

基于多帧超分辨率的方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建方法

赵庆超^{*①②} 张毅^① 王宇^{①②} 王伟^① 王翔宇^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 方位向多通道技术是星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)同时实现高分辨率宽测绘带成像的有效手段,对于方位向多通道星载SAR系统,当脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)不满足均匀采样条件时方位向信号被非均匀采样,成像前需进行均匀化重建。该文创新性地提出以数字图像处理(Digital Image Processing, DIP)领域多帧超分辨率的思路解决方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建问题,并总结给出了多帧超分辨率的一般方法。仿真与实测数据实验验证了方法的有效性,且在复杂度性能上具有一定优势。该文第1次建立了方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建与多帧超分辨率问题的联系,为这一信号重建问题的解决提供一种新的思路。

关键词: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR); 方位向多通道; 高分辨率宽测绘带; 脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF); 非均匀采样; 多帧超分辨率

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)04-0408-12

DOI: 10.12000/JR17035

引用格式: 赵庆超, 张毅, 王宇, 等. 基于多帧超分辨率的方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建方法[J]. 雷达学报, 2017, 6(4): 408-419. DOI: 10.12000/JR17035.

Reference format: Zhao Qingchao, Zhang Yi, Wang Robert, *et al.*. Signal reconstruction approach for multichannel SAR in azimuth based on multiframe super resolution[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 408-419. DOI: 10.12000/JR17035.

Signal Reconstruction Approach for Multichannel SAR in Azimuth Based on Multiframe Super resolution

Zhao Qingchao^{①②} Zhang Yi^① Wang Robert^{①②} Wang Wei^① Wang Xiangyu^{①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To achieve high-resolution wide-swath imaging, the use of multichannel techniques in azimuth is effective for spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR). For azimuth multichannel systems, the signal in azimuth is nonuniformly sampled if the uniform sampling condition related to Pulse Repetition Frequency (PRF) is not satisfied, which makes it important to reconstruct the azimuth signal prior to image formation. In this study, to solve the azimuth signal reconstruction problem in multichannel SAR, we propose the innovative use of a multiframe super-resolution method in Digital Image Processing (DIP) and summarize the general multiframe super-resolution process. Our simulation results and real data experiments verify the effectiveness of the proposed method, which demonstrates some advantages in complexity performance. By establishing linkages between the problem of signal reconstruction of nonuniformly sampled signals and the multiframe super-resolution concept, we provide a new approach to this traditional signal reconstruction problem.

收稿日期: 2017-03-30; 改回日期: 2017-07-19; 网络出版: 2017-08-14

*通信作者: 赵庆超 zqc_nudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金(61422113), 国家万人计划-青年拔尖人才, 中科院百人计划, L波段差分干涉SAR项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61422113), The National Ten Thousand Talent Program-Young Top Notch Talent Program, The Hundred Talents Program of the Chinese Academy of Sciences, The TWIn-L SAR (Terrain Wide-swath Interferometry L-band SAR) Program

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Azimuth multichannel; High resolution wide swath; Pulse Repetition Frequency (PRF); Nonuniform sampling; Multiframe super-resolution

1 引言

作为重要的对地观测传感器，合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具备全天时、全天候、不受气候条件影响甚至穿透植被与地表的成像能力，被广泛用于高分辨率对地成像；相比机载SAR，星载SAR的单次成像测绘带宽可达上百公里，且成像区域不限制于领空主权，因此在全球地形测绘、军事侦察等领域具有难以替代的作用^[1-3]。星载SAR系统有两个重要技术指标——分辨率与测绘带宽：高分辨率可获得更多的目标信息，有利于后续处理中的目标检测和识别；宽测绘带可缩短重复观测周期，有利于对热点地区进行空间监视^[3]。因此，同时实现高分辨率和宽测绘带成像成为星载SAR的重要发展方向。受星载SAR系统最小天线面积限制^[4]的束缚，传统模式的星载SAR难以同时实现高分辨率宽测绘带成像，要实现这一目标需要另辟蹊径。

方位向多通道技术是解决这一问题的有效手段^[5-7]。它在方位向以一个小孔径发射低脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)信号实现大测绘带，同时方位向设置多个接收孔径接收信号以提高采样率，从而巧妙缓解了星载SAR的最小天线面积限制，但是仅当PRF满足均匀采样条件时方位向信号采样才是均匀的，系统PRF被锁定在一个固定值上^[8]。但是在系统设计中，PRF选择的灵活性非常重要。当PRF不满足均匀采样条件时，系统方位向信号的采样是非均匀的，会出现方位向的频谱混叠并导致方位模糊，如果不做处理直接成像会大大降低成像质量。因此，方位向非均匀采样信号重建成为一项有意义的工作。

发展至今，许多方法^[8-15]被提出用于解决方位向多通道星载SAR系统信号非均匀采样重建问题。基于广义采样定理，德国宇航中心学者提出了滤波器组重建算法^[8]，它将方位向多通道回波信号表述为经独立线性系统滤波后的输出，进而设计相应的重构滤波器对信号进行重建；另外一种广泛使用的方法是由我国学者提出的空时自适应处理^[10]，它利用混叠频率的不同空域信息将混叠频率分离实现信号重建。很多方法基于以上两种方法提出，包括基于信号子空间投影提高算法鲁棒性的改进^[11]以及最小化均方误差代价函数的修正^[12]等。文献^[13]对各种改进的方法进行了对比。文献^[14]的方法基于周

期非均匀采样信号重建理论，由于涉及到非均匀离散傅里叶变换(NonUniform Discrete Fourier Transform, NUDFT)，该算法运算复杂度较高，文献^[15]基于非均匀快速傅里叶变换(NonUniform Fast Fourier Transform, NUFFT)对其进行了改进。

本文创新性地提出以数字图像处理(Digital Image Processing, DIP)领域多帧超分辨率^[16-20]的思路解决方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建问题，推导了一种频域超分辨处理方法，并总结给出了多帧超分辨处理的一般方法。仿真与实测数据实验表明，本文方法能有效消除方位向非均匀采样造成的模糊，并且在复杂度性能上具有一定的优势。本文第1次证明了方位向多通道星载SAR系统信号非均匀采样重建问题可以被看作一个多帧超分辨率问题，并给出了多帧超分辨处理的一般方法。由于多帧超分辨率是DIP领域的研究热点，有许多成熟算法可供借鉴，从而为方位向多通道星载SAR系统信号非均匀采样重建问题的解决提供一种新的思路。

文章第2节在介绍超分辨率概念与方位向多通道系统原理的基础上，建立多帧超分辨问题与方位向多通道系统非均匀采样信号重建问题的联系；第3节首先建立一种简单的图像(信号)退化模型，之后对模型进行可逆描述并在逆推模型中实现多帧超分辨处理，最后总结给出多帧超分辨处理的一般方法；第4节结合仿真与实测数据实验验证了本文思路与方法的有效性；第5节分析了滤波器组方法与本文方法的复杂度，证明本文方法在复杂度性能上的优势；第6节对该文进行总结。

