

机载双站合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法

朱振波^① 汤子跃^② 蒋兴舟^①

^①(海军工程大学 武汉 430033)

^②(空军雷达学院电子工程研究所 武汉 430010)

摘要 该文在分析机载双站 SAR 回波模型的基础上,结合常规单站 SAR 的 Chirp scaling 成像算法思想,推导出了双站 SAR 的 Chirp scaling 成像算法。对双站 SAR 的 Chirp scaling 成像算法进行了误差分析。最后通过仿真验证了算法的有效性。

关键词 合成孔径雷达, 机载双站, Chirp-scaling 算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0977-05

The Chirp Scaling Algorithm of Airborne Bistatic SAR Imaging

Zhu Zhen-bo^① Tang Zi-yue^② Jiang Xing-zhou^①

^①(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

^②(Air Force Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract The echo model of airborne bistatic SAR is analyzed in this paper. Based on the echo model and the chirp scaling algorithm of monostatic SAR imaging, the chirp scaling algorithm of bistatic SAR imaging is deduced, and its error is analyzed subsequently. Finally, it is proved to be correct by the simulation results.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Airborne bistatic, Chirp-scaling algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种新体制的高分辨率雷达。它借助于脉冲压缩技术实现距离向的高分辨,借助于方位多普勒分析技术实现方位向的高分辨,它已经广泛用于军事及民用领域当中。双站合成孔径雷达(Bistatic SAR)收、发系统分置在不同的平台上,与单站SAR相比,双站SAR可以接收机前置静默目标回波,从而获得较远的作用距离、更好的抗干扰性和低截获性,提高了SAR的安全性^[1-4]。

目前人们对常规SAR成像算法进行了充分的研究,得到了一些有效的成像算法,包括距离-多普勒(R-D)算法及其改进方法、波数域算法、Chirp-Scaling(C-S)算法和极坐标(FPA)算法等。R-D算法以其较好的性能在很长时期内一直都是SAR成像的标准算法,许多实际雷达系统中都应用了这种算法。双站SAR的回波模型与常规SAR相同,在此基础上文献[1,2]给出了双站SAR距离-多普勒成像算法,在R-D算法中距离迁移校正通过内插进行,计算量较大,且当成像的范围扩展到大斜视角时,R-D算法的性能无法满足实际的需要,C-S算法是近来出现的解决距离迁移问题的一种高效算法^[5-7],结合双站SAR回波特点及常规C-S算法,本文研究了C-S算法

在双站SAR系统中的实现。

2 机载双站 SAR 的信号模型

同常规 SAR 系统一样,双站 SAR 系统通常也有 3 种模式:条带式、扫描式和聚束式。条带式成像的双站 SAR 可以采用正侧视(收、发波束指向与其平台运动方向垂直),也可以采用斜侧视(收、发波束指向与其平台运动方向有一定夹角)的工作方式,通常使用最多的是正侧视工作方式,本文主要研究了机载正侧视模式时双站 SAR 的 C-S 成像算法。

正侧视工作方式时双站 SAR 的收、发平台与目标位置的几何关系如图 1,其中收、发平台高度分别为 H_R , H_T ; 收、发平台到测绘中心 P 的正侧视距离为 R_{R0} , R_{T0} ; 收、发平台分别作等速 V_0 匀速直线飞行; x_R , x_T 分别表示收、

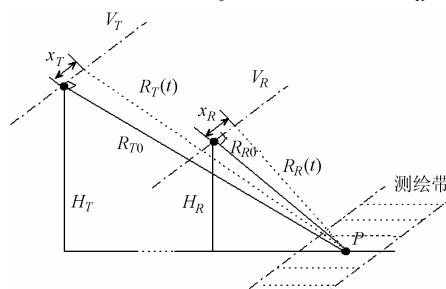


图 1 机载双站 SAR 几何结构

Fig.1 Airborne bistatic SAR configuration

发平台所处的位置。

设 t 时刻收、发平台到 P 点的距离分别为 $R_R(t)$, $R_T(t)$; 由于通常存在 $|x_R| \ll R_R$, $|x_T| \ll R_T$, 则 t 时刻回波信号所经历的路程可以近似表示为^[1]

$$R(t) = R_{T0} + R_{R0} + \frac{R_{T0} + R_{R0}}{2R_{T0}R_{R0}}(V_0 t)^2 \quad (1)$$

