

基于 DCT-TCQ 的 SAR 原始数据压缩算法

宋鸿梅^{①②} 王岩飞^① 潘志刚^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文提出了一种基于离散余弦变换(DCT)和网格编码量化(TCQ)的 SAR 原始数据压缩算法。SAR 原始数据可以看成是距离向和方位向的 2 维线性调频信号的线性平移叠加,因而含有丰富的频率分量,对 DCT 系数按频率分组,根据各组频率分量系数方差确定量化比特分配,然后对量化系数进行 TCQ 编码量化,可以大幅度提高了量化增益。真实 SAR 原始数据实验结果表明:该算法使 SAR 原始数据的压缩性能指标较现有算法有了明显提高。

关键词: SAR 原始数据压缩; 离散余弦变换; 比特分配; 网格编码量化

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1040-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00733

DCT-TCQ Based SAR Raw Data Compression Algorithm

Song Hong-mei^{①②} Wang Yan-fei^① Pan Zhi-gang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: In this paper, an algorithm for compressing SAR raw data is proposed. This algorithm is based on the combination of Discrete Cosine Transform(DCT) and Trellis Coding Quantization(TCQ). Because SAR raw data consists of mass linear frequency modulation signals and have plenty of frequency components, a quantization bit allocation method is desired with grouped DCT coefficients based on frequency components, and quantizing the coefficients with TCQ methods. therefore this algorithm obtains notable quantization gain. Simulation results on real SAR raw data show that the proposed algorithm outperforms existed algorithms.

Key words: SAR raw data compression; Discrete Cosine Transform(DCT); Bit allocation; Trellis Coding Quantization(TCQ)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种高分辨率的主动式微波遥感设备,可以对大面积的地物成像,随着 SAR 系统向多极化、多波段、多模式发展,使得 SAR 原始数据率迅猛增加,给数据的下传和存储带来了困难。数据压缩是减小数据量的重要手段。人们已经研究了多种算法,如 BAQ 算法^[1], BFPQ 算法^[2], BAVQ 算法^[3], DCT-BAQ 算法^[4]和 DWT-BAQ 算法^[5]等,还有人把压缩感知引入 SAR 原始数据的压缩^[6]。然而在已有的原始数据压缩算法中,目前只有 BFPQ 算法和 BAQ 算法,由于其算法简单易于实现而应用到实际的 SAR 系统中。

本文提出了一种基于 DCT 和 TCQ 相结合的算法,针对 SAR 原始数据的特点,对各组 DCT 系数进行 zigzag 扫描,扫描矩阵相同位置的系数组成新的系数向量,构成 DCT 系数的频率分量,各系数

频率分量均满足近似零均值的高斯分布,依据各频率分量系数方差的不同对其进行量化比特分配,而后再使用 TCQ 量化器对频率分量系数进行量化。这种算法具有较高的量化增益,适合多种类型 SAR 原始数据的压缩等特性。

2 算法介绍

基于 DCT 和网格编码量化相结合的 SAR 原始数据压缩算法(DCT-TCQ),其编码器具体包括前向 DCT 变换、系数分组、比特分配、系数量化等几部分,该算法实现编码流程框图如图 1 所示,解码流程为编码流程的逆过程。下面将具体讨论算法中各步骤。

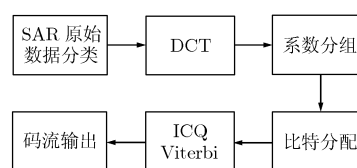


图 1 算法编码流程

2009-05-12 收到, 2009-09-17 改回

通信作者: 宋鸿梅 song_1997@sina.com

2.1 数据分块

SAR 原始数据往往比较庞大, 需要分块进行处理。对数据分块既可以降低数据的动态范围又可以减小运算量, 有利于算法的并行实现。数据分块大小直接影响压缩性能, 数据分块过小不能满足 Gauss 分布的特点, 分块过大会使小块内部的动态范围过大而影响最终的压缩性能。在进行 DCT 变换时也要对数据进行分块, 借鉴 JPEG 标准, 本文采用 8×8 的小块。DCT 变换系数有一个直流分量和 63 个交流分量, 共 64 个频率系数分量, 为了使 DCT 变换系数较好地吻合 Gauss 分布, 取每个频率系数分量有 1024 个系数, 与传统的 BAQ 的分块(32×32)大小相同。所以把 SAR 原始数据分为 256×256 的块进行处理。

