

## 原始数据压缩对星载 SAR/GMTI 系统测速影响研究

行坤<sup>①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup> 祁海明<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 星载SAR原始数据压缩是目前解决星载SAR实时获取的海量数据与星上有限数传带宽的有效手段。压缩比越大,数据率越低,但较大的量化误差将影响SAR-GMTI的测速精度;压缩比越低,数据压缩对测速精度影响越小,但数据率越高。因此,数据压缩比的选择需要在数据率与测速精度之间取得折中。该文建立了星载SAR/GMTI系统回波信号仿真模型,仿真了星载SAR-GMTI原始数据,针对相位中心偏置天线(DPCA)与沿迹干涉(ATI)两种有重要工程应用潜力的方法,详细分析了分块自适应量化(BAQ)算法对测速精度的影响。该文的研究结果将为星载SAR/GMTI系统的压缩比选择提供重要的理论依据。

**关键词:** 合成孔径雷达; 原始数据; 压缩; 地面动目标显示; 速度测量

中图分类号: TP957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1321-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00868

## Study of Effect of Raw Data Compression on Space-borne SAR/GMTI Velocity Measurement

Xing Kun<sup>①②</sup> Deng Yun-kai<sup>①</sup> Qi Hai-ming<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

**Abstract:** At present, the effective way to resolve the contradiction between huge space-borne SAR raw data rate and limited on-board data-transmission bandwidth is space-borne SAR raw data compression. The higher compression ratio is, the lower data rate will be, but larger quantization error will affect the velocity measurement accuracy of SAR-GMTI. The lower compression ratio is, the less effect of data compression on velocity measurement accuracy is, but the higher data rate will be. Therefore, the choice of data compression ratio needs achieve a compromise between data rate and velocity measurement accuracy. This paper establishes the echo simulation model of space-borne SAR/GMTI system and simulates the raw data of space-borne SAR-GMTI. For Displaced Phase Center Antenna (DPCA) and Along-Track Interferometry (ATI) methods which have significant application potentialities in practice, this paper analyzes the effect of Block Adaptive Quantization (BAQ) algorithm on velocity measurement accuracy in detail. The results of this paper provides important theory basis for the choice of compression ratio of the space-borne SAR/GMTI system.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Raw data; Compression; Ground Moving Target Indication (GMTI); Velocity measurement

### 1 引言

星载 SAR/GMTI 系统可以全天时、全天候、不受国界限制地对敌军进行监视,既可以获知敌方军事设施的分布,也可以监测其车辆、坦克、自行火炮、机动式导弹发射架、火车、军舰和航空母舰等军事运动目标的活动部署情况,便于及时掌握敌

方的军事动态。星载 SAR/GMTI 系统将在未来战争中发挥举足轻重的作用,是目前世界各国积极研究和开发的热点和难点<sup>[1]</sup>。

目前国际上研究和应用较多的动目标检测方法<sup>[2,3]</sup>有:相位中心偏置天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA<sup>[4-6]</sup>)方法、沿迹干涉(Along-Track Interferometry, ATI<sup>[4-6]</sup>)方法、空时 2 维自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP<sup>[7]</sup>)等。STAP 采用了空间与时间 2 维联合的自适应处理方式,具有很大的灵活性,能有效的抑制杂波与干扰,但同时具有计算量巨大、无法实时处

2009-06-12 收到, 2009-11-24 改回

中国科学院优秀博士论文专项科研启动基金(0813260042)资助课题和微波成像技术国家重点实验室基金(9140C1903041003)

通信作者: 行坤 xingkunmark@gmail.com

理等缺点，是目前系统硬件结构最复杂、对技术要求最高、工程实现难度最大的 SAR/GMTI 技术。而 DPCA 和 ATI 方法较为成熟，易于工程实现，已被分别应用于德国的 TerraSAR-X<sup>[5]</sup>，加拿大的 RADARSAT-2<sup>[4]</sup>上，因此，本文采用目前星载 SAR/GMTI 系统最常用的 DPCA 方法和 ATI 方法分析数据压缩对星载 SAR/GMTI 系统测速精度的影响。

