

## 步进频率 SAR 快时间多普勒效应补偿新方法

王鹏宇 宋千 金添

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 步进频率信号的长相参积累时间使传统 SAR 的“走-停-走”假设对步进频率 SAR 不再适用, 因此由平台运动而引入的快时间多普勒效应就不能忽略。该文提出了一种基于图像波数域的快时间多普勒补偿方法, 其通过二维傅里叶变换及反变换实现快时间多普勒补偿, 与基于回波的补偿方法相比, 新方法在保持补偿精度不变的基础上, 显著降低了计算量, 更符合步进频率 SAR 系统的实际应用要求。

**关键词:** SAR; 步进频率; 快时间多普勒效应; 波数域补偿

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2053-06

## A New Fast-time Doppler Effect Compensation Method Applied to Step Frequency SAR System

Wang Peng-yu Song Qian Jin Tian

(Institute of Electronic Science and Engineering National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The “go-stop” assumption applied to the conventional SAR can not be used in the SAR system using step frequency waveforms. For the reason that the time spent on the coherent processing is too long. Accordingly the fast-time Doppler effect induced by the movement of the radar platform can not be neglected as usual. In this paper, a new wavenumber domain based on fast-time Doppler effect compensation method is proposed. This new method is implemented through 2D-FFT and 2D-IFFT. Comparing with the time domain compensation method, the new method has almost the same compensation precision but with less processing time, which is more beneficial to the real-time compensation in the practical step-frequency SAR system.

**Key words:** SAR; Step frequency; Fast-time Doppler effect; Wavenumber domain compensation

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)借助合成孔径原理实现方位向的高分辨率, 而距离向分辨率的提高一般是借助大带宽信号来实现。在现有的硬件水平约束下, 脉间频率步进波形是一种工程实用、方便灵活的宽带信号形式。脉间频率步进波形是一组载频以固定频率增量变化的单频脉冲串<sup>[1]</sup>, 相当于目标信号在频域的采样, 通过逆傅里叶变换(IFFT)处理后可获得高分辨一维距离像<sup>[2,3]</sup>。由于大带宽的步进频率信号(带宽  $B = N\Delta f$ , 其中  $N$  为脉冲个数,  $\Delta f$  为频率步进增量)是以时间分割方式发射和接收的, 合成一维距离像所需的相参积累时间比较长, 因此雷达与目标之间的相对运动会产生速度-多普勒耦合, 在此称之为“快时间多普勒效应”。基于“走-停-走”假设的传统SAR, 其一般不考虑快时间多普勒效应的影响<sup>[4]</sup>; 但由于步进频率信号的相参积累时间长, 这使得传统“走-停-走”假设对步进频率SAR不再适用, 因此需要考虑快时间多普勒效应的影响, 而且还要

对其进行补偿<sup>[5-7]</sup>。本文从步进频率SAR的理想点目标回波着手分析快时间多普勒效应的影响, 提出了基于图像波数域的补偿新方法, 并给出了相应的信息处理流程。与基于回波的补偿方法相比, 新方法具有补偿精度高、速度快的优点, 能够有效校正目标图像的散焦, 提高信噪比, 有利于目标高精度的定位与识别。

### 2 快时间多普勒效应分析

以正侧视 SAR 为例研究步进频率 SAR 的快时间多普勒效应。载机沿航线以速度  $V$  匀速运动, 在一个合成孔径时间内雷达发射  $M$  组频率步进脉冲串信号, 每组脉冲串含有  $N$  个子脉冲, 子脉冲重复周期为  $T_r$ 。在第  $K$  个方位向采样点处建立点目标回波模型, 如图 1 所示。其中  $\Delta r = VT_r$ , 为脉冲重复周期内雷达平台的距离走动量;  $R_{k0}$  是雷达发射第 1 个脉冲时与目标之间的初始距离, 对应的频率为  $f_0$ , 此时的方位角为  $\theta_k$ ;  $R_{ki}$  是雷达发射第  $i$  个脉冲时与目标之间的距离, 对应的频率为  $f_i$ , 并且假设发射和接收信号在瞬间完成。