定义

$$R_0 = \frac{R_{R0} + R_{T0}}{2}, \text{ 收发距离比 } k_r = \frac{R_{T0}}{R_{R0}} \quad (2)$$

假设雷达发射线性调频信号, 则 t 时刻点目标的基带回波信号为

$$s(\tau, t | R_0) = \sigma W(t) a\left(\tau - \frac{R(t | R_0)}{c}\right) \cdot \exp\left[-j\pi\gamma\left(\tau - \frac{R(t | R_0)}{c}\right)^2\right] \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}R(t | R_0)\right) \quad (3)$$

上式中, σ 表示地面目标的散射截面积, $a(\tau)$ 表示发射信号包络, $W(t)$ 为收、发天线共同作用的方向加权, γ 为发射信号的线性调频率, R_t 为信号的历程, λ 表示雷达信号的波长, c 为电磁波的传播速度, t 和 τ 分别为方位向和距离向的时间变量。

3 双站 SAR 的 C-S 算法

C-S 算法利用雷达发射线性调频信号的特点, 在雷达回波的 R-D 域中引入线性调频参考信号, 将不同距离上的距离迁移轨迹校正到某一参考距离上的距离迁移轨迹上, 在二维频域同时完成距离迁移校正、距离压缩和二次距离压缩。在整个处理过程中, C-S 算法只用到了两种操作: 傅里叶变换和复数相乘, 这就避免了插值的运算, 提高了计算的效率。根据双站 SAR 回波信号特点和常规 SAR 的 C-S 算法思想^[5-7], 推导得出了双站 SAR 的 C-S 成像算法, 图 2 给出了双站 C-S 算法流程图, 其基本步骤如下:

(1) 方位向傅里叶变换 对双站 SAR 原始回波信号

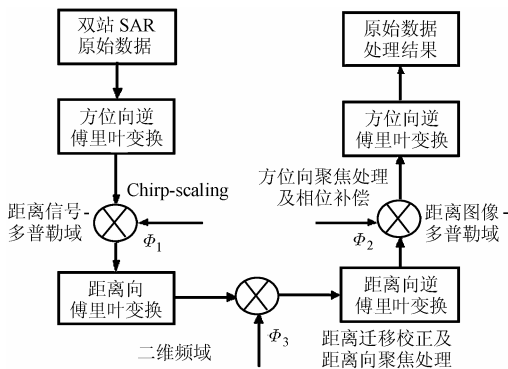


图 2 机载双站 C-S 算法流程图

Fig.2 Airborne bistatic SAR Chirp-scaling algorithm

$s(\tau, t | R_0)$ 进行方位向的傅里叶变换(以后所有傅里叶变换都忽略常数项), 根据式(1)和式(3), 并利用驻留相位原理^[5]可得

$$S_1(\tau, f_t | R_0) = \sigma W\left(-\frac{R_{R0}R_{T0}\lambda}{2R_0V_0^2}f_t\right) a\left(\tau - \frac{2R_f(f_t | R_0)}{c}\right) \cdot \exp\left[-j\pi K_s(f_t | R_0)\left(\tau - \frac{2R_f(f_t | R_0)}{c}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left[R_0^2 - R_{R0}R_{T0}\left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2\right]^{1/2}\right] \quad (4)$$

其中 $R_f(f_t | R_0)$ 表示由于信号包络的移动所导致的距离-多普勒域内的距离迁移, 它是一个与收、发距离有关的变量, 具体表达式为

$$R_f(f_t | R_0) = R_0[1 + C_s(f_t)] \quad (5)$$

$$C_s(f_t) = \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 - R_{R0}R_{T0}\left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2}} - 1 \quad (6)$$

