

基于回波的多子带SAR系统载频误差补偿方法研究

方素娟^① 李光祚^{*①} 张益霏^② 郁文贤^① 吴一戎^{①②}

^①(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 为了提高SAR系统的分辨率,在距离向可以通过发射一系列不同载频的窄带信号,通过信号处理的方法实现带宽合成,进而得到等效大带宽信号对应的分辨率。为有效实现带宽合成,要求不同子带回波的载频步进值严格已知,这在某些实际应用环境中,并不能总是满足,因而需要从回波数据中直接估计步进值。该文提出一种基于子带回波数据的载频误差估计与补偿方法。该方法基于压缩后子带回波数据多普勒相位与载频的关系,对子带图像进行干涉处理,提取差分相位,并利用差分相位沿方位向的冗余进行相干积累,获得以实际载频步进值为振荡频率的单频信号,进而通过频谱分析方法得到误差频率,并对子带间相位误差进行补偿。通过该方法,能够实现子带信号的相干合成,提升了SAR数据成像质量。实验数据的处理结果验证了该方法的有效性。

关键词: 高分宽幅SAR; 带宽合成; 子带频率误差; 相位差分; 相干积累

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2834-07

DOI: [10.11999/JEIT180079](https://doi.org/10.11999/JEIT180079)

Method for Frequency Error Compensation Based on Raw Data for SAR System with Bandwidth Synthesis

FANG Sujuan^① LI Guangzuo^① ZHANG Yifei^② YU Wenxian^① WU Yirong^{①②}

^①(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To improve the resolution of the SAR system, radar bandwidth should be improved. By means of synthetic bandwidth, wide bandwidth can be achieved with less hardware complexity. For frequency band synthesis SAR system, frequency difference should be accurately known. However, in the real measurement situation, the frequency difference may drift and should be estimated based on the raw data. In this manuscript, an effective method is proposed to estimate the frequency difference error and compensate the phase error. Based on the relation between the interferometric phase of subband echoes and frequency difference, the frequency difference drift is estimated. The interferometry between subband images yields the interferometric image. It is observed that in the yielded image, phase varies with range and the slope is proportional to the frequency difference. Also, the phase is redundant along azimuth. Based on the redundancy along azimuth, a new vector is formed. The vector is a sinusoidal signal with the frequency value corresponding to the relative range shift. Frequency analysis yields the value of the frequency difference error. Based on the proposed method, the SAR image is improved. The effectiveness of the method is verified by processing the real SAR data.

Key words: High Resolution and Wide Swath SAR (HRWS-SAR); Bandwidth synthesis; Frequency difference drift; Interferometric phase; Coherent accumulation

1 引言

作为一种主动成像传感器,合称孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)在对地高分辨率观测

中具有重要应用价值。SAR系统通过发射宽带雷达信号获取距离向高分辨率,通过合成孔径技术获取方位向高分辨率^[1,2]。为了提高SAR系统的分辨率,要求发射的雷达信号具有大带宽。采用带宽合成的方法,通过发射一系列不同载频的窄带信号,对接收回波进行信号处理能够获得等效带宽的提

收稿日期: 2018-01-19; 改回日期: 2018-07-24; 网络出版: 2018-08-03

*通信作者: 李光祚 hnyzlgz@163.com

升,进而实现距离向高分辨率成像,同时降低了系统硬件复杂度^[3-6]。在Radarsat-2卫星SAR系统的超精细(Untrafine)成像模式中,采用了称之为“pulse-stitching”技术的带宽合成技术,通过在一个脉冲重复间隔内,连续发射两个带宽为50 MHz的信号,在地面站通过信号处理得到100 MHz带宽。因此星上系统瞬时带宽与ADC采样速率均能降低为原来一半。不同于传统步进频SAR系统,该系统在一个脉冲周期内发射所有子带信号,因而能够保证方位向高分辨率所需的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF),适合星载高分宽幅SAR(High Resolution Wide Swath SAR, HRWS-SAR)系统^[7]。