对第  $K$  组步进频率脉冲串而言, 第  $i$  个子脉冲

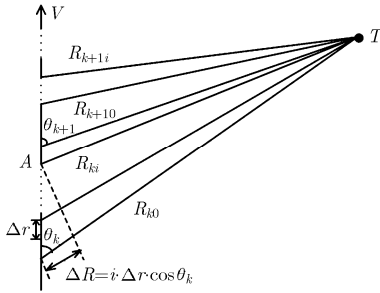


图1 实际机载 SAR 回波模型

经正交混频器输出得到的回波信号为<sup>[8]</sup>

$$S_{ki} = \exp[-j4\pi f_i R_{ki} / c] \quad (1)$$

其中  $k = 1, 2, \dots, M$  为脉冲组序号,  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$  为脉冲串内的子脉冲序号,  $c$  为光速。

传统 SAR 的信息处理假定雷达与目标相对静止(即  $R_{ki} \approx R_{k0}$ ), 那么第  $K$  组脉冲串回波可以表示为

$$S_k = \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left[-j2\pi f_i \frac{2R_{k0}}{c}\right] \quad (2)$$

对式(2)进行 IFFT, 得到点目标的复数一维距离像, 忽略常数项得

$$H_k(l) = \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left[j\frac{2\pi}{N}\left(l - \frac{R_{k0}}{\rho_r}\right)\right] \quad (3)$$

对式(3)取模归一化后得

$$|H_k(l)| = \left| \frac{\sin\left[\pi\left(l - \frac{R_{k0}}{\rho_r}\right)\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N}\left(l - \frac{R_{k0}}{\rho_r}\right)\right]} \right| \quad (4)$$

其中  $l = 0, 1, \dots, N-1$  为目标点的径向距离位置,  $\rho_r = c/(2N\Delta f)$  为距离分辨率。当  $l = [R_{k0}/\rho_r]$  (“ $[ ]$ ”为邻近极大值取整)时, 式(4)达到最大, 对应的距离为  $R_{k0} = l \cdot \rho_r$ , 至此得到了目标的合成距离像。

对步进频率 SAR 而言, 合成距离像的相参处理时间内雷达与目标之间的相对运动不可忽略(即  $R_{ki} \neq R_{k0}$ )。根据图 1,  $R_{ki}$  与  $R_{k0}$  有下式成立:

$$R_{ki} = (R_{k0} - i\Delta r \cos \theta_k) \sqrt{1 + \left(\frac{i\Delta r \sin \theta_k}{R_{k0} - i\Delta r \cos \theta_k}\right)^2} \quad (5)$$

对于机载 SAR 而言,  $R_{k0}$  通常比较大, 满足  $R_{k0} \gg i \cdot \Delta r$  ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ ), 进而使得  $i \cdot \Delta r \cdot \sin \theta_k / (R_{k0} - i \cdot \Delta r \cos \theta_k) \ll 1$  成立, 因此可将式(5)近似为

$$R_{ki} \approx R_{k0} - i \cdot \Delta r \cos \theta_k \quad (6)$$

将式(6)带入式(1)得到点目标回波的近似表达式

$$S_{ki} \approx \exp(-j4\pi f_0 R_{k0} / c) \exp(-j4\pi i \Delta f R_{k0} / c) \cdot \exp(j4\pi i f_0 \Delta r \cos \theta_k / c) \exp(j4\pi i^2 \Delta f \Delta r \cos \theta_k / c) \quad (7)$$

可以看出, 固定点目标在某方位向采样点处的回波函数包含 4 项: 第 1 项是常数, 只与  $R_{k0}$  有关; 目标点的距离信息包含在第 2 项的相位信息中, 也只与  $R_{k0}$  有关; 第 3 项引入的相位是一次的速度与多普勒耦合, 它造成目标距离像的平移, 与角度  $\theta_k$  有关; 第 4 项引入的相位是二次的速度与多普勒耦合, 它造成目标距离像的发散和展宽, 以及信噪比的损失, 同样也只跟  $\theta_k$  有关。

