

文章编号:2095-6134(2017)01-0106-06

SAR 原始数据压缩的自适应比特分配 BAQ 算法^{*}

潘志刚[†], 王小龙, 李志勇

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

(2016 年 3 月 16 日收稿; 2016 年 5 月 16 日收修改稿)

Pan Z G, Wang X L, Li Z Y. An improved block adaptive quantization algorithm based on adaptive bit-allocation for SAR raw data compression[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(1):106-111.

摘 要 针对 SAR 原始数据压缩, 在传统 BAQ 算法基础上, 提出一种分块量化比特率可变的 BAQ 算法, 在保持各分块平均比特率固定的前提下, 针对不同的数据分块自适应选择量化比特率。与已有的改进型 BAQ 算法相比, 比特率选择机制基于分块数据的信号功率大小, 不需要成像区域的先验知识。新方法能够明显提高数据量化信噪比并降低 SAR 复图像相位误差, 而运算复杂度增加很小, 并可以实现分数比特率, 适应于不同通信带宽的数据传输需要, 增加了 SAR 原始数据实时传输的灵活性。

关键词 分块自适应量化; 数据压缩; 比特分配; 合成孔径雷达

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **doi:**10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2017. 01. 014

An improved block adaptive quantization algorithm based on adaptive bit-allocation for SAR raw data compression

PAN Zhigang, WANG Xiaolong, LI Zhiyong

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

Abstract In this study, the variable bit rate BAQ algorithm is proposed based on adaptive rate allocation among blocks of SAR raw data. Compared with FDBAQ and SA-BAQ, the proposed rate selection scheme is completely automatic, without the optimization process using priori data. Compared with the traditional BAQ algorithm, the proposed method evidently improves signal-to-noise ratio (SNR) and decreases the phase error of SAR image at the expense of only slight increase of complexity. Besides, the new method realizes fraction bit rate, which increases the flexibility of the compression application for SAR raw data.

Keywords block-adaptive quantization; data compression; bit allocation; synthetic aperture radar

合成孔径雷达具有全天时、全天候成像特点, 目前已被广泛应用于军事侦察及民用遥感领域。随着星载 SAR 系统不断向高分辨率、宽测绘带、多极化方式等方向发展, 为满足 SAR 原始数据实

时下传需求, 在星上需采用性能更高的 SAR 原始数据压缩方法降低数据传输速率, 以满足通信带宽的要求。

自 20 世纪 80 年代起, 学者们提出了为数众

^{*} 国家自然科学基金(61101201)资助

[†] 通信作者, E-mail: zgpan@mail. ie. ac. cn

多的 SAR 原始数据压缩算法,典型的有:适应于 SAR 原始数据统计特性的标量量化算法^[1]以及利用 SAR 原始数据内在相关性的矢量量化算法^[2]。与时域的量化编码算法相比较,变换域压缩方法具有更好的性能,典型的算法有:基于小波变换的方法^[3]、子带编码方法^[4]、基于 FFT 变换的编码方法^[5]。变换域压缩方法具有较高的复杂度,目前还没有在星载 SAR 系统中得到实际应用。除上述方法之外,其他 SAR 原始数据压缩方法如网格编码量化(TCQ)^[6-7]、预测编码^[8-9]、压缩感知^[10-11]以及熵限制量化方法(ECBAQ)^[12]也被应用于 SAR 原始数据压缩的研究,分别具有不同的优缺点。在目前已出现的 SAR 原始数据压缩方法中,分块自适应量化(BAQ)算法^[13]因其硬件实现的简单性,目前已被用于 Magellan SAR, ENVISAT A-SAR, TerraSAR-X 和 Radarsat-2 等多部星载 SAR 系统中。