传统的带宽合成方法有时域带宽合成^[8,9]、频域带宽合成^[10]以及去斜后带宽合成方式^[11]。所有带宽合成方法中,都需要子带载频差精确值作为输入条件。对于一个实际的SAR系统,由于工作环境的变化,其工作载频可能存在漂移。而对于分布式SAR系统或者星载SAR系统的接收端,或者某些电子侦察条件下的信号接收,回波信号接收端可能存在载频误差。这导致子带间载频步进值无法精确获知,造成了带宽合成时子带间存在相位误差,合成得到的高分辨率距离成像(High Range Resolution Profile, HRRP)质量会退化^[12]。

针对该问题,面向星载SAR高分辨率成像质量的提升,本文提出了一种基于子带回波数据的步进频率误差估计方法,并基于该估计结果实现子带间相位误差的补偿。该方法针对去斜接收的子带回波数据,首先分别对各个子带信号进行距离与方位压缩,得到相应的子带图像。然后,对于相邻的子带图像,通过干涉处理得到干涉图。根据文中的理论推导可知,在该干涉图中,干涉相位随距离单元呈线性关系,且该线性相位的斜率与载频差成一一对应关系。因而,提取该干涉相位,以该干涉相位构造一个单位幅度的信号向量,对该信号向量进行频谱分析即可得到载频差。在干涉图像中,干涉相位在方位向上是冗余的,因而为使得所提取的干涉相位受噪声影响更小,可以在方位向进行相干累加,提升候选点的信噪比(SNR),这是算法能得到高精度估计结果的关键。此外,考虑到去斜接收回波信号的采样率一般都小于信号带宽,而载频步进值与带宽近似,因而估计结果可能存在模糊。解决模糊的办法是先将数据按一个预设载频步进值做移频预处理,对多普勒相位进行一定的补偿,使得干涉相位变化频率降低到小于回波采样率,因而频谱分析就可以得到不存在模糊的结果。

文章后续部分的安排如下:第2节以两个子带

为例,对于去斜接收条件下的回波数据,通过理论分析给出带宽合成过程中步进频率误差对距离向成像的影响,并分析了所需的误差补偿精度;第3节给出了基于干涉相位的步进频率误差的估计方法,并分析了强点目标信号选择、干涉相位方位向冗余性的利用和频率模糊的消除等实际处理中需要考虑的问题;第4节是实验验证与分析部分,给出了实验数据的处理结果,证明了该方法对提升图像质量的意义;最后是总结全文。

2 多子带SAR系统带宽合成误差模型

为推导简明起见,这里以两个子带SAR带宽合成为例进行分析,多个子带的情况完全相同。对于大带宽雷达系统,一般可以采用去斜接收以压缩回波信号带宽。忽略无关紧要的幅度项,去斜接收的回波可以表述为

$$s_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi K_r(t_d - t_0)(t - t_0)] \cdot \exp[j2\pi(f_c + f_1)(t_d - t_0)] \cdot \exp[-j\pi K_r(t_d - t_0)^2] \quad (1)$$

$$s_2(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi K_r(t_d - t_0)(t - t_0)] \cdot \exp[j2\pi(f_c + f_2)(t_d - t_0)] \cdot \exp[-j\pi K_r(t_d - t_0)^2] \quad (2)$$

式中, t 为距离向时间, K_r 为线性调频信号的调频率, t_0 为目标延迟时间, t_d 为去斜参考延迟时间, f_c 为子带信号初始载频, f_1 为第1个子带步进频率值, f_2 为第2个子带步进频率值, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数,子带信号带宽 $B_r = K_r T_p$ 。3个指数项分别为线性相位项、多普勒相位项和残余视频相位(Residual Video Phase, RVP)项,由于RVP项可以近似认为与快时间 t 无关,可以通过相位相乘的方法进行补偿^[12]。从线性相位项可以看出,如果参考距离延时 t_d 与目标实际距离延时 t_0 较接近,则信号为相对低频的单频信号。在RVP补偿后,对信号进行快时间的傅里叶变换得到距离压缩后结果,忽略无关紧要的常数相位与幅度,有

$$s_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi K_r(t_d - t_0)(t - t_0)] \cdot \exp[j2\pi(f_c + f_1)(t_d - t_0)] \quad (3)$$

$$s_2(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi K_r(t_d - t_0)(t - t_0)] \cdot \exp[j2\pi(f_c + f_2)(t_d - t_0)] \quad (4)$$