对式(7)做 IFFT 处理, 得目标点的复数一维距离像, 忽略常数项得

$$H_k(l) = \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left\{j\frac{2\pi}{N}\left[\left(l - \frac{R_{k0}}{\rho_r} + \frac{f_0 \Delta r \cos \theta_k}{\rho_r \Delta f}\right)i + \frac{\Delta r \cos \theta_k}{\rho_r} i^2\right]\right\} \quad (8)$$

与式(3)相比, 式(8)的每个指数项都附加了与  $\theta_k$  相关的  $i$  的一次相位项和二次相位项, 分别造成一维距离像的平移和展宽, 这主要是平台径向速度分量  $V \cos \theta_k$  引入的快时间多普勒效应所导致。在此将文献[9]的分析结果进一步推广, 定义步进频率 SAR 一维距离像的偏移因子和展宽因子分别为  $L$  和  $P$ :

$$L = (f_0 \Delta r \cos \theta_k) / (\rho_r \Delta f) \quad (9)$$

$$P = 2N \Delta r \cos \theta_k / \rho_r \quad (10)$$

在平台运动速度  $V$  和雷达信号参数确定的情况下, 一维距离像的偏移量和发散量只与方位角  $\theta_k$  相关。但  $\theta_k$  不仅随着方位向采样点位置的变化而变化, 而且还随着目标点的位置变化而变化, 因此  $L$  和  $P$  具有方位向和距离向的二维空变性。快时间多普勒效应造成不同方位向采样点处一维距离像的平移和展宽, 使得最终所成的二维 SAR 图像散焦和信噪比损失, 因此必须进行补偿。

### 3 图像波数域快时间多普勒补偿

虽然目标与雷达之间相对运动引起的多普勒效应是 SAR 成像的基础, 但对步进频率 SAR 而言, 它却带来了两方面的负面影响: 合成距离像的平移和图像质量的退化, 因此快时间多普勒补偿是步进频率 SAR 成像的前提。本节首先分析回波域补偿算法, 然后在波数域补偿原理的基础上提出基于图像波数域的快时间多普勒补偿算法, 并给出相应的信息处理流程及计算量分析。

#### 3.1 回波域快时间多普勒补偿算法

文献[7,8]均从步进频率 SAR 的一维距离像着手分析多普勒效应并给出了相应的解决办法。文献[7]通过步进频率信号参数的设计将纵向距离像的

平移和展宽限制在一定的范围内,缺乏普适性。文献[8]提出了变线性步进频率脉冲重复周期法,消除了多普勒二次相位引起的纵向距离分辨率的恶化和信噪比损失,但是没有消除多普勒一次相位对纵向距离像的影响,不能满足精确定位的步进频率SAR系统。

快时间多普勒产生的根本原因是雷达发射各频率脉冲时雷达与目标之间存在相对运动。根据式(1),式(3)可得快时间多普勒补偿因子的精确表达式应为

$$C_{ki} = \exp[-j4\pi f_i(R_{k0} - R_{ki})/c] \quad (11)$$

将式(11)代入到式(1)得到补偿后的回波表达式为

$$S_{ki}^c = C_{ki} \cdot S_{ki} = \exp[-j4\pi f_i R_{k0}/c] \quad (12)$$

对式(12)进行IFFT后就可以得到目标真实的一维距离像,然后利用时域成像算法得到目标点的清晰SAR图像:

$$f_{\text{BPC}}(r, y) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=0}^{N-1} A l^2 r^{-1} H_k^c(l) \delta(l - R_{k0}/\rho_r) \quad (13)$$

如不特殊声明,本文所得图像均采用后向投影(Back Projection, BP)算法。定义补偿后的目标一维距离像  $H_k^c(l)$  及补偿后BP算法所成图像  $f_{\text{BPC}}(r, y)$ 。

假设成像区域有  $n^2$  个像素点,方位向采样点数为  $M$ , 频率步进数为  $N$ , 那么补偿因子需要计算  $NMn^2$  次, 补偿运算的次数同样也是  $NMn^2$ , 那么总的计算量应为  $O(NMn^2)$  量级。

