

基于二次距离压缩的双基地合成孔径雷达斜视成像算法

张升康^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 根据“Tandem”模式双基地 SAR 几何关系及其信号模型, 该文给出了一种适用于该模式下的基于二次距离压缩的斜视成像算法, 成功地解决了由于接收、发射平台分置而产生的不同于单基地 SAR 的二次距离压缩、距离徙动校正和方位聚焦问题。仿真表明在任意双基地角情况下, 该算法均能得到很好的成像结果。

关键词: 合成孔径雷达; 双基地合成孔径雷达; 斜视成像算法; 二次距离压缩(SRC)

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1717-05

A Squint Mode Bistatic Synthetic Aperture Radar Image Formation Algorithm Based on Second Range Compression

Zhang Sheng-kang^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

Abstracts: An squint mode image formation algorithm for “Tandem” Bistatic Synthetic Aperture Radar(BSAR) is addressed in terms of its geometry and echo models, which is relative to second range compression in monostatic SAR. Aspects of second range compression, range migration and azimuth focusing, which are different with those in monostatic SAR due to the separation of receive-transmit platforms, are resolved successfully. The algorithm is validated for bistatic SAR with arbitrary bistatic angle geometry.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Bistatic Synthetic Aperture Radar(BSAR); Squint mode imaging algorithm; Second Range Compression(SRC)

1 引言

双基地合成孔径雷达成像的可行性早已被实验所证实^[1-3], 除时间同步、相位同步等技术问题外, 双基地合成孔径雷达的成像算法依然没有完全解决。Soumekh 最先进行了双基地合成孔径雷达成像算法的研究^[4-6], 其研究的逆变换成像方法实质为双基地 SAR 的 Omega-K 算法。近几年 Ender, Walterscheid 等人^[7-10]将成熟的单基地成像算法进行扩展, 使其满足双基地成像的特殊要求, 并应用于双基地合成孔径雷达成像, 完成了对实际数据的成像。与此同时, D’Aria, Rocca 等人^[11,12]则考虑如何对双基地 SAR 的回波数据进行校正, 使其可以用任意一种通用的单基地 SAR 成像算法进行成像, 并取得了很好结果。此外, CS 算法^[13]、BPA^[14]以及用于聚束模式成像的 PFA^[15]算法都正在成为双基地 SAR 成像处理的可选方案。“Tandem”模式^[8](即发射、接收平台前后分置在相同的轨迹上运动)双基地 SAR 是近几年欧洲多个国家研究的一种非常重要的双基地合成孔径雷达体制, 它编队相对简单且对地面运动目标检测有着很大潜力。本文提出了一种“Tandem”模式双基地 SAR 的斜视成

像算法, 根据该模式下的几何关系和信号模型, 详细地推导成像算法的每个步骤, 并通过仿真得到了理想的成像结果。

2 几何关系与信号模型

如图 1 给出了“Tandem”模式双基地 SAR 的几何关系, T 表示发射平台, R 表示接收平台, P_1 为点目标。假定接收平台以速度 V_a 沿着 Y 轴正向作匀速直线运动, 发射平台以相同的轨迹和速度运动, 并和接收平台相距 $2h$, 其中 h 为发射或接收相位中心到雷达中心(收发相位中心连线的中点)的距离, 称为偏移距离(offset), Q 点为此时收发平台连线的中心。当 $h=0$ 时, 接收、发射平台都重叠到 Q 点, 则“Tandem”模式退化成普通的单基地合成孔径雷达。

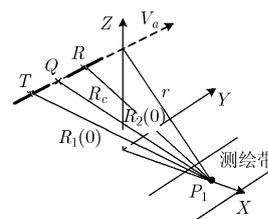


图 1 “Tandem”模式双基地 SAR 的几何关系

令 r 为目标到雷达运动轨迹的距离, T, R, Q 分别为 $t=0$ 时刻发射平台、接收平台位置及其连线中心, $R_1(0), R_2(0), R_c$ 分别对应它们与目标的距离, R_c 与垂直斜距 r 的夹角定义为斜视角, 用 γ 表示, 则 $R_c = r/\cos(\gamma)$ 。

$$\left. \begin{aligned} R_1(t; r, h, \gamma) &= \left[R_c^2 + (V_a t - h)^2 - 2R_c (V_a t - h) \sin \gamma \right]^{1/2} \\ R_2(t; r, h, \gamma) &= \left[R_c^2 + (V_a t + h)^2 - 2R_c (V_a t + h) \sin \gamma \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} (1)$$