近年来,BAQ 算法在实际应用时也不断被优化完善,在 TerraSAR-X 系统^[14-17]中,使用具有不同比特率的 BAQ 量化器提高总体压缩性能,编码器依据世界各地的地物散射特性进行不同比特率 BAQ 的切换。在欧空局的哨兵 1 号(Sentinel-1)^[18-22]任务中,信号与热噪声比(STNR, signal-to-thermal-noise ratio)被用于实现不同比特率 BAQ 的自适应切换。作为 BAQ 算法的扩展,FDDBAQ 算法(flexible dynamic block adaptive quantizer)在保持 BAQ 算法简单性的同时能得到更好的压缩性能,该算法能够依据接收信号的功率不同自适应选择最优量化器。FDDBAQ 量化器利用 SAR 原始数据分块的几百个采样点测量局部杂波功率,该量化器需要 NESZ(noise equivalent sigma zero)^[18]的先验知识,但是 NESZ 不能在线测量,只能通过地面测试设备估计得到,对 FDDBAQ 的优化需要信号统计特性及热噪声功率两方面的先验知识。SA-FBQ^[23]通过采用适应于 SAR 原始数据局部统计特性的量化器组进一步扩展 FDDBAQ 的概念。FDDBAQ 和 SA-FBQ 的主要缺陷在于:都需要事先测定地球上不同区域的地物散射特性的先验知识,地物散射特性的测定是通过之前发射的 SAR 卫星数据得到的,在缺乏先验知识的情况下,只能通过压缩算法本身的优化提高数据压缩性能。

虽然 SAR 原始数据概率统计上符合高斯分布,但是由于 SAR 系统天线方向图调制及地物散

射特性的不同,实行分块编码时,每个分块数据的回波信号功率是变化的。使用 BAQ 算法做原始数据量化时,如果成像场景是均匀的,则固定比特率 BAQ 是最优选择;但是对于非均匀区域,应该选择可变比特率量化器以适应地物散射特性的变化,即信号功率大的数据分块应该采用高比特率量化器,反之则采用低比特率量化器。

本文在上述已有工作基础上,提出一种可变比特率 BAQ 算法,在保持平均比特率一定的前提下,针对不同的数据分块可自适应选择量化比特率。与 FDDBAQ 和 SA-FBQ 相比,本文的比特率选择机制基于分块数据的信号功率大小,可自适应选择不同比特率的量化器,无需成像区域地物散射特性等先验知识。与传统 BAQ 算法相比,新方法能够明显提高数据量化信噪比并降低 SAR 复图像相位误差,而运算复杂度增加很小。除此之外,新方法与固定比特率 BAQ 算法相比,可以实现分数比特率,适应于不同通信带宽的数据传输需要,增加了 SAR 原始数据实时传输的灵活性。

1 算法基本原理

经典的 BAQ 算法^[13]利用 SAR 原始数据统计特性符合高斯分布的特点,对数据进行分块处理,该方法首先计算分块数据的幅度均值,并将幅度均值映射为标准差,对每一子块数据利用标准差进行归一化,之后应用 Lloyd-Max 量化器进行量化编码。图 1 中虚线框部分是本文算法不同于传统 BAQ 算法的地方,比特分配机制使得针对每一子块的 BAQ 量化不再是固定比特率量化,即在平均比特率一定的前提下,每个子块量化比特率是可变的。本文算法的基本思想是:对于 SAR 原始数据各子块,标准差反映了子块内信号功率的强弱,因此可根据子块数据标准差不同,在多个子块之间进行比特分配。标准差大的子块分配较多的量化比特数,反之则分配较少的比特,达到总体上提高压缩性能的目的。