对回波信号的近似处理等同于对补偿因子的化简,那么从式(7)很容易就得到近似的相位补偿因子的表达式为

$$\begin{aligned} C_{ki} &= \exp\left[-j \frac{4\pi f_i \Delta r \cos \theta_k}{c}\right] \\ &= \exp\left[-j \frac{4\pi f_i (f_i - f_0) \Delta r \cos \theta_k}{c \Delta f}\right] \end{aligned} \quad (14)$$

至此,参照图2的信息处理流程将回波域快时间多普勒补偿算法的步骤总结如下:

(1)首先计算出成像区域中每个像素点在每个方位向采样点处的补偿因子;

(2)然后对每个方位向采样点处的回波乘以相应的补偿因子并进行距离压缩(即IFFT);

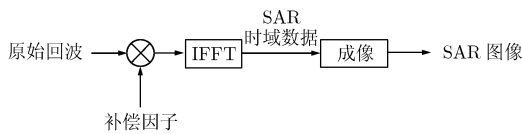


图2 回波域补偿算法流程

(3)将上述两步遍历方位向上的各个采样点;

(4)最后利用补偿后的回波数据通过BP成像算法便可以得到清晰的SAR图像。

可见,式(14)中补偿因子  $C_{ki}$  是  $f_i$  和  $\theta_k$  的函数,假设成像区域有  $n^2$  个像素点,方位向采样点数为  $M$ , 那么  $\theta_k$  计算次数为  $Mn^2$  次, 补偿运算次数为  $NMn^2$  次, 所以总的计算量仍然在  $O(NMn^2)$  量级上。

由于  $\theta_k$  的二维空变性使得补偿因子的计算变得复杂而繁琐。因此基于回波的逐点补偿方法虽然补偿精度高,但其补偿效率低,无法满足实时处理系统的要求。

### 3.2 图像波数域补偿原理

文献[10]研究了距离迁徙(RM)和后向投影(BP)两种典型的SAR成像算法,分析了这两种算法的区别与联系,进而得到了统一的超宽带SAR成像模型。文中指出:在超宽带SAR成像模型中可以将回波域对  $k$  (波数)和  $\theta$  (载机航线方向与雷达和目标连线之间的夹角)的处理等效为在图像域对  $k_r$  (斜距向波数)和  $k_y$  (方位向波数)的处理。它们的关系为:  $\sqrt{k_r^2 + k_y^2} = 2k$  和  $\theta = \arctan(-k_y/k_r)$ 。又由于  $k = 2\pi f_i/c$ , 因此根据图1有以下两式成立:

$$f_i = c\sqrt{k_r^2 + k_y^2}/4\pi \quad (15)$$

$$\cos \theta_k = k_r / \sqrt{k_r^2 + k_y^2} \quad (16)$$

式(15),式(16)表明,对步进频率而言,任何基于回波信号的处理都可以放在图像波数域进行,因此快时间多普勒效应的补偿同样也可以在图像波数域上进行。

### 3.3 图像波数域的快时间多普勒补偿算法

基于前两节的讨论,快时间多普勒效应的补偿可以从回波域转换到图像域来进行,那么根据式(15)和式(16),以  $f_i$  和  $\theta_k$  为变量的回波域补偿因子  $C_{ki}$  对应在波数域的表达式  $M(k_r, k_y)$  就可以表示为

$$M(k_r, k_y) = \exp\left[-j \frac{c\sqrt{k_r^2 + k_y^2} - 4\pi f_0}{4\pi \Delta f} \Delta r k_y\right] \quad (17)$$

相应的信息处理流程如图3所示。

定义  $f_{\text{BP}}(r, y)$  为未补偿的BP算法所成图像函数;  $F_{\text{BP}}(k_r, k_y)$  为  $f_{\text{BP}}(r, y)$  经二维傅里叶变换后在波数域的表达式;  $F_{\text{BPC}}(k_r, k_y)$  为补偿后的二维图像函

