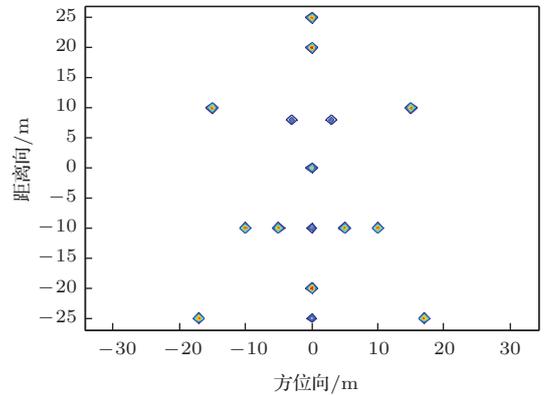


图8 散射点模型

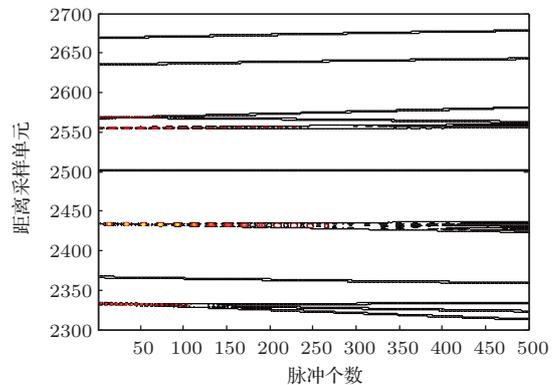


图9 包络对齐后的一维距离像

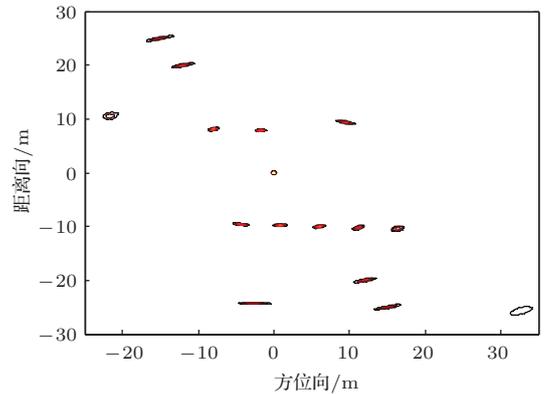


图10 RD直接成像结果

表1 仿真参数设置

参数名称	参数值	参数名称	参数值	参数名称	参数值
载频	10 GHz	脉冲重复频率	50 Hz	距离分辨率	0.180 m
带宽	1 GHz	累积脉冲个数	500	方位分辨率	0.197 m
脉冲宽度	10 μs	平均双基地角	67.47°	包络对齐	累积包络互相关
采样率	1.25 GHz	累积转角	5.25°	方位校正	多特显点

的校正效果,使得散射点的峰值位置在成像期间处于同一距离单元上,便于方位相干积累的实施.图12是越距离单元徙动校正后的RD成像结果,可以看出目标的距离向散焦已经被消除,只剩方位的散焦,在散射中心上下两侧最严重,这是由散射点的越多普勒单元徙动造成的.