2 比特分配

比特分配的基本思想是对标准偏差较大的子块分配较多的量化比特数,而对标准偏差较小的子块分配较少的比特数,使得在总比特数一定的条件下,总的量化误差最小。

设 $p(x)$ 为随机信源 X 的概率密度函数,则均方量化误差为

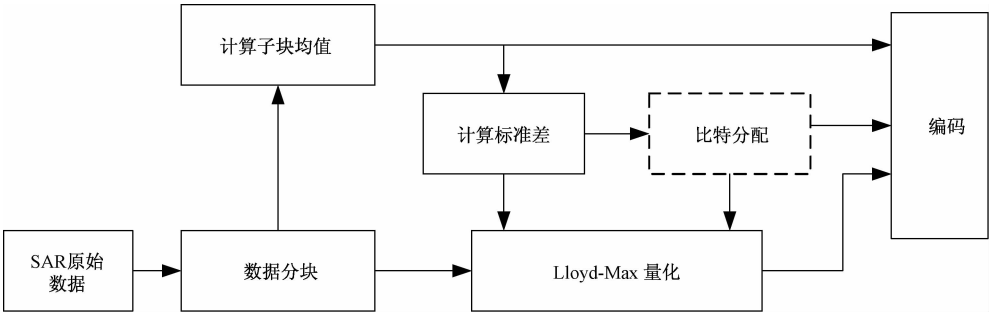


图 1 自适应比特分配 BAQ 算法原理框图

Fig. 1 Block diagram of the proposed compression algorithm

$$d(R) = E[(X - \hat{X})^2], \tag{1}$$

其中： X 表示待量化信号， \hat{X} 表示信号重建值， R 为量化比特率。由于编码信源的概率分布函数很难精确得到，因此具体信源的率失真函数计算非常困难；而 SAR 原始数据统计特性符合高斯分布的假设，因此利用连续分布无记忆高斯信源率失真函数来实现比特分配过程。

$$R(D) = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{\sigma^2}{D} \right). \tag{2}$$

设 SAR 原始数据编码时一次处理的子块个数为 M ，则所有子块数据量化的平均失真为

$$D_T(R_T) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} d_n(R_n). \tag{3}$$

由式(2)可以求出

$$D = \sigma^2 \times 4^{-R}, \tag{4}$$

代入式(3)中,可得

$$D_T(R_T) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \sigma_n^2 \times 4^{-R_n}. \tag{5}$$

则最优比特分配问题可描述为:当所有子块数据量化的平均比特率 $R_T = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} R_n$ 一定时,式(5)所定义的平均量化失真最小。为此建立目标函数

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin}_{R_n} J = \operatorname{argmin}_{R_n} & \left[\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \sigma_n^2 \times 4^{-R_n} + \right. \\ & \left. \lambda \left(\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} R_n - R_T \right) \right]. \end{aligned} \tag{6}$$

利用拉格朗日乘数法求解上述最小化问题,需求解如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial R_n} = \sigma_n^2 (-\ln 4) 4^{-R_n} + \lambda = 0, & n = 0, 1, \dots, M-1, \\ \frac{\partial J}{\partial \lambda} = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} R_n - R_T = 0, \end{cases} \tag{7}$$

求解方程组(7),可得

$$R_n = R_T + \frac{1}{2} \left[\log_2 \sigma_n^2 - \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \log_2 \sigma_n^2 \right]. \tag{8}$$

求得的 R_n 为分数比特率,为适应 BAQ 量化器定长编码的需要,需要对其进行四舍五入取整。分数比特率经四舍五入取整后求平均,与预设的平均比特率存在误差。为使平均比特率更接近预设值,采用如图 2 所示的比特误差控制算法得到接近预设值的比特率。在图 2 中,定义如下符号:

- $Ebit$: 比特数误差;
- $Mbit$: 各子块的平均比特数;
- $Pbit$: 预设的各分块平均比特数;
- $Abit$: 针对某一子块由式(8)计算得到的比特数;
- $Nbit$: 针对某一子块已分配的比特数;
- th : $Mbit$ 与 $Pbit$ 的误差阈值。

3 实验结果与分析

由于无法得到星载 SAR 系统实时获取的无失真 SAR 原始数据,本文采用中国科学院电子学研究所某机载 SAR 获取的 2 块原始数据作为实验数据。数据经 A/D 量化为 8 bit 有符号数据,地物类型为城市郊区,实验结果对于星载 SAR 原始数据压缩具有重要参考意义。使用 C++ 语言编写原始数据压缩与解压缩程序,分别采用自适应比特分配 BAQ 算法(A-BAQ)和传统 BAQ 算法做压缩实验,并定量计算其相应的性能指标,实验结果分别如表 1、表 2 所示。在 A-BAQ 算法中,由于所有子块使用 BAQ 量化时的最低比特率限定为 1 bit (BAQ 量化器定长编码的需要),所以为体现各子块间比特分配效果,A-BAQ 算法平均比特率的最小值应大于 1 bit,本文设定为 1.5,而最大值设定为 3.0。原始数据域采用量化信噪比和平均相位误差来衡量压缩性能,信噪比定义如下:

