

基于瞬时多普勒频率的匀速移变双基 SAR 的二维频谱及其成像算法的应用

熊涛* 周松 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: 该文提出一种新的方法求解匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱表达式。通过使用瞬时多普勒频率, 引入两个独立的方位频率, 并由此推导出精确的严格解析谱。然后, 利用匀速移变双基 SAR 的成像几何模型, 求出这两个方位频率的表达式, 从而得到最终的 2 维频谱。作为该频谱对于成像算法的一个应用, 该文提出适用于平行等速双基 SAR 数据的距离多普勒算法。仿真数据的处理结果不仅证明了所得到的 2 维频谱的精确性, 也证明了该文的距离多普勒算法的有效性。

关键词: 匀速移变双基 SAR; 瞬时多普勒频率; 距离多普勒算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-1840-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01044

New 2-D Spectrum of BiSAR from the Instantaneous Doppler Frequency and a Showcase for Image Algorithm

Xiong Tao Zhou Song Xing Meng-dao

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

Abstract: A novel method to obtain the formulations of the return signals in the two dimensional (2-D) frequency domain for translational variant Bistatic Synthetic Aperture Radar (BiSAR) is proposed. In this study, the instantaneous Doppler frequency is used and two individual azimuth frequencies are introduced, so that the 2-D spectrum can be derived by these two azimuth frequencies. Using the imaging geometry of the general bistatic SAR, the expressions of the two azimuth frequencies can be obtained, as well as the 2-D spectrum. Then, the range Doppler algorithm based on the two 2-D spectrums is developed to process the spotlight general BiSAR data. Finally, the proposed algorithms are applied to the simulated data and the results confirm not only the accuracy of the derived 2-D spectrums for general BiSAR but also the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Translational variant bistatic SAR; Instantaneous Doppler frequency; Range Doppler algorithm

1 引言

相比传统的单基地合成孔径雷达(SAR), 收发分置的双基地 SAR 在机动性和隐蔽性, 以及抗干扰和抗截获性能等方面都具备更强的优势^[1-3]。近几年来, 各国对双/多基成像的研究逐渐升温, 并取得了大量的研究成果。文献[4]中的时域逐点匹配方法适用于任意一类双基 SAR, 该方法理论上是最优的, 然而其成像处理效率较低; 文献[5]针对匀速移变构型双基 SAR 的 2 维频谱, 提出了一种新的求解方法, 该方法将收、发斜距分别在各自的驻相点处做二阶泰勒近似, 然后对二阶近似式应用驻相点法获得了其多普勒域的表达式, 然而该方法在收、发斜距上均引入了近似, 导致所获得的频谱表达式精度下降, 使其应用受到一定限制。文献[6]通过引入两个方位

频率, 对文献[5]频谱加以改进, 取得了精度上的提高; 文献[7]提出了一种新方法——“级数反演法”。此方法把回波的相位历程在慢时间进行高阶泰勒级数展开, 然后用级数反演法求出信号在 2 维频域的近似表达式。在该算法的基础上文献[8,9]分别提出了改进的非线性 CS 算法和改进的距离多普勒算法。以上两种算法应用于 Chirp 数据, 得到了良好的聚焦效果。虽然利用级数反演法得到的频谱精度很高, 然而得到的频谱数学表达式较为复杂, 不利于后续的信号分析与成像处理; 文献[10]提出瞬时多普勒频率的概念, 利用双基 SAR 的几何构型直接求解出 2 维频谱。该方法能够在理论上求解出 2 维频谱的精确表达式, 并且表示式简洁。但由于引入了一个类半双基角, 这个双基角无法用代数方法得到精确表达式, 在实际处理过程中, 文献[10]应用数值方法对其求解, 这在一定程度上对后续成像处理带来不便。

因此, 本文针对匀速移变构型的双基 SAR 成像提出了一种新的研究方法。和文献[10]类似, 本文利

2011-10-11 收到, 2012-04-20 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)资助课题

*通信作者: 熊涛 xtlnmtb2006@163.com

用瞬时多普勒频率的概念, 推导出匀速移变 SAR 的频谱表达式。与文献[10]不同的是, 本文引入两个不同的方位频率, 将信号 2 维频谱的相位表示为两个根号项以及两个线性项, 所得到严格解析的 2 维频谱表达式精确并且简洁。更为重要的是, 基于匀速移变双基 SAR 发射接收信号的几何模型, 利用一个线性近似, 将这两个未知的方位频率的表达式求解出来, 从而最终得到匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱。与文献[7]中的方法不同, 本文利用双基 SAR 的几何构型求解出两个独立的方位频率, 求解过程较为直观, 推导所获得的 2 维频谱不仅有利于后续成像算法, 对双基 SAR 的信号分析也有重要意义。基于该频谱, 本文提出适用于平行等速双基 SAR 构型的改进距离多普勒算法。该算法具有单基距离多普勒算法的优点, 在简单高效的同时, 能够有效消除距离和方位间的高次耦合, 适合大斜视成像处理。

