

文章编号: 1000-6893(2007)04-0959-05

一种 SAR 原始数据压缩新算法

曾尚春, 朱兆达

(南京航空航天大学 401 教研室, 江苏 南京 210016)

A Novel Algorithm for SAR Raw Data Compression

ZENG Shang-chun, ZHU Zhao-da

(Faculty 401, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 由于合成孔径雷达(SAR)原始数据的相关性很低,直接压缩原始数据是比较困难的。因此提出一种新算法,先对 SAR 原始数据做距离聚焦处理,使其在方位向具有较强的相关性,再沿方位向做线性预测,并对预测差值系列做块自适应量化。实验表明,在相同比特率条件下,该算法得到的数据域信噪比和图像域信噪比均比块自适应量化(BAQ)算法高,计算量远小于有关文献给出的距离聚焦后的压缩方法,具有一定实用价值。

关键词: SAR; BAQ; 距离聚焦; 线性预测; 信噪比; 比特率; 块自适应量化

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

Abstract: It is difficult to directly compress synthetic aperture radar (SAR) raw data for the low relativity. In this paper, a new algorithm is put forward. Range focusing is imposed to SAR raw data, which leads to comparatively high relativity, then a linear prediction is performed along the azimuth direction, and block adaptive quantization is used to the prediction error series. The experiments manifest that with same bit rate, signal to quantization noise ration (SQNR) and signal to distortion noise ratio (SDNR) after using the algorithm proposed in this paper surpass that of block adaptive quantization (BAQ) algorithm. The calculation in this paper is far less than that of compression method after range focusing advised in corresponding reference. The algorithm proposed in this paper has practical value in some degree.

Key words: SAR; BAQ; range focusing; linear prediction; signal to noise ratio; bit rate; block adaptive quantization

合成孔径雷达(SAR)是一种新型雷达系统,具有常规雷达无法比拟的距离向和方位向二维高分辨特性,以及成像范围广阔和全天候等特点。现代机载合成孔径雷达系统,包括发射、接收单元和模数转换等硬件处理系统以及实时数据传送或存储设备。SAR 系统面临的一个重要问题是数据率高、难以实时下传,所以必须降低 SAR 原始数据率以满足有限的下传链路带宽。由于 SAR 原始数据的高熵值特性,无损压缩算法难以满足大的压缩比要求,所以目前普遍采用有损压缩技术。

在 SAR 原始数据压缩领域,目前已研究了多种压缩算法,如块自适应量化(BAQ)^[1]、非约束式极坐标量化(UPQ)^[2]、矢量量化(VQ)^[3]、快速傅里叶变换-块自适应量化(FFT-BAQ)^[4]以及网格编码量化(TCQ)^[5]等。由于 SAR 原始数据的相关性很低,所以直接压缩 SAR 原始数据是比较困难的,通过并不复杂的距离聚焦,可以使 SAR 数据在方位向具有较强的相关性,这会使 SAR 原始数据变得易于压缩,这是 SAR 原始数据压缩领

域极具吸引力的一个研究方向。文献[6]研究了 SAR 原始数据距离聚焦后采用可变速率矢量量化,在性能上超过了传统的非聚焦 SAR 原始数据压缩算法。由于采用矢量量化,该方法的计算复杂度是比较大的。文献[7]采用网格编码矢量量化(TCVQ)编码来压缩距离聚焦后的 SAR 数据,为了降低计算复杂度,使用了比文献[6]更短的码字,码字长度的减小必将导致性能的降低,但是 TCVQ 算法码本空间的划分更合理,这将减小量化误差。因此文献[7]采用的方法在性能上与文献[6]相当,但计算复杂度略小。由于矢量量化的计算量随码字长度呈指数增加,这极大限制了上述两种方法在 SAR 原始数据实时传输中的运用。所以,对距离聚焦后的 SAR 数据,有必要研究复杂度更小的算法。本文先对 SAR 原始数据做距离聚焦处理,再沿方位做线性预测,最后对预测误差做分块自适应量化。

