

子孔径 NCS 算法中虚假目标产生的机理与消除方法研究

李建阳 常文革 李悦丽

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 子孔径结构的引入是实现 Ultra Wide Band SAR(UWB SAR)实时信号处理的关键。将子孔径结构与 Nonlinear Chirp Scaling(NCS)算法相结合的子孔径 NCS 算法可以较好的实现 UWB SAR 实时信号处理, 但子孔径结构的引入使得成像结果中存在虚假目标的影响。针对子孔径 NCS 算法中存在虚假目标的现象, 该文从理论上分析了虚假目标产生的机理, 并提出了对距离弯曲校正前的子孔径回波两端补零的改进子孔径 NCS 算法消除虚假目标, 最后通过仿真和实测的 UWB SAR 回波数据验证了该文理论分析以及所提方法的正确性。

关键词: 实时信号处理; UWB SAR; 子孔径 NCS 算法; 虚假目标

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1239-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00565

The Theory Analysis of False Target in Sub-aperture Algorithm

Li Jian-yang Chang Wen-ge Li Yue-li

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

Abstract: The sub-aperture algorithm has great important role in SAR real-time processing. The algorithm combined the sub-aperture and Nonlinear Chirp Scaling (NCS) algorithm has good performance in real-time processing of UWB SAR. However the ghost or false targets exist in the algorithm based on sub-aperture. In this paper, the reason for ghost or false target existing is theoretically analyzed, furthermore, the method of eliminating the ghost is proposed using zero-padding with sub-aperture data. Finally, the validity is verified with simulation and real UWB SAR data.

Key words: Real-time signal processing; UWB SAR; Sub-aperture NCS; False target

1 引言

子孔径类算法^[1-4]主要应用于 SAR 实时信号处理中, 在实时成像处理中, 为满足实时性的要求, 需要采用多 DSP 的并行流水结构进行处理^[5-8], 成像算法一般采用子孔径类的成像算法, 特别是 UWB SAR, 大存储量和大计算量使得子孔径算法成为实现 UWB SAR 实时处理的关键所在。

子孔径成像的基本思想是将回波数据沿方位向或距离向划分成一系列带宽有限的子孔径信号, 对子孔径信号进行处理, 得到粗分辨率的图像, 将粗分辨率的图像进行相干叠加, 最后得到精分辨率的图像^[1,2]。子孔径结构的引入可以提高算法的并行性, 从而可以满足实时处理的较大的计算量和存储量的要求。

UWB SAR 回波信号距离向和方位向的耦合现象非常严重, 采用 NCS 算法^[9]可以有效地消除距离向和方位向的高阶耦合项, 适合于 UWB SAR 成像处理^[10]。将子孔径结构与 NCS 算法相结合的子孔径

NCS 算法^[4]可以较好的实现 UWB SAR 实时信号处理。与高波段 SAR 不同, UWB SAR 孔径特别长, 在划分子孔径时, 一个孔径时间往往需要划分为多个子孔径进行处理, 从而导致最后成像结果中存在虚假目标, 而高波段 SAR 中一般不存在虚假目标。文献[4]提到了子孔径 NCS 算法中存在虚假目标的影响, 但没有从理论上分析虚假目标产生的原因, 采用加窗的方法抑制虚假目标, 对于包含若干目标的子孔径回波, 其频谱分布在整个多普勒频率范围内, 通过加窗的方法不能有效地抑制所有目标的虚假目标, 而且会造成目标分辨率的损失, 正是基于这一点, 本文从理论上分析了虚假目标的产生, 并提出了虚假目标的消除方法。

本文首先分析了子孔径回波的方位频谱特性, 得出子孔径回波的方位频谱中含有的 2 次相位项主要存在于距离压缩、距离弯曲校正以及决定方位分辨率的方位线性调频部分; 然后从距离压缩、距离弯曲校正的参考函数出发, 从理论上研究了虚假目标产生的原因, 提出了改进的子孔径 NCS 算法消除虚假目标; 最后采用仿真和实测 UWB SAR 回波数据, 验证了本文分析以及所提方法的有效性。

2009-04-19 收到, 2009-12-22 改回

通信作者: 李建阳 jianyang_li@sina.com

2 子孔径回波的方位频谱特性

子孔径 NCS 算法中虚假目标的产生主要是由于子孔径长度较短, 从而导致参考函数方位频域采样率过低, 方位向的 2 次相位项出现频谱混叠, 从而产生虚假目标, 因此在本节中主要分析回波中出现方位向的 2 次相位项的部分。回波中方位向的 2 次相位项主要包括两个部分, 一是决定方位向分辨率的 2 次相位项, 另一种是距离压缩、距离弯曲项所导致的方位 2 次相位项。

