

块自适应标量-矢量量化算法 压缩 SAR 原始数据

曾尚春 朱兆达

(南京航空航天大学 401 教研室, 南京 210016)

摘要 块自适应量化(BAQ)算法是目前比较成熟的一种合成孔径雷达(SAR)原始数据压缩算法,该算法以 SAR 原始数据块满足高斯分布为前提。由于 SAR 成像区域很复杂,有些数据块可能不满足高斯分布,因此提出了一种块自适应标量-矢量量化算法(BASVQ),当数据块满足高斯分布时,采用标量量化;当数据块不满足高斯分布时,采用矢量量化。实验结果表明,块自适应标量-矢量量化算法在性能上优于 BAQ 算法,具有一定的实用价值。

关键词 块自适应量化 合成孔径雷达 数据压缩 矢量量化

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)08-1349-05

Block Adaptive Scalar-vector Quantization for SAR Raw Data Compression

ZENG Shang-chun, ZHU Zhao-da

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

Abstract The block adaptive quantization (BAQ) algorithm is comparatively mature for SAR raw data compression at present. This algorithm is on the premise that SAR raw data should satisfy Gauss distribution. But the imaged region is quite rugged, for example some blocks of data do not satisfy Gaussian distribution. Therefore, a block adaptive scalar-vector quantization (BASVQ) algorithm is put forward in this paper, namely, scalar quantization is applied when data blocks satisfy Gaussian distribution while vector quantization is applied when it does not satisfy. The experiments demonstrate that the performance of BASVQ algorithm outperforms that of BAQ algorithm. The BASVQ algorithm has practical value to some degree.

Keywords block adaptive quantization, synthetic aperture radar, data compression, vector quantization

1 引言

对合成孔径雷达的研究始于 20 世纪 50 年代,因为这一领域对军用、民用都有重要价值,所以许多国家都投巨资进行研究。由于合成孔径雷达的数据率与雷达脉冲重复频率(PRF)、采样点数和量化比特数成正比,为了获得高的距离分辨力和方位分辨力,必须提高雷达脉冲重复频率、增加采样点数和量化比特数,这样就会带来大的数据量,在数据的传输

和处理中会遇到很多困难。倘若对原始数据进行压缩编码,可以大大缓解传输过程中数据量过大,传输时间过长等问题。所以对合成孔径雷达原始数据压缩的研究就显得非常重要。迄今为止,在相关的文献中已经提出了多种算法,如 BAQ (block adaptive quantization)^[1], BFPQ (block floating point quantization)^[2], BAVQ (block adaptive vector quantization)^[3], 矢量量化^[4], TCQ (trellis coded quantization)^[5] 算法等,但只有 BAQ 算法由于算法简单而获得实用。这种算法先后用于 Magellan 航天

收稿日期:2006-09-18; 改回日期:2007-03-07

第一作者简介:曾尚春(1971~),男,南京航空航天大学通信与信息系统专业博士研究生。研究方向为雷达信号处理。E-mail: zsc5100@sina.com

飞行任务^[6]和 SIR-C(spaceborne imaging radar-C)任务^[7]中。

BAQ 算法虽然简单,但它有一个前提,即 SAR 原始数据作分块(如 32 × 32),并用方差归一化后,块内数据为标准高斯分布,这一假定在大多数情况下是成立的。但由于 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,由于量化电平和输出电平都是按标准高斯分布来设计的,这时用 Max-Lloyd^[8]量化器量化这些归一化数据块就会造成比较大的偏差。对这类特殊的数据块,很难找到一个合适的信源概率模型来逼近它,因此,用标量化方法已不能准确量化它们。另外,SAR 原始数据是 I、Q 两路回波信号经模数转换得到的,模数转换会在信号两端产生截断误差,所以准确地说,应该算作截尾的准高斯分布。

文献[9]提出了一种基于模糊逻辑的量化方法,它用模糊逻辑判决方法判断一块数据(32 × 32)与高斯分布的偏离程度,再确定相应的量化方式,该方法复杂度和硬件设施的增加是比较大的。本文提出一种相对简单的判别方式来决定数据块与标准高斯分布的偏离程度,以此来决定对该块数据(32 × 32)采用标量还是矢量量化,并用仿真实验证明了该方法的优越性。

2 算法过程分析

统计了一些归一化 SAR 原始数据块在各区间的概率分布情况,如表 1 所示,为便于比较,同时列出了标准高斯分布在各区间的概率分布。由于虚部、实部相互独立,具有相同的概率分布,所以只列出了实部的情况。