1 算法分析

SAR 回波数据是方位和距离向的二维复矩阵,实部和虚部相互独立,均为零均值高斯分布,

具有相同的方差。因此,可以将实部和虚部分开来处理,需要处理的数据块大小为 $2\ 048 \times 2\ 048$ (方位 \times 距离)。SAR 聚焦处理通常分两步进行: (1) 距离聚焦; (2) 依赖于距离的方位聚焦。方位聚焦是比较复杂的,它的参考函数与斜距 r 有关,而距离聚焦对应于每个回波的参考函数(与发射信号有关)是相同的,相当于回波信号通过一个相同的线性滤波器。所以本文只进行距离聚焦处理。采用行间复杂度、列间复杂度来评价 SAR 原始数据的相关性,对于一块 $N \times N$ 的 SAR 原始数据,以 $R(k)$ 表示行间复杂度(即方位向复杂度),以 $C(k)$ 表示列间复杂度(即距离向复杂度),计算公式为

$$R(k) = \left[\frac{1}{(N-k) \times N} \sum_{i=0}^{N-k-1} \sum_{j=0}^{N-1} (A(i,j) - A(i+k,j))^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$C(k) = \left[\frac{1}{N \times (N-k)} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-k-1} (A(i,j) - A(i,j+k))^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: $A(i, j)$ 为 SAR 原始数据在点 (i, j) 处的值(实部或虚部), k 为阶数。

对式(1)展开,得到

$$R(k) = \left[\frac{1}{(N-k) \times N} \sum_{i=0}^{N-k-1} \sum_{j=0}^{N-1} (A^2(i,j) + A^2(i+k,j) - 2A(i,j)A(i+k,j)) \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中:交叉项 $2A(i, j)A(i+k, j)$ 表示行间相关性,可以看出,对同一块数据, $R(k)$ 越小表示行间相关性越强。 $C(k)$ 与之类似。

表1、表2给出了一块归一化 SAR 原始数据及距离聚焦后的 SAR 数据的 $R(k)$ 及 $C(k)$ (因为同一块 SAR 数据实部和虚部的相关性差别很小,所以表中只给出了实部数据的相关性值)。可以看出,经过距离聚焦后的 SAR 数据行间复杂度变化较大,而列间复杂度变化很小,也就是说经距离聚焦后的 SAR 数据在方位向呈现出较强的相关性,而距离向相关性仍然很弱。

表1 行间复杂度 $R(k)$

Table 1 Complexities in row

阶数	1	2	3	4	5
SAR 原始数据	1. 256 655	1. 395 377	1. 418 077	1. 411 239	1. 422 990
距离聚焦后数据	1. 044 868	1. 212 813	1. 402 822	1. 412 674	1. 412 846

表2 列间复杂度 $C(k)$

Table 2 Complexities in column

阶数	1	2	3	4	5
SAR 原始数据	1. 306 811	1. 507 191	1. 328 197	1. 448 878	1. 440 889
距离聚焦后数据	1. 466 397	1. 514 653	1. 499 533	1. 438 883	1. 378 918

距离聚焦后的 SAR 数据具有比原始数据更大的动态范围,所以直接对它进行压缩是比较困难的,借鉴 BAQ 算法的思想,对 $2\ 048 \times 2\ 048$ 的大数据块进行分块归一化,分块大小取 32×32 。图1给出了 $2\ 048 \times 2\ 048$ 数据块实部的统计特性,容易看出它具有高斯分布特性。由此可以得出,由于距离聚焦相当于一个线性变换,因此并没有改变 SAR 原始数据的高斯分布特性。