子孔径 NCS 算法在进行了 3 次相位滤波、NCS 运算、剩余相位补偿后的回波信号的 2 维频谱可以表示为^[9]

$$S_s(f_a, f_r) = \phi_1(f_a, f_r) \exp\left\{-j\pi f_a^2 / K_a\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi R_0}{c} \left[\frac{1}{\cos\theta} - 1\right] f_r\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{\cos\theta}{K_m(f_a, R_{\text{ref}})} f_r^2\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{3} \frac{1}{K_m^3(f_a, R_{\text{ref}})} \cos^3\theta \cdot [q_3 + Y_m(f_a) K_m^3(f_a, R_{\text{ref}})] f_r^3\right\} \quad (1)$$

其中 f_r 为距离频率, f_a 为方位频率, R_0 为目标斜距, λ 为波长, V 为载机速度, $K_a = 2V^2 / \lambda R_0$ 为多普勒调频率, $\cos\theta = \sqrt{1 - (\lambda f_a / 2V)^2}$, $K_m(f_a, R_{\text{ref}})$ 为距离频域的调频率, $Y_m(f_a)$ 为 3 次相位滤波的系数。式(1)第一个指数项为决定方位分辨率的 2 次相位项, 第 2 个指数项为距离弯曲部分, 第 3 个和第 4 个指数项为距离压缩项, $\phi_1(f_a, f_r)$ 为剩余部分。

将 $K_m(f_a, R_{\text{ref}})$ 和 $Y_m(f_a)$ ^[4] 的表达式代入式(1)并进行化简可以得到

$$S_s(f_a, f_r) = \phi_1(f_a, f_r) \exp\left\{-j \frac{\pi f_a^2}{K_a}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi R_0 f_r}{c} \left[\frac{1}{\cos\theta} - 1\right]\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \cos^2\theta - j\pi \frac{2\lambda R_B f_r^2}{c^2} \frac{\sin^2\theta}{\cos^2\theta}\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{\pi f_r^3}{3\gamma f_c} [\sin^2\theta - \sin^2\theta \cos\theta]\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{\pi 2\lambda R_B f_r^3}{3f_c^2} \left[\frac{\sin^4\theta}{\cos^3\theta} - \frac{\sin^4\theta}{\cos^2\theta}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{\pi f_r^3}{3\gamma f_c} [2\cos\theta + \cos^2\theta - \cos^3\theta]\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi \lambda R_B f_r^3}{3c^2 f_c} \left[2 \frac{\sin^2\theta}{\cos^2\theta} + \frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} - \sin^2\theta\right]\right\} \quad (2)$$

其中 γ 为发射信号的调频率。

引起虚假目标的主要是回波信号中的 2 次项, 高次项的影响可以归结到 2 次项中, 相当于 2 次项的调频率发生了变化, 但变化量较小, 因此本文中主要考虑 2 次项的部分。将 $\cos\theta$ 、 $\cos^3\theta$ 、 $1/\cos\theta$ 分别进行泰勒展开, 只考虑 2 次项的部分, 并将其代入到式(2)中可以得到

$$S_s(f_a, f_r) = \phi_1'(f_a, f_r) \exp\left\{-j\pi f_a^2 / K_a\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi f_a^2 [1/K_1(f_r) + 1/K_2(f_r) + 1/K_3(f_r)]\right\} \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} K_1(f_r) &= 1 / \left[\frac{\lambda^2 R_0}{2cV^2} f_r \right] \\ K_2(f_r) &= 1 / \left[\frac{\lambda^2}{4\gamma V^2} + \frac{\lambda^3 R_B}{2c^2 V^2} \right] f_r^2 \\ K_3(f_r) &= 1 / \left[\frac{\lambda^2}{24\gamma V^2 f_c} - \frac{\lambda^3 R_B}{3c^2 V^2 f_c} \right] f_r^3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从式(3)中可以看出, 回波信号中的 2 次项主要包括距离压缩项和距离弯曲校正项。

