

基于距离 Keystone 变换的改进的多普勒调频率估计方法

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: 多普勒调频率估计是 SAR 成像处理中的一个重要步骤。针对聚束、滑动聚束 SAR 采用全孔径算法进行成像时的调频率估计问题, 该文提出一种改进的平移相关(SAC)算法。将距离 Keystone 变换引入到 SAC 算法中, 去除了互相关峰值位置与目标距离间的耦合关系, 从而消除了聚焦深度的限制。由于没有时域补零操作, 调频率估计过程中将会出现模糊, 针对此, 给出了一种基于最小熵准则的模糊数估计方法。仿真及实测数据处理结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 多普勒调频率估计; 改进的平移相关算法; 距离 Keystone 变换; 模糊数估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1135-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01157

An Improved Doppler Rate Estimation Approach Based on the Range-Keystone Transform

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: Doppler rate estimation is an essential procedure in Synthetic Aperture Radar (SAR) signal processing. For the Doppler rate estimation in spotlight and sliding spotlight SAR focused with the full-aperture imaging algorithm, this paper proposes an improved Shift-And-Correlation (SAC) approach. The range-Keystone transform is introduced into the original SAC algorithm to eliminate the coupling effect between the cross-correlation peak position and the target's distance. Thus, the constraint of the focus depth can be avoided. Due to no zero padding in the proposed approach, aliasing will occur in the Doppler rate estimation. For this problem, an ambiguity number estimation method based on minimum entropy is presented. Finally, both simulation and results of real data are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Doppler rate estimation; Improved Shift-And-Correlation (ISAC) algorithm; Range-Keystone transform; Ambiguity number estimation

1 引言

多普勒调频率是合成孔径雷达(SAR)成像的一个重要参数,其直接影响到 SAR 图像的聚焦效果^[1]。国内外对调频率估计方法的研究比较多,具有代表性的是视错位(MD)算法^[2]和对比度优化(CO)算法^[3]。其中 MD 算法在距离压缩域通过两个子孔径去斜图像的相关来估计调频率,其要求场景中存在孤立的强散射点。相干 MD(CMD)算法^[4,5]对 MD 进行了改进,通过同时利用信号的相位信息,可以对低对比度及低信噪比的场景进行调频率估计。CO 算法以 SAR 图像对比度最大为准则,通过多次迭代来获得高精度的调频率。但是,该方法在没有先验

调频率估计值的情况下需要多次迭代,运算效率较低。

对于星载聚束及滑动聚束 SAR,其成像方法可分为子孔径算法^[6,7]和全孔径算法^[8,9]。在子孔径算法中,方位信号被分成多个子孔径信号,保证每个子孔径信号的带宽都小于系统的脉冲重复频率(PRF),然后进行距离徙动校正(RCMC)及距离压缩。然而,子孔径算法会带来诸多不便,比如子孔径划分、拼接及重叠数据的选择等。相比之下,全孔径算法有效避免了这些操作,并可以结合已经比较成熟的条带成像算法,使得成像效率较高。但是,由于在聚束、滑动聚束 SAR 中,系统的 PRF 通常小于回波信号的方位带宽^[6-9],导致在成像处理前需要进行方位预处理,以获得无模糊的信号频谱。方位预处理可采用谱分析(SPECAN)^[8,9]技术或移频 CZT^[10]实现。无论哪种方法,预处理之后信号在方位频域不模糊,但在方位时域却是模糊的^[9,10],这导

2012-09-06 收到, 2012-12-13 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)和国家自然科学基金优秀青年科学基金(61222108)资助课题

*通信作者: 吴玉峰 wyf1176@163.com

致了 MD 或 CMD 算法不再适合用来估计信号的多普勒调频率。

平移相关(Shift-And-Correlation, SAC)算法^[11]是将信号的方位频谱拆分为上下子频带,通过子频带信号的频谱搬移及互相关来估计多普勒调频率。由 SAC 算法的流程可以看出,其比较适合上述聚束、滑动聚束 SAR 的调频率估计。然而, SAC 算法是针对条带模式提出的,当直接应用到聚束、滑动聚束 SAR 的调频率估计中,一些问题将会出现。其一, SAC 算法需要通过时域补零来避免调频率估计过程中出现模糊。但是对于聚束、滑动聚束 SAR,方位预处理之后信号在时域是模糊的,这导致时域补零不再可行,因此调频率估计时就会遇到模糊的问题。其二, SAC 算法需要将互相关函数的幅度沿距离向进行叠加,以强化互相关峰值位置。由于多普勒调频率与目标距离有关,导致互相关峰值位置也与距离有关,因此可叠加的距离范围存在限制,其由聚焦深度决定。对于聚束、滑动聚束 SAR,这可能导致可叠加的距离范围很小,从而影响调频率估计的精度。