2.2 离散余弦变换

Ahmed 等人于 1974 年提出了离散余弦变换, 因为其变换矩阵的基向量很近似于 Toeplitz 矩阵的特征向量, 因此 DCT 常常被认为是性能接近于 K-L 变换的准最佳变换, 并且它获得了编码增益和计算复杂度两者之间很好的折中。DCT 变换具有良好的去相关特性, 可以有效地去除 SAR 原始数据的相关性, SAR 原始数据的 DCT 变换系数的概率分布与 Gauss 分布更加吻合, 使 Gauss 量化码书更适合对其进行量化, 因而取得更为优异的量化效果。设输入信号序列为 $x(m), m = 0, 1, \dots, M - 1$, 令 DCT 变换系数为 $X(k), k = 0, 1, \dots, M - 1$, 则 1 维 DCT 正变换可分别定义为

$$X(k) = \sqrt{\frac{2}{M}} c(k) \sum_{m=0}^{M-1} x(m) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M}, \quad k = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (1)$$

$$x(m) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{k=0}^{M-1} c(k) X(k) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M}, \quad m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (2)$$

其中

$$c(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & k = 0 \\ 1, & k = 1, 2, \dots, M - 1 \end{cases} \quad (3)$$

对于 SAR 原始数据的 2 维 DCT 变换, 可以采用行列分离的算法, 即先行变换, 再列变换, 这样就可以直接利用 1 维 DCT 快速运算子程序或硬件结构, 实现起来比较容易。

2.3 系数分组

在进行 DCT 变换时要对数据进行分块, 借鉴 JPEG 标准, 本文采用 8×8 的小块。每块的 $[0,0]$ 系数组成频带 0, 每块的 $[0,1]$ 系数组成频带 1 等。这样 DCT 变换系数有一个直流分量和 63 个交流分量,

共 64 个频率分量。不同 DCT 块中同一频率分量对图像具有相近的贡献, 本文可以用相同的比特对其量化。基于这种思想, 把每个 DCT 块中相同频率的分量划分为一组, 把所有变换系数分为 64 组频率分量, 再对其进行比特分配。经 DCT 后, 各频率分量均符合广义 Gauss 分布。

2.4 比特分配^[7]

各组频率分量能量并不相同, 重构时对于原始数据的贡献也不同, 如果对每一组都以相同的比特率进行量化编码, 则方差较大的组其失真也较大, 致使压缩性能变差。因此可以对能量较高的组分配较多的量化比特数, 而对能量较低的组则分配较少的比特数, 使得在总比特数为一定的条件下, 总的量化误差为最小。

假设对信号进行简单的无记忆标量量化, 则量化失真可表示为

$$d(R) = E[(X - \hat{X})^2] \quad (4)$$

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。对于高斯分布信号, 其率失真函数可以表示为

$$R(D) = (1/2) \log_2 (\sigma^2 / D) \quad (5)$$

因为本文选择 8×8 的 DCT 块, 所有共有 64 组矢量, 则所有系数量化的平均失真为

$$D_T(R_T) = \frac{1}{64} \sum_{n=0}^{63} d_n(R_n) \quad (6)$$

由式(5)可以求出

$$D = \sigma^2 \times 4^{-R} \quad (7)$$

代入式(6)中, 可得

$$D_T(R_T) = \frac{1}{64} \sum_{n=0}^{63} \sigma_n^2 \times 4^{-R_n} \quad (8)$$

则最优比特分配问题可描述为: 当所有系数量化的平均比特率 $R_T = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} R_n$ 为一定时, 使得式(8)所定义的平均量化失真为最小。为此, 建立目标函数:

$$\arg \min_{R_n} J = \arg \min_{R_n} \left[\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \sigma_n^2 \times 4^{-R_n} + \lambda \left(\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} R_n - R_T \right) \right] \quad (9)$$

利用拉格朗日乘数法来求解上述最小化问题, 需求解方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial R_n} &= \sigma_n^2 (-\ln 4) 4^{-R_n} + \lambda = 0, \quad n = 0, 1, \dots, M - 1 \\ \frac{\partial J}{\partial \lambda} &= \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} R_n - R_T = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

求解方程组式(10), 可得

$$R_n = R_T + \frac{1}{2} \left[\log_2 \sigma_n^2 - \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \log_2 \sigma_n^2 \right] \quad (11)$$