3 虚假目标产生机理分析

以采样频率 250 MHz, 载频 400 MHz, 载机速度 100 m/s, PRF 200 Hz, 参考斜距 10 km 为例, 可以计算得到在距离频率为 1 MHz 的距离频率位置, $K_1(f_r) = 1.1 \times 10^3$, $K_2(f_r) = 3.2 \times 10^5$, $K_3(f_r) = -2.7 \times 10^8$ 。在上面的条件下, 方位向 1 m(未加窗)所对应的孔径长度为 38.2 s, 因此子孔径长度一般要达到数秒, 设子孔径长度为 T_s , 因此一般情况下 $K_1(f_r)T_s > \text{PRF}$, $K_2(f_r)T_s > \text{PRF}$, $K_3(f_r)T_s > \text{PRF}$ 。

子孔径距离压缩和距离弯曲校正参考函数可以表示为

$$H_{\text{Sub}}(f_a) = \exp\left\{-j\pi f_a^2 / K(f_r)\right\} \quad (5)$$

其中 $1/K(f_r) = 1/K_1(f_r) + 1/K_2(f_r) + 1/K_3(f_r)$ 。

参考函数所对应的带宽范围为 $B_c = K(f_r)T_s$, 方位向的采样频率为 PRF, 因此参考函数属于欠采样的过程, 不满足采样定理, 会发生频谱混叠的现象混叠频谱的中心位于 $nK(f_r)T_s$, 因此式(5)混叠后的信号可以表示为

$$H_{\text{Sub}}(f_a) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\left\{-j\pi [f_a - nK(f_r)T_s] / K(f_r)\right\} \quad (6)$$

进行子孔径距离压缩和距离弯曲校正。

$$\begin{aligned}
 S(f_a) &= S_s(f_a)H_{\text{Sub}}(f_a) \\
 &= \phi'_1(f_a, f_r) \exp\{-j\pi f_a^2 / K_a\} \exp\{-j\pi f_a^2 / K(f_r)\} \\
 &\quad \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\{-j\pi[f_a - nK(f_r)T_s] / K(f_r)\} \\
 &= \phi'(f_a, f_r) \exp\{-j\pi f_a^2 / K_a\} \\
 &\quad \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\{-j2\pi n T_s f_a\} \tag{7}
 \end{aligned}$$

距离压缩和距离弯曲校正后, 将子孔径回波变换到2维时域可以表示为

$$\begin{aligned}
 s(t_m) &= \sum_{n=-N/2}^{N/2} B_n(t_m) \exp\{-j\pi K_a(t_m - nT_s)^2\} \\
 &\quad \cdot a_a\left[\frac{t_m - n(T_s - T_s)}{T_s}\right] \\
 &= \sum_{n=-N/2}^{N/2} B_n(t_m) \exp\{-j\pi K_a(t_m - nT_s)^2\} a_a\left[\frac{t_m}{T_s}\right] \tag{8}
 \end{aligned}$$

式(8)中, $a_a(\bullet)$ 为方位向的窗函数, 窗长为 T_s , 混叠目标的零点位于 nT_s , 进行循环移位后时域信号中包含了若干位置的线性调频信号, 信号在 $-T_s/2 \leq t_m \leq T_s/2$ 范围内进行叠加, 若以子孔径信号进行方位压缩, 那么目标位置将会循环移位到0的位置, 虚假目标和真实目标发生重叠, 从而没有虚假目标的影响。而将子孔径信号沿方位向进行拼接后再进行方位压缩, 这时虚假目标将出现在 nT_s ($n = \pm 1, \pm 2 \dots$) 的位置。一般情况下, 由于混叠的部分能量较弱, 因此虚假目标主要存在于 $n = \pm 1$, 即 $-T_s$ 和 T_s 的位置。

4 基于子孔径长度扩展的虚假目标消除

子孔径 NCS 算法的成像结果中会出现虚假目标, 本文提出了基于子孔径长度扩展的改进子孔径 NCS 算法, 消除虚假目标的影响。与标准的子孔径 NCS 算法相比, 改进的子孔径 NCS 算法将距离弯曲校正前的子孔径回波变换到2维时域, 沿方位向进行子孔径长度扩展, 即将子孔径回波沿方位向两端补零, 在扩展的子孔径回波的基础上进行子孔径距离弯曲校正, 距离弯曲校正后, 在方位时域将扩展部分去除掉; 其他步骤与标准的子孔径 NCS 算法相同。

设扩展后的子孔径长度为 T_{sF} , 在扩展后的子孔径回波中, 由于包含信号部分的子孔径长度不变, 因此扩展后的子孔径回波信号所对应的带宽范围不变; 而距离弯曲校正参考函数的有效信号长度变为 T_{sF} , 因此所对应的带宽变为 $B_{cF} = K(f_r)T_{sF}$ 。

