

扫描 SAR 全孔径成像处理方法

吴玉峰* 孙光才 邢孟道 保铮

(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: 该文提出了一种新的扫描 SAR 全孔径成像处理方法。首先根据谱分析(SPECAN)方法进行方位预滤波得到无模糊的二维频谱,在此基础上利用传统的非线性 CS 方法完成距离压缩及距离徙动校正,然后结合 Dechirp 思想将信号聚焦在频率域,最后通过 Chirp-Z 变换实现几何形变校正。该算法不需要插值操作和坐标转换,因此运算量小,效率高。仿真和实测数据处理结果验证了算法的有效性。

关键词: 扫描 SAR; 全孔径处理; 谱分析; Chirp-Z 变换

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2445-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00225

A Full-aperture Imaging Method for ScanSAR

Wu Yu-feng Sun Guang-cai Xing Meng-dao Bao Zheng

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

Abstract: This paper proposes a new full-aperture imaging algorithm for ScanSAR. Firstly, the two dimensional (2-D) spectrum is obtained by the azimuth pro-filtering which adopts the idea of SPECAN. Then the Nonlinear Chirp Scaling (NCS) method is used to complete the range compression and Range Cell Migration Correction (RCMC). After that, the signal is focused in the Doppler domain by dechirping operation. Finally, geometric distortion correction is carried out via a Chirp-Z Transform (CZT). Without interpolation and coordinate transformation, the algorithm is high in computational efficiency. Both simulation and results of real data are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: ScanSAR; Full-aperture processing; SPECAN; Chirp-Z transform (CZT)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像具有全天时、全天候、远距离和宽测绘带等特点,可以大大提高雷达的信息获取能力,特别是信息感知能力。扫描 SAR 由于能够在短时间内对大范围场景成像以及距离向超宽测绘带的能力,得到国内外研究人员的重视。比如德国于 2007 年发射的 TerraSAR-X 就可以工作在扫描模式(TOPS 模式)^[1], 欧空局将扫描模式作为下一代遥感卫星 Sentinel-1 的基本模式^[2]。

扫描 SAR 通过天线波束的控制,实现对方位大场景成像。就像聚束模式一样,由于波束的转动,导致方位信号频谱展宽。如果采用较小的方位采样率(PRF),那么整个方位信号的频谱会超出 $[-PRF/2, PRF/2]$ 的范围,也就是说全孔径方位信号在频域上是混叠的。如果设计较大的 PRF,则系统的数据量

会有较大的增加,处理所消耗的时间增长。实际系统工作中采用的 PRF 一般仅大于方位瞬时带宽,比方位全多普勒带宽小很多,因此需要通过信号处理的方法实现场景的无模糊成像。

扫描 SAR 成像算法可以分为子孔径方法和全孔径方法两种。文献[3]给出了一种利用多普勒波束锐化(DBS)技术实现扫描 SAR 的非聚焦成像方法,方法简单,计算负荷低,但是该方法方位向采用重叠分块的处理方式,实际参与计算的点数增加,冗余计算量较大。子块成像后需要结合相关技术进行图像的拼接,处理不好会留下明显的拼痕。完成图像拼接后还必须进行坐标变换处理,将极坐标转化为直角坐标,完成形变校正。文献[4]给出了一种结合基带方位变标(BAS)的子孔径成像算法,能通过较小的 PRF 实现全方位信号全分辨率成像,但其分块操作需根据成像结合参数而定,频谱重建也较为复杂,也会产生一定的数据冗余。文献[5]考虑到扫描 SAR 方位聚焦参数与方位时间关系弱的特点,将方位频域模糊转化为时域模糊,然后进行成像处理,但是该方法在预处理及其后处理过程中依然需要上采样操作。文献[6]将移频 CZT 变换引入到成像算法中将

2011-03-14 收到, 2011-06-07 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)和国家 973 计划项目(2010CB731903)资助课题