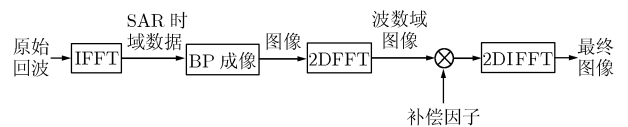


图3 波数域补偿算法流程

数  $f_{\text{BPC}}(r, y)$  在波数域的表达式。根据图 3, 波数域快时间多普勒补偿步骤如下:

(1) 首先对式 (7) 的回波信号进行距离压缩 (IFFT), 得到目标点回波的时域表达式, 即式 (8)。

(2) 采用 BP 算法成像, 得到点目标的二维 SAR 图像函数:

$$f_{\text{BP}}(r, y) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=0}^{N-1} A l^2 r^{-1} \mathbf{H}_k(l) \delta(l - R_{k0} / \rho_r) \quad (18)$$

(3) 对图像函数  $f_{\text{BP}}(r, y)$  做二维傅里叶变换 (2DFFT), 将其变换到  $k_r - k_y$  域;

$$\mathbf{F}_{\text{BP}}(k_r, k_y) = \underset{r \rightarrow k_r, y \rightarrow k_y}{\text{FFT}} [f_{\text{BP}}(r, y)] \quad (19)$$

(4) 利用图像域补偿因子对图像进行补偿;

$$\mathbf{F}_{\text{BPC}}(k_r, k_y) = \mathbf{F}_{\text{BP}}(k_r, k_y) \times \mathbf{M}(k_r, k_y) \quad (20)$$

(5) 对补偿后的图像做二维逆傅里叶变换 (2DIFFT) 得到点目标的时域图像函数;

$$f_{\text{BPC}}(r, y) = \underset{k_r \rightarrow r, k_y \rightarrow y}{\text{IFFT}} [\mathbf{F}_{\text{BPC}}(k_r, k_y)] \quad (21)$$

假设成像区域有  $n^2$  个像素点, 图像经 2DFFT 变换到波数域的计算量在  $o(n^2 \log_2 n)$  数量级上, 而波数域补偿的计算量在  $o(n^2)$  量级上, 最后波数域图像经 2DIFFT 变换到时域图像的计算量也在  $o(n^2 \log_2 n)$  量级上, 因此总的补偿计算量在  $o(n^2 \log_2 n)$  量级上, 与逐点补偿相比, 计算效率大幅提高。

### 4 仿真实验及误差分析

仿真实验采用理想点目标, 窗函数选为汉明窗, 仿真参数设置如表 1 所示:

表 1 仿真参数表

|      |                              |      |                       |
|------|------------------------------|------|-----------------------|
| 载机速度 | $V = 100 \text{ m/s}$        | 孔径长度 | $L_x = 128 \text{ m}$ |
| 频率步进 | $\Delta f = 0.5 \text{ MHz}$ | 脉冲重复 | $T_r = 2 \mu\text{s}$ |
| 增量   |                              | 周期   |                       |
| 脉冲组  | $T = 0.01 \text{ s}$         | 目标地面 | $(0, 60), (0, 150)$   |
| 周期   |                              | 坐标   |                       |

#### 4.1 快时间多普勒效应对成像的影响

图 4(a) 为理想情况下目标点  $(0, 60)$  在第 20 个方位向采样点处的一维距离像, 根据式 (4) 可得目标真实位置位于第 899 根距离谱线, 但由于快时间多普勒效应的存在, 目标实际一维距离像平移了 1 个距离单元, 展宽 6 个距离单元, 如图 4(b) 所示。

图 5(a) 为目标点  $(0, 60)$  在第 20 个方位向采样点处的一维距离像, 图 5(b) 为目标点  $(0, 60)$  在第 50 个方位向采样点处的一维距离像, 根据式 (4) 得到对应一维距离像的真实位置分别位于第 899, 795 距离谱线处, 距离平移量分别为 1, 0 (实质为 0.365, 可以近似为 0), 距离展宽量分别为 6, 2;

图 6(a), 6(b) 为目标点  $(0, 60)$ 、 $(0, 150)$  在第 20 个方位向采样点处的实际一维距离像, 根据式 (4) 可得对应一维距离像的真实位置分别位于第 899, 1643 距离谱线处, 距离平移量分别为 1, 0 (实质为 0.5418, 可以近似为 0), 距离展宽量分别为 6, 3; 对比图 5、图 6 所示结果可知: 快时间多普勒效应存在二维空变性。