式(3)和式(4)中,距离压缩后的信号显示不同子带中目标处于同一频率位置,只是携带的多普勒相位随着载频步进有所变化。带宽合成要完成的工作即是上述两个信号的相干合成,使分辨率对应的等效带宽提升为原来的两倍。设 $f_2 > f_1$,由于 $f_d \ll f_c$,因而可以认为同一目标在两个子带上频率响应特性一致。不失一般性,假设 $f_2 - f_1 = B_r$,即载频步进值为带宽 $f_d = B_r$ 。根据线性调频信号的时频对应关系,对式(3)和式(4)做距离向的时频变量代换,即 $f_r = K_r t_r$,得到频域表达信号:

$$s_1(f_r) = \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp[j2\pi(f_c + f_1)(t_d - t_0)] \quad (5)$$

$$s_2(f_r) = \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_r}\right) \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp[j2\pi(f_c + f_2)(t_d - t_0)] \quad (6)$$

两个子带覆盖同一频段,根据预设的载频步进值 f'_d 进行移频操作,并对移频后的频域信号相参叠加得到:

$$s_{\text{syn}}(f_r) = \text{rect}\left[\frac{f_r + \frac{f'_d}{2}}{B}\right] \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c + f_1 + \frac{f'_d}{2}\right)(t_d - t_0)\right] + \text{rect}\left[\frac{f_r - \frac{f'_d}{2}}{B}\right] \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c + f_2 - \frac{f'_d}{2}\right)(t_d - t_0)\right] \quad (7)$$

若 $f_d = f'_d$,则两个子带在频率连接处相位保持连续,能够完全相干合成得到:

$$s_{\text{syn}}(f_r) = \text{rect}\left[\frac{f_r}{2B}\right] \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c + \frac{f_1 + f_2}{2}\right)(t_d - t_0)\right] \quad (8)$$

式(8)表明,如果载频步进值不存在误差,相干合成后的等效信号带宽提升为单一子带带宽的两倍。

在某些特殊情况下,预设的载频步进值与实际工作过程中的载频步进值之间存在差异,表示为: $f'_d = f_d + \Delta f_d$,此时,由于频率存在误差,导致连接处相位不连续,如式(9)所示。

$$s_{\text{syn}}(f_r) = \text{rect}\left[\frac{f_r + \frac{f'_d}{2}}{B}\right] \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c + f_1 + \frac{f'_d}{2}\right)(t_d - t_0)\right] + \text{rect}\left[\frac{f_r - \frac{f'_d}{2}}{B}\right] \exp\left[j2\pi K_r(t_d - t_0)\left(\frac{f_r}{K_r} - t_0\right)\right] \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c + f_1 + \frac{f'_d}{2}\right)(t_d - t_0)\right] \cdot \exp[j2\pi\Delta f_d(t_d - t_0)] \quad (9)$$

其中,两子带间相位误差为

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta f_d(t_d - t_0) \quad (10)$$

若参考去斜信号的延迟时间选择为测绘带中心距离点的延迟时间,则误差相位沿距离向的分布随与参考点的距离而线性变化,在最近斜距与最远斜距两端点处误差相位最大。写成相位误差与测绘带内不同斜距点的关系为

$$\Delta\phi = \frac{4}{c}\pi\Delta f_d\Delta R \quad (11)$$

ΔR 为目标与中心参考点的距离, $\Delta R \in [-L/2, L/2]$, L 为斜距变化范围。误差相位是斜距变化范围内不同距离延时的线性函数。

由于存在相位误差时,带宽合成后信号的解析表达式求取并不方便,且对问题的描述不够直观,这里通过仿真给出相位误差对带宽合成后1维距离成像的影响。选取脉冲压缩后的峰值旁瓣比(Peak SideLobe Ratio, PSLR)与积分旁瓣比(Integrated