*通信作者: 吴玉峰 wyf1176@163.com

频域模糊直接转换成时域模糊,实现SAR的全孔径成像。

本文提出了一种采用全孔径进行扫描SAR数据处理的方法。算法主要分为4步:第1步为方位预滤波,去除方位信号的混叠问题,它只需要对数据进行很少的扩展,即可获得无混叠的二维频谱;第2步为RCM校正及距离压缩,利用第1步获得的二维频谱,结合高效的条带成像算法,进行越距离单元校正及距离压缩;第3步为方位聚焦,根据分析,数据完成上两步处理后在方位时域是混叠的,因此采用Dechirp的思想将图像聚焦在频率域。第4步为几何形变校正,其实质是一种尺度变换,可以通过Chirp-Z变换实现。该方法具有以下优点:全孔径处理无需考虑分块及子孔径拼接问题;PRF只需稍微大于瞬时带宽即可,这给系统设计和数据处理带来了好处;可与传统条带处理算法结合,精度高效率。

文章的结构如下:第2节给出了扫描SAR的信号模型及存在的问题;第3节论述了采用低采样率情况下通过方位预处理实现二维频谱无模糊恢复的方法和结合Dechirp的方位聚焦方法,并简要介绍了Chirp-Z变换实现形变校正的方法;第4节给出了算法流程;第5节给出了仿真和实测数据处理结果,验证了算法的有效性;第6节对全文进行了总结。

2 信号模型与问题

如图1所示为扫描SAR几何关系示意图,图中雷达平台以速度 v 运动,天线波束的转动中心与航线的最近距离为 R_{ref} ,场景中心线到雷达航线的最近距离为 R_s 。天线波束宽度为 θ_{bw} ,数据录取过程中波束指向从 θ_s 变化到 θ_e 。

照射场景中存在任意点目标 $P(R_B, X)$,则瞬时斜距为 $R(t_m; R_B) = \sqrt{R_B^2 + (X - vt_m)^2}$,其中 t_m 表示

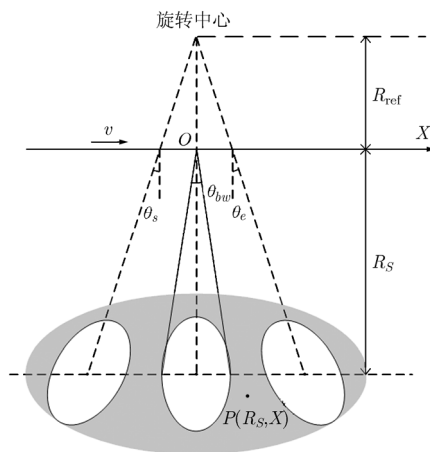


图1 扫描SAR几何关系示意图

方位慢时间。假设发射信号为线性调频信号,则回波信号去载频后可以表示为

$$S_{\text{ech}}(\hat{t}, t_m) = W_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right) \cdot \exp \left[j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_B)}{c} \right)^2 \right] \cdot W_a \left(\frac{t_m - t_0}{T_a} \right) \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m; R_B) \right] \quad (1)$$

其中 \hat{t} 为快时间, c 为光速, λ 为雷达的中心波长, γ 为距离调频率, $W_r(\cdot)$ 和 $W_a(\cdot)$ 分别表示雷达线性调频信号的窗函数和方位窗函数,前者在未加权时为矩形窗;后者除滤波外,还与天线波束形状有关。若令 $\alpha = R_{\text{ref}}/(R_{\text{ref}} + R_B)$,则波束中心时间 $t_0 = \alpha(X/v)$,合成时间 $T_a \approx \frac{\alpha R_B \cdot \theta_{bw} (R_B + R_{\text{ref}})^2 + X^2}{v (R_B + R_{\text{ref}})^2}$ 。

将信号式(1)变换到距离频率域可得

$$S_{\text{ech}}(f_r, t_m) = W_r \left(\frac{f_r}{B} \right) \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] W_a \left(\frac{t_m - t_0}{T_a} \right) \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_m; R_B) \right] \quad (2)$$