2 多帧超分辨率与方位向多通道系统信号重建

2.1 超分辨率概念

本节对DIP领域的超分辨率问题进行简单介绍。图像的超分辨率是指用图像处理方法，以软件算法的形式将输入低分辨率图像转换为高分辨率图像输出的技术^[17]。图像的超分辨率问题可大致分为单帧图像的超分辨率问题和多帧图像的超分辨率问题。如图1(a)所示，单帧图像的超分辨率问题即通过输入一幅低分辨率的图像，经过信号处理过程获取同一场景的高分辨率图像，输出图像中包含了输入图像中没有的信息。多帧图像超分辨率问题的输入是同一场景的一系列低分辨率帧，这些不同的图

像之间满足一定的关系，例如是由位于不同位置的多个相机(成像系统)对同一场景成像得到，输出是这一场景的高分辨率图像，如图1(b)所示。此时输出图像可以利用输入图像信息经信号处理得到。严格来讲，多帧超分辨率由于没有“生成”信息，概念里的“超”分辨可能在某些场合不被完全承认，但这一概念在DIP领域已被使用并认可数十年，为避免混淆，我们仍沿用这一概念。本文将重点放在多帧图像的超分辨处理上，并在2.3节证明方位向多通道系统非均匀采样信号重建问题可以被看作一个多帧超分辨率问题。

2.2 方位向多通道系统原理

为简化分析并突出主要步骤，在下面的讨论中只考虑方位向信号。图2是典型方位向三通道系统

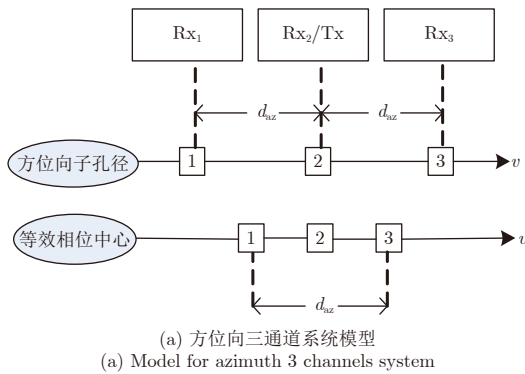


(a) 单帧超分辨率模型
(a) Model for single image super resolution

(b) 多帧超分辨率模型
(b) Model for multiframe super resolution

图 1 单帧及多帧超分辨率模型

Fig. 1 Model for single image and multiframe super resolution



(a) 方位向三通道系统模型
(a) Model for azimuth 3 channels system

模型与收发几何，它的中间孔径为发射和接收孔径，其余孔径为接收孔径，即实现方位向的一发三收。如果 $t=0$ 时发射孔径正好位于目标正上方，根据图2(b)的收发几何，对于单个点目标，回波信号可表示为：

$$s_i(t) = A_{Tx}(vt) \cdot A_{Rx,i}(vt) \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{R_0^2 + (vt)^2} + \sqrt{R_0^2 + (vt - \Delta x_i)^2} \right) \right\} \quad (1)$$

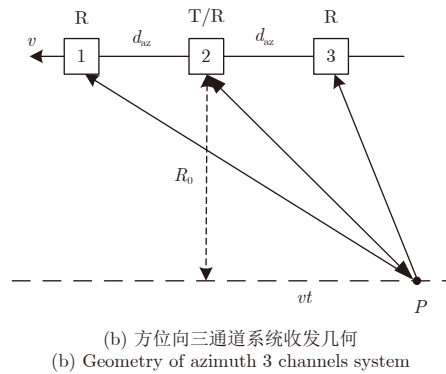
其中， $A_{Tx}(vt) \cdot A_{Rx,i}(vt)$ 代表回波包络，它由收发双程天线方向图决定， λ 为载波波长， t 为方位向时间(也称慢时间)， v 为SAR卫星平台速度， R_0 为最短斜距， i 为各通道的编号， Δx_i 为第*i*个接收孔径与发射孔径的间距。将式(1)泰勒展开并保留至2次项可得如下2次近似式：

$$s_i(t) \approx A_{Tx}(vt) \cdot A_{Rx,i}(vt) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{\pi \Delta x_i^2}{2\lambda R_0} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi v^2}{\lambda} \frac{\left(t - \frac{\Delta x_i}{2v} \right)^2}{R_0} \right\} \quad (2)$$

对于传统单通道系统，其点目标回波如下：

$$s(t) \approx A_{Tx}(vt) \cdot A_{Rx}(vt) \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi v^2 t^2}{\lambda R_0} \right\} \quad (3)$$

对比式(2)与式(3)，对于单平台系统，由于 $\Delta x_i \ll R_0$ ，式(2)的第2个指数项可以忽略，从而可以得出如下结论：对于方位向有*p*个通道的系统，在1个脉冲重复时间内各通道的接收信号等价



(b) 方位向三通道系统收发几何
(b) Geometry of azimuth 3 channels system

图 2 方位向三通道系统模型与收发几何

Fig. 2 Model and geometry for azimuth 3 channels system

于传统单通道系统在 $\Delta x_i/2$ (假设发射孔径位置为零)处自发自收 p 次。如图2所示。因此如果系统满足 $v/PRF = p \cdot d_{az}/2$, 则接收信号采样为均匀的。其中 d_{az} 为相邻孔径间距, 对于孔径均匀分布的系统有 $\Delta x_i = \left(\frac{N+1}{2} - i\right) \cdot d_{az}$ 。以上均匀采样条件为:

$$PRF = \frac{2v}{p \cdot d_{az}} \quad (4)$$

这意味着对于已知的系统, PRF必须取固定值, 任何不满足均匀采样条件的取值将导致方位向接收信号的非均匀采样, 从而导致信号频谱的模糊。我们期望此时能将混叠的频谱进行重建以获得方位向均匀采样的信号。

2.3 信号重建与多帧超分辨率的相似性分析

无论对于方位向多通道系统还是传统单通道系统, 由回波反映的地面特性是一个未知的连续时间信号, 由于SAR的脉冲工作方式, 方位向的接收信号被采样为离散信号。图3示意了方位向三通道系统的采样场景, 此时PRF不满足均匀采样条件。 $s(t)$ 代表了方位向场景反射率信息, 它是时间连续的。如图3所示, 对于方位向三通道系统, 在1个脉冲重复时间内, 发射孔径发射1个脉冲, 之后回波信号被3个接收孔径接收, 在下一个脉冲重复时间内情况也是一样的, 这样就得到了方位向的离散回波信号。从图中可以看出, 尽管信号总体采样是非均匀的, 但对于每一个接收孔径, 接收信号是均匀采样的, 图中不同的形状代表了相应的接收孔径。相邻通道的接收信号在 $s(t)$ 的时间上满足时移关系。