星载 SAR 原始数据量大，星载存储设备容量和数据传输带宽有限，因此必须对回波数据作压缩处理。目前，广泛应用的算法是分块自适应量化 (Block Adaptive Quantization BAQ<sup>[8-10]</sup>) 算法，该算法曾被分别应用于美国 Magellan 飞行器的 SAR 系统<sup>[8]</sup>，ENVISAT<sup>[11]</sup>的 A-SAR，德国的 TerraSAR-X<sup>[12]</sup>，加拿大的 RADARSAT-2<sup>[12]</sup>上。因此，针对工程实际应用，本文对 BAQ 算法进行分析。

设计星载 SAR 系统时，需要针对不同的应用，合理地选择压缩算法和压缩比<sup>[13,14]</sup>。由于数据压缩必然使回波信号相位产生失真，当星载 SAR 系统做地面动目标检测时，将影响动目标的速度测量精度<sup>[15]</sup>。因此研究数据压缩对星载 SAR/GMTI 系统速度测量精度的影响，将为合理设计星载 SAR/GMTI 系统数据压缩方案提供重要的理论依据。本文通过仿真实验详细分析 BAQ 压缩对星载 SAR/GMTI 系统速度测量精度的影响。文章结构如下：

第 2 节给出星载 SAR/GMTI 系统回波信号仿真模型。第 3 节给出详细的实验流程、仿真参数、实验结果及分析。第 4 节为文章的结论。鉴于篇幅，文章没有给出 BAQ 算法原理以及 DPCA 和 ATI 方法原理，具体原理可参考文献<sup>[8]</sup>和文献<sup>[6]</sup>。

## 2 星载 SAR/GMTI 系统回波信号仿真模型<sup>[16,17]</sup>

星载 SAR/GMTI 系统回波信号仿真流程如图 1 所示。具体过程如下：

(1) 根据卫星轨道参数和卫星轨道动力学方程确定卫星的位置矢量，再利用地球椭球模型确定合成孔径中心时刻天线瞄准线在地球表面的交点(瞄准点，作为场景中心)的位置矢量。

(2) 根据场景中心的位置矢量和所设置的杂波点相对场景中心的位置确定杂波点的位置矢量。

(3) 根据杂波点的位置矢量、卫星的位置矢量以及发射和接收通道相位中心的位置矢量，确定每个慢时刻发射和接收相位中心与杂波点的视线距离和视线夹角，再根据 SAR 系统参数和所生成的杂波散射系数得到每个慢时刻杂波点回波数据。