其中 f_r 为距离频率, f_c 为中心频率。为了下一步的分析,需要推导出二维频域的表达式,采用驻定相位原理求得驻点为

$$t_m^* = \frac{X}{v} - \frac{R_B f_a}{v \sqrt{f_{aM}^2 - f_a^2}} \quad (3)$$

其中 f_a 为方位频率, $f_{aM} = 2v/\lambda$ 为载机正前方目标回波的多普勒频率。于是得到二维频域表达式为

$$S_{\text{ech}}(f_r, f_a) = W_r \left(\frac{f_r}{B} \right) \exp \left[-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] W_{a-f_a}(f_a) \cdot \exp \left[-j4\pi R_B \sqrt{\left(\frac{f_c + f_r}{c} \right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v} \right)^2} \right] \cdot \exp \left[-j2\pi \frac{X}{v} f_a \right] \quad (4)$$

其中窗函数 $W_{a-f_a}(f_a) = W_a \left(\frac{1}{\alpha \theta_{bw}} \left[\frac{X}{R_{\text{ref}} + R_B} - \frac{f_a}{\sqrt{f_{aM}^2 - f_a^2}} \right] \frac{(R_B + R_{\text{ref}})^2}{(R_B + R_{\text{ref}})^2 + X^2} \right)$ 。从式(4)可以看出扫描SAR二维频谱的相位表达式与传统条带模式一样,不一样的地方在于方位的窗函数。方位窗函数表明扫描SAR二维频谱所处的区间与条带模式是不同的。

图2所示为场景中点目标的时频关系图。图中两条右斜上虚线的中间地带为场景点的时谱分布区域,粗实线为场景点目标的时频线。从图中可以看

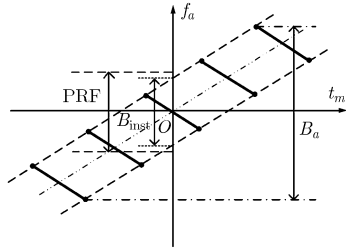


图 2 点目标的时频关系

出，方位点的多普勒中心随方位位置变化，这样导致整个场景的方位带宽增加，通常会达到 PRF 的好几倍，这与聚束式 SAR 的信号特性极为相似。为了解决频谱混叠问题，聚束 SAR 给出了两类成像算法。第 1 类为方位分块处理，然后进行子块频谱拼接，分块操作保证块内的信号带宽小于 PRF。对于星载而言，PRF 资源是非常有限的，小的 PRF 会带来分块过多的问题。第 2 类为全孔径处理方法，文献[7]给出了一种两步处理的方法，首先通过方位预滤波消除频谱混叠，然后结合条带算法的优势对聚束模式数据进行良好的成像，本文将方位预滤波思想引入到扫描 SAR 的处理中以解决方位频谱的混叠问题。

3 信号处理与成像方法

本节讨论的信号处理包括 4 步：第 1 步是在 PRF 稍大于瞬时带宽 B_{inst} 的情况下对方位信号的无模糊恢复过程；第 2 步结合 NCS 算法完成距离压缩、二次距离压缩以及 RCM 校正；第 3 步为利用 Dechirp 进行方位点聚焦；第 4 步通过 Chirp-Z 变换完成形变校正。

3.1 方位解模糊

图 3 给出了方位信号无模糊二维频谱恢复过程中信号在时频平面的变化。图 3(a)为原始信号的时频图。从图中可以看出，信号在频域是混叠的，但是从另一个角度看，信号在时域是不混叠的。如果我们将时频平面的信号补偿为水平带，然后在频域补零就可以无模糊地恢复信号，但是这样做会使数据量增加 B_a/PRF 倍，导致运算量大大增加。为了在不显著增加数据量的情况下，得到 PRF 略大于 B_{inst} 时信号无模糊的二维频谱，我们结合 SPECAN 的思想^[7,8]，首先对方位信号进行预滤波处理。

为了分析的方便将斜距方程在 $t_m = X/v$ 处作泰勒级数展开并忽略二次以上的高次项，则可将式(2)的方位相位表达式近似为

$$S_{ech}(f_r, t_m) = \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \left(R_B + \frac{(X - vt_m)^2}{2R_B} \right) \right] \quad (5)$$