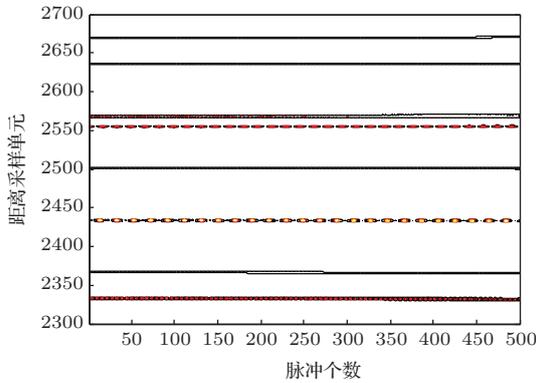


图11 越距离徙动校正后的一维距离像

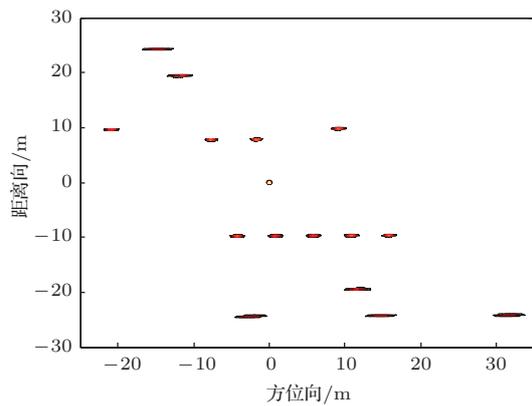


图12 越距离徙动校正后的ISAR二维像

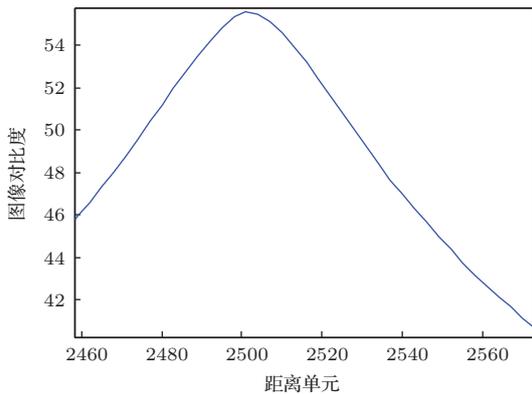


图13 等效旋转中心估计曲线

为构造(27)式的多普勒补偿相位项,这里利用本文提出的基于图像对比度最大的等效旋转中心估计方法估计旋转中心位置,ISAR像的图像对

比度随距离单元位置的变化曲线如图13所示.从图13可以看出,在2501个距离单元处,图像对比度最大,即第2501个距离单元就是所找的等效旋转中心位置.这样,就可以对距离向进行绝对定标,进而构造补偿相位项,完成越多普勒单元徙动的校正.经过多普勒徙动校正后,RD成像结果如图14所示,该图像聚焦效果良好,较图10和图12成像质量明显提高.

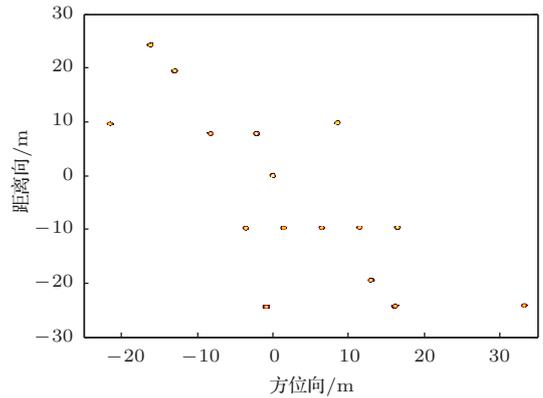


图14 越多普勒徙动校正后的ISAR二维像

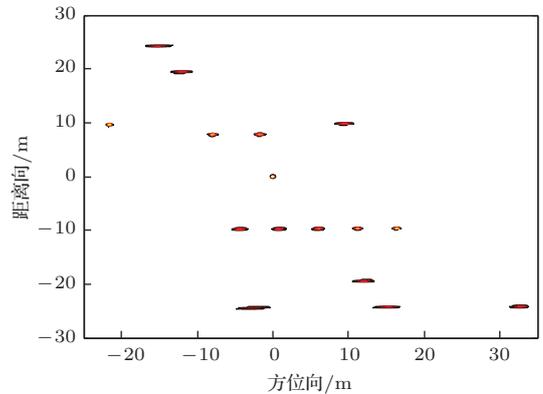


图15 文献[13]方法越距离徙动校正后的ISAR二维像

为了进一步说明本文算法的优势,将本文的越分辨单元徙动校正算法与文献[13]的方法进行对比.文献[13]研究了双基地ISAR的越距离单元徙动问题,但没有考虑双基地角时变对分辨单元徙动的影响.采用文献[13]的方法越距离单元徙动校正后的双基地ISAR成像结果如图15所示.从图15可以看出,由于没有考虑双基地角的变化,在同一距离单元上的不同散射点散焦程度不同.对越距离单元徙动校正后的一维距离像进行多普勒徙动校正,校正后的ISAR像如图16所示,该图像

质量相对图 15 有一定程度的提高, 但部分散射点的散焦现象依然很严重. 将文献 [13] 的成像校正结果图 16 与本文算法校正得到的 ISAR 图像图 14 对比, 可以明显看出本文的校正算法优于文献 [13] 所提出的算法.