(4) 根据所设置的动目标参数确定每个慢时刻动目标的位置矢量。

(5) 根据动目标的位置矢量、卫星的位置矢量以及发射和接收通道相位中心的位置矢量，确定每个

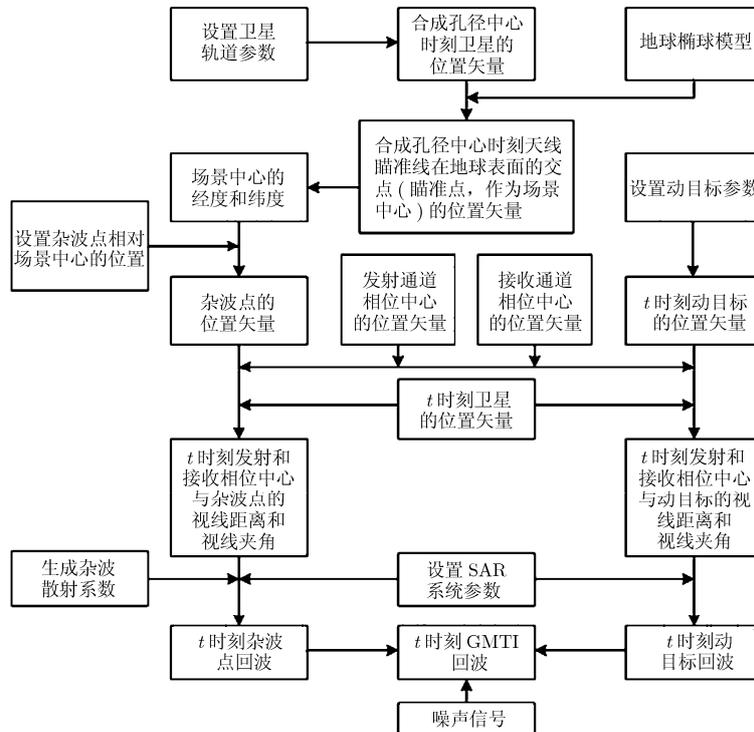


图1 星载SAR/GMTI系统回波信号仿真流程

慢时刻发射和接收相位中心与动目标的视线距离和视线夹角,再根据 SAR 系统参数得到每个慢时刻动目标回波数据。

(6)将杂波回波数据、动目标回波数据和噪声信号叠加,得到 GMTI 回波数据。

在确定每个慢时刻发射和接收相位中心与杂波点和动目标的视线距离和视线夹角时,要对每个慢时刻完成转动的地心坐标系、不转动的地心坐标系、卫星轨道平面坐标系、卫星平台坐标系、卫星星体坐标系和天线坐标系的转换,是整个回波信号仿真模型的关键。

仿真模型中,杂波模型采用点散射体阵列模拟,仿真时在每一个分辨单元内放置一个点散射体,杂波点阵后向散射系数服从瑞利分布;动目标模型采用点散射体模拟;噪声信号幅度服从瑞利分布,相位服从均匀分布。

### 3 仿真实验

#### 3.1 实验流程

仿真实验流程如图2所示。

本仿真实验将在不同动目标径向速度、不同信杂比、不同信噪比、不同BAQ压缩比和不同分块情况下,分析数据压缩对星载SAR-GMTI测速精度的影响。具体信号处理方法归纳如下:星载SAR/GMTI回波信号按照第2节给出的仿真模型生成。数据压缩算法采用BAQ算法。原始数据成像采用CS算法,单视处理。图像配准采用频域插值方法。由于回波信号生成过程中,杂波和噪声都服从瑞利分布,通过随机产生,因此经过数据压缩和未经过数据压缩之间的测速误差对于每一个回波样本都是不一样的,需要通过统计得出。统计测速误差采用均方根(RMS)误差。需要说明的是:对于不同情况,经过数据压缩和未经过数据压缩的处理流程中所用的信号处理参数和处理方法完全相同,这样保证了 GMTI测速RMS误差仅由数据压缩引起。

#### 3.2 仿真参数

卫星轨道参数如表 1 所示。仿真中对卫星姿态

进行了偏航牵引。

将天线沿航迹向放置,等分为两个子孔径,天线全孔径发射信号,两个子孔径同时接收回波信号。仿真中采用的 SAR 系统参数如表 2 所示。

仿真中,在成像带中心放置 51 点×41 点杂波,每一个地面分辨单元包含一个杂波点,杂波后向散射系数和噪声幅度均服从瑞利分布。设置一个动目标。为了使测速误差更加精确,仿真中假设动目标方位向速度为零。

表 1 卫星轨道参数

卫星轨道高度	650000 m
卫星飞行速度	7535 m/s
卫星椭圆轨道半长轴	7021023 m
卫星椭圆轨道偏心率	0.0015
轨道倾角	95°
卫星轨道升交点赤径	300°
近地点幅角	89°
卫星过近地点时刻	0 s
地球平均赤道半径	6378137 m
地球极半径	6356752 m
地球自转速度	$7.292115 \times 10^{-5}$ rad/s

表 2 SAR 系统参数

发射天线长度	11.2 m
接收天线长度	5.6 m
天线高度	2.5 m
两子孔径相位中心间距	5.6 m
中心频率	9.5 GHz
脉冲重复频率	1900 Hz
脉冲宽度	$35 \times 10^{-6}$ s
信号带宽	60 MHz
采样频率	75 MHz
视角	35.9°
合成孔径中心时刻	607.5 s
峰值发射功率	10000 W
系统损耗因子	4.0 dB
噪声系数	4.0 dB
天线效率	70%