式中 $C_s(f_t)$ 称为距离弯曲因子, $K_s(f_t | R_0)$ 为信号的实际调频率:

$$K_s(f_t | R_0) = \frac{\gamma}{1 + \gamma R_{T0}R_{R0}R_0^2 \frac{2\lambda}{c^2} \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2} \left/ \sqrt{R_0^2 - R_{R0}R_{T0}\left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2} \right|^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

(2) Chirp-scaling 相位因子相乘 将距离-多普勒域的信号 $S_1(\tau, f_t | R_0)$ 乘以一个相位因子, 使所有散射点目标的距离迁移相位均被补偿到参考距离处的距离迁移相位。设参考距离为 R_{ref} , 则所需的 Chirp-scaling 相位因子为

$$\Phi_1(\tau, f_t | R_{ref}) = \exp\left\{-j\pi K_s(f_t | R_0)C_s(f_t)[\tau - \tau_{ref}(f_t)]^2\right\} \quad (8)$$

其中

$$\tau_{ref}(f_t) = \frac{2}{c}R_{ref}[1 + C_s(f_t)] \quad (9)$$

根据式(4)~式(9), 并做一定近似, 可得信号 $S_1(\tau, f_t | R_0)$ 乘以 Chirp-scaling 相位因子后的信号 $s_2(\tau, f_t | R_0)$ 为

$$s_2(\tau, f_t | R_0) = S_1(\tau, f_t | R_0)\Phi_1(\tau, f_t | R_0) = \sigma W\left(-\frac{R_{R0}R_{T0}\lambda}{2R_0V_0^2}f_t\right) a\left(\tau - \frac{2R_f(f_t | R_0)}{c}\right) \cdot \exp\left\{-j\pi K_s(f_t | R_0)[1 + C_s(f_t)]\left(\tau - \frac{2}{c}(R_0 + R_{ref}C_s(f_t))\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left[R_0^2 - R_{R0}R_{T0}\left(\frac{\lambda f_t}{2V_0}\right)^2\right]^{1/2}\right\} \exp\{-j\Theta\} \quad (10)$$

其中

$$\Theta = \pi K_s(f_t | R_{\text{ref}}) \frac{C_s(f_t)(\tau - \tau_{\text{ref}})^2}{1 + C_s(f_t)} \quad (11)$$

由上式可以看出, 距离-多普勒域的信号 $S_1(\tau, f_t | R_0)$ 经过 Chirp-scaling 处理之后, 不同距离上的目标的迁移已经和 R_0 无关, 与参考点具有相同的迁移轨迹 $R'(f_t | R_0)$ 。

$$R'(f_t | R_0) = R_0 + R_{\text{ref}} C_s(f_t) \quad (12)$$

(3) 距离向傅里叶变换 利用驻留相位原理, 对 Chirp-scaling 后的信号 $s_2(\tau, f_t | R_0)$ 进行距离向的傅里叶变换

$$\begin{aligned} S_2(f_\tau, f_t) &= \sigma W \left(-\frac{R_{R0} R_{T0} \lambda}{2R_0 V_0^2} f_t \right) a \left(-\frac{f_\tau}{K_s(f_t | R_0)(1 + C_s(f_t))} \right) \\ &\cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0^2 - R_{R0} R_{T0} \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - j\Theta_\Delta(f_t | R_0) \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ j\pi \frac{f_\tau^2}{K_s(f_t | R_{\text{ref}})(1 + C_s(f_t))} \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f_\tau [R_0 + R_{\text{ref}} C_s(f_t)] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\Theta_\Delta(f_t | R_0) = \frac{4\pi}{c^2} K_s(f_t | R_{\text{ref}}) [1 + C_s(f_t)] C_s(f_t) (R_0 - R_{\text{ref}})^2 \quad (14)$$

式(13)中, 第3个指数项是 f_τ 的线性函数, 它包含了每个点目标 R_0 以及相应的距离弯曲, 由于前面 Chirp-scaling 的作用, 使每个点目标距离弯曲项都相同, 并在二维频域是单值的, 所以可以通过乘以相应补偿因子补偿掉。