任意时刻的双基地 SAR 距离和为发射天线相位中心到目标的距离加上接收天线相位中心到目标的距离之和, 为了和单基地 SAR 的表示方法相一致, 定义双基地 SAR 的距离历史为

$$R(t; r, h, \gamma) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 R_i(t; r, h, \gamma), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

对 $R(t; r, h)$ 在 $R(0; r, h)$ 处作泰勒展开, 可得到如下表达式:

$$R(t; r, h) = R(0; r, h) + \dot{R}(0; r, h)t + \frac{\ddot{R}(0; r, h)}{2!}t^2 + \dots \quad (3)$$

忽略时间的三次方以上的项, 则双基地 SAR 的距离历史同样可以近似为时间的二次函数, 式(3)在偏移距离 $h=0$ 时将退化成单基地 SAR 的距离历史, 但是在偏移距离(或双基地角, 即 $\angle TP_1R$)较大的情况下, 其差别很明显。

图 2 给出了式(3)的二次泰勒展开近似所产生的距离历史误差和相位误差, 仿真参数选择见表 1 所示, 可以看出在单基地(双基地角为 0°)情况下, 二次泰勒展开产生的距离误差和相位误差最大, 随着双基地角的增大, 式(3)的近似程度越来越高, 这是由于在垂直斜距不变时, 双基地角增大就意味着初始距离历史变大, 所以式(3)近似会更精确。

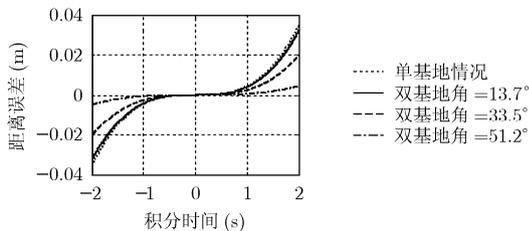


图 2 距离历史二次泰勒展开误差变化

3 成像算法

上文给出了双基地 SAR 的斜视几何关系与信号模型, 它是研究成像算法的基础。在单基地情况下, 由于斜视角的存在使得距离向和方位向的耦合更加紧密, 距离压缩后在时域已经聚焦的距离线, 经过傅里叶变换后将会在频域展开, 所以需要进行二次距离压缩, 同类问题在双基地情况下依然存在, 而且由于双基地 SAR 复杂的几何关系而变得更加复杂。不仅如此双基地 SAR 的斜视算法, 在距离徙动校正、方位聚焦与偏移校正等方面都有其不同于单基地 SAR 的独特方面。

3.1 距离压缩与二次距离压缩

根据驻定相位原理首先对回波信号进行距离向傅里叶变换, 可得

$$S_1(f_r, t; r, h) = \exp\left\{j\pi \frac{f_r^2}{K}\right\} \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R(t; r, h)\right\} \quad (4)$$

其中 f_r 为快时间域的信号频率。经过距离压缩后, 信号在频率-慢时间域近似表示为

$$S_2(f_r, t; r, h) = \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + f_r) R(t; r, h)\right\} \quad (5)$$

考虑到式(3)的近似, 对距离压缩后的信号 $s(f_r, t; r, h)$ 作方位向傅里叶变换, 由驻定相位原理

$$\begin{aligned} S_3(f_r, f_i; r, h) &= \exp\left\{-j \frac{4\pi f_0}{c} R(0; r, h) - j \frac{\pi f_{dc}^2}{f_r}\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j2\pi \frac{f_i f_{dc}}{f_r}\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi f_r}{c} R(0; r, h) - j \frac{\pi f_r f_{dc}^2}{f_0 f_r}\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_0}{(f_0 + f_r) f_r} f_i^2\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 f_i 为信号的多普勒, f_0 为载波频率,

$$f_{dc} = -\frac{f_0}{c} \left(\frac{-hV_a - V_a R_c \sin \gamma}{R_1(0)} + \frac{hV_a - V_a R_c \sin \gamma}{R_2(0)} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_R &= -\frac{f_0}{c} \left(\frac{V_a^2}{R_1(0)} - \frac{(V_a h + R_c V_a \sin \gamma)^2}{R_1^3(0)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{V_a^2}{R_2(0)} - \frac{(-V_a h + R_c V_a \sin \gamma)^2}{R_2^3(0)} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)与式(8)分别定义为回波的多普勒中心和多普勒调频率。式(6)中第 1 项为固定相位项, 对成像处理没有任何影响, 可以不予考虑; 第 2 项为多普勒频率的线性项, 它会造成方位压缩后点目标的偏移, 但对聚焦处理没有影响; 第 3 项为快时间频率的线性项, 它对应距离徙动, 其中前一部分由初始距离 $R(0; r, h)$ 引起, 可以不予考虑; 最后一项为多普勒和频率的耦合项, 必须先对其进行解耦合后才能进行方位聚焦处理, 将该项按快时间频率展开, 并忽略高于二次的项, 可得