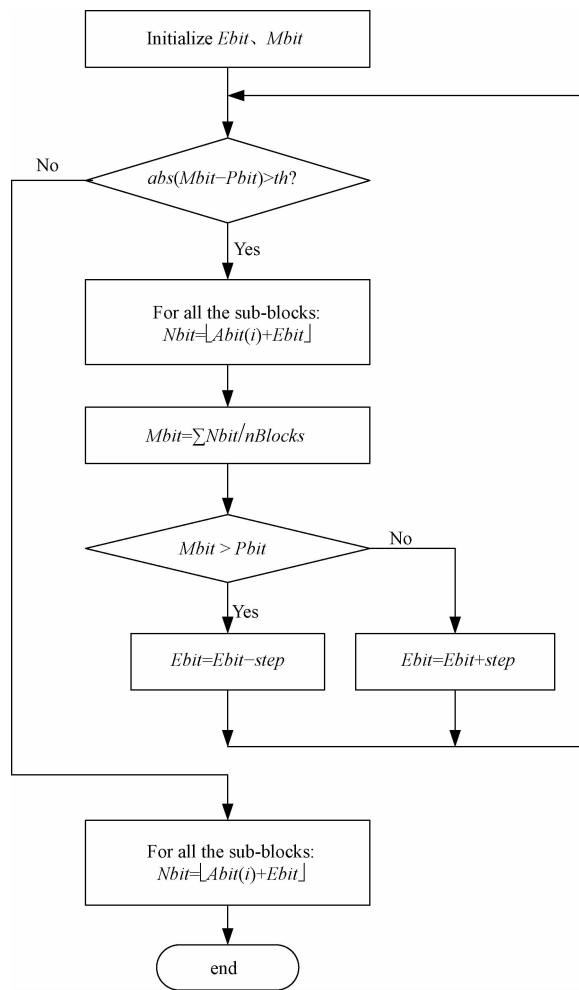


图 2 平均比特率控制算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the mean bit rate control algorithm

$$\text{SNR} = 10\lg\left(\frac{s}{\varepsilon}\right), \tag{9}$$

其中： $s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2$ 为信号功率, $\varepsilon = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - f(i,j)]^2$ 为量化过程所引起的噪声功率。平均相位误差 (MPE) 定义如下：

$$\text{MPE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\phi_0(i,j) - \phi_1(i,j)|, \tag{10}$$

其中： $\phi_0(i,j)$ 为原始数据相位; $\phi_1(i,j)$ 为解压重建数据相位。其单位均为弧度。

采用峰值信噪比评价 SAR 图像质量, 式 (9) 中如果取 s 为峰值信号的功率, 则峰值信噪比定义如下所示 (对于 16 位存储的 SAR 幅度图像, 信号峰值取为 65 535)：

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg\left(\frac{s_{\max}}{\varepsilon}\right). \tag{11}$$

由表 1、表 2 可以看出, 无论是 SAR 原始数据域还是图像域, 相同比特率前提下, A-BAQ 算法与 BAQ 算法相比, 均具有较高的信噪比和较低的相位误差。当比特率为 2.0 时, 数据域信噪比提高约 1.7 dB, 图像域信噪比提高约 3.6 dB, 原始数据相位误差降低约 0.03 rad, 复图像相位误差降低约 0.17 rad。尤其值得一提的是, A-BAQ 算法在图像域性能提高更为明显, 进一步说明通过在子块数据之间进行比特分配, 可以使强散射区域得到更多的编码比特数, 有助于提高 SAR 图像质

表 1 SAR 原始数据域评价结果

Table 1 Compression performance in SAR raw data domain

实验数据	评价指标	1.0 bpp		1.5 bpp		2.0 bpp		2.5 bpp		3.0 bpp	
		A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ
Data1	SNR (I)	—	4.22	8.39	—	10.55	9.14	13.11	—	15.61	14.34
	SNR (Q)	—	4.21	8.26	—	10.44	9.15	13.02	—	15.57	14.38
	MPE	—	0.411	0.353	—	0.323	0.346	0.286	—	0.257	0.247
Data2	SNR (I)	—	4.26	8.84	—	10.98	9.20	13.49	—	16.03	14.43
	SNR (Q)	—	4.25	8.68	—	10.88	9.14	13.42	—	16.05	14.41
	MPE	—	0.411	0.347	—	0.317	0.342	0.281	—	0.252	0.243