2 匀速移变双基 SAR 回波信号模型

匀速移变双基 SAR 模型如图 1 所示。发射机和接收机分别以速度 V_T 和 V_R 沿着非平行的航迹匀速飞行。假设双基 SAR 发射脉冲是线性调频信号, 发射信号经地面目标 P 反射后, 接收到的回波信号为

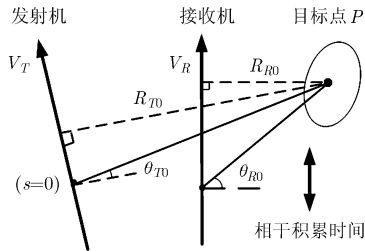


图 1 匀速移变双基 SAR 几何模型

$$ss(\tau, s) = w_r \left[\tau - R(s)/c \right] w_a(s) \cdot \exp \left\{ -j\pi\gamma \left[\tau - \frac{R(s)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[-j2\pi f_c \frac{R(s)}{c} \right] \quad (1)$$

式(1)中, 信号的调频率为 γ , T_p 为脉冲持续时间, f_c 为信号中心频率, τ 和 s 分别表示距离向时间和方位时间, c 表示光速, $w_r(\cdot)$ 和 $w_a(\cdot)$ 分别为距离向包络和方位向包络。在特定的方位时刻的瞬时斜距表示为

$$R(s) = R_T(s) + R_R(s) = \sqrt{R_{OT}^2 + V_T^2 (s - s_{OT})^2} + \sqrt{R_{OR}^2 + V_R^2 (s - s_{OR})^2} \quad (2)$$

其中 R_{OT} 和 R_{OR} 分别为发射机和接收机到目标的最

近距离, θ_{T0} 和 θ_{R0} 分别为在零方位时刻 ($s = 0$), 发射机和接收机的瞬时斜视角, 并且满足 $s_{OT} = R_{OT} \tan(\theta_{T0})/V_T$ 以及 $s_{OR} = R_{OR} \tan(\theta_{R0})/V_R$ 。

对式(1)进行距离向傅里叶变换, 得到

$$Ss(f_r, s) = W_r(f_r) w_a(s) \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi(f_r + f_c)R(s)}{c} - j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \right] \quad (3)$$

其中 f_r 是距离频率。然后, 对式(3)进行方位向傅里叶变换, 表达式为

$$SS(f_r, f_s) = \int Ss(f_r, s) \cdot \exp(-j2\pi f_s s) ds = W_r(f_r) \int w_a(s) \exp \left\{ -j2\pi(f_c + f_r) \frac{R_R(s) + R_T(s)}{c} - j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} - j2\pi f_s s \right\} ds \quad (4)$$

对于频域成像算法而言, 点目标的 2 维频谱表达式, 即式(4), 至关重要。在匀速移变双基构型下, 式(4)的表达式用代数方法无法精确得到。这里必须用其他的方法得到匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱。

3 利用瞬时多普勒频率求解匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱

将式(4)的相位记为

$$\Phi(s) = -2\pi(f_r + f_c) \frac{R_R(s) + R_T(s)}{c} - j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} - 2\pi f_s s \quad (5)$$

假设 $\theta(s)$ 对应的驻定相位点为 \tilde{s} , 则有

$$f_s = -(f_c + f_r) \frac{R'_T(\tilde{s}) + R'_R(\tilde{s})}{c} \quad (6)$$

为分析简便, 令 $s = \tilde{s}$ 时刻收发雷达到目标的斜视角为 $\tilde{\theta}_R$ 和 $\tilde{\theta}_T$, 由几何关系易知 $R'_R(\tilde{s}) = -V_R \sin \tilde{\theta}_R$, $R'_T(\tilde{s}) = -V_T \sin \tilde{\theta}_T$, 因而有

$$f_s = \frac{(f_c + f_r)}{c} (V_T \sin \tilde{\theta}_T + V_R \sin \tilde{\theta}_R) \quad (7)$$