表 1 SAR 原始数据实部不同数据块在各区间的概率分布

Tab. 1 Probability distribution of different data blocks of SAR raw data real part in different region

数据块大小 (方位 × 距离)		[-1,1]	[-2,2]	[-3,3]	[-4,4]	[-5,5]
标准高斯分布		0.6827	0.9545	0.9973	0.9999	1
数据块 1	32 × 32	0.7336	0.9384	0.9912	1	1
数据块 2	.....	0.7481	0.9408	0.9971	1	1
数据块 3	.....	0.8073	0.9538	0.995	1	1
数据块 4	.....	0.8295	0.9596	0.9958	1	1
数据块 5	.....	0.6414	0.9194	0.998	1	1
数据块 6	.....	0.5307	0.9422	0.9971	1	1
数据块 7	.....	0.5951	0.9563	0.9925	1	1

由表 1 容易看出,各归一化数据块落入[-1, +1]区间的概率呈现出较大的差异,反映了各数据块与标准高斯分布的偏离程度。设第 i 块数据落入[-1, +1]区间的概率为 p_i,按如下规则确定门限(取门限时应考虑性能和复杂度间的折衷)

$$\left| \frac{0.6827 - T}{0.6827} \right| = 15\% \quad (1)$$

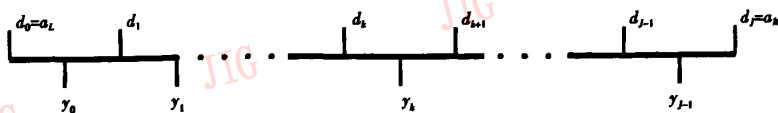


图 1 Max-Lloyd 量化区间划分图

Fig. 1 Region partition block diagram of Max-Lloyd quantizer

于是得到, $T_1 = 0.5803$, $T_2 = 0.7851$ 。从而得出判决规则如下:

如果 $T_1 \leq p_i \leq T_2$, 则第 i 块数据为标准高斯分布,用标量化;

如果 $p_i \leq T_1$ 或 $p_i \geq T_2$, 则第 i 块数据不服从标准高斯分布,用矢量量化;对标量化,用 Max-Lloyd 方法^[8]来设计最佳量化器。图 1 示出了 Max-Lloyd 量化区间划分图。

最佳量化器设计具体步骤如下:

- (1) 任选 y_0 ;
- (2) 由 $\int_{a_L}^{a_U} (x - y_0) p(x) dx = 0$ 来计算 d_1 , 式中 a_L 可为 $-\infty$;
- (3) 计算 $y_1 = 2d_1 - y_0$;
- (4) 继续这一过程直至算出 y_{j-1} ;
- (5) 检验 y_{j-1} 是否为 d_{j-1} 至 a_U (可为 $+\infty$) 段的概率中心, 即 $\int_{d_{j-1}}^{a_U} (x - y_{j-1}) p(x) dx = 0$ 是否成立 (在一定误差范围内)。如果成立, 结束; 反之, 另选一个 y_0 , 重复步骤 2~5。

信息论和通信理论已经证明, 即使在信源不相关的情况下, 矢量量化的性能也总是好于标量化。另外, 矢量量化并不考虑信源之间的分布特性。所以可以预言, 用矢量量化方法来量化这些特殊的数据块, 应该取得比标量化更好的效果。

采用分裂法^[10]设计码书, 具体步骤如下:

- (1) 计算所有训练矢量的质心 $y_0^{(0)} = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x_j$;
- (2) 用分裂因子 A (根据经验, 可取 $0 < A < 1$, 本文中取 $A = 0.9$) 乘以码字 $y_0^{(0)}$, 形成第 2 个码字 $y_1^{(0)}$ 。
- (3) 以 $y_0^{(0)}$ 和 $y_1^{(0)}$ 为初始码字, 用 LBG 迭代算法设计仅含 2 个码字的码书 $C_2^{(n)} = \{y_0^{(n)}, y_1^{(n)}\}$ 。
- (4) 将码书 $C_2^{(n)}$ 中的两个码字 $y_0^{(n)}$ 和 $y_1^{(n)}$ 分别乘以分裂因子 B (根据经验, 可取 $0 < B < 1$, 本文中取 $B = 0.9$), 得到 4 个码字 $y_0^{(n)}, y_1^{(n)}, By_0^{(n)}, By_1^{(n)}$ 。
- (5) 以这 4 个码字为初始码书, 用 LBG 算法设计仅含 4 个码字的码书, 再对设计好的 4 个码字乘以适当系数进一步扩大码字数目。如此反复, 经过 $\log_2 N$ 次设计, 就可得到所要求的含 N 个码字的初始码书。