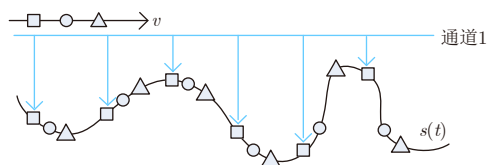


图3 方位向三通道系统采样场景

Fig. 3 The sampling scenario of an azimuth 3 channels system

图示的3个通道获得了 $s(t)$ 的3个均匀采样信号, 用 $s_k(t)$ 表示每个通道的接收信号(此处 $s_k(t)$ 仍写做连续时间信号的形式, 相应的离散时间信号为对 $s_k(t)$ 以PRF为采样率的采样)。如2.2节所述, $s_k(t)$ 可表示为 $s_k(t) = s\left(t \pm \frac{\Delta x_k}{2v}\right)$, $k = 0, \dots, p-1$, p 表示方位向通道数, 式中的“ \pm ”取决于发射孔径位置, 对具体推导没有影响, 文中取“+”。结合图1(b)与图3, 不难发现多帧超分辨率的输入与 $s_k(t)$

在信号特性上的相似性: 图1(b)的输入是同一场景在不同位置拍摄的图像, 互相具有空间位移关系, 图3的各通道接收信号是对同一场景回波信号的低采样率采样信号, 相互之间满足时移关系。两个问题的输出分别是对原来场景的高分辨率图像和高采样率信号, 图4对比了这两个问题的输入输出。

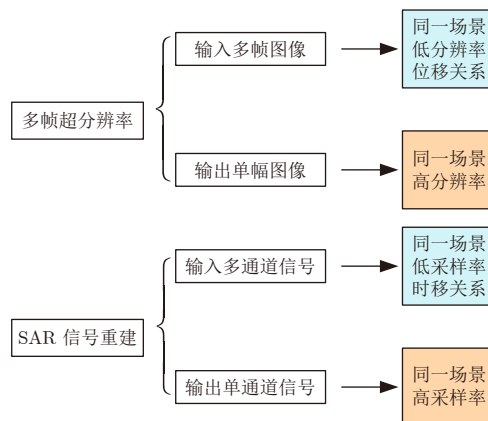


图4 多帧超分辨率与多通道SAR信号重建对比

Fig. 4 Comparison of multiframe super resolution and signal reconstruction of multichannel SAR system

由于输入输出在信号特性上的高度相似性, 方位向多通道系统非均匀采样信号的重建问题可以看作类多帧超分辨率问题, 在超分辨处理中可实现方位向信号的均匀化重建。下一节对一种频域超分辨率方法在信号重建问题中的适用性进行推导, 并总结给出多帧超分辨处理的一般方法。

3 多帧超分辨方法用于方位向信号重建

在多帧超分辨理论中, 用于重建的低分辨率图像间存在相似但不一致的信息, 超分辨处理要利用信息中不一致的地方来“生成”还原高分辨率图像需要的信息。如何利用这些不一致信息, 超分辨理论中有很多不同的方法, 本节从超分辨率处理的角度出发, 利用各通道相似但不一致的信息重建等效单通道信号原型。

多帧超分辨处理首先须假设一个图像退化模型, 这个模型是联系各幅低分辨率图像与最终获取高分辨率图像的纽带。其次, 此模型须在某种方式上可逆, 从而可以从求逆中得到高分辨率图像。一种简单的图像退化模型如图5所示, 即时间连续的场景经几何变换(如旋转、平移等)后采样得到低分辨率的场景图像, 采样率小于奈奎斯特采样率。超分辨处理就是将建立的图像(信号)退化模型经过某种描述后进行逆推, 从而还原原来的高分辨率图像(高采样率信号)。

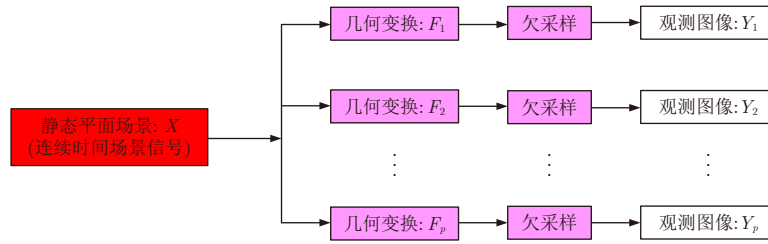


图 5 仅考虑几何变换的图像退化模型

Fig. 5 Image degradation model with only geometric transformation considered

3.1 退化模型的频域描述

在图3中, 方位向连续时间信号 $s(t)$ 代表了地面反射率信息, $s(t)$ 经几何变换(时延)后以 PRF 为采样率进行采样得到各通道接收信号 $s_k(i)$, 它可以表示为:

$$s_k(i) = s \left(\frac{i}{\text{PRF}} + \frac{\Delta x_k}{2v} \right) \quad (5)$$

$s_k(i)$ 即第 k 个接收通道的第 i 个信号采样点, $i = 0, 1, \dots, N-1, k = 0, \dots, p-1$, 对应多帧超分辨处理各低分辨率图像的像素点。以上各通道信号的获取原理对应了图5的图像退化模型, 在下面的讨论中将各通道信号直接对应到超分辨处理的各幅图像。首先对图5的图像退化模型进行可逆的描述, 建立 $s(t)$ 的连续傅里叶变换(Continuous Fourier Transform, CFT)与各通道信号离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)的联系。对于 $s_k(t) = s \left(t + \frac{\Delta x_k}{2v} \right)$, 根据CFT的时移关系^[21]可得

$$S_k(\omega) = S(\omega) \cdot \exp \left\{ j\omega \frac{\Delta x_k}{2v} \right\} \quad (6)$$

$S_k(\omega)$ 与 $S(\omega)$ 分别为 $s_k(t)$ 与 $s(t)$ 的CFT, 以 S_{kn} 表示第 k 通道采样信号的DFT, 则 S_{kn} 为

$$S_{kn} = \sum_{i=0}^{N-1} s_k(i) \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{in}{N} \right\}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (7)$$

根据CFT与DFT的关系^[22], S_{kn} 与 $S_k(\omega)$ 的关系可表示为:

$$S_{kn} = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} S_k \left(\frac{n}{NT} + m \cdot \text{PRF} \right) \quad (8)$$

式(8)是对各通道欠采样信号的频域描述, 其中 $T = 1/\text{PRF}$ 为脉冲重复时间, 我们需要利用图像(信号)的退化模型将各通道欠采样信号与方位向连续的地面反射率信息联系起来, 式(6)提供了这一联系。将式(6)代入式(8)可得

$$S_{kn} = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} S \left(\frac{n}{NT} + m \cdot \text{PRF} \right) \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta x_k}{2v} \left(\frac{n}{NT} + m \cdot \text{PRF} \right) \right\} \quad (9)$$