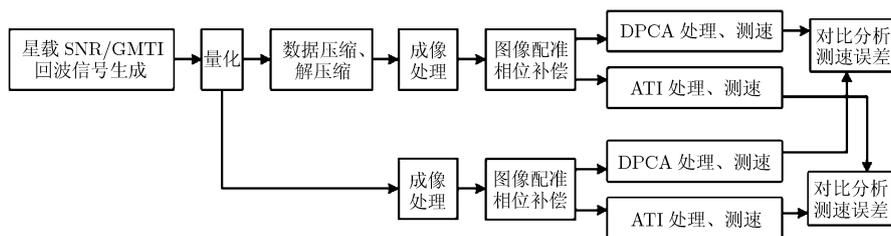


图 2 仿真实验流程图

### 3.3 仿真实验结果

**3.3.1 原始数据统计特性分析** 图 3 给出了原始数据经不同位数 BAQ 压缩前、后统计特性曲线。从图中可见，压缩后原始数据直方图与未压缩原始数据直方图按相似度从高到低排序，依次为 4 bit BAQ, 3 bit BAQ, 2 bit BAQ, 1 bit BAQ。显然，数据压缩位数越高，数据压缩导致的原始数据统计特性畸变越小。

**3.3.2 DPCA 和 ATI 检测结果** 以动目标径向速度  $v_r = 10 \text{ m/s}$ ，杂波平均后向散射系数  $\delta_c^0 = -13 \text{ dB}$ ，动目标雷达散射截面(RCS)  $\delta_t = 10 \text{ dBm}^2$  情况(该情况下，信噪比  $\text{SNR} = 23.7 \text{ dB}$ ，信杂比  $\text{SCR} = 11.4 \text{ dB}$ )为例给出 DPCA 和 ATI 检测结果如下。

GMTI 处理前通道一 SAR 图像如图 4 所示，图中平行四边形区域为杂波图像，杂波图像中心白色亮点为动目标点图像。DPCA 相消后 SAR 图像如图 5 所示，从图中可以看出，杂波已被消去，剩下动目标点和噪声图像。

ATI 干涉极坐标图如图 6 所示，圆圈中的点为动目标(动目标点在 SAR 图像中分布在两个像素里)，其它没有在  $0^\circ$  相角附近且具有较大幅度和相角的点(如在  $40^\circ$  相角附近的两个点，在  $120^\circ$  相角附近的两个点，在  $150^\circ$  相角附近的一个点)是动目标点周围像素受噪声影响产生的。

**3.3.3 测速误差分析** 图 7 给出相同信噪比和信杂比，不同径向速度条件下，BAQ 压缩相对于未经原始数据压缩的 RMS 测速误差。BAQ 分块为  $672(\text{距离}) \times 2(\text{方位})$ 。动目标径向速度取  $4 \text{ m/s}$  和  $10 \text{ m/s}$  两种情况：本仿真参数下， $4 \text{ m/s}$  为虚警概率  $P_{fa} = 10^{-6}$ ，检测概率  $P_d = 0.9$  条件下最小可检测径向速度；径向速度  $10 \text{ m/s}$  相当于动目标平均地面绝对速度为  $80 \text{ km/h}$ ，为军事上最关心的动目标速度。 $v_r = 4 \text{ m/s}$  时， $\text{SNR} = 26.5 \text{ dB}$ ， $\text{SCR} = 13.8 \text{ dB}$ ，而  $v_r = 10 \text{ m/s}$  时， $\text{SNR} = 23.7 \text{ dB}$ ， $\text{SCR} = 11.4 \text{ dB}$ ，这是因为  $v_r = 10 \text{ m/s}$  时，动目标在合成孔径时间内跨 4 个距离门，成像时动目标峰值能量下降。这里，可以近似看作是相同的信噪比和相同的信杂比。采用较大的信噪比和信杂比是为了使影响因素只来自径向速度的不同。需指出的是，在经过 BAQ 压缩和未经压缩情况下，动目标在 SAR 图像中的位置不变。RMS 测速误差指的是径向速度测速误差。从图 7 中可以看出：同一径向速度下，4 bit/sample 测速误差与 3 bit/sample 测速误差相差较小，3 bit/sample 测速误差与 2 bit/sample 测速误差相差较大，2 bit/sample 测速误差与 1 bit/sample 测速误差相差也较大；BAQ 压缩比越大，RMS 测速误差越大；径向速度越大，同压缩比条件下，不模糊可检测径向速度范围内相对 RMS 测速误差(RMS 测速