将驻定相位点 \tilde{s} 代入式(4), 根据驻定相位点原理可得

$$SS(f_r, f_s) = W_r(f_r) W_a(f_s) \cdot \exp \left[-j2\pi(f_c + f_r) \frac{R_R(\tilde{s}) + R_T(\tilde{s})}{c} - j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} - j2\pi f_s \tilde{s} \right] \quad (8)$$

其中 $W_a(\cdot)$ 为回波方位谱包络。当接收机和发射机均运动时间 \tilde{s} 后, 其几何关系可由图 2 表示, 有

$$\left. \begin{aligned} R_T(\tilde{s}) &= R_{OT} \cos \tilde{\theta}_T + (R_{OT} \tan \theta_{T0} - V_T \tilde{s}) \sin \tilde{\theta}_T \\ R_R(\tilde{s}) &= R_{OR} \cos \tilde{\theta}_R + (R_{OR} \tan \theta_{R0} - V_R \tilde{s}) \sin \tilde{\theta}_R \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 得

$$SS(f_r, f_s) = W_r(f_r) W_a(f_s) \exp[-j\Phi(f_r, f_s)] \quad (10)$$

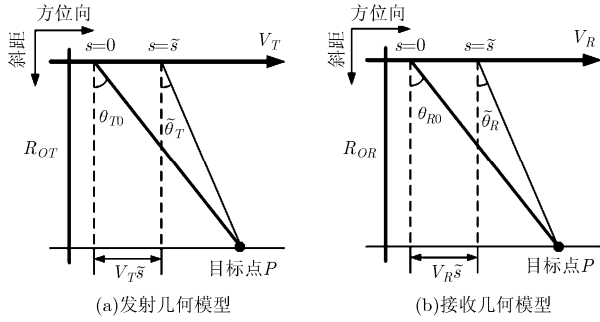


图2 匀速移变双基的几何模型

其中

$$\begin{aligned} \Phi(f_\tau, f_s) = & -2\pi \frac{(f_c + f_\tau)}{c} \left(R_{OR} \cos \tilde{\theta}_R + R_{OT} \cos \tilde{\theta}_T \right. \\ & \left. + R_{OR} \tan \theta_{R0} \sin \tilde{\theta}_R + R_{OT} \tan \theta_{T0} \sin \tilde{\theta}_T \right) \\ & - j \frac{\pi f_\tau^2}{\gamma} \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)以及式(11)即为匀速移变模式下双基地 SAR 的目标 2 维频谱, 在推导式(10)的过程中, 本文未采用任何近似, 因而该表达式是精确的。

4 基于几何模型求解匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱

式(11)得到的结果和文献[10]中的结果类似。值得注意的是式(10)中还包含未知 $\tilde{\theta}_R$ 和 $\tilde{\theta}_T$, 因而式(10)还不是最终的 2 维频谱的表达式。为了求解出 $\tilde{\theta}_R$ 和 $\tilde{\theta}_T$ 的表达式, 文献[10]提出一种数值计算的方法。但数值计算会带来运算量上的负担, 同时不利于后续成像处理。

针对上述问题, 本文引入两个新的方位频率。定义

$$\left. \begin{aligned} f_{sT} &= (f_c + f_\tau) V_T \sin \tilde{\theta}_T / c \\ f_{sR} &= (f_c + f_\tau) V_R \sin \tilde{\theta}_R / c \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

则由式(7)得到 $f_s = f_{sT} + f_{sR}$ 。式(12)中的两个方位频率为瞬时多普勒频率, 由式(12), 推出

$$\left. \begin{aligned} \cos \tilde{\theta}_T &= \sqrt{1 - c^2 (f_{sT} / V_T)^2 / (f_c + f_\tau)^2} \\ \cos \tilde{\theta}_R &= \sqrt{1 - c^2 (f_{sR} / V_R)^2 / (f_c + f_\tau)^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

把式(12)以及式(13)代入式(11), 则匀速移变 SAR 的 2 维频谱的相位为

$$\begin{aligned} \Phi(f_\tau, f_s) = & -2\pi \left[R_{OT} \sqrt{\left(\frac{f_c + f_\tau}{c} \right)^2 - \left(\frac{f_{sT}}{V_T} \right)^2} + \frac{R_{OT} f_{sT}}{V_T} \right. \\ & \left. \cdot \tan \theta_{T0} + R_{OR} \sqrt{\left(\frac{f_c + f_\tau}{c} \right)^2 - \left(\frac{f_{sR}}{V_R} \right)^2} \right. \\ & \left. + \frac{R_{OR} f_{sR}}{V_R} \tan \theta_{R0} \right] - \frac{\pi f_\tau^2}{\gamma} \end{aligned} \quad (14)$$