式中, $S(\omega)$ 为连续方位向回波信号的CFT。如果 $s(t)$ 是带限信号, 取 L 为正整数满足当 $|f| \geq L \cdot \text{PRF}$ 时 $S(f) = 0$, 则式(9)可简化为:

$$S_{kn} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{2L} S \left(\frac{n}{NT} + (i-1-L) \cdot \text{PRF} \right) \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta x_k}{2v} \left(\frac{n}{NT} + (i-1-L) \cdot \text{PRF} \right) \right\} \quad (10)$$

对于每一个频点 n , 可得如下矩阵方程:

$$\mathbf{S}_{kn} = \varphi_n \mathbf{S}_n \quad (11)$$

\mathbf{S}_n 是连续方位向回波信号CFT的采样, 为 $2L \times 1$ 列向量, 第 i 点为 $S(n/NT + (i-L-1) \cdot \text{PRF})$, \mathbf{S}_{kn} 是各通道信号的DFT。式(11)对图5退化模型的描述方程建立了连续方位向回波信号CFT与各通道信号DFT的联系, 下一节介绍退化模型的逆推即多帧超分辨处理过程。

3.2 多帧超分辨处理

以上对图5图像退化模型描述是可逆的, 这是多帧超分辨处理的基础。图6示意了退化模型的求逆过程: 对于每个频点 n , 式(11)是独立的, \mathbf{S}_n 可以被分别求出, 由此可获得 $2L$ 个均匀分布于 $-L \cdot \text{PRF}$ 至 $L \cdot \text{PRF} - 1/NT$ 的连续方位向回波信号的CFT, 即 $S(\omega)$ 的均匀采样。当对每一频点 n 都进行上述运算后可获得 $2L \times N$ 个均匀分布的 $S(\omega)$ 的采样, 根据CFT与DFT的关系, 可以获得序列 $s(n)$ 的 $2L \times N$ 点的DFT, 其中 $s(n)$ 是对 $s(t)$ 的均匀采样, 采样率为 $p \cdot \text{PRF}$ 。此时 $s(n)$ (对应超分辨输出图像的各点像素值) 可通过对上述所得做逆变换得到。

要得到最终结果需解矩阵方程式(11), φ_n 可分解为对角矩阵与常量矩阵的乘积, 即 $\varphi_n = \mathbf{D}_n \mathbf{C}$,

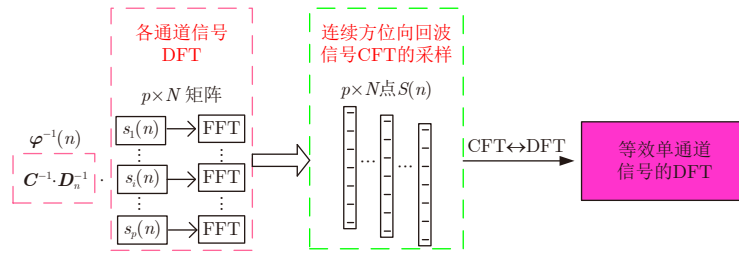


图6 图像(信号)退化模型求逆

Fig. 6 Inverse of image (signal) degradation model

令 $W_i = \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta x_i}{2v} \cdot \text{PRF} \right\}$, C 可表示为:

$$C = \begin{bmatrix} W_0^0 & W_0^1 & W_0^2 & \dots & W_0^{2L-1} \\ W_1^0 & W_1^1 & W_1^2 & \dots & W_1^{2L-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{p-1}^0 & W_{p-1}^1 & W_{p-1}^2 & \dots & W_{p-1}^{2L-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

C 为常量范德蒙德矩阵, 如果 $p=2L$, 则 C 为常量范德蒙德方阵。由于 C 与 n 无关, 故 C^{-1} 只需计算一次。

D_n 可表示为:

$$D_n = \text{diag} \left(\frac{1}{T} \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta x_0}{2v} \left(\frac{n}{NT} - L \cdot \text{PRF} \right) \right\} \dots \frac{1}{T} \cdot \exp \left\{ j2\pi \frac{\Delta x_{p-1}}{2v} \left(\frac{n}{NT} - L \cdot \text{PRF} \right) \right\} \right) \quad (13)$$

对于对角矩阵 D_n , 可以直接得到其逆矩阵表达式

$$D_n^{-1} = \text{diag} \left(T \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{\Delta x_0}{2v} \left(\frac{n}{NT} - L \cdot \text{PRF} \right) \right\} \dots T \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{\Delta x_{p-1}}{2v} \left(\frac{n}{NT} - L \cdot \text{PRF} \right) \right\} \right) \quad (14)$$

在实际操作中, D_n^{-1} 是不用计算的, 可以由公式直接写出, 这可以有效降低计算复杂度。所以

$$S_n = C^{-1} D_n^{-1} S_{kn} \quad (15)$$

以上在对退化模型的逆推中完成了多帧超分辨率处理, 多通道信号被合为一路信号, 采样率以通道数为倍数增加, 即实现信号的均匀化重建。

3.3 多帧超分辨率的一般方法

可以总结给出多帧超分辨率的一般步骤, 如图7所示。退化模型联系了原始场景图像与低分辨率图像序列, 对模型描述就是将原始场景图像与低分辨率图像序列之间的联系以可逆的方式表示出来, 之后逆推模型即可恢复原始场景图像。应用到方位向多通道系统, 在超分辨率的过程中即实现信号的均匀化重建。

需要指出, 前面推导的方法不是多帧超分辨率方法的全部, 退化模型的可逆描述不是唯一的。如文

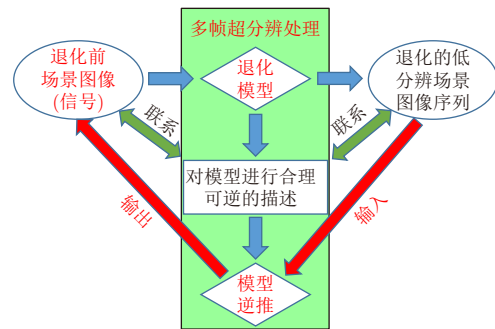


图7 多帧超分辨率处理的一般流程

Fig. 7 General process for multiframe super-resolution

献[18]给出了使用线性方程组直接建立低分辨信号时域采样点与高分辨场景CFT采样的关系, 这可以避免对各通道信号进行FFT的操作, 但是该方法涉及到大型矩阵的乘法, 计算复杂度较高。本文推导的方法原理清晰易懂且计算复杂度低, 作为对本文思路验证的示范性方法是合适的。