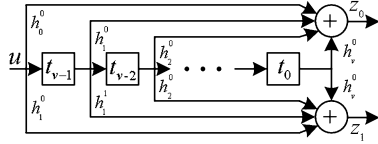


图 2 算法编码流程

其中 $M=64$ 。求得的 R_n 为分数比特率, 为了定长编码的需要, 需要对其进行四舍五入取整。

在按照式(11)进行比特分配时, 可能会出现这样的情况, 即分数比特率经四舍五入取整后, 取整后的比特数总和在比特分配过程当中即大于或等于预设的比特数, 这时可终止比特分配的过程; 或者当取整后的比特数总和在比特分配完毕以后仍然小于预设的比特数, 这时可采用所谓的“位填充”机制, 按照初始比特分配的顺序分别进行一位填充, 直到分配的总比特数等于预设比特数^[7]。

2.5 网格编码量化(TCQ)和 Viterbi 算法

TCQ 借鉴了通信领域中 TCM 的码集扩展和子集划分的思想, 利用网格的约束特性, 把量化码书扩展为相同码率标量量化码书的两倍, 从而显著地改善了压缩性能, 采用 Viterbi 译码算法对其编码, 又使编解码的运算量大为降低。TCQ 可以达到非常接近于率失真理论允许的均方误差性能, 而计算复杂度适中。

网格实质上是有限状态机的状态转移图。每一个状态有两个分支进入和离开的网格应用比较广泛。在通信理论文献中这种类型的状态机称为率 1/2 无反馈卷积编码器。从这个图的状态机导出的网格有 $N = 2^v$ 个状态。参数 $h^j = (h_v^j, h_{v-1}^j, \dots, h_0^j)$, $j = 0, 1$ 叫做奇偶校验系数。

二进制 h_i^j 确定一个连接是否在图 3 中出现。本文的 h^j 值来自文献[8]并在表 1 中给出。

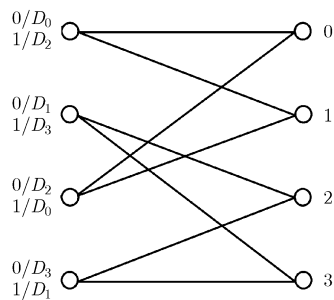


图 3 4 状态网格图

表 1 TCQ 奇偶校验系数(以八进制给出)

	状态数						
	4	8	16	32	64	128	256
h^0	5	13	23	45	103	235	515
h^1	2	04	04	10	126	126	362

图 3 的 4 状态网格是由 $h^0 = 5 = (1, 0, 1)$, $h^1 = 2 = (0, 1, 0)$ 得到的。在固定码率网格编码中, 有 2^R ($R > 0$ 的整数) 个分支离开每个网格状态。由此, 从一个给定的初始状态开始通过网格的任何路径, 都可以由一个 R 位索引序列来确定。将某个输出码集 $A_{\hat{x}}$ 中的记号与这种网格中的每一个分支联系起来。则 R 位索引序列可用来确定与一个特定的网格路径相联系的输出记号序列。因此, 提供一个网格和规定一个初始状态, 就产生一组输出序列, $C = \{\hat{x}_0, \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{M-1}\}$, 其中 $M = 2^{Rm}$, m 是网格的级数, 即每个输出序列的长度。这一组输出序列称为每样本 R 比特的网格编码。网格的结构可以用 Viterbi 算法^[9]进行编码, 它不需要在所有 2^{Rm} 种容许输出序列中穷尽搜索出失真最小的网格。Viterbi 算法允许编码从左到右穿过网格进行, 在每一级除了失真最小的 N 条路径外的所有路径都可以丢弃, 其中 N 是网格的状态数。

3 实验结果分析比较

为验证本文提出方法的有效性, 采用方位向 8192 点, 距离向 4096 点的 I,Q 两路机载 SAR 原始数据, 将数据分为 256×256 的子块进行实验。最后在原始数据域和采用 R-D(距离-多普勒)算法成像后的图像域进行性能评估, 并与常见的原始数据压缩算法进行比较。

定义 $g(i, j)$ 为原始数据在 (i, j) 处的采样值, $f(i, j)$ 为重建数据在 (i, j) 处的采样值, M, N 分别为原始数据方位向和距离向的点数。

(1)数据域采用的评估参数有:

(a)量化信噪比(SNR)

$$SNR = 10 \times \lg(s/\varepsilon) \quad (12)$$

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。

(b)峰值信噪比(PSNR) 如果取 s_{\max} 为峰值信号的功率, 则称此时的信噪比为峰值信噪比, 即

$$PSNR = 10 \times \lg(s_{\max}/\varepsilon) \quad (13)$$

对于 8 bit 有符号整型存储的 SAR 原始数据, 取 $s_{\max} = 127^2$; 对于 16 bits 无符号整型存储的 SAR 灰度图像, 取 $s_{\max} = 65535^2$ 。