为了解决上述的两个问题,本文提出了一种改进的 SAC 算法。通过分析可知,互相关峰值位置与距离存在正比关系,通过采用 Keystone 变换^[12],就可以去除这种耦合,使互相关峰值位置与距离无关,从而消除聚焦深度的限制。由于没有时域补零处理,在调频率估计过程中将出现模糊问题,对此,本文给出了一种基于最小熵准则的模糊数估计方法,通过比较信号的熵值,就可以准确地估计出模糊数。

文章的结构如下:第2节简要介绍了 SAC 算法的基本原理;第3节详细论述了所提的改进的 SAC 算法;第4节给出了所提算法的流程;第5节给出了仿真及实测数据处理结果,验证了本文方法的有效性;最后,第6节对全文进行了总结。

2 SAC 算法原理

如图1给出 SAC 算法估计多普勒调频率的基本原理,其主要操作包括频谱搬移及互相关。SAC 算法将距离压缩后的 SAR 信号的方位频谱分解为上下子频带,然后对两子频带信号作频谱搬移及求取互相关,通过互相关峰值的位置来估计多普勒调频率。

为了简单起见,假设 SAR 回波的方位向信号为线性调频(LFM)信号,其在频域可以表示为

$$S(f_a) = \exp\left[-j\frac{\pi}{k_a}f_a^2\right], \quad -\frac{B_a}{2} < f_a < \frac{B_a}{2} \quad (1)$$

其中 f_a 为方位频率, $k_a = -2v^2/\lambda R_b$ 为多普勒调频

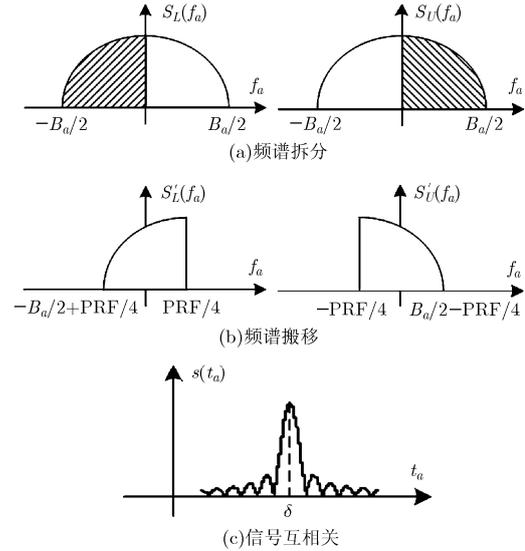


图1 SAC 算法原理

率, v 为有效速度, λ 为雷达波长, R_b 为 SAR 天线相位中心到目标的最近距离, B_a 为方位带宽。式(1)中忽略了信号的幅度信息及常数相位。SAC 算法将回波信号的频谱分解为上下两部分,分别为 $S_L(f_a)$ 和 $S_U(f_a)$, 如图1(a)所示。其中

$$\left. \begin{aligned} S_L(f_a) &= \exp\left[-j\frac{\pi}{k_a}f_a^2\right], \quad -\frac{B_a}{2} < f_a < 0 \\ S_U(f_a) &= \exp\left[-j\frac{\pi}{k_a}f_a^2\right], \quad 0 < f_a < \frac{B_a}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