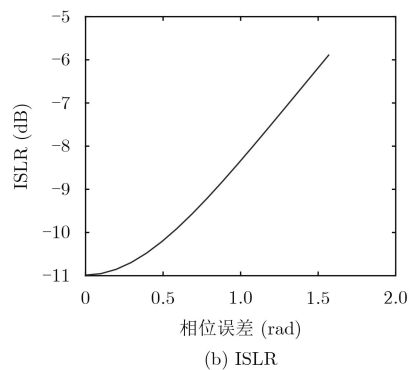
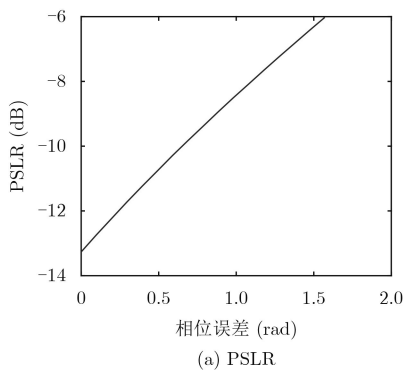


图1 距离脉压效果评估指标随相位误差变化情况

SideLobe Ratio, ISLR)作为评估指标。图1给出了两指标随相位误差的变化关系,可以看出,存在子带间相位误差时,带宽合成后的脉冲压缩质量退化严重。

根据图1,为使获得的合成带宽距离向成像结果无明显质量退化,这里假设能接受的PSLR与ISLR的退化均小于3 dB,则要求相位误差小于 $\pi/4$,此时有

$$\Delta f_d L \leq \frac{c}{8} \quad (12)$$

这里给出频率误差与斜距变化范围的关系可以看出,载频误差对图像质量的影响在高分宽幅成像中比较严重,对于典型的星载X波段成像,测绘带距离幅宽一般可到达20 km,此时要求频率误差小于2 kHz。

3 误差估计与补偿

根据第2节的分析,可以看出相位误差是距离空变的,因而无法通过特显点估计的方法进行相位误差补偿。这里基于子带间干涉图像相位,利用相位沿方位向的冗余性,提出了一种基于回波数据的载频步进误差估计与子带间相位误差补偿方法,该方法能够对距离空变的相位误差进行一致补偿。

3.1 基于子带间干涉相位的误差估计

这里依然以两个子带为例进行分析,多子带情况类似。对于各个子带接收到的回波,在经过距离压缩和距离徙动校正后,点目标回波信号参考函数可以表述为

$$\begin{aligned} S_{r1}(t_r, t_a) = & \bar{\sigma} \cdot \text{sinc} \left[B_r \left(t_r - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \\ & \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{c} f_1 \right) \\ & \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi f_1}{c} \frac{V^2 t_a^2}{2R_0} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S_{r2}(t_r, t_a) = & \bar{\sigma} \cdot \text{sinc} \left[B_r \left(t_r - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \\ & \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{c} f_2 \right) \\ & \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi f_2}{c} \frac{V^2 t_a^2}{2R_0} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\bar{\sigma}$ 为与目标散射特性和系统参数有关的常数, t_r 和 t_a 分别表示距离向快时间和方位向慢时间, V 为雷达平台等效速度。其它参数与第2节中定义相同。由于本文着重于基于干涉相位的子带间相位误差和频率误差估计,其它无关紧要的常数幅度项在这里不需要考虑,且假设为正侧视成像。

根据式(13)与式(14),二者携带的延迟相位项和多普勒相位存在差异。首先根据MapDrift(MD)算法对两子带信号进行方位向自聚焦压缩,可以得到2维压缩后的点目标冲激响应^[13]。

$$\begin{aligned} S_{r1}(t_r, t_a) = & \sigma \cdot \text{sinc} \left[B \left(t_r - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \\ & \cdot \text{sinc} (B_a t_a) \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{c} f_1 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} S_{r2}(t_r, t_a) = & \sigma \cdot \text{sinc} \left[B \left(t_r - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \\ & \cdot \text{sinc} (B_a t_a) \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{c} f_2 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, σ 为无关紧要的常数幅度项, B_a 为方位向处理带宽。从式(15)与式(16)可以看出,方位向的压缩消除了两子带间不同的2次相位,同时获得了方位向的脉冲压缩增益,使得后面更容易选取到具有高能量的特显强点。