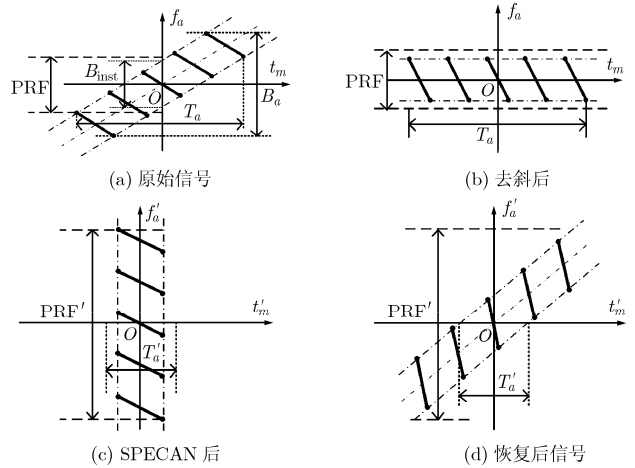


图 3 方位信号无模糊频谱恢复示意图

构造参考函数

$$S_{ref}(t_m) = \exp \left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{ref}} t_m^2 \right) \quad (6)$$

将式(5)的慢时间相位项与参考函数式(6)进行卷积可得

$$\begin{aligned} S_2(f_r, t_m) &= S_{ech}(f_r, t_m) \otimes_{az} S_{ref}(t_m) \\ &= \exp \left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{ref}} t_m^2 \right) \int_x S_{ech}(f_r, x) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j\pi \frac{2v^2 x^2}{\lambda R_{ref}} \right) \exp \left(j2\pi \frac{2v^2 t_m x}{\lambda R_{ref}} \right) dx \quad (7) \end{aligned}$$

其中符号 \otimes_{az} 表示方位卷积。从式(7)可以看出，SPECAN 算法可以通过信号和二次相位函数相乘然后求傅里叶变换，再补偿一个二次相位实现。从式中傅里叶变换的意义来看，信号 $S_2(f_r, t_m)$ 虽然还是时域信号，但已经可以认为是在频域里了。用新的变量 t'_m 替代 t_m ，式(7)变为

$$\begin{aligned} S_2(f_r, t'_m) &= \exp \left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{ref}} t_m^2 \right) \int_x S_{ech}(f_r, x) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j\pi \frac{2v^2 x^2}{\lambda R_{ref}} \right) \exp \left(j2\pi \frac{2v^2 t'_m x}{\lambda R_{ref}} \right) dx \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)可以被看为信号方位标度从 t_m 变换到 t'_m ，相当于将采样频率从 PRF 变到 PRF'。在坐标变换的过程中，信号支撑区始终集中于参数对 (T_a, PRF) 内，如图 3(b), 3(c)所示。SPECAN 前后的时频标度满足如下关系：

$$t'_m = \frac{\lambda R_{ref}}{2v^2} f_a \quad (9)$$

对变换前后的一个采用点进行分析，由式(9)可得

$$\frac{1}{PRF'} = \frac{\lambda R_{ref}}{2v^2} \frac{PRF}{nan} \quad (10)$$

其中 nan 为方位点数。于是可以得到变换前后 PRF

的比值为

$$\xi = \frac{\text{PRF}'}{\text{PRF}} = \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{ref}}} \frac{\text{nan}}{\text{PRF}} \frac{1}{\text{PRF}} \quad (11)$$

式(11)右边前两项的积近似为信号的方位带宽, 前后 PRF 的改变等效为信号采样率提高了, 且提高的倍数近似为信号欠采样的倍数。SPECAN 前后信号在时域支撑区的变化为

$$\zeta = \frac{T_a'}{T_a} = \frac{\text{nan}'/\text{PRF}'}{\text{nan}/\text{PRF}} = \frac{\text{nan}'}{\text{nan}} \frac{1}{\xi} \quad (12)$$