然后下子频带频谱搬移 $+\text{PRF}/4$, 上子频带搬移 $-\text{PRF}/4$, 结果如图1(b), 可以写为

$$\left. \begin{aligned} S'_L(f_a) &= \exp\left[-j\frac{\pi}{k_a}\left(f_a - \frac{\text{PRF}}{4}\right)^2\right], \\ &\quad -\frac{B_a}{2} + \frac{\text{PRF}}{4} < f_a < \frac{\text{PRF}}{4} \\ S'_U(f_a) &= \exp\left[-j\frac{\pi}{k_a}\left(f_a + \frac{\text{PRF}}{4}\right)^2\right], \\ &\quad -\frac{\text{PRF}}{4} < f_a < \frac{B_a}{2} - \frac{\text{PRF}}{4} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将 $S'_L(f_a)$ 与 $S'_U(f_a)$ 的共轭相乘, 可得

$$S_C(f_a) = S'_L(f_a)S'^*_U(f_a) = \exp\left[j2\pi\frac{\text{PRF}}{2k_a}f_a\right] \quad (4)$$

其中 $*$ 表示信号共轭。由式(4)可知, 两子频带信号共轭相乘后, 其结果为一单频信号。若对其作傅里叶变换获得信号的互相关, 其峰值将出现在

$$\delta = \text{PRF}/(2k_a) \quad (5)$$

如图1(c)所示。由此, 在已知 PRF 的情况下, 通过互相关峰值位置就可以估计出多普勒调频率。

由上述流程可以看出, SAC 算法在估计调频率

时, 不需要有先验的速度信息, 且无需迭代就可以估计出调频率, 是一种高效的估计方法。

3 改进的 SAC 算法

正如引言所介绍, 当聚束、滑动聚束 SAR 采用全孔径算法进行成像时, 若采用 SAC 算法进行调频率估计, 将会出现两个问题。本节针对它们给出了一种改进的 SAC 算法。

3.1 距离 Keystone 变换

由于多普勒调频率 $k_a = -2v^2/\lambda R_b$, 将其代入式(4)可得

$$\begin{aligned} S_C(f_a) &= \exp\left(-j2\pi \frac{\lambda \text{PRF} R_b}{4v^2} f_a\right) \\ &= \exp\left(-j2\pi \frac{\lambda \text{PRF} (R_s + \Delta r)}{4v^2} f_a\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 R_s 为 SAR 天线相位中心到场景中心的距离, $\Delta r = R_b - R_s$ 。式(6)相位与距离存在正比关系, 这也导致了互相关峰值位置与距离之间的耦合。为了消除这种耦合关系, 可以作以下的变量代换

$$(R_s + \Delta r) f_a = R_s f'_a \quad (7)$$

进行代换后, 式(6)变为

$$S_C(f_a) = \exp\left(-j2\pi \frac{\lambda \text{PRF} R_s}{4v^2} f'_a\right) \quad (8)$$

式(8)的相位项只与场景中心距离有关, 已与目标的最近距离无关。对式(8)作傅里叶变换, 互相关峰值将出现在

$$\delta' = -\frac{\lambda \text{PRF}}{4v^2} R_s \quad (9)$$

可见, 峰值位置不再随目标距离的变化而变化, 也即耦合关系已经被消除。此时, 互相关函数幅度沿距离向的叠加将不再受聚焦深度的限制。式(7)所代表的变换类似于 ISAR 及运动目标成像中的 Keystone 变换, 只不过这里是距离的尺度变换, 因此, 我们将其称为距离 Keystone 变换(Range-Keystone Transform, RKT)。

然而, 由于时域补零不再可行, 在调频率估计的过程中将不可避免地会出现模糊。当式(6)相位变化超过 2π 时, 模糊就出现了。因此, 模糊的临界相位为

$$2\pi \frac{\lambda \text{PRF} (R_s + \Delta r)}{4v^2} f_a = 2\pi \quad (10)$$

由于期望估计的多普勒调频率为场景中心的值, 我们可以令式(10)中的 Δr 等于 0。此外, 方位频率可以写为

$$f_a = \frac{m}{M} \text{PRF} \quad (11)$$

其中 m 为方位采样点索引, M 为方位采样点数。将

式(11)代入式(10), 可以得到

$$\frac{\lambda \text{PRF}}{4v^2} m = \frac{M}{\text{PRF} R_s} \quad (12)$$

定义 $x_0 \triangleq \frac{M}{\text{PRF} R_s}$ 以及

$$X = \frac{\lambda \text{PRF}}{4v^2} \triangleq x + M_{\text{amb}} x_0 = x + M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF} R_s} \quad (13)$$