对式(15)与式(16),进行干涉操作,即将一个子带图像信号的复共轭与另一子带图像相乘,得:

$$\begin{aligned} S_{in}(t_r, t_a) = & S_1(t_r, t_a) \times S_2^*(t_r, t_a) \\ = & |\sigma|^2 \text{sinc}^2 \left[B \left(t_r - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \text{sinc}^2 (B_a t_a) \\ & \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{c} \Delta f \right) \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $\Delta f = f_1 - f_2$ 为两子带回波的实际载频差即载频步进值。在式(17)中,2维点散布函数(2D-Point Spread Function, 2D-PSF)峰值位于 $(2R_0/c, 0)$,该峰值点对应的相位为 $4\pi R_0 \Delta f / c$ 。相位项 $4\pi R_0 \Delta f / c$ 决定应与载频步进值 Δf 和最近斜距 R_0 。干涉操作消除了与点目标特性相关的复散射系数的相位项,在干涉图像中,所得的相位理论上只与其最近斜距和载频差有关。沿方位向分布、具有同一最近斜距的所有点目标,具有相同的干涉相位,即干涉图像中相位沿方位向是冗余的。

在干涉图中,从测绘带最近端至最远端,逐距离单元选取具有较强能量点目标2D-PSF信号的峰值点,构造一沿距离向分布的信号向量

$$\mathbf{S}_{in}(\Delta f) = \mathbf{A}_i \exp \left[-j \frac{4\pi R_i}{c} \Delta f \right] \quad (18)$$

$\mathbf{A}_i$ 表示无关紧要的幅度项, $R_{\text{ref}} - L/2 \leq R_i \leq R_{\text{ref}} + L/2$ 。为抑制提取向量幅度起伏对频谱分析的影响,可以只提取相位,再构造单位模向量,即 $\mathbf{A}_i \equiv 1$ 。从式(18)可以看出,构造的信号是以 R_i 为自变量、频率为 $2\Delta f / c$ 的单频信号。对式(22)直接

进行频谱分析,如快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)即可得到该信号的频率。根据估计得到的频率,构造子带间相位误差补偿函数为

$$h(R_i) = \exp \left[j \frac{4\pi R_i}{c} \Delta f \right] \quad (19)$$

3.2 实际工程应用中的考虑

在3.1节中,根据干涉图像中点目标2D-PSF的分析,给出了基于子带图像干涉相位的载频差估计与相位误差补偿方法。在实际回波信号处理中,选取的点目标峰值信号包含了噪声,使得提取的相位可能存在误差,提高信噪比是保证估计精度的关键,为此还应该考虑如下几个问题:

(1) 强点目标选择:选择具有较大能量的点目标,且需要在2维窗中去除其旁瓣,防止其旁瓣继续被当作孤立强点被选入。

(2) 沿方位向相干积累:干涉图中相位沿方位向的冗余,使得在同一距离单元的不同方位单元的点目标2D-PSF峰值点可以相干积累,进而提高信噪比。

(3) 频率模糊消除:考虑到在去斜接收SAR系统中,回波信号采样率往往小于发射信号带宽,因而存在回波采样率 F_s 小于 Δf 的情况,直接FFT得到的结果是模糊的。对于干涉图像,可以取初始补偿频率 $f_{di} = B_r$,对干涉图像进行补偿得到

$$\begin{aligned} S'_{in}(t_r, t_a) &= S_{in}(t_r, t_a) \times \exp(j2\pi f_{di} t) \\ &= |\sigma|^2 \operatorname{sinc}^2 \left[B_r \left(t_r - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \operatorname{sinc}^2 (B_a t_a) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi R_0}{c} (\Delta f - f_{di}) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