下一节将给出仿真与实测数据实验结果验证方法的有效性。

4 仿真与实测数据实验

本节集中展示方法的星载系统仿真与实测数据实验结果。首先对一星载方位向四通道系统进行仿真, 仿真参数如表1所示。

表1 方位向多通道星载SAR系统参数

Tab. 1 The parameters for a spaceborne azimuth multichannel system

系统参数	数值
载波波长(m)	0.0311
方位向通道数	4
理想脉冲重复频率(Hz)	1247
载荷飞行速度(m/s)	7483
方位向子孔径间距(m)	3
多普勒带宽(Hz)	4000

根据式(4), 如果 $\text{PRF} = 2v/(p \cdot d_{az}) = 1247 \text{ Hz}$, 满足均匀采样条件, 则方位向信号采样是均匀的, 图8示意了这一均匀采样场景。可以看到, 在均匀采样

条件下脉冲压缩结果是理想的, 没有假目标出现, 频谱也没有混叠。当PRF取1300 Hz时, 不满足均匀采样条件, 仿真结果如图9所示, 此时方位向点目标压缩结果出现明显的假目标, 频谱出现混叠, 如果不进行信号重建直接成像将出现严重的模糊。使用本文所述方法处理后仿真结果如图10所示, 假

目标被很好地压制, 频谱混叠被消除了。取点目标压缩局部放大结果示于图11, 并用滤波器组方法进行对比。可以看到重建前后方位向分辨率分别为1.66 m和1.60 m, 重建前后峰值旁瓣比(PSLR)分别为-11.4 dB与-13.2 dB, 并且在这些指标上本文方法与滤波器组方法持平, 本文方法的重建是有效的。

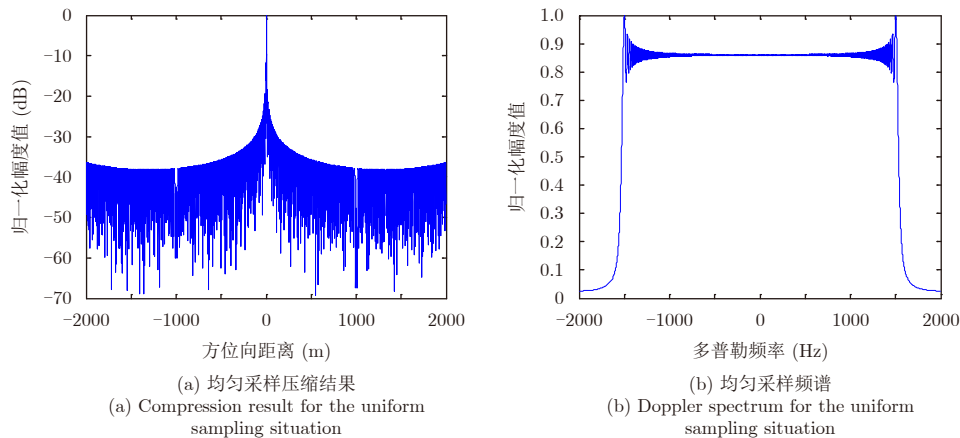


图 8 PRF满足均匀采样条件时仿真结果

Fig. 8 Simulation results for the uniform sampling situation

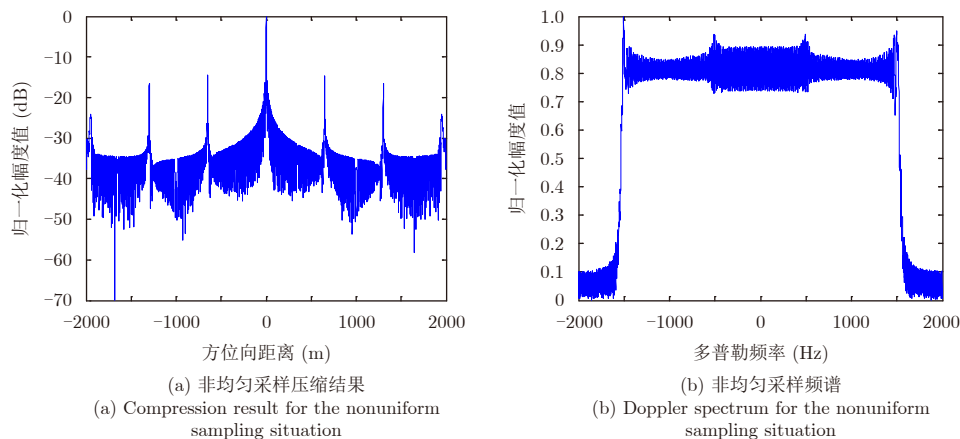


图 9 PRF不满足均匀采样条件时仿真结果

Fig. 9 Simulation results for the nonuniform sampling situation

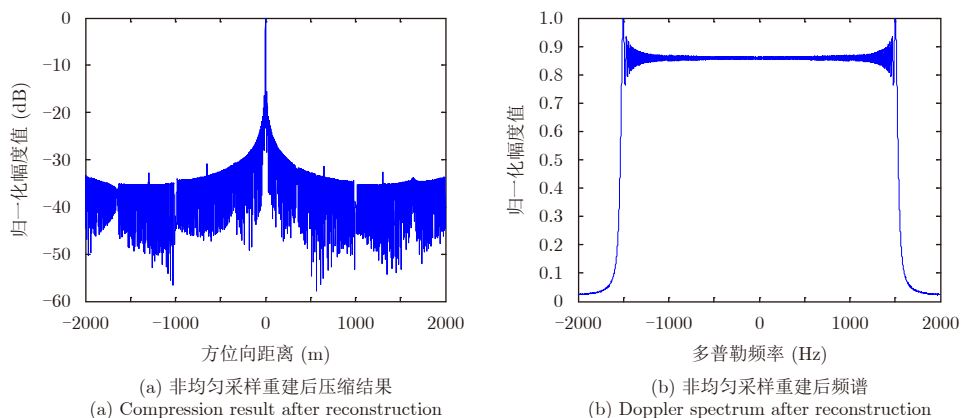


图 10 非均匀采样重建后仿真结果

Fig. 10 Simulation results for the nonuniform sampling situation after reconstruction

为更好地展示算法性能，我们进行了实测数据实验，所用实测数据由中国科学院电子学研究所收集，为机载方位向双通道系统条带工作模式。由于该机载系统的PRF远大于多普勒带宽(PRF约等于5倍的多普勒带宽)，采样率过高使得数据不能直接用于实验，否则难以观察重建效果。我们通过图12的方法使每通道数据PRF降到原来的1/6，从而使

PRF小于多普勒带宽。图13(a)示意了仅使用通道1的数据成像的结果，由于采样率小于多普勒带宽，图中存在明显的模糊。图13(b)是两个通道的方位向非均匀采样数据直接成像的结果，此时等效采样率($2 \cdot PRF$)已经大于多普勒带宽，但由于信号的非均匀采样使得图中仍有模糊残留。重建后的成像结果示于图14，本文方法与滤波器组方法都很好