其中 M_{amb} 为模糊数。因此, 式(6)可以重新写为

$$\begin{aligned} S_C(f_a) &= \exp\left(-j2\pi \frac{\lambda \text{PRF} (R_s + \Delta r)}{4v^2} f_a\right) \\ &= \exp\left(-j2\pi \left(x + M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF} R_s}\right) (R_s + \Delta r) f_a\right) \\ &= \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF} R_s} (R_s + \Delta r) f_a\right) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi x (R_s + \Delta r) f_a) \\ &= \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} f_a\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} \frac{\Delta r}{R_s} f_a\right) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi x (R_s + \Delta r) f_a) \end{aligned} \quad (14)$$

对式(14)作距离 Keystone 变换, 可得

$$\begin{aligned} S_C(f'_a) &= \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} f'_a\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} \frac{\Delta r}{R_s + \Delta r} f'_a\right) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi x R_s f'_a) \\ &\approx \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} f'_a\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} \frac{\Delta r}{R_s} f'_a\right) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi x R_s f'_a) \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)第 2 个相位项可知, 由于模糊的存在, 完成距离 Keystone 变换后, 互相关峰值位置与距离的耦合关系并不能被完全消除。若要完全消除耦合, 还需要进行相位补偿

$$H_{\text{com}}(f'_a) = \exp\left(j2\pi M_{\text{amb}} \frac{M}{\text{PRF}} \frac{\Delta r}{R_s} f'_a\right) \quad (16)$$

式(16)与式(15)相乘后, 作傅里叶变换, 此时互相关峰值位置将不再依赖于目标距离, 因此耦合被完全消除, 互相关峰值线表现为一竖直线。由于模糊的存在, 多普勒调频率的估计表达式需要被修正为

$$\hat{k}_{\text{esti}} = \frac{\text{PRF}}{2(\delta - T_a \cdot M_{\text{amb}})} \quad (17)$$

其中 T_a 为数据获取时间。

由式(16)可知, 补偿函数的相位与模糊数 M_{amb} 有关, 而此时我们并不知道模糊数为多少, 因此首先需要对模糊数进行估计, 下一小节将给出一种模糊数的估计方法。

3.2 模糊数估计

当式(16)补偿采用的模糊数与实际模糊数不一致时, 互相关峰值位置与目标距离的耦合关系不能被完全补偿, 互相关峰值线依然为一斜直线。而当与实际模糊数一致时, 耦合被完全补偿, 互相关峰值线为一竖直线。若此时将互相关函数的幅度沿距离向叠加, 所得信号将最尖锐。因此, 通过比较叠加所得信号的平滑程度, 我们就可以估计出模糊数。信号熵值可以用来测量信号的平滑程度^[13]。信号 $x(t_a)$ 的熵值定义为

$$E(x) = - \int_{t_a} \frac{|x(t_a)|^2}{X_{eng}} \lg \frac{|x(t_a)|^2}{X_{eng}} dt_a \quad (18)$$

其中 $X_{eng} = \int_{t_a} |x(t_a)|^2 dt_a$ 。信号的熵值越小, 信号越尖锐。因此, 通过最小熵准则可以估计出模糊数

$$\hat{M}_{amb} = \min_{M_{amb}} \arg E(s) \quad (19)$$

图 2 给出某实测数据的模糊数估计结果。其中图 2(a)为补偿不同模糊数后的互相关峰值线, 可见随着模糊数的不同, 互相关峰值线的斜率也不同,

当补偿的模糊数与实际相符时, 互相关峰值线为一竖直线, 此时幅度沿距离向叠加, 所得信号最尖锐, 如图 2(b)所示。图 2(c)给出了图 2(b)信号的熵值, 由最小熵准则可知, 该实测数据的模糊数为 2。