这样式(18)对应的频率估计值小于采样频率,频谱分析给出的结果将不存在模糊。

4 实验与结果

本实验回波数据由一套X波段机载SAR实验系

统采集。实验中,用该数据模拟SAR系统同时发射两个相同带宽的子带信号。在模拟实验中,子带信号带宽均为100 MHz,子带信号采样率为120 MHz。预设的两子带间载频差为85 MHz,实际的载频差为80 MHz。实验中的带宽合成方法采用频域合成方法。这里由于实验条件限制,并没有直接获取去斜接收的回波数据。

采用文中提出的估计方法,子带成像图进行干涉后,通过逐距离单元选取强点目标、方位向相干积累得到式(18)信号向量,并对其采用FFT得到其频域信号如图2(a)所示。频谱信号在某一频点具有非常高的幅度值,而其它频率成分的幅度值则非常低,这说明构造所得的信号为线性相位信号,信噪比足够高。抽取该特显频点局部放大在图2(b)中,得到估计的载频差约为80.000766 kHz,与真实值相差766 Hz,相对误差控制在 1×10^{-5} 左右。

根据估计的结果,对两个子带信号进行带宽合成处理。采用Chirp Scaling算法(CSA)对合成后信号进行成像^[14]。图3中给出了成像实验结果对比。图3(a)和图3(b)分别给出了采用预设载频差与估计载频差带宽合成成像结果。从方框区域对比可以看出,图3(b)中图像在距离向压缩效果有改善,旁瓣和栅瓣得到了有效抑制,亦即ISLR和PSLR得到了改善。对框选区域进行放大至图3(c)和图3(d)中,可以明显分辨出相位误差补偿后带宽合成的距离向成像质量改善。由于图像场景中没有孤立特显点可以用于标定,这里没有对ISLR与PSLR进行量化比对。

抽取图3(c)和图3(d)中框选区域的同一方位向时刻的一条距离线,得到图4中的距离剖面图对比。可以看出,精确估计补偿后,图像聚焦后的峰值能量更高,而旁瓣下降更快。

为了验证本文所提方法的稳健性,进行了方位向严重散焦情况下的估计实验。实验结果如图5所示。同样的数据,实验中在方位向加入了2次相位误差,从图5(a)中可以看出,图像在方位向完全散