子孔径长度扩展后, 距离压缩和距离弯曲校正的参考函数可以表示为

$$H_{\text{Sub}}(f_a) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\{-j\pi[f_a - nK(f_r)T_{sF}] / K(f_r)\} \tag{9}$$

进行子孔径距离压缩和距离弯曲校正

$$\begin{aligned}
 S(f_a) &= S_s(f_a)H_{\text{Sub}}(f_a) \\
 &= \phi'_1(f_a, f_r) \exp\{-j\pi f_a^2 / K_a\} \exp\{-j\pi f_a^2 / K(f_r)\} \\
 &\quad \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\{-j\pi[f_a - nK(f_r)T_{sF}] / K(f_r)\} \\
 &= \phi'(f_a, f_r) \exp\{-j\pi f_a^2 / K_a\} \\
 &\quad \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2} \exp\{-j2\pi n T_{sF} f_a\} \tag{10}
 \end{aligned}$$

然后将子孔径回波信号变换到2维时域可以表示为

$$\begin{aligned}
 s(t_m) &= \sum_{n=-N/2}^{N/2} B_n(t_m) \exp\{-j\pi K_a(t_m - nT_{sF})^2\} \\
 &\quad \cdot a_a\left[\frac{t_m - n(T_{sF} - T_s)}{T_{sF}}\right] \tag{11}
 \end{aligned}$$

将扩展的子孔径长度去掉后, 方位时间的取值范围为 $-T_s/2 \leq t_m \leq T_s/2$, 这时, 式(11)表示为

$$\begin{aligned}
 s(t_m) &= \sum_{n=-N/2}^{N/2} B_n(t_m) \exp\{-j\pi K_a(t_m - nT_{sF})^2\} \\
 &\quad \cdot a_a\left[\frac{t_m - n(T_{sF} - T_s)}{T_s}\right] \tag{12}
 \end{aligned}$$

可以看出, 在信号的范围, 混叠的部分就要减小很多。

当扩展的子孔径长度 $T_{sF} < 2T_s$ 时, 方位向信号还存在混叠的部分, 这时虚假目标出现的位置主要存在于 $-T_{sF}$ 和 T_{sF} 的位置。

当扩展的子孔径长度满足 $T_{sF} \geq 2T_s$ 时, 式(12)可以简化为

$$s(t_m) = B_0(t_m) \exp\{-j\pi K_a t_m^2\} \text{rect}[t_m / T_s] \tag{13}$$

这时混叠的能量部分被截掉了, 因此虚假目标也给去除了。

与标准的子孔径 NCS 算法相比, 改进的子孔径 NCS 算法只需在子孔径距离压缩和距离弯曲校正之前将子孔径长度沿方位向扩展1倍即可消除虚假目标的影响, 而运算量也不会有较大的增加。

5 仿真结果

为了验证前面理论分析的虚假目标产生的机理以及消除方法的有效性, 在这里采用仿真数据和实测数据进行分析, 仿真数据的参数如表1所示, 成像算法为 NCS 算法。在参考位置上放置一个点目

表 1 仿真参数

载频 400 MHz	脉冲重复频率 200 Hz
带宽 200 MHz	参考斜距 10 km
采样频率 250 MHz	方位分辨率 1 m

标, 分别采用全孔径 NCS 和子孔径 NCS 进行成像处理。

全孔径 NCS 成像结果如图 1(a)所示, 目标聚焦效果良好, 未出现虚假目标; 将全孔径信号沿方位向分为 10 个子孔径, 子孔径 NCS 成像结果如图 1(b)所示, 在方位向出现两个虚假目标。当子孔径长度扩展为原来长度的 2 倍时, 子孔径 NCS 成像结果如图 1(c)所示, 虚假目标给消除掉了。

为了分析扩展的子孔径长度对虚假目标消除的影响, 本文采用不同的扩展长度, 进行改进的子孔径 NCS 成像处理, 并划出点目标的方位向剖面图, 分别如图 2 所示。图 2(a)为子孔径 NCS 算法中点目标的方位向剖面图, 出现虚假目标, 虚假目标的幅度为 -14.7 dB, 距离真实目标的位置偏移子孔径长度; 图 2(b)为子孔径长度扩展为原来子孔径长度的 1.5 倍时的点目标方位向剖面图, 虚假目标的幅度被抑制到 -31.2 dB, 并且虚假目标的位置距离真实目标位置偏移扩展的子孔径长度, 这与前面的理论分