其中 nan' 为信号变换到 t'_m 域方位向点数。可以看出, 如果在 t'_m 域不补零, 即 $\text{nan}' = \text{nan}$, 没有数据量的扩展, 那么信号在变换前后的等效带宽变化与等效时宽变化成反比, 即信号时间窗变短了。因此本文方法的操作可以理解为: 在不增加数据量的情况下, 通过等效缩短时间窗来换取增加频域窗。这使得我们不能像聚束两步处理一样进行时域成像。如果要将信号聚焦在时域, 必须用同样的方法恢复信号的时域窗。

为了进行 RCMC 操作, 需要分析信号在方位频域的表达式, 由于信号式(8)在时域和频域都是无模糊的, 可以将其变换到频域, 利用傅里叶变换的性质得到式(8)的频域表达式为

$$S_2(f_r, f'_a) = S_{\text{ech}}(f_r, f'_a) S_{\text{ref}}(f'_a) \quad (13)$$

其中 f'_a 为与 t'_m 对应的频率参量。为了获得 $S_{\text{ech}}(f_r, f'_a)$, 对式(13)中的第二项进行补偿即可, 补偿函数为

$$S_{\text{com}}(f'_a) = \exp\left[-j\pi \frac{\lambda R_{\text{ref}}}{2v^2} f_a'^2\right] \quad (14)$$

于是得到回波信号在二维频域无模糊的表达式为

$$S_{\text{ech}}(f_r, f'_a) = S_2(f_r, f'_a) S_{\text{com}}(f'_a) \quad (15)$$

从图 3(d)可以看出虽然得到了二维无模糊的频域表达式, 但是信号式(15)在 t'_m 域是模糊的。得到二维无模糊的表达式以后就可以采用传统的 RD 或 NCS 算法完成 RCMC 操作。

3.2 距离压缩及 RCM 校正

回波信号经过上述操作得到无模糊的二维频域表达式后, 可以采用传统的信号处理方法如 NCS, RD 等校正 RCM, 然后进行方位成像。本文采用 NCS 方法校正 RCM, 包括三次相位扰动函数 H_1 、变标函数 H_2 、距离压缩及 RCM 校正函数 H_3 和剩余相位补偿函数 H_4 , 其具体形式可以参考文献[9,10]。

3.3 方位聚焦

距离压缩及 RCM 校正后, 方位信号可以表示为

$$S_{\text{azi}}(f'_a) = W_{a-f'_a}(f'_a) \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{R_B}{v} \sqrt{f_{aM}^2 - f_a'^2} - j2\pi \frac{X}{v} f_a'\right] \quad (16)$$

上面的分析表明, 信号在 t'_m 域是混叠的, 如果想要消除混叠, 需要再进行一次 SPECAN 操作, 这样会产生额外的计算量, 增加信号处理的复杂度。为了对场景进行快速成像, 本文结合 Dechirp 处理的思想, 将点目标直接聚焦在 f'_a 域。构造函数 $H_5(f'_a)$ 将式(16)的信号旋转到竖直的区域

$$H_5(f'_a) = \exp\left[j\pi \frac{\lambda R_{\text{ref}}}{2v^2} f_a'^2\right] \quad (17)$$

将式(17)与式(16)相乘, 方位 IFFT 转换到时域, 再乘以参考函数

$$H_6(t'_m) = \exp\left[j\pi \frac{2v^2}{\lambda(R_{\text{ref}} + R_B)} t_m'^2\right] \quad (18)$$

最后方位 FFT 变换到频域即完成成像过程, 完成压缩后的方位信号为

$$S_{\text{azi}}(f'_a) = \sigma_0 \cdot \text{sinc}\left[T_a \left(f'_a - \frac{2v^2}{\lambda(R_B + R_{\text{ref}})} \frac{X}{v}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\pi \frac{2X^2}{\lambda(R_B + R_{\text{ref}})}\right] \quad (19)$$

为了使算法具有保相性, 必须对式(19)的常数相位进行补偿, 根据关系 $f'_a = \frac{2vX}{\lambda(R_B + R_{\text{ref}})}$ 可得补偿函数为

$$H_7(f'_a) = \exp\left[j\pi \frac{\lambda(R_B + R_{\text{ref}})}{2v^2} f_a'^2\right] \quad (20)$$