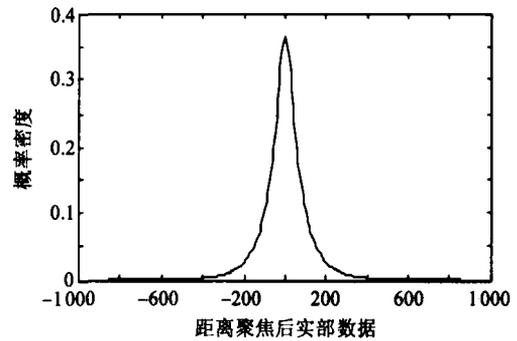


图1 距离聚焦后数据实部概率密度曲线

Fig 1 Probability density curve of real part after range focusing

从理论上说,随着预测阶数的增加,计算量也会增大,从表1可以看出,相距两点(即三阶)以后行间复杂度变化很小。所以在方位向采用三阶线性预测。如果针对不同距离门数据都设计一个预测器会使计算量过大,不利于实时处理。采用一种简化的方法,每间隔 512 个距离门设计一个预测器,实验表明这样处理带来的误差是很小的。另外,由于距离聚焦后的 SAR 数据动态范围很大,因此应先分块归一化(分块大小为 32×32)后再做线性预测。由于 SAR 成像区域很广,不同目标的后向散射系数也不一样,所以,不排除某些数据块会偏离高斯分布。文献[8]指出,如果原系列呈渐近高斯分布,则预测得到的差值系列比原系列更具有高斯分布特性。另外差值系列接近 0 值的数目显著增多,动态范围小,这会更有利于量化。对线性预测得到的差值系列采用分块自适应量化,分块大小为 32×32 ,各数据块采用相同的比特量化。因此,本文采用的压缩算法为线性预测-块自适应量化(LPBAQ)。

2 实验结果及分析

用一组实测正侧视机载 SAR 原始数据(条带模式),并用本文介绍的方法进行了压缩。由于 BAQ 算法是目前实用的比较成熟的 SAR 原始数

据压缩算法,因此将本文算法的结果与 BAQ 算法进行比较。另外,文献[6]与文献[7]给出的 2 种算法性能相当,为进一步比较,计算了文献[6]所示算法的性能参数。表 3 是 3 种算法在不同比特率下的计算结果。

表 3 3 种压缩算法在不同比特率下的性能参数

Table 3 Performances parameters of the three compression methods in different bit rates

算法	压缩比	比特率/ 比特·采样 ⁻¹	SQNR/ dB	SDNR/ dB	分辨率/ m		PSLR/ dB		ISLR/ dB	
					距离	方位	距离	方位	距离	方位
BAQ 算法	8.00	1	6.56	8.08	3.53	2.62	-8.77	-10.91	-5.67	-6.24
BAQ 算法	4.00	2	11.48	14.28	3.37	2.57	-9.10	-11.09	-6.15	-7.01
BAQ 算法	2.67	3	16.84	20.13	3.31	2.59	-9.52	-10.91	-6.61	-6.93
文献[6]算法	8.00	1	8.57	9.87	3.60	2.53	-8.64	-11.55	-6.41	-6.03
文献[6]算法	4.00	2	14.25	16.68	3.38	2.62	-9.30	-10.94	-6.53	-6.84
文献[6]算法	2.67	3	20.11	23.04	3.32	2.61	-9.51	-10.68	-6.35	-6.95
本文算法	8.00	1	8.22	9.56	3.58	2.54	-8.72	-11.44	-6.32	-6.01
本文算法	4.00	2	13.71	16.12	3.36	2.61	-9.26	-10.97	-6.55	-6.71
本文算法	2.67	3	19.34	22.24	3.35	2.63	-9.56	-10.74	-6.84	-6.31
SAR 原始数据					3.32	2.61	-9.51	-10.64	-6.74	-6.92

采用数据域信噪比和图像域信噪比为压缩效果评价参数。同时计算了图像域的空间分辨率()、峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)^[9]。可以看出,在相同比特率条件下,本文算法的数据域信噪比和图像域信噪比均比 BAQ 算法高,但略低于文献[6]所示算法。同时可以看到,在不同比特率时,分辨率的变化很小,PSLR 和 ISLR 变化也不大。这说明数据压缩几乎不影响 SAR 图像的分辨率,这同时也说明 SAR 图像对原始数据的量化比特数不敏感。

图 2 为 BAQ 算法所成的图像,图 3 为文献[6]算法所成的图像,图 4 为本文算法所成的图像。

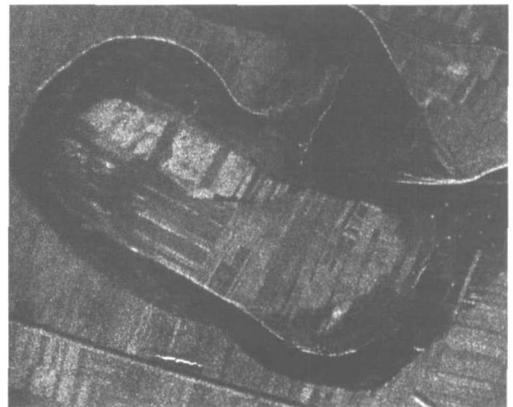


图 3 文献[6]算法所成的图像(比特率为 2 比特/采样)
Fig 3 Image of Ref. [6] algorithm (bit rate 2 bits/ sample)