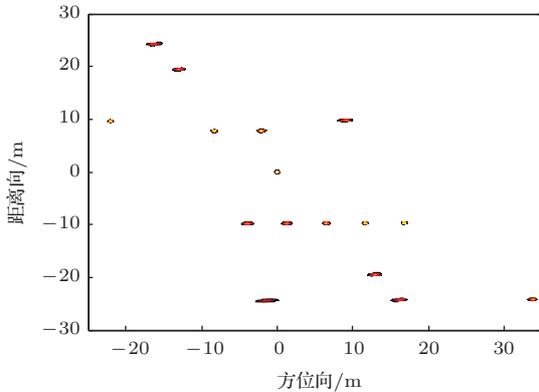


图 16 文献 [13] 方法越多普勒徙动校正后的 ISAR 二维像

表 2 列出了 RD 直接成像结果、分别采用本文方法和文献 [13] 方法进行越距离单元徙动校正后的 ISAR 二维像及越多普勒单元徙动校正后的 ISAR 二维像的图像对比度. 通过数值对比, 表明了本文校正算法的有效性和优越性.

双基地角时变下, ISAR 成像结果是“歪斜”的, 通过文献 [22] 可以得到成像期间图像“歪斜”角度曲线, 如图 17 所示, 即图像平均“歪斜”了约 32.5° . 对越分辨单元徙动校正后的二维像图 14 进行 4 倍插值, 并对不同距离单元的像素点物理平移, 进而

完成图像的“歪斜”校正. 校正后的结果如图 18 所示, 该图的形状与散射点模型相符, 利于目标的正确识别.

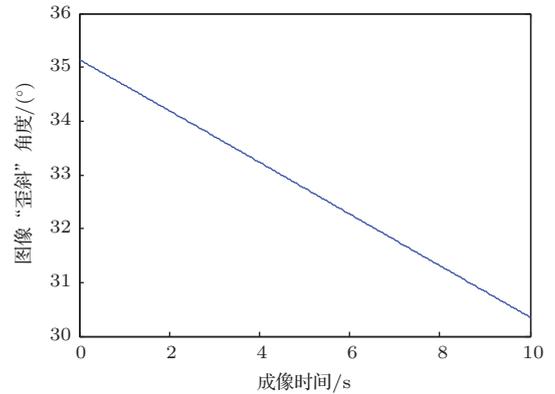


图 17 图像“歪斜”角度曲线

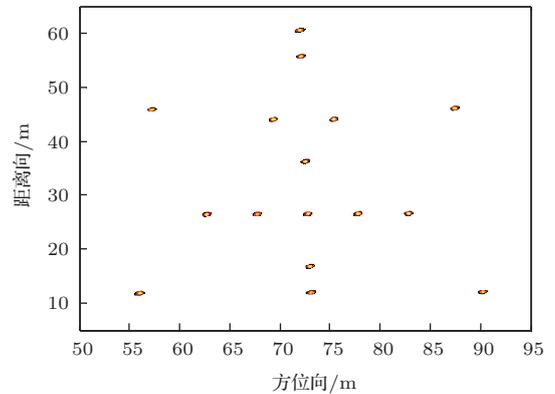


图 18 “歪斜”校正后的 ISAR 二维像

表 2 图像对比度比较

	RD 直接成像	越距离徙动校正后		越多普勒徙动校正后	
		文献 [13] 方法	本文方法	文献 [13] 方法	本文方法
图像对比度	33.62	38.62	39.83	47.29	55.61

7 结 论

本文针对双基地角时变下的 ISAR 越分辨单元徙动问题, 提出了一种校正算法. 首先, 建立了双基地 ISAR 回波模型; 其次, 分析了双基地角时变下越分辨单元徙动的产生机理, 通过广义的 Keystone 变换实现了越距离单元徙动的校正, 并同时消除了目标非匀速转动引入的高次相位; 然后, 提出了基于图像对比度最大的等效旋转中心位置估计方法,

通过构造补偿相位项, 完成了越多普勒单元徙动的校正; 最后, 进行了仿真实验. 仿真结果表明, 本文方法能够有效地校正了双基地角时变下的越分辨单元徙动问题, 提高成像质量.