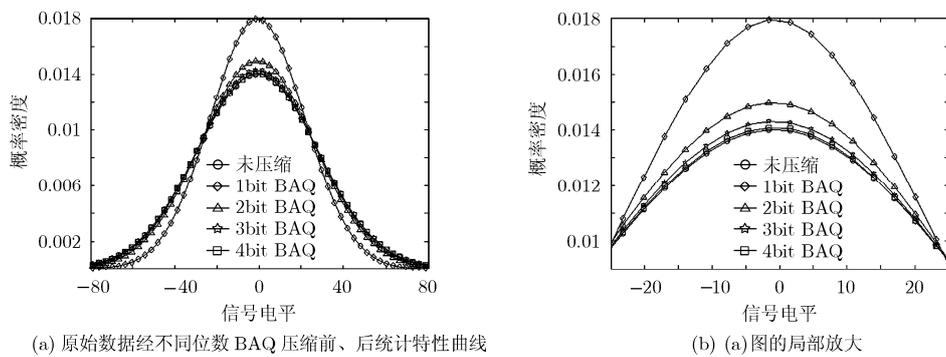


图 3

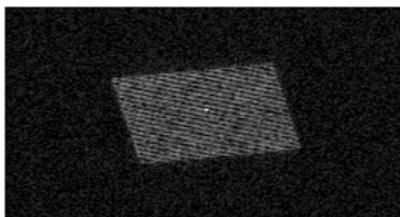


图 4 GMTI 处理前通道一 SAR 图像



图 5 DPCA 相消后 SAR 图像

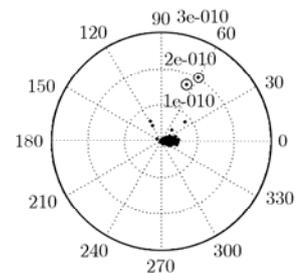


图 6 ATI 干涉极坐标图

误差与径向速度之比)越小,这是因为动目标径向速度越大,相消后动目标保留信息越多,受数据压缩影响越小,相对 RMS 测速误差越小;使用 DPCA 方法和 ATI 方法测速误差非常接近。

图 8 给出相同径向速度( $v_r = 10 \text{ m/s}$ ),相同信噪比( $\text{SNR} = 23.7 \text{ dB}$ ),不同信杂比条件下,BAQ 压缩相对于未经原始数据压缩的 RMS 测速误差。BAQ 分块为  $672(\text{距离}) \times 2(\text{方位})$ 。信杂比取较小的  $0 \text{ dB}$  和较大的  $11.4 \text{ dB}$  两种情况。采用较大的信噪比是为了使影响因素只为信杂比。从图 8 中可以看出:信杂比较小时,4 bit/sample 测速误差与 3 bit/sample 测速误差相差很小,3 bit/sample 测速误差与 2 bit/sample 测速误差相差很大,2 bit/sample 测速误差与 1 bit/sample 测速误差相差也很大;BAQ 压缩比越大,RMS 测速误差越大;信杂比越大,同压缩比条件下 RMS 测速误差越小,这是因为信杂比越大,动目标受杂波影响越小,因而受数据压缩影响越小,RMS 测速误差越小;使用 DPCA 方法和 ATI 方法测速误差非常接近。

图 9 给出相同径向速度( $v_r = 10 \text{ m/s}$ ),相同信杂比( $\text{SCR} = 11.4 \text{ dB}$ ),不同信噪比条件下,BAQ 压缩相对于未经原始数据压缩的 RMS 测速误差。BAQ 分块为  $672(\text{距离}) \times 2(\text{方位})$ 。信噪比取较小的  $13 \text{ dB}$  和较大的  $23.7 \text{ dB}$  两种情况。采用较大的信杂比是为了使影响因素只为信噪比。从图 9 中可以看出:信噪比较小时,4 bit/sample 测速误差与 3 bit