表 2 SAR 图像域评价结果

Table 2 Compression performance in SAR image domain

实验数据	评价指标	1.0 bpp		1.5 bpp		2.0 bpp		2.5 bpp		3.0 bpp	
		A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ	A-BAQ	BAQ
Data1	SNR	—	9.52	15.72	—	19.28	16.22	21.65	—	24.98	22.05
	PSNR	—	54.00	60.20	—	63.77	60.70	66.14	—	69.47	66.53
	MPE	—	1.091	0.745	—	0.535	0.678	0.426	—	0.302	0.397
Data2	SNR	—	7.80	14.68	—	18.16	14.59	20.45	—	23.79	20.36
	PSNR	—	49.02	55.71	—	59.18	55.61	61.47	—	64.82	61.38
	MPE	—	1.145	0.762	—	0.557	0.723	0.441	—	0.314	0.426

量,且较好地保持了相位信息。A-BAQ 算法使用比特分配机制可实现分数比特率,在实际应用时可根据数传速率不同,提供多种比特率选择方式,增加了应用的灵活性。A-BAQ 算法与目前国际上最先进的 FDBAQ 算法(应用于 ESA 的 Sentinel-1 任务中)和 SA-BAQ 算法相比,无需先验知识,

而压缩性能的提高与之相当,SAR 系统实现复杂度增加很少,具有较高的实用性和普适性。

分别对未经压缩的原始数据以及本文算法在不同比特率时的解压缩数据进行成像,图 3 给出成像的结果,所有图像均使用 16 bit 无符号存储,符号 CR 表示压缩比。

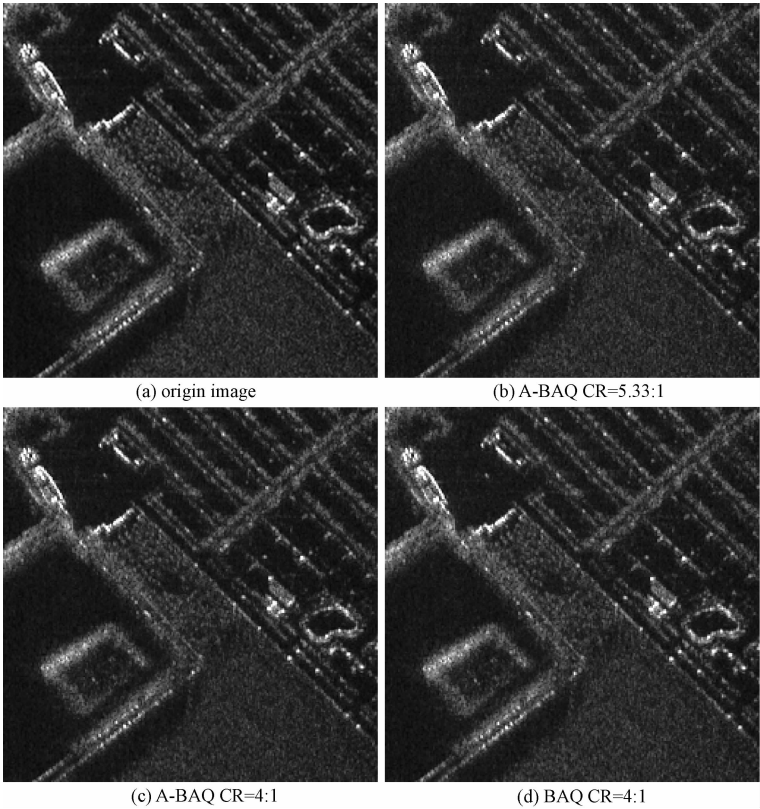


图 3 解压缩数据成像结果与原始图像的比较
Fig.3 Imaging results for SAR raw data and decompression data

图 3 所示 4 幅图像的对比结果表明,A-BAQ 算法在压缩比为 5.33 时依然能够得到很好的图像质量,与压缩比为 4 的 BAQ 算法得到的 SAR 图像质量相当。说明通过比特分配机制能够有效提高 SAR 原始数据压缩性能,可为星载 SAR 系统实时数据压缩提供更加灵活的选择。

4 结束语

针对 SAR 原始数据实时编码传输应用,本文在传统 BAQ 算法基础上,依据数据分块信号功率不同,在数据分块之间进行自适应比特分配以提高压缩性能,在保持平均比特率一定的前提下,针对不同的数据分块可自适应选择比特率不同的 BAQ 量化器。本文同时给出比特分配的计算方法,与目前星载 SAR 系统在用的先进 SAR 原始数据量化器相比,本文的比特分配机制无需成像