参考文献

- [1] Yang Z Q, Zhang Y S, Luo Y J 1998 *Bistatic (Multi-static) Radar System* (Beijing: Defense Industry Press) pp14, 15 (in Chinese) [杨振起, 张永顺, 骆永军 1998 双(多)基地雷达系统(北京: 国防工业出版社) 第 14, 15 页]
- [2] Ji W J, Tong C M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 020301

- [3] Zhang Y M, Wang Y H, Zhao C F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084103
- [4] Ma C Z, Yeo T S, Guo Q, Wei P J 2012 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **50** 3859
- [5] Peng S B, Xu J, Meng C Z, Yang J, Peng Y N 2013 *I-ET International Radar Conference Xi'an, China*, April 14–16, 2013 p1
- [6] Bai X R, Zhou F, Xing M D, Bao Z 2010 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett.* **7** 430
- [7] Fabrice C, Ali K, Alexandre B 2006 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **54** 3529
- [8] Ma C, Gu H, Su W M, Li C Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 028403 (in Chinese) [马超, 顾红, 苏卫民, 李传中 2014 物理学报 **63** 028403]
- [9] Pan X Y, Wang W, Feng D J, Liu Y C, Fu Q X, Wang G Y 2014 *IET Radar Sonar Navig.* **8** 173
- [10] Zhu R F, Luo Y, Zhang Q 2011 *Modern Radar* **33** 34 (in Chinese) [朱仁飞, 罗迎, 张群 2011 现代雷达 **33** 34]
- [11] Xing M D, Wu R, Bao Z 2005 *IEE Proc. Radar Sonar Navig.* **152** 58
- [12] Zheng P, Jing X J, Sun S L, Huang H 2012 *3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content Beijing, China*, September 21–23, 2012 p562
- [13] Zhu X P, Zhang Q, Zhu R F 2009 *2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Xi'an, China*, October 26–30, 2009 p977
- [14] Zhang L, Li H L, Qiao Z J, Xing M D, Bao Z 2013 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett.* **10** 1394
- [15] Horvath M S, Gorham L A, Rigling B D 2013 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **49** 1402
- [16] Wang Y, Li J W, Chen J, Xu H P, Sun B 2014 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **52** 640
- [17] Wang W Q, Cai J Y 2010 *IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett.* **9** 307
- [18] López-Dekker P, Mallorquí J J, Serra-Morales P, Sanz-Maros J 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 3459
- [19] Krieger G, de Zan F 2014 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **52** 1480
- [20] Bao Z, Xing M D, Wang T 2010 *Radar Imaging Technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp243–249 (in Chinese) [保铮, 邢孟道, 王彤 2010 雷达成像技术 (北京: 电子工业出版社) 第243—249页]
- [21] Ye C M, Xu J, Zuo Y, Peng Y N, Wang X T 2009 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Technol. Ed.)* **49** 1205 (in Chinese) [叶春茂, 许稼, 左渝, 彭应宁, 王秀坛 2009 清华大学学报 (自然科学版) **49** 1205]
- [22] Dong J, Shang C X, Gao M G 2012 *J. Electron. Inform. Technol.* **32** 1855 (in Chinese) [董健, 尚朝轩, 高梅国 2012 电子与信息学报 **32** 1855]

Correction of migration through resolution cell in bistatic inverse synthetic aperture radar in the presence of time-varying bistatic angle*

Guo Bao-Feng^{1)2)†} Shang Chao-Xuan¹⁾ Wang Jun-Ling²⁾ Gao Mei-Guo²⁾ Fu Xiong-Jun²⁾

1) (Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

2) (School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 6 June 2014; revised manuscript received 13 July 2014)

Abstract

When the size of target or the rotation angle is big, migration through resolution cell may occur in the bistatic inverse synthetic aperture radar (ISAR), which will affect the imaging quality. Aiming at the problem of migration through resolution cell of bistatic ISAR in the presence of time-varying bistatic angle, a correction algorithm is proposed in this paper. Firstly, the echo model of bistatic ISAR is built, and the mechanism of migration through resolution cell is analyzed. Migration through range cell may be corrected through the generalized Keystone transformation, and the effect of non-uniform rotation is eliminated at the same time. Then the rotating center is estimated according to the maximum criterion of image contrast, and the range bin is scaled absolutely. A phase compensation term is constructed and the correction of migration through Doppler cell is finished. Finally, the simulations are carried out and the results show that the method proposed in this paper can solve the problem of migration through resolution cell and improve the image quality.

Keywords: bistatic inverse synthetic aperture radar, bistatic angle, migration through resolution cell

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: [10.7498/aps.63.238406](https://doi.org/10.7498/aps.63.238406)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271373) and the Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Foundation, China (Grant No. SAST201240).

† Corresponding author. E-mail: guobao_feng870714@126.com