/sample 测速误差相差很大,3 bit/sample 测速误差与 2 bit/sample 测速误差相差很小,2 bit/sample 测速误差与 1 bit/sample 测速误差相差更大;BAQ 压缩比越大,RMS 测速误差越大;信噪比越大,同压缩比条件下 RMS 测速误差越小,这是因为信噪比越大,动目标受噪声影响越小,因而受数据压缩影响越小,RMS 测速误差越小;使用 DPCA 方法和 ATI 方法测速误差非常接近。

表 3 给出了相同径向速度( $v_r = 10 \text{ m/s}$ ),相同信噪比( $\text{SNR} = 23.7 \text{ dB}$ ),相同信杂比( $\text{SCR} = 11.4 \text{ dB}$ ),不同分块尺寸条件下 BAQ 压缩相对于未经原始数据压缩的 RMS 测速误差。采用两种分块尺寸:分块 1 为  $672(\text{距离}) \times 2(\text{方位})$ ,分块 2 为  $168(\text{距离}) \times 8(\text{方位})$ 。需说明的是,两种分块情况采用相同的原始样本数据,因此两种分块条件下 BAQ 压缩相对于未压缩的 RMS 测速误差之间的差异只由分块尺寸不同造成。

从表 3 中可以看出:分块尺寸对 RMS 测速误差影响很小。

#### 4 结论

动目标的速度是 GMTI 指标体系中十分重要的一个指标,因此研究原始数据压缩对星载 SAR-GMTI 测速精度的影响,将为合理设计星载 SAR/GMTI 系统数据压缩方案提供重要的理论依据。在星载 SAR/GMTI 工程中,当数据压缩采用

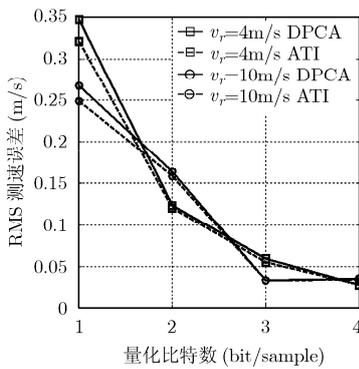


图 7 不同径向速度条件下 BAQ 压缩相对于未压缩的 RMS 测速误差

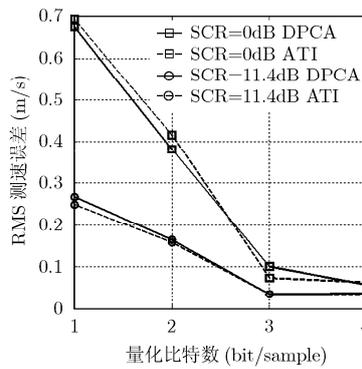


图 8 不同信杂比条件下 BAQ 压缩相对于未压缩的 RMS 测速误差

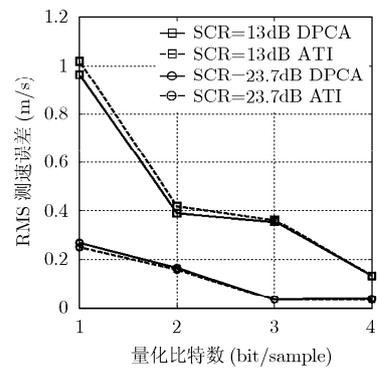


图 9 不同信噪比条件下 BAQ 压缩相对于未压缩的 RMS 测速误差

表 3 不同 BAQ 分块条件下 BAQ 压缩相对于未压缩的 RMS 测速误差

分块尺寸		4 bit/sample	3 bit/sample	2 bit/sample	1 bit/sample
分块 1(672×2)	DPCA (m/s)	0.03577	0.03390	0.16406	0.26802
	ATI (m/s)	0.03478	0.03339	0.15879	0.24966
分块 2(168×8)	DPCA (m/s)	0.04877	0.04041	0.16939	0.27580
	ATI (m/s)	0.04836	0.04013	0.16635	0.25726