(c)平均误差(ERMS)

$$ERMS = \sqrt{\varepsilon} \quad (14)$$

(d)逼真度(K)

$$K = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |g(i, j)| \cdot |f(i, j)|}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(i, j)^2} \quad (15)$$

(e)相位误差($\bar{\phi}$)

$$\bar{\phi} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\phi_0(i, j) - \phi_1(i, j)| \quad (16)$$

其中 $\phi_0(i, j)$ 为原始数据相位, $\phi_1(i, j)$ 为重建数据相位。

(2)图像域评估参数有:

(a)图像的相关系数(ρ)

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j) \cdot f(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)^2 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)^2}} \quad (17)$$

(b)量化信噪比(SNR) 量化信噪比的定义与数据域相同。

试验结果如表 2, 表 3, 表 4 所示, 取已有的压缩算法 DCT-BAQ, DWT-BAQ 和 BAQ 做比较。BAQ 是工程应用最为广泛的一种压缩算法, DCT-BAQ 和 DWT-BAQ 是理论研究中较为优秀的两种

SAR 原始数据压缩算法^[9]。从表中可以看出, 同样基于 DCT 变换的压缩算法采用不同的量化方式, 在低压缩比时 TCQ 量化具有明显的优势, 量化为每像素 3 bits 时, 数据域的信噪比 DCT-TCQ 压缩算法比 DCT-BAQ 压缩算法高 1.7518 dB, 同时可以得到较小的相位平均误差(0.2527)。但随着压缩比的提高, TCQ 量化的优势也逐渐减弱, 进行 1 bit 量化时 TCQ 在数据域指标已不再具有较显著的优势, 这是因为 TCQ 量化的原理是要拿出 1 bit 来选择码集, 其他比特用来选择该码集中的码字, 因此 1 bit 量化时, TCQ 不能取得较 BAQ 更为优秀的效果。但是所有压缩比下的图像域性能指标始终高于其他算法, 而 SAR 作为高分辨率成像雷达, 图像域的性能指标尤为重要的。图 4 为原始数据成像和 3, 2, 1 bpp 下 DCT-TCQ 压缩重建图像, 可以看出重建图像很好地保留了原图像的细节, 主观上看不出和原始数据成像有质的恶化。

4 结束语

本文深入地研究了离散余弦变换和网格编码量化编码并分析了 SAR 原始数据和普通光学图像在经过 DCT 变换后所体现出的差异, 并针对这种特性, 提出了一种基于方差的频率分组比特分配方式, 采用 TCQ 量化、Viterbi 算法对 DCT 变换后的系数进行量化编码。对一真实机载 SAR 原始数据, 采用几种经典的 SAR 原始数据压缩算法和本文算法对其做分析对比试验, 证明了本文算法(DCT-TCQ)对 SAR 原始数据压缩的有效性。

表 2 3bpp 压缩性能比较

压缩算法	数据域性能指标					图像域性能指标		
	SNR(dB)	PSNR(dB)	K	ERMS	$\bar{\phi}$	SNR(dB)	PSNR(dB)	ρ
本文算法	18.2667	29.7264	0.9947	4.1446	0.2527	25.6568	54.5338	0.9987
DCT-BAQ	16.5149	28.6273	0.9833	4.7037	0.2975	23.7685	50.9703	0.9981
DWT-BAQ	16.2931	28.3217	0.9572	4.9105	0.3001	23.6264	50.4518	0.9978
BAQ	14.5362	26.9898	0.9665	5.6795	0.2711	22.8869	50.1916	0.9969

表 3 2bpp 压缩性能比较

压缩算法	数据域性能指标					图像域性能指标		
	SNR(dB)	PSNR(dB)	K	ERMS	$\bar{\phi}$	SNR(dB)	PSNR(dB)	ρ
本文算法	12.6454	23.6489	0.9797	8.3437	0.4488	19.7686	49.9905	0.9948
DCT-BAQ	11.4706	23.5829	0.9833	8.4073	0.5033	18.6440	44.5679	0.9935
DWT-BAQ	11.2645	22.8753	0.9060	9.1927	0.5133	19.1601	45.8458	0.9940
BAQ	9.2282	21.6818	0.9059	10.4643	0.3392	16.0486	44.3533	0.9880