这里需要注意的是, 从式(14)可以看出, 由于收发异置, 发射机和接收机的瞬时多普勒频率是不相同的, 这样造成的结果是, 在最终 2 维频谱的相位中, 出现了两个根号项。如果发射机和接收机在每一个方位时刻, 位置重合, 则双基 SAR 退化为单基 SAR, 式(14)将变成单基的 2 维频谱。

如果可以将 f_{sT} 和 f_{sR} 表示为 f_τ 和 f_s 的函数, 则 2 维频谱问题将被解决。从式(12)看出, 这两个方位频率是和角度有关, 即由成像的几何模型决定。因此, 本文从另外一个角度求解 f_{sT} 和 f_{sR} 的关系。由式(12)得到, f_{sT} 和 f_{sR} 分别为 $\sin \tilde{\theta}_T$ 和 $\sin \tilde{\theta}_R$ 的函数, 如果可以将 $\sin \tilde{\theta}_T$ 和 $\sin \tilde{\theta}_R$ 的表达式求解出来, 则问题能够即刻解决。由图 2 看到, 接收机和发射机的方位向时间相同, 利用这个性质, 可以通过几何关系对 $\sin \tilde{\theta}_T$ 和 $\sin \tilde{\theta}_R$ 进行求解。回到图 2, 对于发射机和接收机而言, 由于二者的方位时间相同, 因此二者的 \tilde{s} 也相同。由图 2 得到

$$\begin{aligned} & (R_{OT} \tan \theta_{T0} - R_{OT} \tan \tilde{\theta}_T) / V_T \\ & = (R_{OR} \tan \theta_{R0} - R_{OR} \tan \tilde{\theta}_R) / V_R \end{aligned} \quad (15)$$

需要强调的是, 式(15)是由双基 SAR 的几何模型决定的。遗憾的是, 由式(15)还是很难得到 $\sin \tilde{\theta}_T$ 和 $\sin \tilde{\theta}_R$ 的关系式。因此, 这里我们需要做一个线性近似处理。将 $\tan \tilde{\theta}_T$ 展开成 $(\sin \tilde{\theta}_T - \sin \theta_{T0})$ 的泰勒级数, 将 $\tan \tilde{\theta}_R$ 展开为 $(\sin \tilde{\theta}_R - \sin \theta_{R0})$ 的泰勒级数, 保留到一次项, 结果表示为

$$\left. \begin{aligned} \tan \tilde{\theta}_T &\approx \tan \theta_{T0} + (\sin \tilde{\theta}_T - \sin \theta_{T0}) / \cos^3 \theta_{T0} \\ \tan \tilde{\theta}_R &\approx \tan \theta_{R0} + (\sin \tilde{\theta}_R - \sin \theta_{R0}) / \cos^3 \theta_{R0} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15), 有

$$\begin{aligned} & R_{OT} (\sin \tilde{\theta}_T - \sin \theta_{T0}) / (V_T \cos^3 \theta_{T0}) \\ & = R_{OR} (\sin \tilde{\theta}_R - \sin \theta_{R0}) / (V_R \cos^3 \theta_{R0}) \end{aligned} \quad (17)$$

很明显, 式(17)揭示了将 $\sin \tilde{\theta}_T$ 和 $\sin \tilde{\theta}_R$ 的线性关系, 即最终接收机和发射机的方位频率存在线性关系。在这样的关系下, 求解两个方位频率变得易于实现。把式(17)整理为以下形式:

$$\left. \begin{aligned} \sin \tilde{\theta}_T &= (R_{OR} / R_{OT}) \cdot (\cos \theta_{T0} / \cos \theta_{R0})^3 \cdot (V_T / V_R) \\ &\quad \cdot (\sin \tilde{\theta}_R - \sin \theta_{R0}) + \sin \theta_{T0} \\ &= k (\sin \tilde{\theta}_R - \sin \theta_{R0}) + \sin \theta_{T0} \\ k &= (R_{OR} / R_{OT}) \cdot (\cos \theta_{T0} / \cos \theta_{R0})^3 \cdot (V_T / V_R) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

虽然在推导过程中, 式(16)中的高次项被忽略, 但是从后续的成像结果分析, 这样的近似是合理的。然后, 将式(18)和 $f_s = f_{sT} + f_{sR}$ 联立求解, 两个方位

频率为

$$\left. \begin{aligned} f_{sT} &= (kf_s - kf_{sCR} + f_{sCT}) / (1+k) \\ f_{sR} &= (f_s + kf_{sCR} - f_{sCT}) / (1+k) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} f_{sCT} &= (f_r + f_c) V_T \sin \theta_{T0} / c \\ f_{sCR} &= (f_r + f_c) V_R \sin \theta_{R0} / c \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