由于模糊的存在, 有一种特殊情况就需要考虑。当互相关峰值线出现在平面边沿时, 一部分将可能发生折叠, 如图 3(a)所示。此时, 互相关峰值线的两部分将具有不同的模糊数, 这对模糊数的估计以及距离 Keystone 变换都不利。为了克服这种现象, 我们可以采用一个小技巧: 通过对 SAR 数据补偿一个 LFM 信号, 数据的调频率将发生变化, 互相关峰值线的位置也将发生变化。补偿的 LFM 信号的调频率为

$$k_{com} = \frac{PRF R_s}{T_a R_b} \quad (20)$$

因此, 补偿的 LFM 信号可以写为

$$H_1(f_a) = \exp \left[-j \frac{\pi}{k_{com}} f_a^2 \right] \quad (21)$$

补偿该信号之后, 互相关峰值线将被移到平面中间, 如图 3(b)所示。此时模糊数仅有一个值, 这对距离 Keystone 变换及模糊数估计都有利。当我们估计出补偿信号的调频率后, 原始信号的调频率为

$$\hat{k} = k_{com} k_{esti} / (k_{com} - k_{esti}) \quad (22)$$

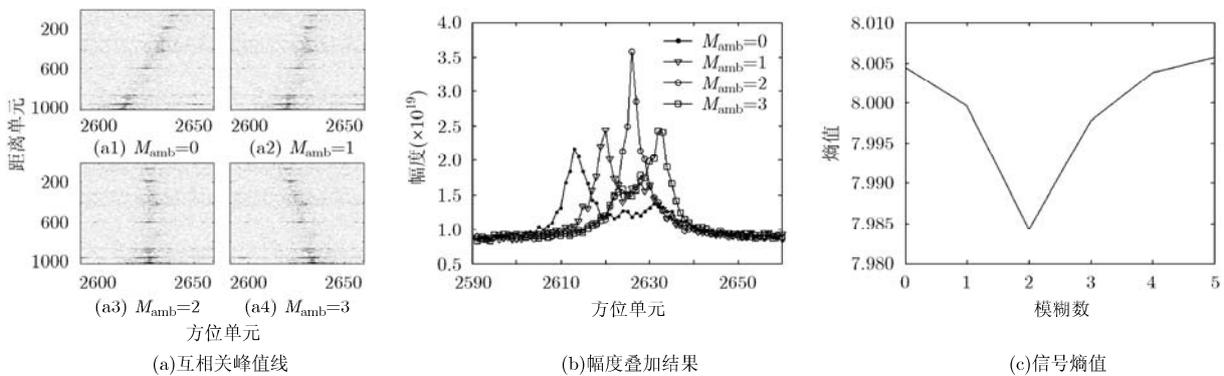


图 2 模糊数估计结果

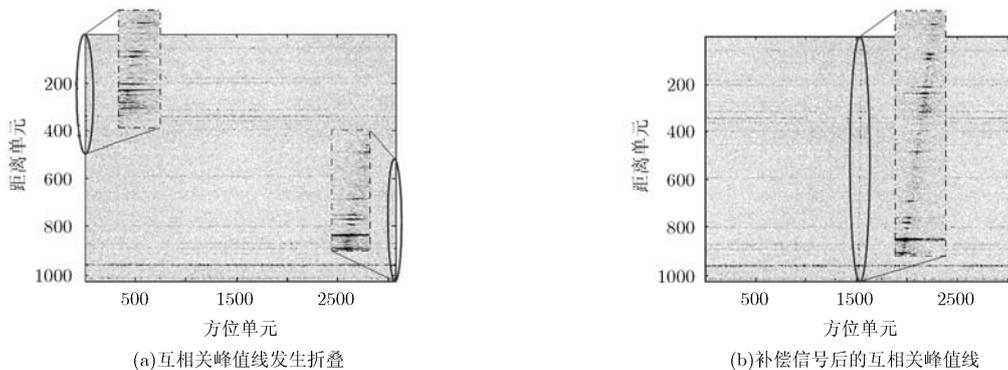


图 3 特殊情况

4 算法流程

改进的 SAC 调频率估计方法的处理流程如图 4 所示。图中 SAC 表示原始 SAC 算法中的基本操作，包括频谱拆分、搬移及取互相关，RKT 表示距离 Keystone 变换。首先判断互相关峰值线在互相关平面里的位置，这里我们采用 $M/8$ 作为分界线，其中 M 为 SAR 数据的方位采样点数。当互相关峰值位置 pos_{CPL} 满足 $M/16 < pos_{CPL} < 7M/16$ 时，认为不会发生折叠，否则对 SAR 数据补偿 LFM 信号式(21)；接着对数据进行方位频谱拆分、平移及共轭相乘，对所得的单频信号进行距离 Keystone 变换；然后采用 3.2 小节所提的模糊数估计方法估计模糊数，对单频信号补偿模糊数对应的相位并作方位傅里叶变换；最后将互相关函数的幅度沿距离向进行叠加，并根据所得峰值位置估计出多普勒调频率。