(4) 距离向迁移校正及距离聚焦处理 由式(13)可以看出, 二维频域信号 $S_2(f_\tau, f_t)$ 乘以一个补偿参考函数 $\Phi_2(f_\tau, f_t | R_{\text{ref}})$, 可以完成距离向迁移校正、距离压缩和二次距离压缩, 其参考函数为

$$\begin{aligned} \Phi_2(f_\tau, f_t | R_{\text{ref}}) &= \exp \left\{ -j\pi \frac{f_\tau^2}{K_s(f_t | R_{\text{ref}})(1 + C_s(f_t))} \right\} \\ &\cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} f_\tau R_{\text{ref}} C_s(f_t) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

则有

$$\begin{aligned} s_3(f_\tau, f_t) &= S_2(f_\tau, f_t) \Phi_2(f_\tau, f_t | R_{\text{ref}}) \\ &= \sigma W \left(-\frac{R_{R0} R_{T0} \lambda}{2R_0 V_0^2} f_t \right) a \left(-\frac{f_\tau}{K_s(f_t | R_0)(1 + C_s(f_t))} \right) \\ &\cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0^2 - R_{R0} R_{T0} \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - j\Theta_\Delta(f_t | R_0) \right\} \\ &\cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} f_\tau R_0 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

(5) 距离向逆傅里叶变换 将完成距离迁移校正和距离

压缩的信号 $s_3(f_\tau, f_t)$, 进行距离向逆傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} S_3(\tau, f_t) &= \sigma W \left(-\frac{R_{R0} R_{T0} \lambda}{2R_0 V_0^2} f_t \right) A \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \\ &\cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0^2 - R_{R0} R_{T0} \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - j\Theta_\Delta(f_t | R_0) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

从上面的式子可以看出, 距离项的相位得到了很好的补偿, 经过逆傅里叶变换后信号基本集中在 R_0 附近, 剩余的只有方位向的相位项, $A(\square)$ 为距离压缩后点目标包络。

(6) 方位聚焦及剩余相位补偿 对式(17)进行方位向的处理, 乘以参考函数, 完成方位向的聚焦处理及剩余相位的补偿

$$\begin{aligned} \Phi_3(\tau, f_t) &= \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0^2 - R_{R0} R_{T0} \left(\frac{\lambda f_t}{2V_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 + j\Theta_\Delta(f_t | R_0) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

(7) 方位向逆傅里叶变换 对方位聚焦和相位补偿后的信号进行方位向逆傅里叶变换得到复图像

$$s_4(\tau, t) = \sigma w(t) A \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) \quad (19)$$

这样就完成了 C-S 算法的成像处理, 其中 $w(t)$ 为方位压缩后的目标包络, 与天线的方位加权函数有关。

4 双站 SAR 的 C-S 算法误差分析

4.1 泰勒级数近似产生的相位误差

在 C-S 算法的推导过程中, 需要根据相位驻留原理和泰勒级数展开作一些近似计算, 这些近似会给 C-S 算法和成像带来一定的影响。特别在推导原始回波信号方位向傅里叶变换的过程中, 需要泰勒级数的二次项近似展开, 为了不影响目标的最终成像质量, 由此近似引起的相位误差必须小于 $\pi/8 = 22.5^\circ$, 其误差可表示为

$$\begin{aligned} \phi_{e_taylor}(f_\tau, f_t) &= \frac{-4\pi R_0}{\lambda} \left[\sqrt{\left(\frac{f_t \lambda}{c} + 1 \right)^2 - \frac{R_{T0} R_{R0}}{R_0^2} \left(\frac{f_t \lambda}{2V_0} \right)^2} \right. \\ &\quad \left. - \left(D_s(f_t) + \frac{f_t \lambda}{c \cdot D_s(f_t)} + \frac{D_s(f_t)^2 - 1}{2D_s(f_t)^3} \cdot \left(\frac{f_t \lambda}{c} \right)^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$D_s(f_t) = \sqrt{1 - \frac{R_{T0} R_{R0}}{R_0^2} \left(\frac{f_t \lambda}{2V_0} \right)^2} \quad (21)$$