$$\begin{aligned} &\exp\left\{-j\pi \frac{f_0}{(f_0 + f_r) f_r} f_i^2\right\} \\ &= \exp\left\{-j\pi \frac{f_i^2}{f_r} + j\pi \frac{f_i^2}{f_r f_0} f_r - j\pi \frac{f_i^2}{f_r f_0^2} f_r^2\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)中, 并且忽略固定相位项, 得到

$$\begin{aligned} S_4(f_r, f_i; r, h) &= \exp\left\{-j\pi \frac{f_i^2}{f_r f_0^2} f_r^2\right\} \exp\left\{j\pi \frac{f_i^2 - f_{dc}^2}{f_0 f_r} f_r\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f_i^2}{f_r}\right\} \exp\left\{j2\pi \frac{f_i f_{dc}}{f_r}\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

很明显, 式(10)中的第 1 项为快时间频率的二次项, 它对应着时域的线性调频信号, 对此信号进行压缩即为通常所说的二次距离压缩(Second Range Compression, SRC), 二次距离压缩对应的调频斜率为

$$K_{SRC} = f_r f_0^2 / f_i^2 \quad (11)$$

该调频分量在距离方向上引起的最大相位误差为

$$|\Delta\Phi| = \pi \frac{f_t^2}{f_R f_0^2} \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad (12)$$

其中 B 为发射信号的带宽。相位误差随着多普勒的增加而增大, 一般情况下, 若 $|\Delta\Phi| < \pi/4$, 则二次距离压缩分量不会对距离压缩产生明显的影响。在斜视角为零时, 多普勒中心为零, 多普勒频率 f_t 在 $-B_d/2$ 和 $+B_d/2$ 之间, 所以产生的相位误差很小。而在斜视情况下, 多普勒中心可能为 PRF 的几倍, 此时多普勒满足 $-B_d/2 + f_{dc} \leq f_t \leq +B_d/2 + f_{dc}$, 因而会产生较大的相位误差。

二次距离压缩的调频率是多普勒频率和多普勒调频率的函数, 下面从 3 个方面来讨论二次距离压缩问题:

(1) 在测绘带不是很宽且多普勒带宽比多普勒中心小很多时, 可以用测绘带中心多普勒斜率来代替不同距离单元上的多普勒斜率(多普勒斜率和距离大小有关), 用多普勒中心频率代替多普勒频率, 此时 SRC 调频斜率为一常数

$$K_{\text{SRC}} = \frac{f_{Rc} f_0^2}{f_{dc}^2} \quad (13)$$

其中 f_{Rc} 为测绘带中心的多普勒斜率。这样 SRC 可以和前面的距离压缩一次完成, 但是需要把距离压缩的参考调频斜率变为

$$K_m = \frac{K K_{\text{SRC}}}{K + K_{\text{SRC}}} \quad (14)$$

(2) 当测绘带宽不宽但多普勒带宽较大时, K_{SRC} 随多普勒的变化需要考虑, 此时 SRC 处理需要在距离多普勒域进行, 不同的多普勒单元需要用不同的 K_{SRC} 进行压缩, 当然也可以在二维频域进行。(3) 测绘带较宽且多普勒带宽较大时, 将无法对 SRC 进行补偿。

3.2 距离徙动校正

式(10)中的第 2 项对应着距离徙动项, 将其转化到距离-多普勒域, 则距离徙动校正量为

$$\Delta\tau = -\frac{f_t^2 - f_{dc}^2}{2f_0 f_R} \text{ 或 } \Delta R = -\frac{\lambda(f_t^2 - f_{dc}^2)}{2f_R} \quad (15)$$