把式(19)以及式(20)代入式(14), 即求出 2 维频谱的相位。至此, 匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱问题得到解决。相比于文献[7], 本文的两个方位频率的求解过程全部是基于双基 SAR 的几何模型。在下一小节, 本文将把得到的频谱应用于成像算法, 对双基 SAR 数据进行处理。

5 基于本文 2 维频谱的距离多普勒算法

本节将把上面推导得到的 2 维频率应用于成像算法。作为一个例子, 本文将该频谱应用于距离多普勒算法去处理平行等速双基 SAR 数据(即接收机和发射机以相同的速度运动在平行的航迹上)。距离多普勒算法为至今仍在广泛适用的经典成像算法。它通过距离和方位上的频域操作, 达到了高效的模块化处理要求, 同时又具备了 1 维操作的简便性。该算法已成功的应用到各种构型 SAR 的数据处理^[7,10], 本小节将把前面所得到的匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱应用到距离多普勒算法上。为了将得到的 2 维频谱用于成像处理, 首先将式(14)展开为距离频率 f_r 的泰勒级数并且忽略高次项, 有

$$\Phi(f_r, f_s) \approx \phi_0 + \phi_1 f_r + \phi_2 f_r^2 \quad (21)$$

下面, 分别对式(21)的各项进行分析。其中

$$\begin{aligned} \phi_2 &= -\pi R_{OT} \frac{\lambda (f_{sT} / V_T)^2}{c^2 [1 - (f_{sT} / V_T)^2]^{3/2}} \\ &\quad - \pi R_{OR} \frac{\lambda (f_{sR} / V_R)^2}{c^2 [1 - (f_{sR} / V_R)^2]^{3/2}} - \frac{\pi}{\gamma} \end{aligned} \quad (22)$$

$\phi_2 f_r^2$ 代表距离方位高次耦合项, 其距离向空变性比较弱。在实际处理过程中, 通过构造滤波器 $H_2 = \exp(j\phi_2 f_r^2)$ 将这个高次耦合项去除。这时, 构造的 H_2 选用特定的斜距来进行构造, 一般选取场景中心的斜距来构造该滤波器。 $\phi_1 f_r$ 与距离徙动有关, 其中

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -\frac{2\pi}{c} \left[\frac{R_{OT}}{\sqrt{1 - (f_{sT} / V_T)^2}} + \frac{R_{OR}}{\sqrt{1 - (f_{sR} / V_R)^2}} \right] \\ &\quad - \frac{2\pi}{c} \left[R_{OT} \frac{-kV_T \sin \theta_{T0} + V_R \sin \theta_{R0}}{k+1} \right. \\ &\quad \left. + R_{OR} \frac{kV_R \sin \theta_{R0} - V_T \sin \theta_{T0}}{k+1} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

本文依照单基 SAR 处理方法, 将信号变换到距离多普勒域, 通过插值来校正距离徙动。完成距离徙动校正后, 每个点目标的主要能量落到同一距离单元。此时, 信号的表达式为

$$sS(\tau, f_s) = p_r \left(\tau - \frac{R_{cen}}{c} \right) W_{az}(f_s - f_{sc}) \exp[-j\phi_0(f_r, f_s)] \quad (24)$$

其中 $p_r(\cdot)$ 为 sinc 函数的包络, f_{sc} 为多普勒中心, 满足 $f_{sc} = -(V_T \sin \theta_{sQT} + V_R \sin \theta_{sQR}) f_c / c$, R_{cen} 为零方位时刻点目标到接收机和发射机的斜距和, 满足 $R_{cen} = R_{OT} / \cos \theta_{T0} + R_{OR} / \cos \theta_{R0}$ 。

成像最后一步为方位压缩, 构造的匹配滤波器为 $H_0 = \exp(j\phi_0)$, 其中 $\phi_0 = \Phi(0, f_s)$ 。经过方位压缩后, 最终信号的表达式为

$$ss(\tau, s) = p_r \left(\tau - \frac{R_{cen}}{c} \right) p_{az}(s) \exp(-j2\pi f_{sc} s) \quad (25)$$