图 7, 图 8 分别为  $(0, 60)$  目标点的二维 SAR 图像及二维剖面图。可以看出: 快时间多普勒效应造成点目标的二维 SAR 图像位置偏移、散焦和信噪比损失。此时点目标坐标为  $(-0.325, 60)$ 。距离向、方位向分辨率 (主瓣 3 dB 宽度) 分别为 0.4072 m 和 0.1994 m。

#### 4.2 回波域补偿与波数域补偿

(1) 回波域补偿仿真结果 图 9, 图 10 分别为回波域快时间多普勒补偿的二维 SAR 图像及二维剖面图。可以看出, 回波域补偿的精度高, SAR 聚焦效果好, 距离向和方位向分辨率都有明显的改善。

(2) 波数域补偿仿真结果 从图 11, 图 12 可以看出: 经波数域补偿的点目标 SAR 图像, 聚焦效果好, 距离向和方位向分辨率改善显著, 表 2 定量将两种算法的补偿结果进行比较, 有以下结论:

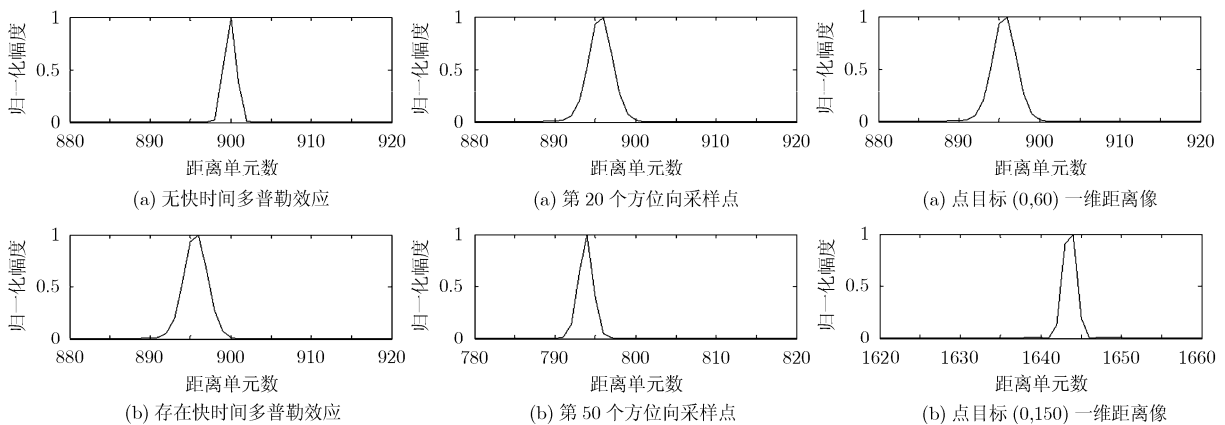


图 4 点目标  $(0, 60)$  高分辨一维距离像

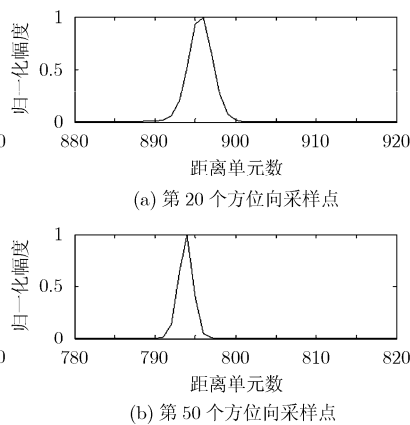


图 5 点目标  $(0, 60)$  在不同方位向采样点处一维距离像

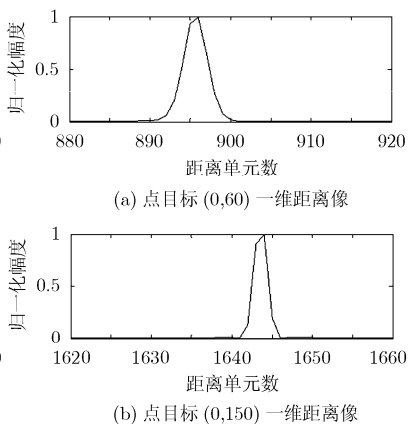


图 6 第 20 个方位向采样点处不同目标的距离像

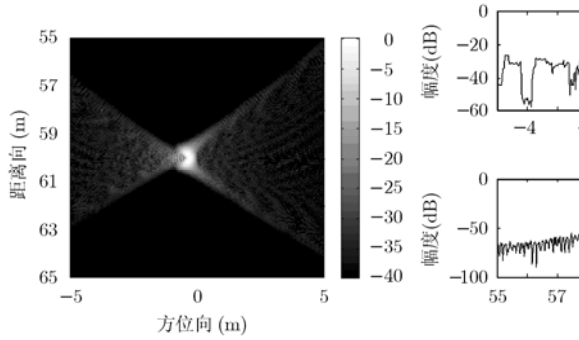