5 实验结果

为了验证本文所提算法的有效性，本节给出了

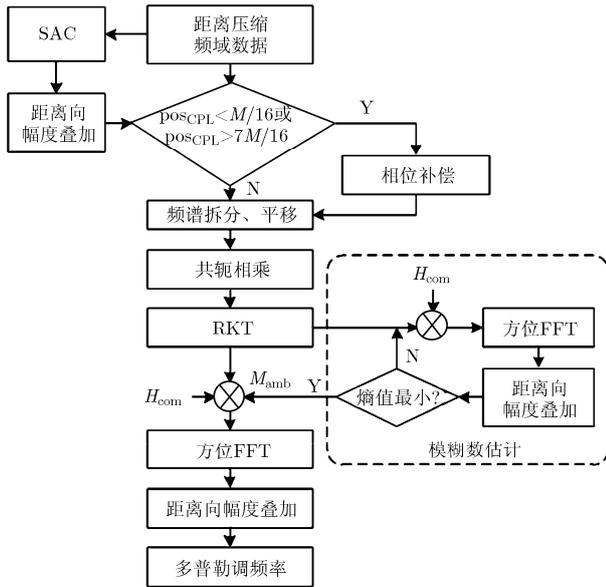


图4 本文算法流程

仿真和实测数据处理结果。仿真实验的主要参数如表 1 所示。仿真场景中设置了 256 个点目标，随机分布在 $1.6 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$ (距离向 \times 方位向)的范围内，如图 5 所示，点目标的幅度服从高斯分布。

表 1 仿真实验主要参数

中心频率	9.65 GHz	方位天线孔径	4.8 m
脉冲宽度	12 μs	PRF	3600 Hz
信号带宽	300 MHz	场景中心	680 km
采样频率	360 MHz	获取时间	2.94 s

仿真实验中雷达工作在聚束模式，采用全孔径成像算法进行方位预处理、距离脉压及 RCM 校正。接着对距离压缩后的数据采用本文所提方法进行多普勒调频率估计，并采用估计所得的调频率完成方位向的脉压。由于分辨率较高，仿真过程中调频率的估计进行了一次迭代。图 6 给出了仿真数据的模糊数估计结果，其中图 6(a)为补偿不同模糊数对应相位后互相关函数幅度的叠加结果，图 6(b)为其对应的熵值。由图可知，补偿不同的相位，叠加所得信号的平滑程度不同，其熵值也不同，当补偿所用的模糊数与实际模糊数一致时，信号最尖锐，其熵值也最小。通过熵值，我们可以确定仿真数据的模糊数为 3。

采用估计得到的调频率进行方位脉冲压缩，场景中一点目标 A 的成像结果如图 7 所示。为了比较，图 7 中同时给出了没有消除耦合的成像结果。多普勒调频率估计的过程中并没有考虑聚焦深度对互相关函数幅度叠加的限制。由仿真结果可知，在没有消除耦合的时候，调频率的估计精度将受到影响，估计精度下降，导致成像结果方位向出现散焦。而由图 7(b)，图 7(d)及所给出的方位向峰值旁瓣比(PSLR)及积分旁瓣比(ISLR)可以看出，消除耦合之后，方位向聚焦良好。这说明，消除耦合可以明显地提高多普勒调频率估计的精度。