$p_r(\cdot)$ 和 $p_{az}(\cdot)$ 分别为距离和方位包络, 都是 sinc 型的函数。

6 仿真实验

为了验证本文提出的 2 维频谱以及针对平行等速双基的距离多普勒算法的有效性, 本小结对仿真数据进行处理。表 1 给出了机载聚束式匀速移变双基 SAR 的仿真参数, 其发射机和接收机均工作于大斜视情况。图 3 给出目标点分布, 5 个地面目标, A, B, C, D 和 E 沿一条直线方向分布在地平面上 ($\beta = 28^\circ$)。C 点为场景中心点, 也是成像处理的参考点, 其余 4 点在参考点周围, 相邻两点之间的距离均为 200 m。

表 1 匀速移变双基 SAR 仿真参数

| | |
|---------|-------------------|
| 中心频率 | 9.6 GHz |
| 脉冲持续时间 | 2.6 μ s |
| 带宽 | 150 MHz |
| | 接收机 (发射机) |
| 沿 x 轴速度 | 0 m/s (0 m/s) |
| 沿 y 轴速度 | 100 m/s (100 m/s) |
| 沿 z 轴速度 | 0 m/s (0 m/s) |
| 斜视角 | 40° (16°) |

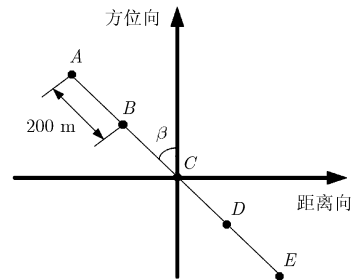


图 3 仿真点的分布

为了分析本文方法得到的 2 维频谱的相位和真实相位的误差, 构造相位误差函数:

$$\Delta E(f_r; f_s) = |\theta(f_r; f_s) - \theta_{\text{num}}(f_r; f_s)| \quad (26)$$

$\theta(f_r; f_s)$ 由式(14)给出, $\theta_{\text{num}}(f_r; f_s)$ 由文献[10]的数值方法得到。在表 1 的参数情况下, $\Delta E(f_r; f_s)$ 的最大误差为 0.000023 rad, 远小于 $\pi/4$ 的限制。因此在这个情况下, 这个近似频谱的误差可以忽略。

下面利用所得的频谱, 对数据进行处理。回波信号产生后, 图 4 (a)描绘出了最初回波信号的 2 维频谱。当进行了二次距离脉压和距离向逆傅里叶变换后, 信号距离方位高次耦合被去掉。此时每个点目标被聚焦成为相应的斜直线(如图 5(b))。进行距

离徙动校正后, 这些直线变成垂直于距离方向(如图 5(c))。最终, 方位压缩完成之后, 回波信号被聚焦成为点(如图 5(d))。

本文用 3 dB 冲激响应宽度, 峰值旁瓣比和积分旁瓣比来进一步衡量成像质量。经过去斜处理后^[7], 目标点的成像性能参数由表 2 给出。3 dB 冲激响应宽度在距离向最大值是 1.067 个采样单元(目标点 E), 方位向最大值是 3.124 个采样单元(目标点 D)。相对于理论值, 成像结果在距离向最大扩展为 0.38%, 在方位向为 0.22%, 其扩展都是非常小的。同样, 理论峰值旁瓣比在距离向是 -13.05 dB, 方位向是 -13.34 dB; 理论积分旁瓣比在距离向是 -10.27 dB, 方位向是 -10.78 dB。经过去斜处理后, 目标点