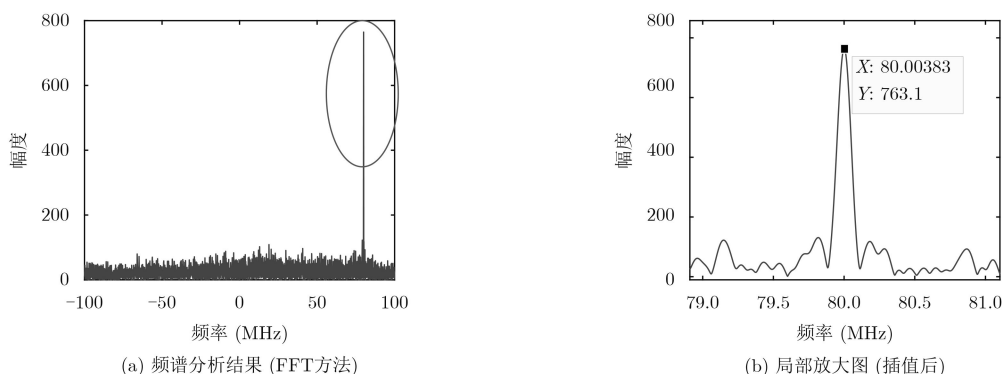


图2 载频差估计实验结果

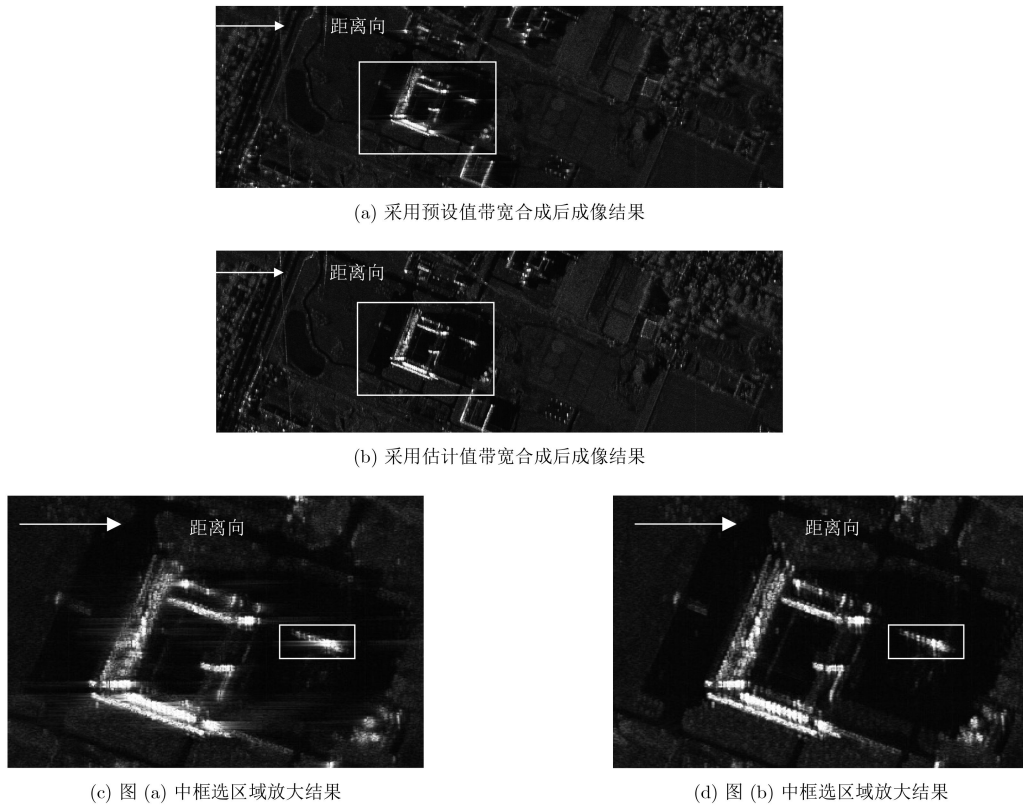


图3 成像实验结果对比

焦。根据文中提出的方法，对构造的单位向量进行FFT操作，其结果如图5(b)所示。比对图2(a)可以看出，即使是在存在较大方位向散焦的情况下，

本文方法估计所得的载频依然非常准确，证明了本文方法具有较好的稳健性。

5 结束语

本文面向基于带宽合成技术的SAR系统成像质量的提升，提出了一种有效的载频差估计以及带宽合成相位误差补偿方法。该方法基于子带图像信号干涉处理后，得到沿方位向冗余、沿距离向线性变化的干涉相位。基于线性干涉相位，可以估计载频误差。基于方位向冗余性，可以通过相干积累保证估计精度。该算法具有较高的估计精度和稳健的估计性能。应用于带宽合成SAR系统中，能显著提高最终成像质量。实验数据的处理结果，证明了本文

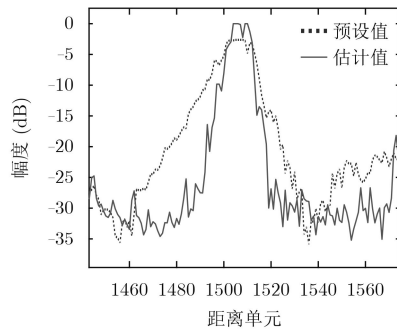
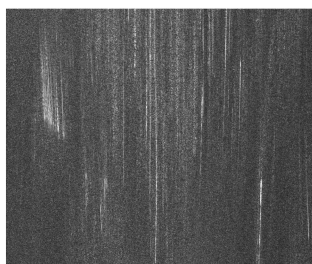
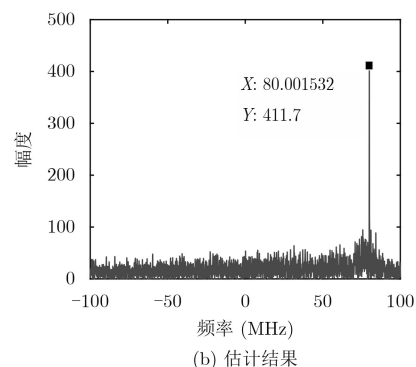