表 4 1bpp 压缩性能比较

压缩算法	数据域性能指标					图像域性能指标		
	SNR(dB)	PSNR(dB)	K	ERMS	$\bar{\phi}$	SNR(dB)	PSNR(dB)	ρ
本文算法	6.7697	18.8821	0.9099	14.4444	0.7992	13.6651	44.1679	0.9807
DCT-BAQ	6.3755	18.4879	0.8284	15.1151	0.8338	12.3607	39.5625	0.9757
DWT-BAQ	6.0651	18.0897	0.7523	15.9486	0.5133	12.1777	38.7532	0.9752
BAQ	4.2783	16.7319	0.7054	18.5015	0.4835	9.4858	37.7906	0.9535

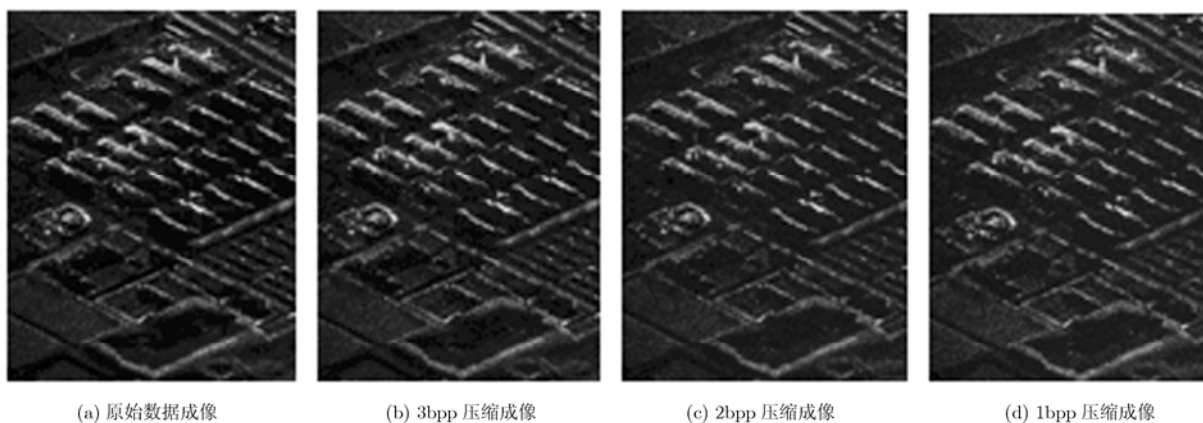


图 4 压缩成像比较

参 考 文 献

- [1] Sheng Lei, Zheng Tao-ye, and Zhang Xu-jin. Design and implementation of SAR raw data BAQ based on FPGA Synthetic Aperture Radar. APSAR 2007, 1st Asian and Pacific Conference on Huangshan, China, Nov. 5-9, 2007: 664-666.
- [2] Huneycutt B L. Spaceborne imaging Radar-C instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(2): 164-169.
- [3] Li Ting, Wang Dong-jin, and Liu Fa-lin. A fast BAVQ algorithm for SAR raw data compression[C]. CIE '06. International Conference on Radar, on Shanghai, China, Oct. 16-19, 2006: 1-3.
- [4] 潘志钢, 王岩飞. 基于 DCT 的分块自适应量化算法及其用于 SAR 原始数据压缩[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(8): 1784-1788.
Pan Zhi-gang and Wang Yan-fei. A compression algorithm for SAR raw data based on the combination of discrete cosine transform and block-adaptive quantization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(8): 1784-1788.
- [5] Zhou M, Deng Y, and Zhang Z. A new algorithm for SAR raw data compression by using wavelet packets. The 8th International Conference on Guilin, China, signal Processing, 2006, Vol.4: 16-20.
- [6] Bhattacharya S, Blumensath T, Mulgrew B, and Davies M. Synthetic aperture radar raw data encoding using compressed sensing. Radar Conference, RADAR '08. IEEE on Guilin, China, May 26-30, 2008: 1-5.
- [7] 潘志刚, 低比特率合成孔径雷达数据压缩算法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院, 2006.
- [8] Ungerboeck G. Trellis-coded modulation with redundant signal sets - Part II: State of the art. *IEEE Communications Magazine*, 1987, 25(2): 12-21.
- [9] Forney G D Jr. The Viterbi algorithm. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 25(2): 268-278.
- 宋鸿梅: 女, 1971 年生, 博士生, 研究方向为数据压缩、信源编码、图像处理。
- 王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像与数字信号处理。
- 潘志刚: 男, 1976 年生, 助理研究员, 研究方向为微波成像与数字信号处理、数据压缩。