图3给出了泰勒级数近似引起的相位误差曲线图。图4为泰勒近似相位误差与收发距离比 k_r 关系。可以看出随着收

发距离比的增大泰勒级数近似引起的相位误差变大。按照表1给出的参数计算,泰勒级数的二次项作近似展开得到的相位误差为 0.036° 。该误差远远小于 22.5° ,由此近似引起的误差不影响目标的成像质量。

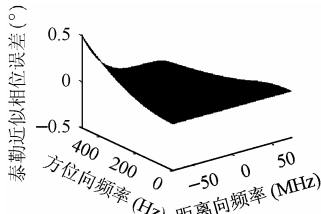


图3 泰勒近似相位误差

Fig.3 The phase error of Taylor approximation

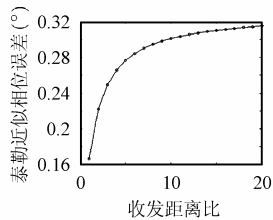


图4 泰勒近似相位误差与收发距离比关系

Fig.4 The relation between the Taylor approximation phase error and the ratio of range

表1 双站 SAR 系统参数

Table1 The parameter of bistatic SAR

信号载频 f_c	10GHz
信号带宽 B	100MHz
脉冲重复频率 PRF	600Hz
脉冲宽度 τ	2 μ s
载机速度 V_0	150m/s
发射载机高度 H_T	10km
接收载机高度 H_R	5km
发射载机地距 R_{Tg}	50km
接收载机地距 R_{Rg}	30km
参考距离 R_{ref}	30km

4.2 二次距离压缩(SRC)相位误差

在 C-S 算法中二次距离压缩仅由参考距离 R_{ref} 进行修正,在大的测绘带宽下将会引起一定的相位误差 $\phi_{e_SRC}(f_r, f_i)$,同样为了不影响目标的最终成像质量,由 SRC 引起的相位误差必须小于 $\pi/8 = 22.5^\circ$,其误差可表示为

$$\phi_{e_SRC}(f_r, f_i) = \frac{2\pi\lambda}{c} \left(\frac{D_s(f_i)^2 - 1}{D_s(f_i)^3} \right) (R_{ref} - R_0) f_r^2 \quad (22)$$

由图5 SRC 相位误差曲线可以看出,按照表1给出的参数,二次距离压缩(SRC)的相位误差为 10^{-8} 量级,由此近似引起的误差几乎为零,不影响目标的最终成像质量。

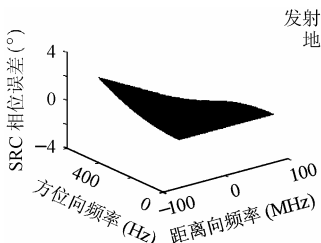


图5 SRC 相位误差曲线
Fig.5 The phase error curve of SRC

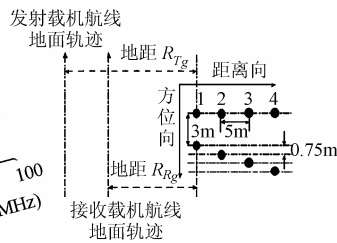
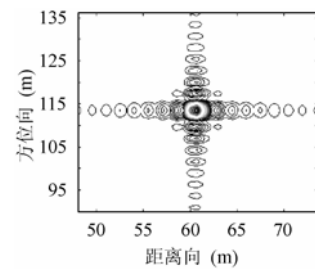


图6 点目标位置关系图
Fig.6 The coordinate of target points

5 双站 SAR 的 C-S 算法成像仿真

前面推导了正侧视模式双站 SAR 的 C-S 成像算法,下面基于 C-S 算法对点目标进行了成像仿真。仿真中系统参数由表1给出,地面四组点目标相对位置关系如图6所示,每组目标的距离向间隔为5m;第1组目标的方位向间隔3m,第2,3,4组目标的方位间隔依次增加0.75m;收、发平台航线到点目标场景中心线的地面距离分别为 R_{Rg} 、 R_{Tg} 。