图4 距离剖面对比



(a) 严重散焦图像



(b) 估计结果

图5 方法稳健性实验验证

方法的有效性,对高分辨率SAR成像质量提升具有重要的参照意义。

参 考 文 献

- [1] RICHARDS M. Fundamentals of Radar Signal Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2005: 139–147.
 - [2] CUMMING I G and WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005: 33–37.
 - [3] SCHIMPF H, WAHLEN A, and ESSEN H. High range resolution by means of synthetic bandwidth generated by frequency-stepped chirps[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(4): 1346–1348. doi: [10.1049/el:20030829](https://doi.org/10.1049/el:20030829).
 - [4] ESSEN H, SCHIMPF H, and WAHLEN A. Improvement of the millimeterwave SAR MEMPHIS for very high resolution[R]. FGAN-FHR Technical Report, Werthhoven, 2003.
 - [5] 王沛, 王翔宇, 李宁, 等. 超高分辨率机载SAR高精度子带拼接与处理方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(10): 2325–2331. doi: [10.11999/JEIT170093](https://doi.org/10.11999/JEIT170093).
WANG Pei, WANG Xiangyu, LI Ning, *et al.* Investigation on high precision sub-band synthesizing and processing method for very-high-resolution airborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2325–2331. doi: [10.11999/JEIT170093](https://doi.org/10.11999/JEIT170093).
 - [6] 李光祚, 默迪, 王宁, 等. 一种新的高重频宽带相干激光雷达系统研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(3): 525–531. doi: [10.11999/JEIT170479](https://doi.org/10.11999/JEIT170479).
LI Guangzuo, MO Di, and WANG Ning, *et al.* A novel coherent ladar system with high repetition frequency and wide bandwidth[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(3): 525–531. doi: [10.11999/JEIT170479](https://doi.org/10.11999/JEIT170479).
 - [7] THOMPSON A A and MCLEOD I H. The RADARSAT-2 SAR processor[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(3): 336–344.
 - [8] WEHNER D R. High Resolution Radar[M]. Norwood, MA: Artech House, 1995.
 - [9] LOAD R T and INGGS M R. High resolution SAR processing using stepped-frequencies[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Singapore, 1997: 490–492.
 - [10] INGGS M R, VANZYL M W, and KNIGHT A. A simulation of synthetic range profile radar[C]. IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing, Cape Town, South Africa, 1992: 1–16.
 - [11] WILKINSON A J, LORD R T, and INGGS M R. Stepped-frequency processing by reconstruction of target reflectivity spectrum[C]. IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing, Cape Town, South Africa, 1998: 101–104.
 - [12] LEE G, SUN W, SUN G, *et al.* A new estimation method for SAR frequency difference drift base on frequency band synthesis[C]. IET International Radar Conference, Xi'an, China, 2013: 1–6.
 - [13] CARRAR G, GOODMAN R S, and MAJEWSKI R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Norwood, Massachusetts, Artech House, 1995: 501–506.
 - [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 204–206.
- 方素娟: 女, 1970年生, 研究员, 研究方位为合成孔径雷达系统、雷达信号处理。
- 李光祚: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达与合成孔径激光雷达信号处理。
- 张益霏: 男, 1983年生, 副研究员, 研究方向为雷达系统、高分对地观测地面应用。
- 郁文贤: 男, 1964年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达目标识别、遥感信息处理、融合导航定位技术。
- 吴一戎: 男, 1963年生, 博士, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为合成孔径雷达、遥感卫星地面处理与应用系统技术等。