式(15)中, 距离徙动包含了距离走动和距离弯曲两个分量, 距离走动对应着距离历史随慢时间变化的线性部分, 所以可以在时间域进行直接校正; 距离弯曲则对应着时间的二次项, 必须在多普勒域进行校正。当然整个距离徙动也可以在距离多普勒域进行校正, 由于实际回波在两个方位向都是离散采样的, 所以距离徙动的轨迹并不一定位于采样点上, 通常需要对压缩后的数据进行插值, 来获得徙动的精确轨迹, 然后根据式(13)完成距离徙动校正。距离徙动虽然是 SAR 处理中必然出现的现象, 但它的大小随系统参数不同而变化, 一般情况下, 当最大距离徙动量小于 $1/4$ 距离分辨率时, 距离徙动量可以忽略不计, 亦即

$$R_q = \frac{1}{2} \{|\Delta\tau|\}_{\max} \cdot c = \frac{\lambda \left[\left(\frac{B_d}{2} + f_{dc} \right)^2 - f_{dc}^2 \right]}{2f_R} < \frac{\rho_r}{4} \quad (16)$$

其中 $\{ \cdot \}_{\max}$ 表示取最大值, ρ_r 表示距离分辨率。在斜视情况下, 式(16)很难满足。从式(1), 式(7), 式(8)可知, 多普勒

调频率和多普勒中心都与雷达航迹与测绘带垂直斜距 r 有关, 所以在不同斜距的测绘带上, 距离徙动量是变化的, 值得注意的是在双基地情况下, 多普勒中心也随测绘带作线性变化。假设雷达的测绘带宽度为 W_r , 则测绘带远、近边缘与航迹的垂直距离分别近似为 $r + W_r \sin\theta/2$ 和 $r - W_r \sin\theta/2$, 其中 θ 为视角。由此距离的变化而造成的距离徙动差等于

$$\Delta R_q = \frac{\lambda}{2} \left[\left(\frac{B_d}{2} + f_{dc} \right)^2 - f_{dc}^2 \right] \cdot \left| \frac{1}{f_R (r - W_r \sin\theta/2)} - \frac{1}{f_R (r + W_r \sin\theta/2)} \right| \quad (17)$$

很明显, 距离徙动差的大小取决于测绘带宽度及其他诸多因素, 当距离徙动差比系统的距离分辨率小很多时(小于 $1/4$ 距离分辨率), 距离徙动的空变性可以忽略。

3.3 方位聚焦与偏移补偿

从式(10)可明显看出, 对回波数据的成像在距离压缩后, 还需要补偿 4 个相位项, 第 1 项的二次距离压缩和第 2 项的距离徙动上文已经详细介绍, 下面介绍第 3 项(方位聚焦)和第 4 项(方位偏移补偿)。方位聚焦非常简单, 和普通距离多普勒算法没有两样, 其匹配函数为

$$H_a(f_t; r, h) = \exp \left\{ j\pi \frac{f_t^2}{f_R} \right\} \quad (18)$$

同样, 在进行方位聚焦时, 同样需要考虑方位聚焦深度问题, 即采用同一多普勒调频率进行方位向脉压时, 测绘带宽度是有限制的。

进行方位聚焦后, 我们会发现目标偏离了原来的位置, 这刚好与式(10)的最后一项相对应。所以要消除目标偏移, 则需要在方位聚焦后再进行偏移相位补偿, 补偿函数为

$$H_{os}(f_t; r, h) = \exp \left\{ -j2\pi \frac{f_t f_{dc}}{f_R} \right\} \quad (19)$$

在实际处理中, 为了减小运算量, 方位聚焦于偏移补偿可以在慢时间域内一步完成, 此时的匹配函数可以表示为

$$h_a(t; r, h) = \exp \left\{ -j\pi f_R t^2 + j2\pi f_{dc} t \right\} \quad (20)$$

至此, 完成了成像的全部过程, 整个流程图如图 3 所示。

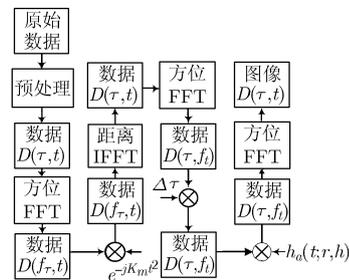


图 3 双基地 SAR 斜视成像算法流程图

4 仿真与分析

根据上文推导的算法, 下面采用数值仿真方法对其进行验证, 仿真采用的双基地 SAR 的系统参数, 如表 1 所示。

假设雷达具有如图1所示的几何关系。

表1 雷达系统参数设置

参数	数值	参数	数值
载波频率	3.2GHz	方位天线长度	2.8m
脉冲信号带宽	60MHz	平台运行速度	200m/s
PRF	1000Hz	平台高度	7.8km
视角	60°	斜视角	10° ~ 30°