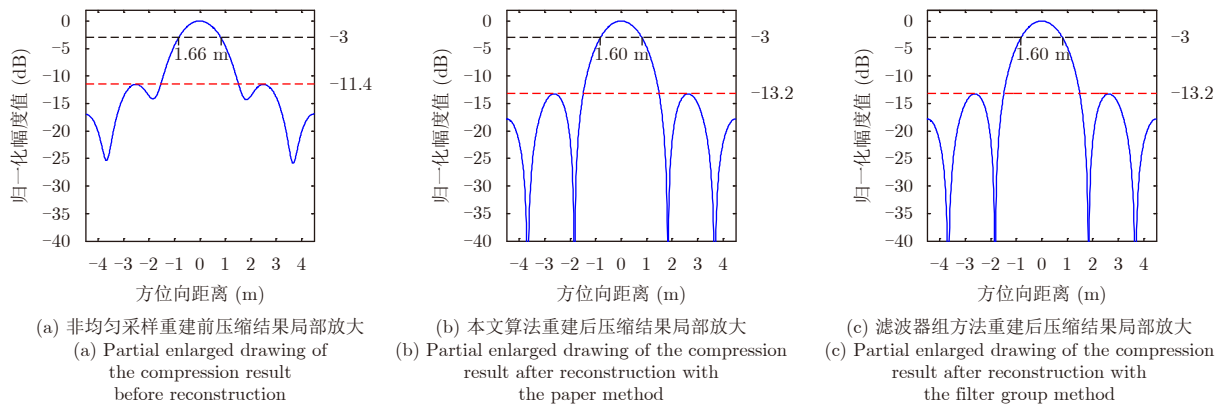


图 11 方位向压缩结果局部放大

Fig. 11 Partial enlarged drawing of the compression result in azimuth

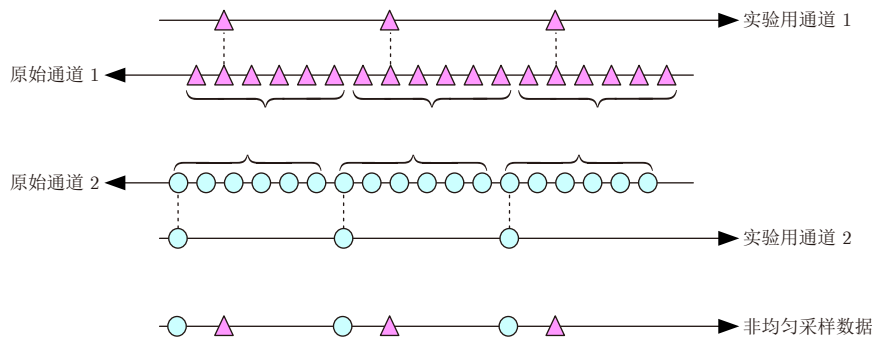
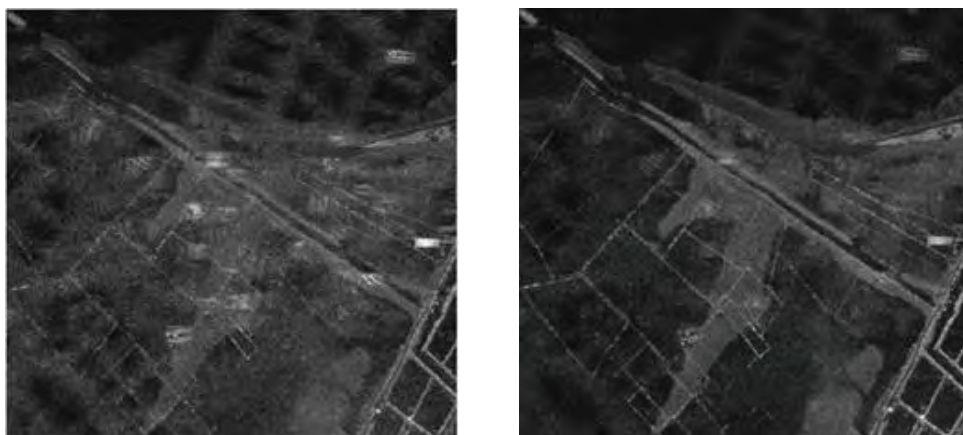


图 12 实验用数据获取方法

Fig. 12 Acquisition method of the data for experiments



(a) 通道 1 数据成像结果
(a) Image obtained from the first channel

(b) 两通道不做重建成像结果
(b) Image obtained before reconstruction

图 13 通道1及两通道不做重建成像结果

Fig. 13 The images obtained from the first channel and the unreconstructed nonuniform data

地消除了非均匀采样造成的模糊。图15是对图14中红色方框内强点目标的方位向切片，从两方法的主瓣宽度与峰值旁瓣比性能来看，两者的重建效果近乎相同。本文方法的重建是有效的。

以上仿真及实测数据实验结果证明了本文方法的有效性，也验证了方位向多通道系统非均匀采样信号重建问题可以看作多帧超分辨率问题进行处理。

5 算法复杂度分析

随着计算技术及存储技术的发展，算法的复杂度对算法整体性能的影响在减小，但由于星载SAR的数据是海量的，运算效率的提高及存储需求的降低在海量SAR数据实时处理中仍具有重要的工程实际意义。本节对滤波器组方法及本文方法的复杂度进行分析，本文方法在复杂度性能上具有一定优势。