区域地物散射特性等先验知识,系统实现较为简单。实验结果表明,新方法能够明显提高 SAR 原始数据量化信噪比并降低 SAR 复图像相位误差,而运算复杂度增加很小。分数比特率的实现也为 SAR 原始数据实时传输提供了更加灵活的选择。工程实现时,本文方法只需要在传统 BAQ 方法基础上增加比特分配环节,硬软件改动很小,具有重要的工程应用价值。

参考文献

[1] Koren Y, Yavneh I, Spira A. A multigrid approach to the scalar quantization problem[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 2005, 51(8): 2 993-2 998.
[2] 祁海明,华斌,李信. 星载 SAR 原始数据普适性分块自适应矢量压缩算法[J]. 中国科学:信息科学, 2012, 42(2): 206-217.
[3] 潘志刚,王岩飞. 一种基于小波变换的高倍数 SAR 原始

- 数据压缩算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1 798-1 801.
- [4] Pascazio V, Schirinzi G. SAR raw data compression by subband coding[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 2003, 41(5): 964-976.
- [5] Benz U, Strodl K, Moreria A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 1994, 33(5): 1 266-1 276.
- [6] Elia C D', Poggi G, Verdoliva L. Compression of SAR raw data through range focusing and variable-rate trellis-coded quantization[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(9): 1 278-1 287.
- [7] Owens J W, Marcellin M W, Hunt B R, et al. Compression of synthetic aperture radar video phase history data using trellis-coded quantization techniques[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 1999, 37(2): 1 080-1 085.
- [8] Magli E, Olmo G. Lossy predictive coding of SAR raw data[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 2003, 41(5): 977-987.
- [9] Ikuma T, Naraghi-Pour M, Lewis T. Predictive quantization of range-focused SAR raw data[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1 340-1 348.
- [10] Bhattacharya S, Blumensath T, Mulgrew B, et al. Fast encoding of synthetic aperture radar raw data using compressed sensing[C] // IEEE/SP Workshop on Statistical Signal Processing. Madison, US: WI, 2007: 448-452.
- [11] Chen Y C, Zhang Q, Wang G Z, et al. A novel compressing method of airborne SAR raw data[C] // IEEE International Conference on Signal Processing, Communication & Computing. Kunming: IEEE, 2013:1-5.
- [12] Algra T. Data compression for operational SAR missions using entropy-constrained block adaptive quantization[C] // IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Toronto: IEEE, 2002: 1 135-1 138.
- [13] Kwok R, Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 1989, 27(4): 375-383.
- [14] Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3 317-3 341.
- [15] Mittermayer J, Younis M, Metzger R, et al. Terra SAR-X system performance characterization and verification[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2010, 48(2): 660-676.
- [16] Martone M, Brautigam B, Krieger G. Azimuth-switched quantization for SAR systems and performance analysis on TanDEM-X data[J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letter, 2014, 11(1): 181-185.
- [17] Martone M, Brautigam B, Krieger G. Quantization effects in TanDEM-X Data[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2015, 53(2): 583-597.
- [18] Attema E, Cafforio C, Gottwald M, et al. Flexible dynamic block adaptive quantization for Sentinel-1 SAR missions[J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letter, 2010, 7(4): 766-770.
- [19] Snoeijs P, Attema E, Guarnieri A M, et al. FDFAQ: a novel encoding scheme for Sentinel-1[C] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE, 2009: 44-47.
- [20] Guccione P, Cafforio C, Guarnieri A M. Optimal block quantization for SAR data[C] // IEEE Radar Conference. Arlington, Virginia: IEEE, 2010: 348-353.
- [21] Guccione P, D'Aria D, Piantanida R. Sentinel-1 FDFAQ performances: the data compression and estimation tool[C] // Advances in Radar and Remote Sensing. Tyrrhenian: IEEE, 2012: 18-25.
- [22] Malz E, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Sentinel-1 FDFAQ performance validation using TerraSAR-X data[C] // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE, 2012: 1 629-1 632.
- [23] Guccione P, Guarnieri A M. A space adaptive quantizer for spaceborne SAR[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3 564-3 573.