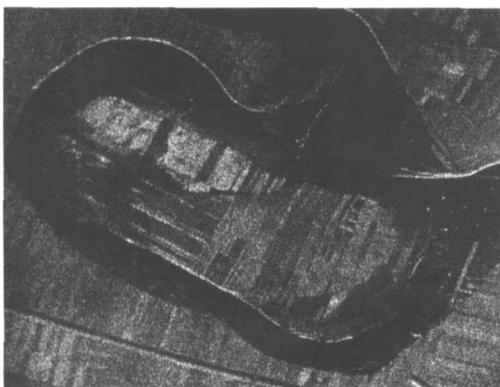


图 2 BAQ 算法所成的图像(比特率为 2 比特/采样)
Fig 2 Image of BAQ algorithm (bit rate 2 bits/ sample)

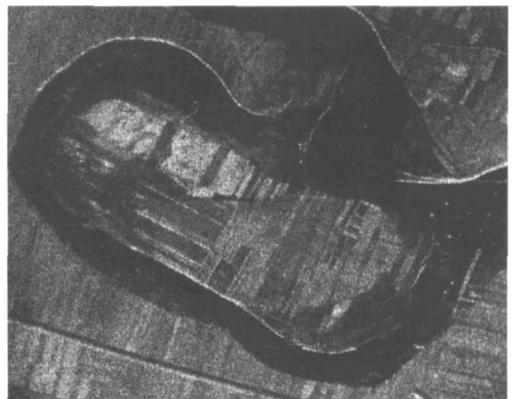


图 4 本文算法所成的图像(比特率为 2 比特/采样)
Fig 4 Image of the algorithm proposed in this paper (bit rate 2 bits/ sample)

3 算法复杂度分析

设 N_r 为距离向数据长度, N_a 为方位向数据长度, N 为对原始数据归一化操作中数据块的长度, p 为线性预测器的阶数。在算的运算复杂度方面,由于 DSP 对加法、乘法及比较法运算都可在同一时钟周期内完成,因此将算法中每一个浮点数加法、乘法和比较各看成一次操作。BAQ 算法量化一个采样值需要 2 次操作估计均值、2 次操作进行数据归一化及 2^b (b 为量化比特数) 次操作进行 Lloyd+Max 编码。本文算法中距离聚焦相当于卷积运算,对一个回波数据 (N_r 个复数) 共需要 N_r^2 次复数乘法和 N_r^2 次复数加法,每一次复数乘法需要 6 次操作,所以每个浮点数对应的操作数为

$$\frac{N_r^2 \times 6 + N_r^2 \times 2}{2N_r} = 4N_r \quad (4)$$

如果用快速傅里叶变换将时域卷积转化为频域乘积处理,则每个浮点数对应的操作数降为

$$\frac{(2N_r \log_2 N_r \times 2 + N_r) \times 6}{2N_r} = (4 \log_2 N_r + 1) \times 3 \quad (5)$$

对 p 阶线性预测,每个浮点数需要 $2(p+1)$ 次操作,对预测差值系列做 BAQ,每个浮点数需要 $2^b + 4$ 次操作。因此本文算法每个浮点数需要的操作次数为

$$(4 \log_2 N_r + 1) \times 3 + 2(p+1) + 4 + 2^b = 12 \log_2 N_r + 2p + 2^b + 9 \quad (6)$$

文献[6]算法对距离聚焦的 SAR 数据采样矢量量化,设比特率为 R ,码字长度为 L ,则码字搜索过程中每一分量(浮点数)对应的操作次数为 $2L \cdot 2^{RL}$,故该算法每个浮点数需要的操作次数为

$$(4 \log_2 N_r + 1) \times 3 + 2L \cdot 2^{RL} = 12 \log_2 N_r + 2L \cdot 2^{RL} + 3 \quad (7)$$

就算法的空间复杂度来看,BAQ 算法的 RAM 存储区主要用来存放原始数据、估计数据块的均值和方差以及对数据进行归一化操作,其中估计方差和均值有简化的方法而占用更少内存。文献[6]方法由于要对距离聚焦后数据做分块归一化处理,故 RAM 存储区大小与 BAQ 算法相同。本文算法的 RAM 存储区主要用来存放进行距离聚焦的 SAR 数据和沿方位向预测得到的差值系列。