图7 未补偿的点目标二维 SAR 图像

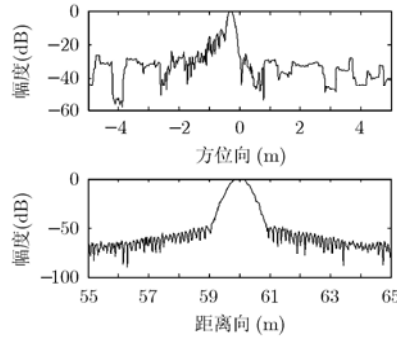


图8 未经补偿的点目标二维剖面图

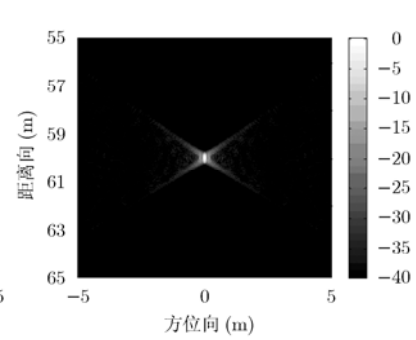


图9 回波域补偿 SAR 图像

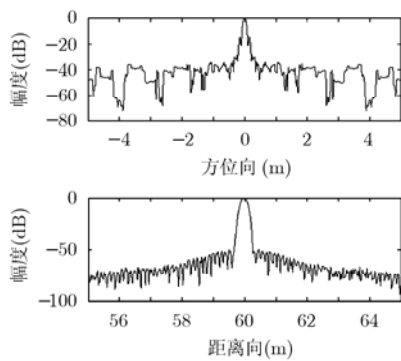


图10 回波域补偿二维剖面图

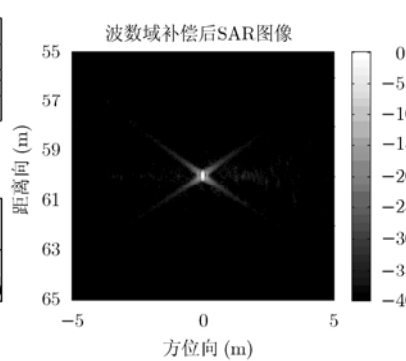


图11 波数域补偿 SAR 图像

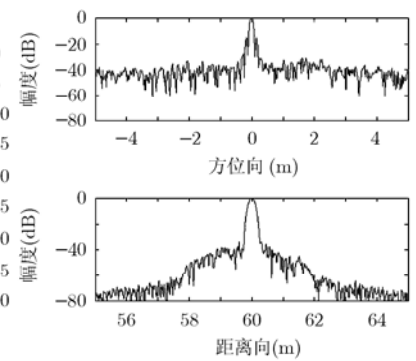


图12 波数域补偿后二维剖面图

表2 补偿效果对比表

| 方法    | 回波域补偿               | 波数域补偿       |
|-------|---------------------|-------------|
| 距离分辨率 | 0.1747 m            | 0.1759 m    |
| 方位分辨率 | 0.1012 m            | 0.1022 m    |
| 峰值旁瓣比 | -18.4275 dB         | -17.3926 dB |
| 积分旁瓣比 | -10.957 dB          | -9.9320 dB  |
| 补偿耗时  | $1.5 \times 10^5$ s | 0.31 s      |