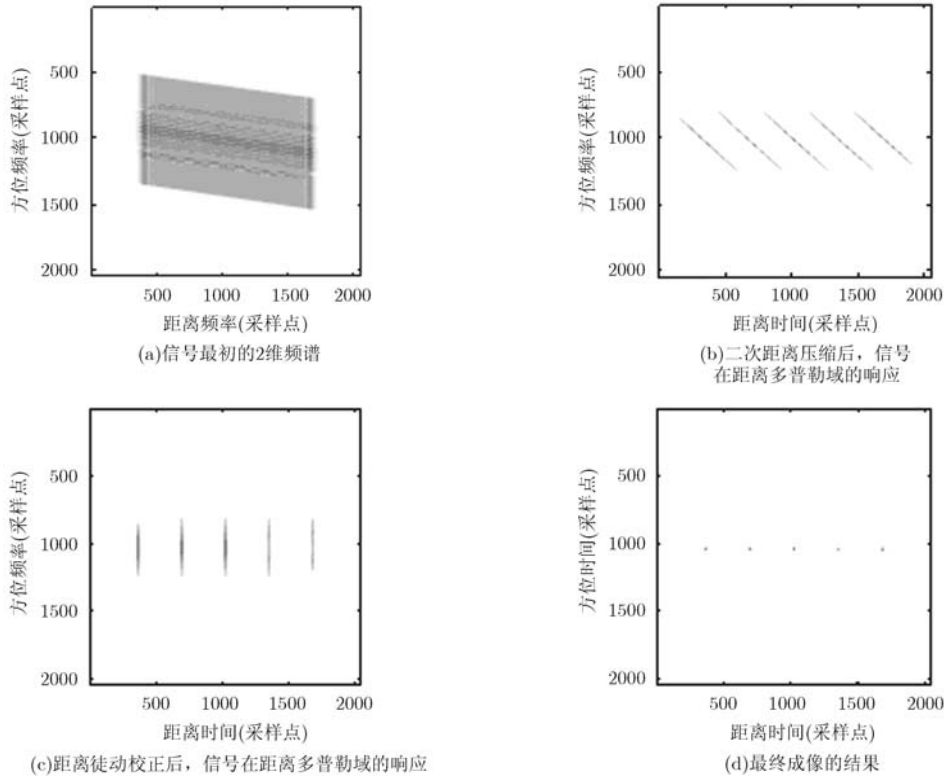


图 4 仿真实验结果

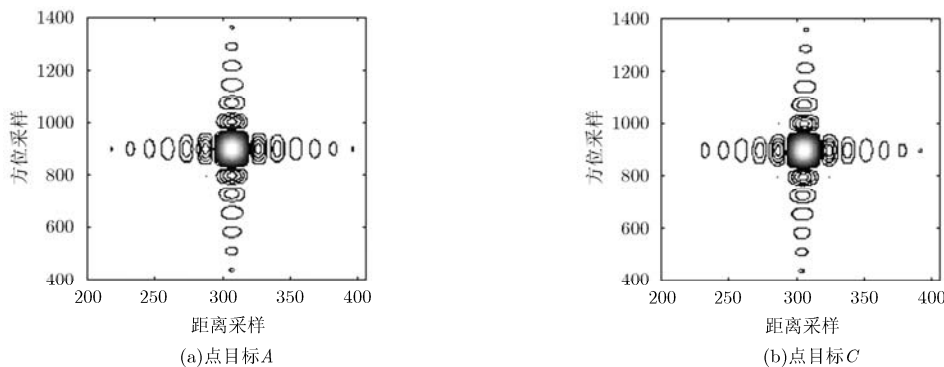


图 5 点目标的聚焦结果

的聚焦性能参数在表 2 中列出。从表 2 可以知道, 聚焦的目标点的峰值旁瓣比相比理论值, 距离向的差别在 0.03 dB 之内, 方位向的差别在 0.1 dB 之内; 积分旁瓣比与理论值相比, 距离向的差别在 0.18 dB 之内, 方位向差别在 0.12 dB 之内。因此, 所有的点目标聚焦效果良好(从图 4(d) 中也能够看到), 并且它们成像质量接近于理论值。为了更便于直观理解, 图 5 将 A 点(成像最差点)和 C 点(成像最好点)的 2 维冲激响应图给出。良好的聚焦效果不仅说明了本文提出的 2 维频谱的精确性, 也证明了后续距离多普勒算法的有效性。

表 2 点目标距离向(方位向)成像结果

| | 3 dB 宽度 (采样单元) | 峰值旁瓣比 (dB) | 积分旁瓣比 (dB) |
|-----|-------------------|----------------|----------------|
| 理论值 | 1.062(3.117) | -13.06(-13.36) | -10.29(-10.80) |
| A | 1.065(3.120) | -13.02(-13.24) | -10.09(-10.66) |
| B | 1.064(3.120) | -13.04(-13.24) | -10.10(-10.68) |
| C | 1.063(3.119) | -13.05(-13.34) | -10.27(-10.78) |
| D | 1.064(3.123) | -13.03(-13.30) | -10.16(-10.70) |
| E | 1.067(3.124) | -13.03(-13.25) | -10.15(-10.69) |

7 距离方位高次耦合的空变性分析

本文提出的距离多普勒算法基于一个假设, 即距离方位高次耦合的空变性可以忽略, 因此该耦合项可以通过滤波器在 2 维频率域去除。实际处理过程中的滤波器是通过参考点(点 C)在零方位时刻的参数构造出来的。对于非参考点(如仿真实验中的 A, B, D 和 E 点), 在多普勒中心处, 空变性所造成的二次相位误差(QPE)定义为

$$QPE = 4\pi \left| (\varphi_{src} - \varphi_{src0}) (B/2)^2 \right|_{f_s=f_{sc0}} \quad (27)$$