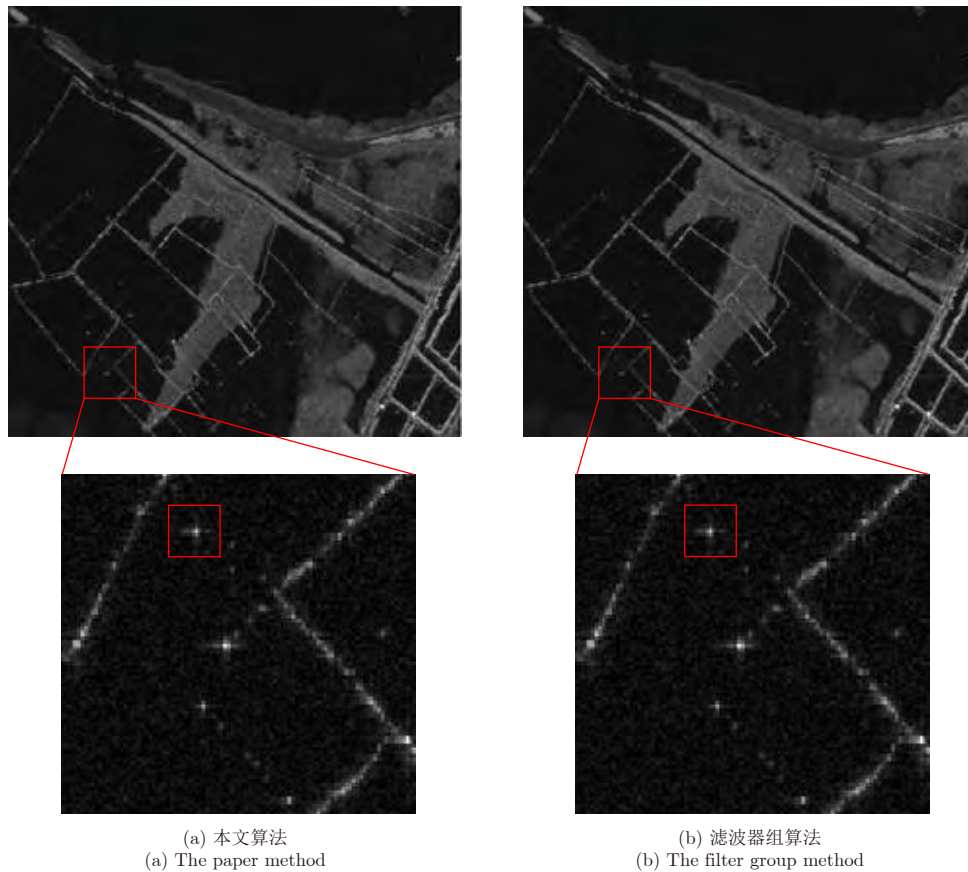


图 14 信号均匀化重建后成像结果

Fig. 14 The images obtained after signal reconstruction

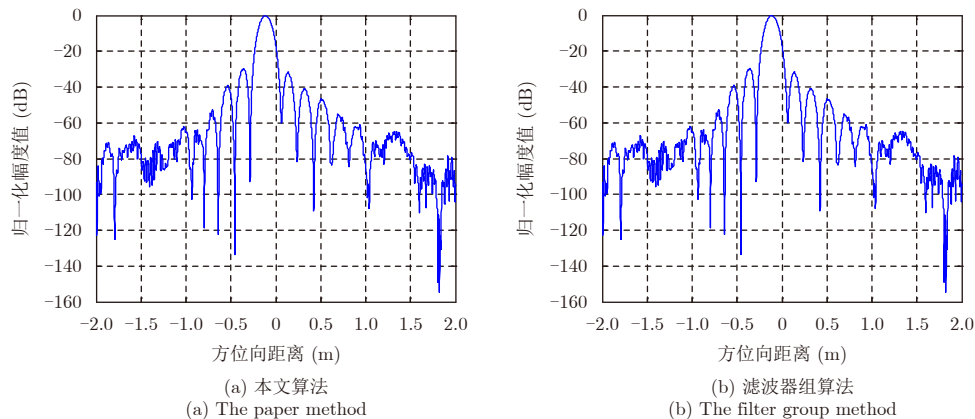


图 15 实测数据点目标方位向切片

Fig. 15 Zoomed azimuth cut of the point target in the image with both methods

5.1 滤波器组方法的复杂度

基于广义采样定理的滤波器组方法是很多近年来陆续提出方法的基础，本节对其计算复杂度进行分析。文献[9]给出滤波器组方法在工程上一种常见的实现流程并初步计算了运算量，下面分析其总体运算量。假设方位向有 p 个通道，每通道有 N 个采样。对各通道回波信号做 p 倍插值处理，经重建滤波后进行叠加，得到均匀化重建的信号，如图16所示。使用图16中流程处理，则方位向要做 p 次 pN 点的FFT及一次 pN 点的IFFT，另外图中加和处理环

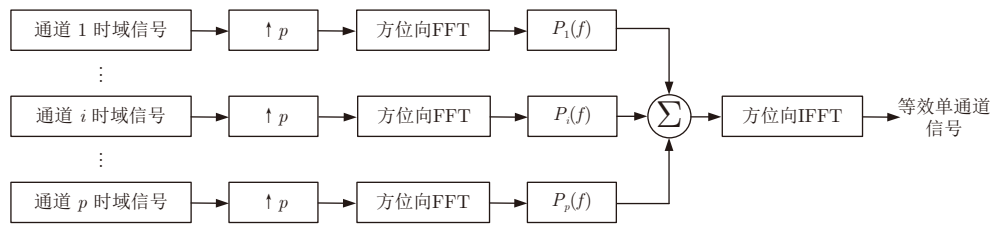


图 16 滤波器组方法的处理流程

Fig. 16 The realization of filter group method

节还有 $(p-1) \cdot pN$ 次复加以及滤波器相乘的 p^2N 次复乘。 p 个通道的FFT共需进行约 $p^2N \cdot \log_2(pN)$ 次复乘及 $p^2N \cdot \log_2(pN)$ 次复加，IFFT为 $pN \cdot \log_2(pN)$ 次复乘及 $pN \cdot \log_2(pN)$ 次复加。对于重构滤波器的计算， p 阶矩阵求逆计算复杂度为 $O(p^3)$ ， N 次矩阵求逆得到各通道重构滤波器组需进行约 $N \cdot p^3$ 次复乘。所以整个处理流程需要 $p^2N \cdot \log_2(pN) + pN \cdot \log_2(pN) + p^2N + N \cdot p^3$ 次复乘及 $p^2N \cdot \log_2(pN) + pN \cdot \log_2(pN) + (p-1) \cdot pN$ 次复加。

5.2 本文方法的复杂度

在以上运算流程中，滤波器组方法在方位FFT后数据量以通道数为倍数成倍增加，因此其空间复杂度较高。

如前所述，方位向多通道系统信号的非均匀采样重建可以看作类多帧超分辨率问题处理，本文给出了一种基于多帧超分辨率的处理方法，其处理流程如图6所示。

如第3节所述， $\varphi_n = D_n C$ ，其中 C 为常量范德蒙德矩阵，求逆时只需计算一次， D_n 是对角矩阵，其逆矩阵的表达式可以直接得到，在求逆时不需要计算，因此 $\varphi^{-1}(n)$ 可以根据公式写出从而避免了计算。 $\varphi^{-1}(n)$ 为 $p \times p$ 矩阵，每次 $\varphi^{-1}(n)$ 与图6所示的 $p \times N$ 矩阵的一列做矩阵乘法，得到 p 个频点值，当对 $p \times N$ 矩阵的所有列进行操作后可得到 $p \times N$ 点连续方位向回波信号CFT的采样。整个过程需要进行 $pN \cdot \log_2(pN) + pN \cdot \log_2 N + p^2N$ 次复乘及 $pN \cdot \log_2(pN) + pN \cdot \log_2 N + p(p-1)N$ 次复加。对比5.1节的分析，本文方法具有较低的时间复杂度。

另外，在方位向FFT处理后，滤波器组方法所需的原始数据存储空间以通道数为倍数增加，本文方法原始数据存储空间在FFT前后相同。本文方法在时间和空间复杂度性能上具有一定优势。