用分裂法产生的初始码书性能好, 但其主要缺点是计算量较大。

矢量量化过程可以定义为从 k 维欧几里德空间 R^k 到其一个有限子集 W 的一个映射, 即 $Q: R^k \rightarrow W$, 其中 $W = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n \mid Y_i \in R^k\}$ 称为码书, n 为码书长度。该映射应满足: $Q(X \mid X \in R^k) = Y^*$, 其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 为 R^k 中的 k 维矢量, $Y^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_k^*)$ 为码书 W 中的码字并满足

$$d(X, Y^*) = \min_{1 \leq i \leq n} (d(X, Y_i)) \quad (2)$$

上式中 $d(X, Y_i)$ 为矢量 X 与码字 Y_i 之间的失

真测度, 这里采用的失真测度为均方误差 (MSE) 测度, 其表达式为

$$d(X, Y_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (x_j - y_{ij})^2 \quad (3)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

矢量量化由于计算量大, 提高码字搜索速度是一个重要环节。对于分裂法设计的码书, 采用二叉树搜索的方法, 为便于分析, 设最后一级码书有 32 个码字, 则需要存储 5 个码本, 各码本的码字数分别为 $W_1, 2$ 个码字; $W_2, 4$ 码字; $W_3, 8$ 码字; $W_4, 16$ 码字; $W_5, 32$ 码字。搜索方式如图 2 所示, Y_i^j 表示第 j 级码书的第 i 个码字。

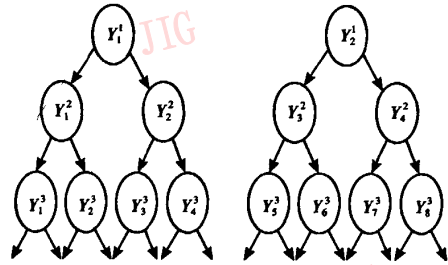


表 2 不同码率时的码字长度和码本大小

Tab. 2 Length of codeword and size of codebook in different code rate

f	$r(\text{bit})$	k	J
8	1	3	8
4	2	3	64
3.67	3	3	512
2	4	3	4096

增加非常快(指数增长)。

采用一组实测正侧视 SAR 原始数据,取实部归一化数据作训练系列,为保证训练系列能充分反映整块 SAR 原始数据的特征,训练系列是随机抽取的,本实验随机抽取了 256 000 个长度为 3 的矢量作训练系列,采用分裂法设计码本,经多次试算,实验中发现用于分裂码字的系数取 0.9 最适合。

表 3 是两种算法在不同码率下的计算结果,为便于分析,表的最后一行列出了原始数据所成图像的分辨率、峰值旁瓣比(PSLR)及积分旁瓣比(ISLR)。本文采用数据域信噪比(SQNR)和图像域信噪比(SDNR)为压缩效果评价参数。同时计算了图像域的空间分辨率(ρ)、PSLR 和 ISLR^[11]。

容易看出,在相同的码率下,标量-矢量量化算法的 SQNR 和 SDNR 均比块自适应量化算法高,码率为 1、2、3bits/采样时, SQNR 分别高出 1.10dB、1.54dB、1.77dB; SDNR 分别高出 0.88dB、1.24dB、1.38dB。同时可以看到,在不同码率时,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 3、图 4 分别给出了两种压缩算法所成的图像,采用 Range-Doppler 成像算法,图中暗区为一条蜿蜒的河流。

表 3 两种算法在不同码率下的性能参数

Tab. 3 Performance parameter of the two compression method in different bit rate

算法	压缩比	码率 (bits/sample)	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	8	1	6.56	8.08	3.53	2.62	-8.77	-10.91	-5.67	-6.24
BASVQ	8	1	7.66	8.96	3.61	2.54	-8.65	-11.54	-7.41	-7.03
BAQ	4	2	11.48	14.28	3.37	2.57	-9.10	-11.09	-6.15	-7.01
BASVQ	4	2	13.02	15.52	3.39	2.64	-9.29	-10.95	-7.21	-7.76
BAQ	2.67	3	16.84	20.13	3.31	2.59	-9.52	-10.91	-6.61	-6.93
BASVQ	2.67	3	18.61	21.51	3.33	2.64	-9.49	-10.64	-7.35	-7.23
SAR 原始数据					3.30	2.61	-9.50	-10.64	-6.70	-6.90