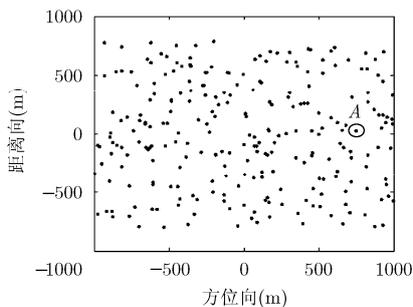
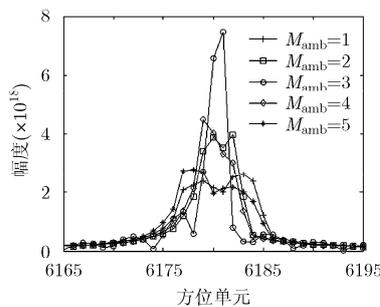
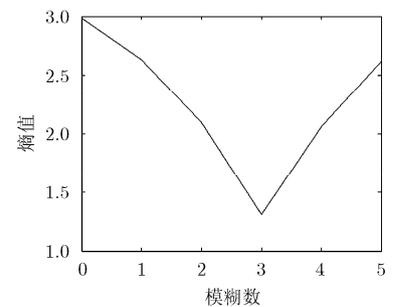


图5 仿真场景点目标分布



(a)互相关函数幅度叠加结果



(b)信号熵值

图6 模糊数估计结果

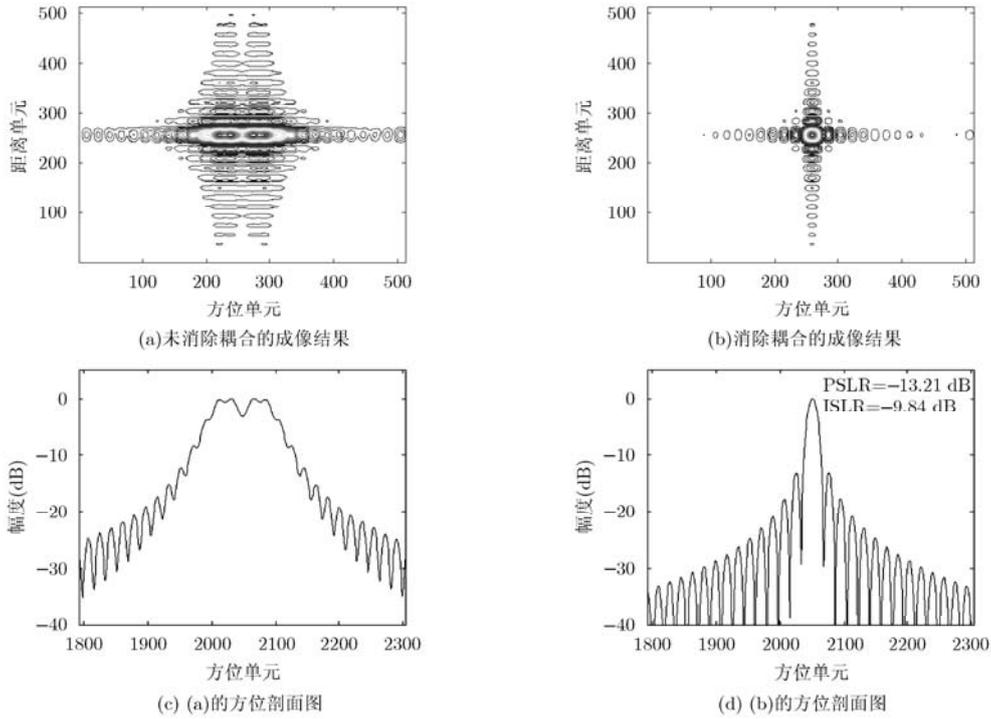


图 7 仿真成像结果

本文采用某机载聚束 SAR 实测数据来验证所提方法的有效性。表 2 给出了该机载 SAR 系统的主要参数，机载 SAR 运动补偿采用文献[14]的基于实测数据的运动补偿方法。由于分辨率较高，调频率估计过程中同样进行了一次迭代。图 2 已给出该数据的模糊数估计结果，可知其模糊数为 2。图 8 给出了该实测数据的处理结果。其中图 8(a)为未消除耦合的成像结果，可以看出方位向散焦严重。图 8(b)为消除耦合后的成像结果，可见图像聚焦良好。这同样证明了消除耦合对提高多普勒调频率估计精度的作用。