需要说明的是, 之所以未像文献[4]中那样将式(16)中的双曲相位函数转化为二次函数, 是因为方位预滤波处理等效于扩展了方位采样率而压缩了时间窗, 当扫描范围较大时, 扩展后的方位频率参量 f'_a 不再远小于参量 f_{aM} , 使高次相位项构成的方位信号带宽必须加以考虑; 而在构造时域参考函数时又忽略高次相位项, 则是由于时间窗被压得很窄, 使方位时间参量 t'_m 变为很小, 且通过级数反演法计算可知, 高次相位系数与 R_B 的 $n-1$ 次方成反比(n 为高次项次数), 从而导致高次相位项很小, 可以忽略。

3.4 几何形变校正

分析式(19)可知, 聚焦后场景点目标方位位置与 R_B 有关, 即存在方位向几何形变。因此需要对它作形变校正, 其实质上是一种尺度变换, 可以通过 Chirp-Z 变换实现^[11,12], 具体过程如图 4 所示。图中 $x(m, n)$ 代表成像完成后任一距离单元的数据, $x(m, n')$ 代表形变校正后的数据。Chirp-Z 变换(CZT)采用 FFT 方法的实现步骤可以参考文献[11], 这里

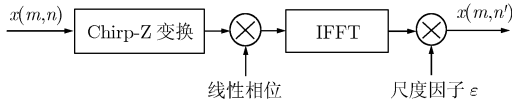


图 4 Chirp-Z 变换实现形变校正

只简单的给出变换中使用到的两个复数值。以场景中心为参考,则可以定义尺度因子为 $\epsilon = \frac{R_B + R_{ref}}{R_S + R_{ref}}$,

从而得到 CZT 变换中使用的两个复数为

$$A = \exp(j\pi(1 - \epsilon)) \quad (21)$$

$$W = \exp\left(-j\pi \frac{\epsilon}{\text{nan}'}\right) \quad (22)$$

其中 nan' 为方位向点数。线性相位函数为

$$H = \exp(j\pi\epsilon k), \quad k = 1, 2, \dots, \text{nan}' \quad (23)$$

用以保证 CZT 变换后场景中心不会发生偏移,最后的尺度因子则是为了使变换前后目标的幅度基本不变。

4 成像处理流程

扫描 SAR 全孔径处理方法的流程如图 5 所示。算法由 4 部分组成:方位预滤波, NCS(RCMC), 方位 Dechirp 成像及形变校正。方位预滤波主要完成二维频谱的无模糊恢复,通过以上的分析,它可等效认为是提高了方位采样率,避免了大幅度扩展频谱或是方位信号分子块,从而简化了信号处理的难度;第 2 部分为典型的 NCS 算法,用于完成距离压缩及 RCM 校正,无需插值,保证了算法的高效性;第 3 部分为结合 Dechirp 的方位聚焦,由于方位预处理后的信号时域是混叠的,因此将其聚焦在频率域;最后部分为基于 CZT 变换的形变校正。成像结果不存在几何失真,因此无需进行额外的坐标变换过程。

5 实验结果

为了验证本文提出的扫描 SAR 全孔径处理算法,本节给出了仿真和实测数据处理结果。仿真参数见表 1。仿真场景为 5×5 的矩形点阵,均匀分布

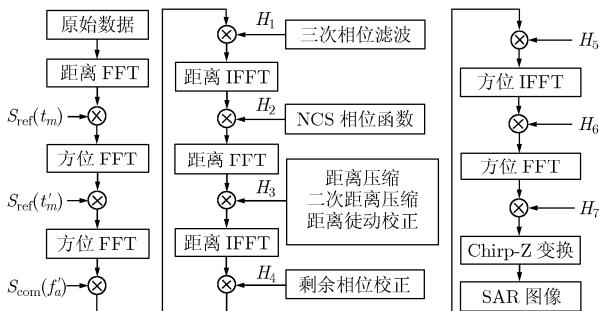


图 5 扫描 SAR 全孔径处理方法流程

表 1 仿真参数

| 波段 | Ku 波段 | 方位波束宽度 | 3.5° | 旋转中心 | 338.5 m |
|------|---------|--------|---------|------|------------|
| 脉冲宽度 | 40 μs | PRF | 2000 Hz | 扫描范围 | -18° ~ 18° |
| 信号带宽 | 80 MHz | 速度 | 110 m/s | 扫描速度 | 18°/s |
| 采样频率 | 100 MHz | 场景中心 | 14.5 km | 获取时间 | 2 s |