为了验证算法的有效性, 设置了9个点目标的成像场景, 最近、远斜距和场景中心处斜距相差1000m, 方位向点目标相距100m。根据场景布置先产生回波数据, 再采用上文推导的算法对数据进行处理, 得到场景图像的三维显示如图4所示(斜视角10°、双基地角28.3°或偏移距4000m), 可以粗略地看出点目标图像中各个点目标的相对位置和设置的场景吻合, 且在测绘带近端和远端的目标都能够很好地聚焦。图5为位于测绘带近端、中心、远端处点目标的放大二维图像, 它们的副瓣特性与主瓣宽度基本相同, 具体特性指标见表2和表3。

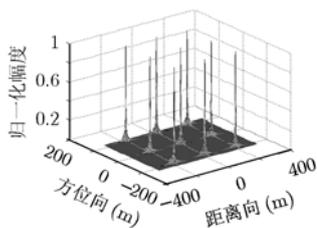


图4 成像结果三维显示

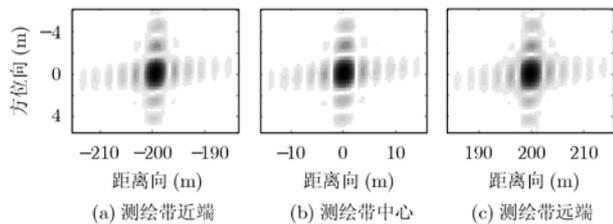


图5 不同斜距处二维放大点目标图像

为了研究算法的适用范围, 本次仿真分别对3种斜视角(分别为10°, 20°, 30°)、3种双基地角(0°, 28.3°, 54.3°), 对应偏移距 h 分别为0m, 4000m, 8000m共9种组合情景下进行了仿真, 图6给出了3种典型组合情景下的点目标仿真结果。可以看出各种情况下都能实现点目标的聚焦, 但是随着斜视角的增大, 图像的方位向主瓣变宽, 方位分辨率下降, 这是由于多普勒调频率随着斜视角的增大而变小, 在相同的积分时间下, 多普勒带宽降低而引起的。此外, 在斜视角为30°时, 方位副瓣有较明显的分叉现象, 且距离向分辨率也明显变差, 这是由于斜视角增大使得多普勒频率变大, 在距离-方位耦合相位项展开中, 三次以上高次相位项不能忽略。图像的具体性能指标将在表2、表3列出。

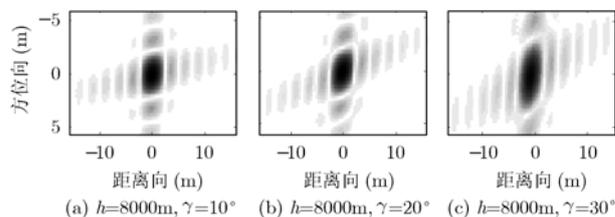


图6 几种典型组合情景下的点目标仿真图像

表2、表3给出了全部9种几何参数下, 点目标的性能指标(仅列出测绘带中心与测绘带近端的点目标指标)。表2、表3中第一列表示不同的斜视角, 第一行表示不同的双基地偏移距, R 表示仿真的实际分辨率, 单位m, PSLR为峰值副瓣比, 单位dB, ISLR为积分副瓣比, 单位dB。同样可以看出方位向分辨率随这斜视角增大而变差; 另外在斜视角较大时, 图像的理想分辨率与实际分辨率误差较大, 这是由于式(9)近似中忽略了三次以上的误差项所引起的, 也就是说在斜视角达到一定值后, 式(9)的二次近似引入的误差已经不可忽视, 此时必须选择更精确的近似, 以便适应大斜视角情况下的成像。除此之外, 各种情况下的PSLR、ISLR都基本上满足成像质量的要求。

表2 各种情况下点目标的方位向性能指标

斜视角(°)		$h=0m$			$h=4000m$			$h=8000m$		
		R	PSLR	ISLR	R	PSLR	ISLR	R	PSLR	ISLR
10	中心目标	1.90	12.7	10.6	1.82	12.7	10.6	2.25	13.7	10.6
	近端目标	1.90	12.9	10.6	1.82	12.6	10.4	2.25	13.7	10.5
20	中心目标	2.30	13.0	10.1	2.08	13.8	10.8	2.30	14.1	10.7
	近端目标	2.32	13.0	10.2	2.08	13.4	10.5	2.31	13.9	10.2
30	中心目标	2.53	14.4	11.7	2.60	14.7	11.6	2.56	14.3	11.4
	近端目标	2.57	13.8	11.2	2.61	14.3	11.6	2.56	14.1	10.9