析相一致; 图 2(c)为子孔径长度扩展为原子孔径长度的 2 倍时, 改进子孔径 NCS 算法成像结果, 虚假目标的影响消除了。

表 2 给出了点目标的性能指标, 与全孔径成像相比, 采用子孔径 NCS 成像会使得目标距离向和方位向的分辨率受损失; 采用改进的子孔径 NCS 成像, 目标的距离向和方位向分辨率稍有改善。

采用实测 UWB SAR 回波数据, 分别采用子孔径 NCS 算法和本文所提改进的子孔径 NCS 算法进行成像处理, 成像结果分别如图 3(a)和图 3(b)所示。在图 3(a)中子孔径成像结果中存在较强目标的虚假目标的影响。将图 3(a)中的 A 区进行放大, 如图 3(c)所示, 存在明显的虚假目标的影响; 采用本文所提改进子孔径 NCS 算法成像结果中的 B 区进行放大, 如图 3(d)所示, 虚假目标的影响给消除掉了。

5 结论

虚假目标是子孔径 NCS 算法中存在的主要问题, 本文从理论上分析了虚假目标产生的原因, 提出了虚假目标消除的方法。在实时处理中, 将子孔径长度进行了扩展, 在消除虚假目标的同时, 会使得实时处理所需的计算量和存储量有所增加, 因此实际处理中, 往往需要在两者之间进行折衷处理。

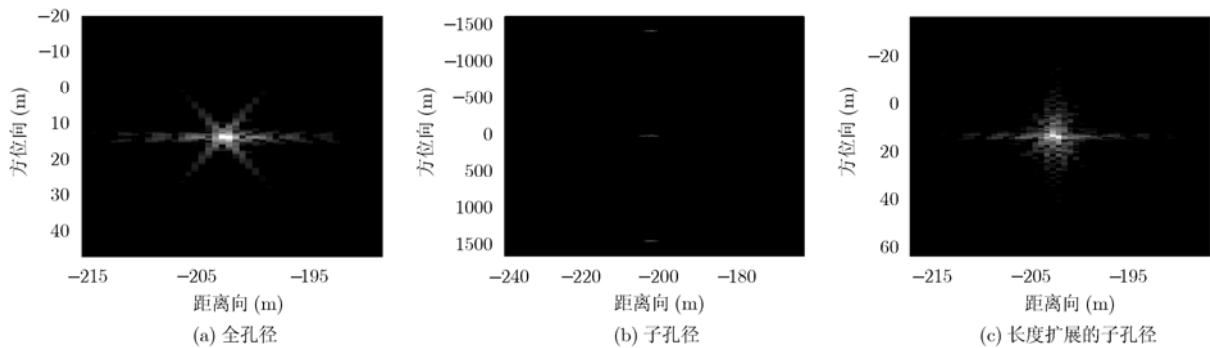


图 1 NCS 算法成像结果

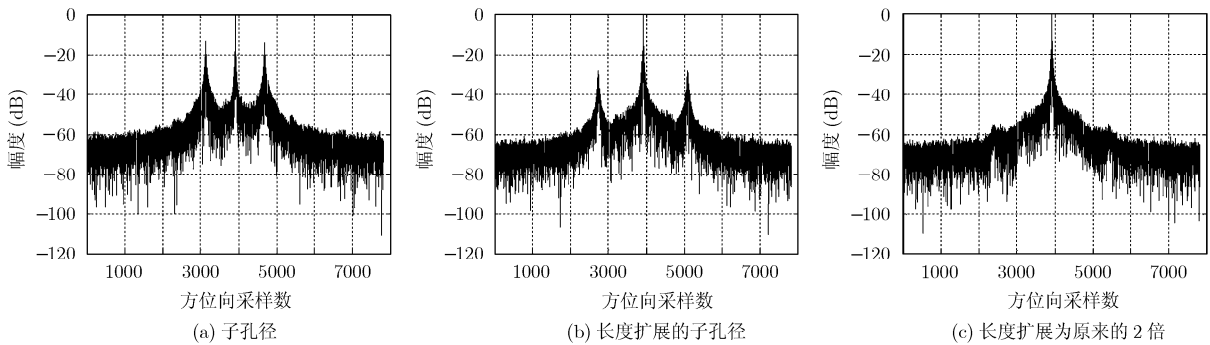


图 2 点目标方位向剖面图

表2 性能指标

不同的成像处理方法	峰值旁瓣比(dB)		积分旁瓣比(dB)		分辨率(m)	
	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向
全孔径 NCS	-14.57	-10.94	-15.87	8.83	0.71	0.92
子孔径 NCS	-20.65	-14.62	-19.99	-10.74	0.82	1.03
子孔径长度扩展 1.5 倍	-20.67	-14.27	-19.68	-10.9	0.81	1.02
子孔径长度扩展 2 倍	-20.72	-14.08	-19.63	-10.88	0.81	1.02