在 6 km×6.8 km(距离向×方位向)的范围内,如图 6 所示。

通过对表 1 参数的计算可知,方位带宽为 7661.9 Hz,远大于 PRF。图 7(a)为原始回波信号的频谱,可见其存在严重的混叠问题,通过方位预滤波处理后的信号频谱如图 7(b),信号频谱得到了很好的恢复。图 8 为图 7(b)信号对应的时域图,可以看出此时信号在时域是模糊的,与之前的理论分析一致。

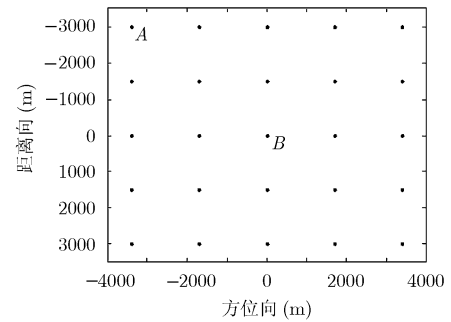
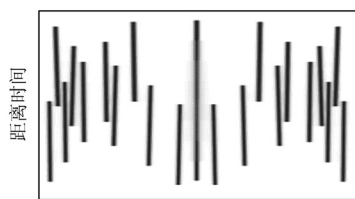


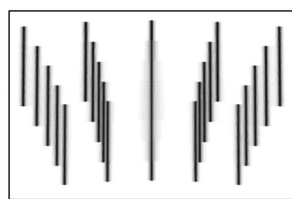
图 6 仿真场景点目标分布

采用本文方法的成像结果如图 9 所示,图中水平方向为方位向,垂直方向为距离向,图像上端表示场景近端。图 9(a)为几何形变校正前的成像结果,图 9(b)为 CZT 变换完成形变校正后的成像结果,图 9(c), 9(d)分别对应图 9(a)中 A, B 两点的等高线图。从仿真结果可以看出,通过方位预滤波处理之后,信号方位频谱不再混叠,成像结果没有出现模糊现象。分析图 9(c), 9(d)可知,场景中的所有点目标都得到良好的聚焦,且通过 CZT 变换完成形变校正后,成像结果点目标相对位置与仿真所用矩形点阵基本一致。

扫描 SAR 原始数据为某研究所在 2004 年 8 月录取的数据,其系统主要参数与仿真所用参数相同。图 10 为采用本文方法避免方位模糊并形变校正后的成像结果。可以看出,图中主要目标清晰,对比为理想,得到了较好的成像效果。仔细观察还可发现,成像场景已是扇形区域,符合扫描 SAR 的几何形态,该图无需坐标转换操作,因此说明本文方法能有效应用于扫描 SAR,实现高效的全孔径成像。



(a) 原始回波信号频谱



(b) 方位预滤波后信号频谱

图7 回波信号方位频谱比较

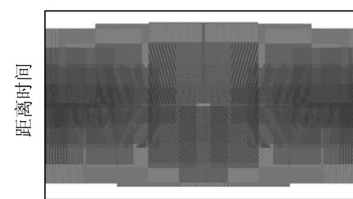
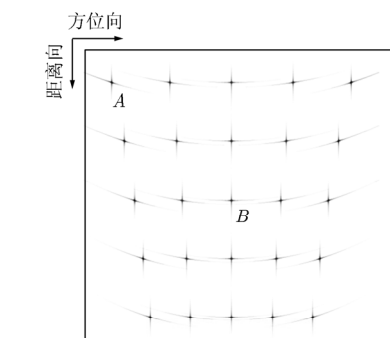
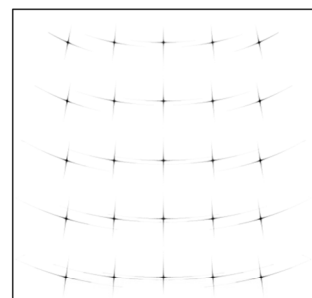