3 种算法需要的缓存空间和运算量大小详见

表 4。

表 4 算法复杂度分析

算法	存储空间(浮点数)/RAM	运算量/操作·采样 ⁻¹
BAQ	$2 \times N_r \times N$	$2^b + 4$
文献[6]算法	$2 \times N_r \times N$	$12 \log_2 N_r + 2L \cdot 2^{RL} + 3$
本文算法	$2 \times N_r \times N_a$	$12 \log_2 N_r + 2p + 2^b + 9$

在本文实验中,表 4 的一些变量取值为 $N_r = N_a = 2048$, $N = 32$, $b = R = 2$, $L = 4$, $p = 3$ 。表 5 定量给出了存储空间、运算量及微机运算时间值。由表 5 可看出,本文算法所需的存储空间比文献[6]算法大,但运算量及运算时间比文献[6]算法大大减小。

表 5 3 种算法存储空间、运算量及运算时间

Table 5 Memory spaces, operations and operational times of three algorithms

算法	存储空间(浮点数)/RAM	运算量/操作·采样 ⁻¹	运算时间/s
BAQ	131 072	8	0.23
文献[6]算法	131 072	2 183	5.36
本文算法	8 388 608	151	1.17

4 结论

SAR 原始数据做距离聚焦后在方位向呈现出较强的相关性,这有利于数据压缩。本文对 SAR 原始数据做距离聚焦后,在方位向采用线性预测,并对得到的差值系列采用 BAQ。实验表明,在相同比特率条件下,本文算法的数据域信噪比和图像域信噪比均比 BAQ 算法高,但略低于文献[6]所示算法。在比特率分别为 1, 2, 3 比特/采样的情况下,本文算法的数据域信噪比分别比 BAQ 算法高 1.66 ~ 2.50 dB,图像域信噪比比 BAQ 算法高 1.48 ~ 2.11 dB;同时可以得出,本文算法的数据域信噪比比文献[6]所示算法低 0.35 ~ 0.77 dB,图像域信噪比比 0.31 ~ 0.80 dB。由于本文对预测得到的差值系列采用了标量量化,与文献[6]相比,本文算法的计算复杂度大大降低,这对实时性要求高的 SAR 原始数据压缩非常有利,具有一定实用价值。

参考文献

- [1] Kwok R, Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(4): 375-383.
- [2] 朱永明,朱岱寅,朱兆达.一种改进的 UPQ 算法在 SAR 原始数据压缩中的应用[J].空载雷达,2004, 145(1): 25-30.

- Zhu Y M, Zhu D Y, Zhu Z D. An improved algorithm in the application of SAR raw data compression[J]. Airborne Radar, 2004, 145(1): 25-30. (in Chinese)
- [3] 关振红,朱岱寅,朱兆达. 块自适应球形矢量量化算法压缩 SAR 原始数据[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 82-86.
Guan Z H, Zhu D Y, Zhu Z D. Compression of SAR raw data by block adaptive spherical vector quantization [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(1): 82-86. (in Chinese)
- [4] Benz U, Strodl K, Moreira A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(5): 1266-1276.
- [5] Michael W M, Fischer T R. Trellis coded quantization of memoryless and Gauss-Markov sources[J]. IEEE Transactions on Communications, 1990, 38(1): 82-93.
- [6] Poggi G, Ragozini A R P, Verdoliva L. Compression of SAR data through range focusing and variable-rate vector quantization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1282-1289.
- [7] D'Elia C, Poggi G, Verdoliva L. Compression of SAR data through range focusing and variable-rate trellis-coded quantization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(9): 1278-1286.
- [8] Magli E, Olmo G. Lossy predictive coding of SAR raw data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 977-987.
- [9] 王晓军,孙洪,管鲍. SAR 图像相干斑抑制滤波性能评价[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1165-1170.
Wang X J, Sun H, Guan B. Evaluation for coherent speckle suppression filters of SAR images[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(9): 165-170. (in Chinese)

作者简介:



曾尚春(1971 -) 男,博士研究生。主要研究方向:雷达信号处理。

Tel: 025-84896490 转 12501

E-mail: zsc5100@sina.com



朱兆达(1939 -) 男,教授,博士生导师。

主要研究方向:雷达信号处理、信号检测。

Tel: 025-84896490 转 12508。

(责任编辑:鲍亚平)