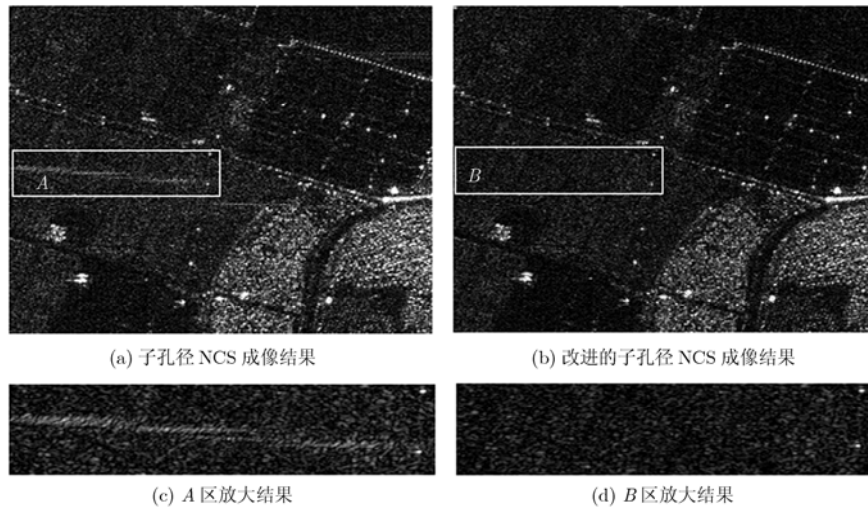


图3 实测数据子孔径NCS成像结果

参考文献

[1] Moreira A. real-time Synthetic Aperture Radar (SAR) processing with a new subaperture approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 714-722.

[2] Yeo T S, Tan N L, Zhang C B, and Lu Y H. A new subaperture approach to high squint SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 954-968.

[3] Mittermayer J and Moreira A. Spotlight SAR processing using the extended Chirp scaling algorithm. IGARSS 1997, Singapore, 1997: 2021-2023.

[4] 王建, 薛国义, 周智敏等. 超宽带 SAR 子孔径 NCS 实时成像算法. *信号处理*, 2008, 24(3): 390-394.
Wang Jian, Xue Guo-yi, Zhou Zhi-min, and Song Qian. A new subaperture nonlinear Chirp scaling algorithm for real-time UWB SAR imaging. *Signal Processing*, 2008, 24(3): 390-394.

[5] Simon-Klar C, Friebe L, Kloos H, Lieske H, Hinrichs W, and Pirsch P. A multi DSP board for real time SAR processing using the HiPAR-DSP 16. IGARSS 2002, Canada, 2002: 2750-2752.

[6] Liu Jing, Wu Jing-wei, Wang Zhi-rui, and Hu Qing-rong. Airborne C-SAR (Synthetic Aperture Radar) real-time imaging system. APSAR Huangshan, China, 2007: 675-679.

[7] Simon-Klar C, Kirscht M, Langemeyer S, Nolte N, and Pirsch P. An on-board real-time SAR processor for small platforms. Proceedings of SPIE, 2004, Vol.5574: 420-427.

[8] Tang Yue-sheng and Zhang Chang-yao. Multi-DSPs SAR real-time signal processing system based on cPCI BUS. APSAR Huangshan, China, 2007: 661-663.

[9] Davidson G W, Cumming I G, and Ito M R. A Chirp scaling approach for processing squint mode SAR data. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.

[10] 王亮, 黄晓涛, 周智敏. 非线性 Chirp Scaling 在机载 SAR 成像中的应用. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(5): 723-727.
Wang Liang, Huang Xiao-tao, and Zhou Zhi-min. Application of nonlinear Chirp scaling in airborne SAR imaging. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(5): 723-727.

李建阳: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像及运动补偿研究.

常文革: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 长期从事超宽带雷达的系统设计和成像处理等方面的研究.