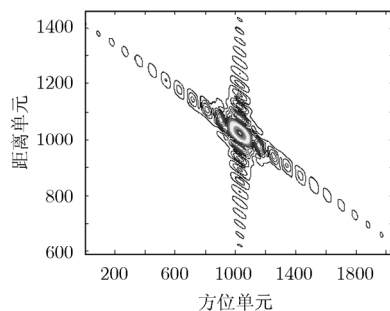
图8 方位预处理后信号的时域图



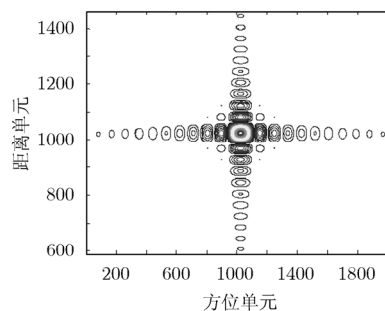
(a) 形变校正前



(b) 形变校正后



(c) A点等高线图



(d) B点等高线图

图9 仿真成像结果

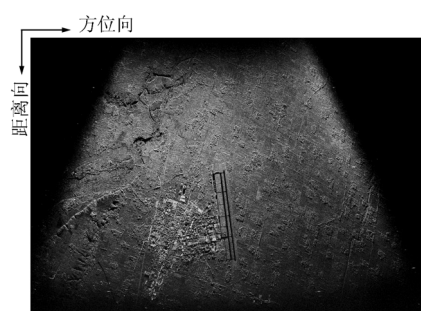


图10 实测数据成像结果

6 结论

扫描 SAR 通过控制天线波束指向实现方位大场景成像, 同时导致不同方位点具有不同的多普勒中心, 使信号方位带宽大于 PRF 造成频谱混叠。方位预滤波处理利用卷积将全孔径的数据变换到一个较窄的频谱带宽内, 等效扩展了方位采样率, 获得

无模糊的二维频谱。结合 NCS 完成距离徙动校正及距离压缩, 无需插值及坐标变换, 保证了算法的高效性。仿真和实测数据处理结果验证了本文方法的可行性。

参考文献

- [1] Meta A, Mittermayer J, Prats P, *et al.* TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 759-769.
- [2] Attema E, Davidson M, Flouy N, *et al.* Sentinel-1 ESA's new European radar observatory [C]. EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, June 2-5, 2008, 2: 179-182.
- [3] 李燕平, 邢孟道, 保铮. 宽带机械扫描雷达的 DBS 成像和动目标检测[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(1): 116-121.
Li Yan-ping, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. DBS imaging and GMTI in a wideband airborne mechanic scanning radar [J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(1): 116-121.

- [4] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, *et al.* Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [5] Francesco D Z and Andrea M G. TOPS: terrain observation by progressive scan [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2352-2360.
- [6] Engen G and Larsen Y. Efficient full aperture processing of TOPS mode data [C]. EUSAR 2010, Eurogress, Aachen, Germany, June 7-10, 2010: 13-16.
- [7] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, *et al.* Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993-2004.
- [8] 井伟, 张磊, 邢孟道, 等. 聚束式SAR的宽场景成像算法[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 470-475.
Jing Wei, Zhang Lei, Xing Meng-dao, *et al.* Algorithm for wide-swath spotlight SAR data processing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 470-475.
- [9] Davidson G W, Cumming I G, and Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 第5章.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: Ch.5.
- [11] 程佩青. 数字信号处理教程(第3版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 176-182.
Cheng Pei-qing. Digital Signal Processing Tutorial(Third Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 176-182.
- [12] Lanari R. A new method for the compensation of the SAR range cell migration based on the Chirp Z-transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1296-1299.
- 吴玉峰: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、运动补偿.
- 孙光才: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、动目标检测等.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别等.
- 保铮: 男, 1927年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为SAR成像、目标识别、天波超视距、空时二维自适应等.