为了让最终成像结果能够接收, QPE 必须控制在 $\pi/4$ 以内。在实际工作的系统中, 其他参数全都确定下来的时候, QPE 只和点目标离参考点的距离有关, 二者之间的对应关系正是本小节要研究的内容。图 6 显示了 QPE 和点目标离参考点的距离的关系。其中, 信号的带宽为 100 MHz, 其它参数由表 1 给出。图 6 给出了 3 组不同斜视角下, QPE 和距离的对应关系。在小斜视情况下(斜视角 1, 发射机斜视角 8° , 接收机斜视角 5°), 场景大小为 1.5 km 以内, QPE 趋近于零。在这种情况下, 距离方位高次耦合的空变性几乎对成像没有影响。在中等斜视角情况下(斜视角 2, 发射机斜视角 40° , 接收机斜视角 16°), QPE 变化稍微大一些。在 400 m 处, QPE 大约为 0.1π 。因此在仿真实验的条件下, 场景

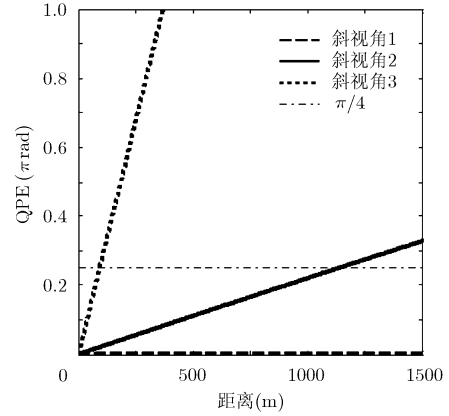


图 6 QPE 和距离对应关系图

大小为 800 m (场景中心点两边 400 m), 忽略距离方位高次耦合的空变性, 是合理的。在大斜视情况下(斜视角 3, 发射机斜视角 52° , 接收机斜视角 23°), QPE 随距离变化很快。距离参考点 100 m 处, 其空变性已经不能忽略不计了。在这样的情况下, 本文提出的距离多普勒算法将不再适用。因此, 虽然本文提出的等效斜距历程以及后续得到的 2 维频谱的精度很高, 但基于该方法的距离多普勒算法还受到场景大小的限制。因此, 在以后的工作中, 应该研究更加精确的成像算法。

8 总结

对于匀速移变双基 SAR 成像, 其距离历程包含两个根号项之和。因此, 其回波信号在 2 维频率域或者距离多普勒域的解析表达式无法通过驻定相位原理精确得到。为了解决这个问题, 本文利用瞬时多普勒频率的概念, 引入两个方位频率, 用这两个方位频率表示 2 维频谱的相位信息。基于匀速移变双基 SAR 的几何构型, 在代数运算后, 这两个方位频率可以求得, 最终可以得到匀速移变双基 SAR 的 2 维频谱。本文求出的 2 维频谱被应用到距离多普勒算法, 并且成功地处理了匀速移变双基 SAR 数据。仿真实验证实了该频谱的距离多普勒算法的有效性。

参考文献

- [1] Walterscheid I, Espeter T, and Brenner A. Bistatic SAR experiments with PAMIR and terraSAR-X: setup, processing, and image results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3268-3279.
- [2] Rodriguez-Cassola M, Baumgartner S, and Krieger G. Bistatic terraSAR-X/F-SAR spaceborne — airborne SAR experiment: description, data processing, and results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 781-794.

- [3] Massonnet D. Capabilities and limitation of the interferometric cartwheel[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506–520.
- [4] Krieger G and Moreira A. Spaceborne bi- and multistatic SAR: potentials and challenges [J]. *IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 184–198.
- [5] Loffeld O, Nies H, Peters V, *et al.* Models and useful relations for bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2031–2038.
- [6] Ul-Ann Q, Loffeld O, and Nies H. Optimizing the individual azimuth contribution of transmitter and receiver phase terms in Loffeld's Bistatic Formula (LBF) for bistatic SAR processing[C]. *Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Berlin, 2008: 455–458.
- [7] Neo Y, Wong F, and Cumming I. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letter*, 2007, 4(1): 93–96.
- [8] Neo Y, Wong F, and Cumming I. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14–21.
- [9] Wong F, Cumming I, and Neo Y. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2493–2505.
- [10] Zhang Z, Xing M, Ding J, *et al.* Focusing parallel bistatic SAR data using the analytic transfer function in the wavenumber domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3633–3645.
- 熊 涛: 男, 1984 年生, 博士生, 从事 SAR 成像方面的研究工作.
- 周 松: 男, 1984 年生, 博士生, 从事弹载 SAR 成像方面的研究工作.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 博士, 教授, 从事雷达成像和目标识别等方面的研究工作.