表 3 各种情况下点目标的距离向性能指标

斜视角($^{\circ}$)		$h=0\text{m}$			$h=4000\text{m}$			$h=8000\text{m}$		
		R	PSLR	ISLR	R	PSLR	ISLR	R	PSLR	ISLR
10	中心目标	2.57	14.0	10.8	2.60	13.7	10.5	2.56	13.5	10.3
	近端目标	2.57	14.1	10.8	2.60	13.7	10.4	2.56	13.5	10.1
20	中心目标	2.58	13.4	10.2	2.58	13.8	10.4	2.56	14.2	11.3
	近端目标	2.59	13.2	10.0	2.60	13.4	10.1	2.57	14.1	10.8
30	中心目标	2.78	14.1	11.3	2.80	14.1	11.6	2.86	13.3	10.8
	近端目标	2.79	13.9	11.1	2.82	13.7	11.0	2.89	14.3	11.4

5 结束语

本文根据“Tandem”模式双基地合成孔径雷达的几何关系和信号模型, 推导了适用于该模式下的双基地斜视成像算法。首先由菲涅耳近似, 给出了双基地距离历史的二阶近似模型, 并给出信号回波的一般表达式; 然后根据单基地斜视的二次距离压缩算法, 提出了双基地情况下的等效二次距离压缩问题及其解决步骤; 此外, 推导了双基地斜视情况下的距离徙动校正公式, 并同时推导了方位聚焦匹配函数与方位偏移校正函数公式, 最终给出了算法实现的整体步骤。根据给出的算法实现方法, 采用计算机对算法进行仿真, 验证的算法的有效性, 并基于仿真结果分析了算法适用的局限性。

参 考 文 献

- [1] Walterscheid I and Ender J. Geometry and system aspects for a bistatic airborne SAR-experiment. Proc. EUSAR'04, Ulm, Germany, May 2004: 567-570.
- [2] Walterscheid I and Ender J. New results on bistatic synthetic aperture radar. *IEE Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1224-1225.
- [3] Yates G, Horne A M, and Blake A P, *et al.* Bistatic SAR image formation. Proc. EUSAR'04, Ulm, Germany, May 2004: 581-584.
- [4] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1991, 39(9): 2044-2054.
- [5] Soumekh M. Bistatic synthetic aperture radar imaging using wide-bandwidth continuous -wave sources. *SPIE*, 1998, 3462: 99-109.
- [6] Soumekh M. wide-bandwidth continuous-wave monostatic/bistatic synthetic aperture radar imaging. *IEEE International Conference on Image Processing*, Chicago, Oct. 1998: 361-365.
- [7] Ender J H G. A step to bistatic SAR processing. Proc. EUSAR'04, Ulm, Germany, May 2004: 359-364.
- [8] Ender J H G, Walterscheid I, and Brenner A R. New aspects of bistatic SAR: processing and experiments. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Alaska, USA, Sept. 2004: 1758-1762.
- [9] Ender J, Walterscheid I, and Brenner A. Bistatic SAR-translational invariant processing and experimental results. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2006, 153(3): 177-183.
- [10] Walterscheid I, Brenner A, and Ender J. Bistatic SAR processing using an Omega-K type algorithm. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seoul, Korea, July, 2005: 1064-1067.
- [11] D'Aria D and Rocca F. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1362-1375.
- [12] D'Aria D and Rocca F. Bistatic SAR Processing Using Standard Monostatic Processor. Proc. EUSAR'04, Ulm, Germany, May 2004: 567-570.
- [13] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I. Focusing bistatic SAR images using non-linear chirp scaling. *Radar 2004*, Toulouse, France, Oct. 2004.
- [14] Rigling B D and Moses R L. Polar format algorithm for bistatic SAR. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 40(4): 1147-1159.
- [15] Ding Y and Munson D C. A fast back-projection algorithm for bistatic SAR imaging. *IEEE International Conference on Image Processing*, Austin, 1994: 456-460.

张升康: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为双站合成孔径雷达系统、雷达信号处理、合成孔径雷达新体制、新概念研究。

杨汝良: 男, 1943年, 研究员, 博士生导师, 长期从事机载和星载合成孔径雷达系统总体设计。