(1)补偿效果: 回波域补偿是针对信号原始回波所进行的逐点逐频率的精确补偿; 而波数域补偿是在图像波数域中对图像整体的近似补偿。但无论是峰值旁瓣比、积分旁瓣比还是二维分辨率都可以说明这两种算法的补偿效果相近;

(2)补偿效率: 回波域补偿是逐点逐频率的补偿, 计算量大, 效率低; 而波数域补偿只是针对整幅图像进行的补偿, 计算量小, 效率高。无论是从前面两种补偿算法的计算量分析还是表2中的补偿耗时均可以证明波数域补偿算法的高效性。

因此, 综合考虑补偿效果和补偿效率两方面因素考虑, 在工程实际应用中, 波数域补偿法是精确高效的快时间多普勒补偿方法。

## 5 结论

通过分析可以看出, 步进频率脉冲波形在应用

于 SAR 系统的同时由于快时间多普勒效应的存在使得距离高分辨像产生了平移和展宽, 最终造成 SAR 图像散焦和信噪比损失。本文详细阐述了快时间多普勒效应产生的原因, 并在此基础上提出了基于图像波数域的多普勒补偿算法, 克服了回波域补偿效率低的问题, 在实现高效补偿的同时有效消除了一维高分辨率距离像的平移和展宽, 从而减少了二维 SAR 图像的散焦和信噪比的损失, 在需要对目标进行精确定位和识别的应用中具有非常广阔的前景。此外, 本文所提出的基于图像波数域的快时间多普勒效应补偿算法是以图像为基础并独立于 SAR 系统中的运动补偿, 因此该算法易于与 SAR 的运动补偿相结合, 提高了信息处理的灵活性。本文所讨论的问题是在载机处于理想飞行状态下进行的, 并没有考虑载机平台运动误差对步进频率 SAR 的影响, 关于步进频率 SAR 的运动补偿问题将在后续的研究加以探讨。

## 参考文献

[1] Gill G S. Step frequency high PRF waveform design [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1996: 15-22.

[2] Lord R T and Inngs M R. High resolution VHF SAR processing using synthetic range profiling. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, May 1996,

- Vol.1: 454-456.
- [3] Garvin A D M and Inngs M R. Use of synthetic aperture and stepped-frequency continuous wave processing to obtain radar images, Pretoria, South Africa. COMSIG 1991: 32-35.
- [4] Bing Han. A new method for stepped-frequency SAR imaging. Proceedings of EUSAR, Dresden Germany, May 2006, Vol.1: 1-4.
- [5] Juan Chen. High-resolution airborne stepped-frequency SAR system design and signal processing. Proceedings of EUSAR, Dresden Germany May 2006, Vol.3: 21-25.
- [6] 安建平. 应用于SAR的一种波形及多普勒效应补偿技术. 系统工程与电子技术, 2000, 22(1): 59-62.  
An Jian-ping. A novel waveform applied to SAR system and its doppler phase compensation technique. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(1): 59-62.
- [7] 李海英, 杨汝良. 步进频率信号的合成孔径雷达处理. 电子学报, 2003, 31(3): 349-352.  
Li Hai-ying and Yang Ru-liang. Stepped-frequency synthetic aperture radar imaging. *Acta Electronical Sinica*, 2003, 31(3): 349-352.
- [8] Wehner D R. High Resolution Radar(2nded)[M]. London: ArtechHouse, 1994, Chaper 5.
- [9] 金添. 超宽带SAR浅埋目标成像与检测的理论和技术研究. [博士学位论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- 王鹏宇: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为步进频率信号处理及SAR成像技术.
- 宋 千: 男, 1973年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为实时信号处理、超宽带SAR信息处理技术、超宽带浅地表探测技术等.
- 金 添: 男, 1980年生, 副教授, 研究方向为SAR成像算法、目标检测技术、目标电磁建模、机器学习等.