图7给出了双站C-S成像算法对单个点目标的成像结果。图8~图11给出的是 R_{Tg} 为不同值时对图6所示点目标的成像结果。其中,图8是 $R_{Tg} = 30\text{km}$ ($k_r = 1.04$) 时的成像结果;图9是 $R_{Tg} = 50\text{km}$ ($k_r = 1.68$) 时的成像结果;图10是 $R_{Tg} = 100\text{km}$ ($k_r = 3.30$) 时的成像结果;图11是 $R_{Tg} = 150\text{km}$ ($k_r = 4.94$) 时的成像结果。从仿真结果可以看出,目标的斜距分辨率不受地距变化的影响,只与系统发射带宽有关;方位向的分辨率受到地距变化的影响。由图8~图11可以看出,在接收地距 R_{Rg} 不变时,随着发射地距 R_{Tg} 的增大(亦即收发距离比的增大),图像的方位分辨率越来越差,原本能够清晰分辨的点,随着地距 R_{Tg} 的增大逐渐变得模糊起来。当 $R_{Tg} = 150\text{km}$ ($k_r = 4.94$) 时,仿真中第1,2组点目标已经完全模糊无法分辨。基于双站C-S成像算法得到的成像结果与文献[1,2]关于方位向分辨率分析的理论结果完全相符。



错误! 图7 双站 SAR 单个点目标成像
Fig.7 The image of single target point of bistatic SAR



图8 $R_{Tg} = 30\text{km}$ 时的成像结果
图9 $R_{Tg} = 50\text{km}$ 时的成像结果
Fig.8 The image of points with $R_{Tg} = 30\text{km}$
Fig.9 The image of points with $R_{Tg} = 50\text{km}$



图10 $R_{Tg} = 100\text{km}$ 时的成像结果
图11 $R_{Tg} = 150\text{km}$ 时的成像结果
Fig.10 The image of points with $R_{Tg} = 100\text{km}$
Fig.11 The image of points with $R_{Tg} = 150\text{km}$

6 结论

本文分析了正侧视模式下双站 SAR 的回波模型, 基于此并结合常规单站 C-S 成像算法的思想, 推导出了双站 SAR 的 C-S 成像算法, 分析了 C-S 算法由于相位驻留原理和泰勒级数展开等近似计算引起的相位误差。利用双站 SAR 的 C-S 成像算法, 对给定的点目标进行了成像仿真。根据仿真结果可以得出结论, 随着收发距离比 k_r 的增大, 图像的方位分辨率越来越差。基于双站 C-S 成像算法得到的成像结果与关于方位向分辨率分析的理论结果完全相符。

参 考 文 献

- [1] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003: 20–50.
- [2] 汤子跃, 张守融. 双站 SAR 的方位分辨力、脉冲重复频率和测绘带宽. 电子与信息学报, 2004, 26(4): 607–712.
- [3] 汤子跃, 张守融, 王卫延. 运动误差对双站 SAR 相位同步及成像的影响. 电子学报, 2003, 31(12): 1907–1910.
- [4] Ender J H G. Signal theoretical aspects of bistatic SAR. IEEE International Geosci. and Remote Sensing Symp., Toulouse, July 2003: 1438–1441.
- [5] Raney R K, Runge H, Bamler R *et al.*. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on GRS*, 1994, 32(4): 786–799.
- [6] Runge H, Bamler R. A novel high precision SAR focusing algorithm based on chirp scaling. IGARSS' 92, Clear Lake, TX, May 1992: 372–375.
- [7] Raney R K. A new and fundamental Fourier transform pair. In Proc. IEEE Geosci. Remote Sensing Symp., IGARSS'92, Clear Lake, TX, May 1992: 106–107.

朱振波: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为双站合成孔径雷达系统及成像技术.

汤子跃: 男, 1966年生, 博士后, 副教授, 博士生导师, 从事有关合成孔径雷达系统及微波成像新技术的研究.

蒋兴舟: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达及水声信号理论的研究.