6 结论

针对星载聚束、滑动聚束 SAR 的多普勒调频率

表 2 机载试验 SAR 系统主要参数

波段	X 波段	方位天线孔径	1 m
脉冲宽度	12 μ s	PRF	312.5 Hz
信号带宽	600 MHz	场景中心	40.84 km
采样频率	800 MHz	获取时间	19.66 s

估计问题，本文对原始 SAC 算法进行了改进。将距离 Keystone 变换引入到调频率的估计中，有效去除了互相关峰值位置与目标距离间的耦合关系，消除了聚焦深度的限制。本文提出了一种基于最小熵准则的模糊数估计方法，解决了 SAC 算法由于没有时域补零而导致的模糊问题。相对于原始 SAC 算法，本文方法由于需要进行距离 Keystone 变换及模糊

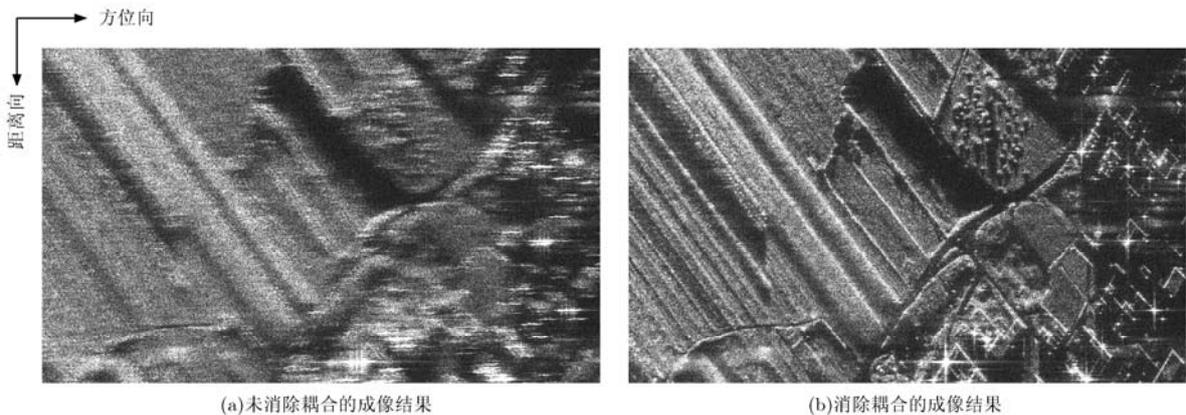


图 8 实测数据成像结果

数搜索, 估计效率有所降低, 但是从解决的问题及图像质量的提高方面来说, 该方法还是可行的。虽然本文方法针对的是聚束、滑动聚束 SAR 数据, 但其同样适用于条带 SAR, 以避免聚焦深度的限制以及时域补零操作。

参 考 文 献

- [1] Ian G C and Frank H W. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005, Ch. 13.
- [2] Walter G C, Ron S G, and Ronald M M. Spotlight Synthetic Aperture Radar—Signal Processing and Algorithms[M]. Boston, MA: Artech House, 1995, Ch. 6.
- [3] Berizzi F and Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(3): 1185–1191.
- [4] Piotr S and Krzysztof S K. Coherent mapdrift technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1505–1517.
- [5] Piotr S. Superconvergent velocity estimator for an autofocus coherent mapdrift technique[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 204–208.
- [6] Josef M, Alberto M, and Otmar L. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198–2214.
- [7] 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 and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770–780.
- [8] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, *et al.* Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993–2004.
- [9] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Wang Yong, *et al.* Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1036–1040.
- [10] Geir E and Yngvar L. Efficient full aperture processing of TOPS mode data using the moving band chirp z-transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3688–3693.
- [11] Jørgen D. A new frequency domain autofocus algorithm for SAR[C]. IGARSS'91, Espoo, Finland, June 3–6, 1991: 1069–1072.
- [12] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Xia Xiang-gen, *et al.* Robust ground moving target imaging using deramp-keystone processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 966–982.
- [13] Li Wen-chao, Yang Jian-yu, Huang Yu-lin, *et al.* A geometry-based Doppler centroid estimator for bistatic forward-looking SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 388–392.
- [14] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, Wu Ren-biao, *et al.* Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870–2883.

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2维自适应等。