6 结束语

本文在简要介绍图像超分辨率概念的基础上，对方位向多通道系统的信号特性进行了研究，指出

了方位向多通道系统的方位向信号特性与多帧超分辨率问题信号特性的联系，对方位向多通道系统非均匀采样信号重建问题与多帧超分辨率问题的相似性进行了证明，第1次指出方位向多通道系统非均匀采样信号重建问题可以看作多帧超分辨率问题。基于此，本文建立了一种简单的图像(信号)退化模型，并根据多帧超分辨处理逆推模型的思路推导了一种非均匀采样信号重建的方法，并总结给出了多帧超分辨处理的一般方法。结合仿真及实测数据实验对方法有效性进行了验证，之后进行了复杂度分析，本文方法在时间与空间复杂度性能上具有一定优势。多帧超分辨率问题是DIP领域的热点，有许多成熟算法可供借鉴，而且多帧超分辨率概念中的有关细节对多通道SAR系统通道误差校正等问题具有指导意义，多帧超分辨率概念在星载SAR多通道技术中具有很好的应用前景，本文思想可为方位向多通道系统非均匀采样信号重建问题的解决提供一种新的思路。

参考文献

[1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载SAR技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.

[2] Lee J S and Pottier E. 洪文, 李洋, 尹婵, 译. 极化雷达成像基础与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 199-223.
Lee J S and Pottier E. Hong Wen, Li Yang, and Yin Qiang, Trans. Polarimetric Radar Imaging From Basics to

- Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 199–223.
- [3] Wiley C A. Synthetic aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, AES-21(3): 440–443. DOI: 10.1109/TAES.1985.310578.
- [4] Freeman A, Johnson W T K, Huneycutt B, *et al.*. The “myth” of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320–324. DOI: 10.1109/36.823926.
- [5] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 122–135. DOI: 10.1049/ip-f-2.1992.0016.
- [6] Younis M, Fischer C, and Wiesbeck W. Digital beamforming in SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1735–1739. DOI: 10.1109/TGRS.2003.815662.
- [7] Mittermayer J and Runge H. Conceptual studies for exploiting the TerraSAR-X dual receive antenna[C]. Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003: 2140–2142.
- [8] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260–264. DOI: 10.1109/LGRS.2004.832700.
- [9] 齐维孔, 禹卫东. 基于滤波器组的星载SAR DPC-MAB技术方位向非均匀采样信号的重构[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(7): 1218–1222.
Qi Wei-kong and Yu Wei-dong. Reconstruction of nonuniform azimuth sampling signals of space borne SAR DPC-MAB technique based on filter banks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(7): 1218–1222.
- [10] Li Zhen-fang, Wang Hong-yang, Su Tao, *et al.*. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82–86. DOI: 10.1109/LGRS.2004.840610.
- [11] 陈倩, 邓云凯, 刘亚东, 等. 基于自适应滤波的DPC-MAB SAR方位向信号重建[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(6): 1331–1336.
Chen Qian, Deng Yun-kai, Liu Ya-dong, *et al.*. SAR azimuth signal reconstruction based on adaptive filtering for the DPC-MAB SAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1331–1336.
- [12] Sikaneta I, Gierull C H, and Cerutti-Maori D. Optimum signal processing for multichannel SAR: With application to high-resolution wide-swath imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6095–6109. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2294940.
- [13] Sikaneta I, Cerutti-Maori D, Klare J, *et al.*. Comparison of multi-channel high-resolution wide-swath SAR processing methods[C]. Proceedings of 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec, Canada, 2014: 3834–3837.
- [14] Liu Guang-yan, Wang You-lin, and Lin You-quan. Unambiguous reconstruction and imaging of nonuniform sampling SAR signals[C]. Proceedings of the 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, China, 2007: 253–256.
- [15] Zhao Shuo, Wang R, Deng Yun-kai, *et al.*. Modifications on multichannel reconstruction algorithm for SAR processing based on periodic nonuniform sampling theory and nonuniform fast fourier transform[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(11): 4998–5006. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2421303.
- [16] Siu W C and Hung K W. Review of image interpolation and super-resolution[C]. Proceedings of 2012 Asia-Pacific Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference, Hollywood, CA, 2012: 1–10.
- [17] 苏衡, 周杰, 张志浩. 超分辨率图像重建方法综述[J]. *自动化学报*, 2013, 39(8): 1202–1213.
Su Heng, Zhou Jie, and Zhang Zhi-hao. Survey of super-resolution image reconstruction methods[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1202–1213.
- [18] 刘鹏, 刘定生, 李国庆. 基于矩阵秩估计偏移量的频域超分辨率重建[J]. *计算机工程*, 2009, 35(15): 29–31, 34.
Liu Peng, Liu Ding-sheng, and Li Guo-qing. Frequency field super-resolution reconstruction based on estimation offset of matrix rank[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(15): 29–31, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2009.15.010.
- [19] Jiang Jun-jun, Ma Xiang, Chen Chen, *et al.*. Single image super-resolution via locally regularized anchored neighborhood regression and nonlocal means[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(1): 15–26. DOI: 10.1109/TMM.2016.2599145.
- [20] Tsai R Y and Huang T S. Multiframe image restoration and registration[J]. *Advances in Computer Vision and Image Processing*, 1984, 1(2): 317–339.
- [21] Oppenheim A V, Willsky A S, and Nawab S H. Signals and Systems[M]. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 190–200.
- [22] Proakis J G and Manolaki D G. 方艳梅, 刘永清, 译. 数字信号处理: 原理、算法与应用[M]. 第4版, 北京: 电子工业出版社, 2014: 332–350.
Proakis J G and Manolaki D G. Fang Yan-mei and Liu Yong-qing, Trans. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications[M]. Fourth Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 332–350.

作者简介



赵庆超(1987-), 男, 山东人, 中国科学院电子学研究所电子与通信工程专业硕士研究生, 研究方向为多通道星载SAR信号处理。

E-mail: zqc_nudt@163.com



王伟(1985-), 男, 河北人, 毕业于中国科学院电子学研究所, 获得博士学位, 现为中国科学院电子学研究所助理研究员, 研究方向为新体制星载SAR系统设计和信号处理。

E-mail: ww_nudt@sina.com



张毅(1971-), 男, 上海人, 现为中国科学院电子学研究所研究员, 硕士生导师, 研究方向为高速数字信号处理、合成孔径雷达信号处理新技术研究、合成孔径雷达系统设计等。

E-mail: zhangyi@mail.ie.ac.cn



王翔宇(1990-), 男, 天津人, 中国科学院电子学研究所通信与信息系统专业博士研究生, 研究方向为高分宽测模式信号处理技术。

E-mail: wangxiangyu13@mailsucas.ac.cn



王宇(1980-), 男, 河南人, 现为中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR系统设计与信号处理技术。

E-mail: yuwang@mail.ie.ac.cn