图 3 块自适应量化(BAQ)算法所成的像
(码率 2bits/采样)

Fig. 3 Image of the block adaptive quantization(BAQ) algorithm(bit rate 2 bits/sample)

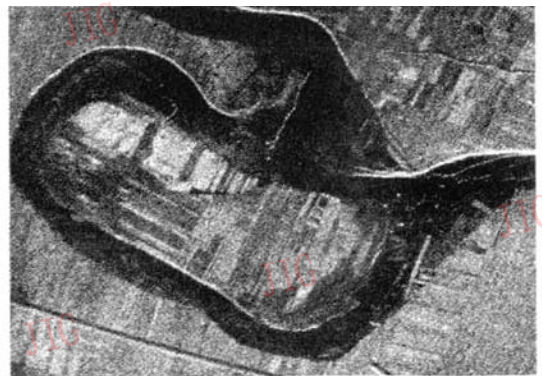


图 4 块自适应标量-矢量量化(BASVQ)算法所成的像
(码率 2bits/采样)

Fig. 4 Image of the block adaptive scalar-vector quantization(BASVQ) algorithm(bit rate 2 bits/sample)

由于 SAR 图像分辨率较低,因此,即便在 SDNR 相差 5dB 的情况下也很难从图像上看出明显的差异,所以表 1 所示的数据能更充分说明两种压缩方法性能上的优劣。

4 结 论

通过对实测 SAR 原始数据进行压缩算法仿真实验及分析得出,在给定的判别准则下,由于对分块归一化后符合标准高斯分布的数据块采用了标量化;不符合标准高斯分布的数据块采用了矢量量化,所以,在相同码率下,标量-矢量量化算法的数据域及图像域信噪比均比块自适应量化算法高,在性能上获得了一定的增益,在码率为 1 ~ 3bits/sample 采样时,数据域信噪比增加 1.10 ~ 1.77dB;图像域信噪比增加 0.88 ~ 1.38dB。标量-矢量量化算法在计算量上比块自适应量化算法增加 10% ~ 30% (跟采用的概率门限有关),该算法具有一定的实用价值。

参考文献 (References)

- 1 Ye Shao-hua, Sha Nan-sheng, Zhu Zhao-da. Study on SAR raw data compression using block adaptive quantization [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2001, 16(2): 181 ~ 184. [叶少华,沙南生,朱兆达. BAQ 算法在 SAR 原始数据压缩中的应用研究[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(2): 181 ~ 184.]
- 2 Cao Peng-zhi, Xu Rong-qing, Liu Yong-tan. Block floating point quantization (BFPQ) used to compress spaceborne synthetic aperture radar (SAR) raw data [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1997, 29(3): 91 ~ 94. [曹鹏志,许荣庆,刘永坦. 块浮点量化在星载合成孔径雷达数据压缩中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(3): 91 ~ 94.]
- 3 Moreira A, Blasler F. Fusion of block adaptive and vector quantizer for efficient SAR data compression [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 4(3): 1583 ~ 1585.
- 4 Guan Zhen-hong, Zhu Dai-yin, Zhu Zhao-da. Compression of SAR raw data by block adaptive spherical vector quantization [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(1): 82 ~ 86. [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.]
- 5 Michael W Marcellin, Fischer T R. Trellis coded quantization of memoryless and Gauss-Markov sources [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1990, 38(1): 82 ~ 93.
- 6 Kwok R, Johnson W. Block adaptive quantization of Magellan SAR data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375 ~ 383.
- 7 Caro E R. SIR-C, the next generation spaceborne SAR [A]. In: *The Second Spaceborne Imaging Radar Symposium [C]*, Tokyo, Japan, 1996, 6(2): 109 ~ 114.
- 8 Max J. Quantizing for minimum distortion [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1980, 28(76): 84 ~ 95.
- 9 Benz U. A fuzzy block adaptive quantizer (FBAQ) for synthetic aperture radar [J]. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 1994, 2(1): 1006 ~ 1011.
- 10 Sun Sheng-he, Lu Zhe-ming. Vector quantization technology and application [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2002: 224 ~ 225. [孙圣和,陆哲明. 矢量量化技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 224 ~ 225.]
- 11 Wang Xiao-jun, Sun Hong, Guan Bao. Evaluation for coherent speckle suppression filters of SAR images [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(9): 165 ~ 170. [王晓军,孙洪,管鲍. SAR 图像相干抑制滤波性能评价[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1165 ~ 1170.]