BAQ算法, GMTI采用DPCA或ATI方法时,有以下结论: DPCA和ATI测速误差非常接近; BAQ分块尺寸对测速误差影响很小; 信噪比较大时, 3 bit/sample与4 bit/sample的测速误差相差很小, 实际应用时可选择3 bit/sample; 信噪比较小时, 3 bit/sample与4 bit/sample的测速误差相差较大, 当用户对测速精度要求较高时, 应选择4 bit/sample; 压缩比越大, 测速误差越大; 径向速度越大, 同压缩比条件下, 不模糊可检测径向速度范围内的测速误差越小; 信杂比或信噪比越大, 同压缩比条件下测速误差越小; 数据压缩不影响动目标在SAR图像中的位置。本文的研究结果将为星载SAR/GMTI系统的压缩比选择提供重要的理论依据。

### 参考文献

- [1] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(3): 499-505.
  - [2] Stockburger E F and Held D N. Interferometric moving ground target imaging. Proceedings of the IEEE International Radar Conference, Alexandria, New York, May 1995: 438-443.
  - [3] 杨垒, 王彤, 邢孟道, 保铮. 机载多通道SAR-GMTI的杂波抑制方法. *电子与信息学报*, 2008, 30(12): 2831-2834.  
Yang Lei, Wang Tong, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. The clutter suppression method of airborne multi-channel SAR-GMTI system. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(12): 2831-2834.
  - [4] Chiu S and Livingstone C, *et al.* RADARSAT-2 moving object detection experiment(MODEX). Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, Massachusetts, July 2008: 13-16.
  - [5] Suchandt S and Runge H, *et al.* First results of ground moving target analysis in TerraSAR-X data. Proceedings of EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, June 2008: 55-58.
  - [6] Livingstone C E, Sikaneta I, Gierull C H, and Chiu S, *et al.* An airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 Ground Moving Target Indication (GMTI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002, 28(6): 794-813.
  - [7] Barbarossa S and Farina A. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(2): 341-358.
  - [8] Kwok R and Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375-383.
  - [9] 关振红, 朱岱寅等. 归一化自适应预测矢量量化算法压缩SAR原始数据. *电子与信息学报*, 2006, 28(3): 507-511.  
Guan Zhen-hong and Zhu Dai-yin, *et al.* Compression of SAR raw data with normalized adaptive predictive vector quantization. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(3): 507-511.
  - [10] 祁海明, 禹卫东. 基于二维查找表结构的SAR原始数据自适应频域压缩算法. *电子与信息学报*, 2009, 31(3): 592-595.  
Qi Hai-ming and Yu Wei-dong. Adaptive frequency domain algorithm for SAR raw data compression based on two dimensions look-up table. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(3): 592-595.
  - [11] Mcleod I and Cumming I. ENVISAT ASAR data reduction: Impact on SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 589-602.
  - [12] 祁海明, 禹卫东. 针对饱和度全集上SAR原始数据自适应抗饱和BAQ压缩算法. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 227-234.  
Qi Hai-ming and Yu Wei-dong. Anti-saturation block adaptive quantization algorithm for SAR raw data compression over the whole set of saturation degrees. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(8): 1003-1009.
  - [13] 祁海明, 禹卫东. 基于实测数据的原始数据压缩对InSAR系统测高影响研究. *电子与信息学报*, 2008, 30(11): 2693-2697.  
Qi Hai-ming and Yu Wei-dong. Study of effect of raw data compression on space-borne InSAR interferometry based on real data. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(11): 2693-2697.
  - [14] 祁海明, 禹卫东, 田旭文等. 星载SAR原始数据BAQ压缩算法性能评估[J]. *现代雷达*, 2007, 29(11): 17-21.  
Qi Hai-ming, Yu Wei-dong, and Tian Xu-wen, *et al.* Evaluation of BAQ algorithm for spaceborne SAR raw data compression. *Modern Radar*, 2007, 29(11): 17-21.
  - [15] Schaefer C and Wagner A. Analysis of potential GMTI performance of TanDEM-X. Proceedings of EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, June 2008: 115-118.
  - [16] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京: 国防工业出版社, 2003, 第2, 5章.
  - [17] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001, 第7章.
- 行 坤: 男, 1980年生, 助理研究员, 研究方向为星载和机载合成孔径雷达运动目标检测.
- 邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载SAR系统总体设计.
- 祁海明: 男, 1980年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为合成孔径雷达原始数据压缩、多发多收SAR系统及信号处理技术.