

## 基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法

胡晓新 王岩飞 秦蕾  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 该文介绍了提升方法构造小波变换的优点,结合 SAR 原始数据的特点,提出了基于提升小波变换的 SAR 原始数据压缩算法。利用模拟和实际数据分析了基于提升小波的压缩算法的性能,与其他原始数据压缩算法的比较说明了这一方法的有效性。

**关键词** 合成孔径雷达, 数据压缩, 提升小波

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)05-0919-04

## Lifting Wavelet for SAR Raw Data Compression

Hu Xiao-xin Wang Yan-fei Qin Lei  
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The advantages of wavelet transform constructed with lifting scheme are introduced and compression algorithm based on lifting wavelet for SAR raw data is proposed. Compression performance of the algorithm is analyzed with simulation and real raw data and compared with other techniques by different quality parameters, which show that the algorithm is suitable for compression of SAR raw data.

**Key words** Synthetic Aperture Radar (SAR), Data compression, Lifting wavelet

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种重要的遥感手段,具有高分辨率和全天时、全天候探测的优点,因此被广泛地应用于环境监测、地形测绘和农业资源调查等领域中。由于 SAR 系统具有较高的分辨率、较大的测绘带宽和较大系统动态范围,接收到的回波数据量相当大,同时 SAR 系统逐步向多极化、多波段、多模式发展会导致数据量越来越大,这与下传信道的有限带宽相矛盾。因此如何降低数据率,同时保持系统动态范围成为需要解决的热点问题。

压缩SAR原始数据必须考虑数据的特点,根据SAR系统的原理,SAR原始数据的I、Q两路信号为互相独立的近似零均值高斯分布信号,沿距离向和方位向方差缓变,具有类白噪声的频谱,数据动态范围很大,熵值较高<sup>[1]</sup>。

针对SAR数据的特点和受小波变换编码用于SAR图像压缩的启发,Pascasio<sup>[2]</sup>提出将小波变换编码技术直接用于SAR原始数据,根据每一频带小波系数的统计特征分配量化比特,优化相应的量化器和熵编码器。Magli<sup>[3]</sup>将BAQ算法对I、Q系数的分块归一化的思想用于离散小波变换(DWT)去相关数据的过程,使得基于DWT的压缩算法受输入数据特性的统计波动影响减小,从而改善数据压缩的效果。

Pascasio<sup>[4]</sup>将小波包用于SAR原始数据压缩,并根据不同频率成分的重要性进行位分配,以更好地利用信号频率特性的差异。尽管基于小波的SAR原始数据压缩算法获得了人们的肯定,但标准DWT运算对存储量和计算能力的要求妨碍了这些压缩算法在实际SAR系统中的实时应用。

基于多项式内插的思想,Sweldens<sup>[5]</sup>提出了新的小波构造算法——提升算法。它在空间域内构造小波,无需引入Fourier分析,摆脱了对频域的依赖,因而更方便灵活。同时提升小波的实现结构决定了小波变换具有可直接获得逆变换,原址计算和计算速度加快的优点。本文基于前人的结果,结合提升方法构造小波变换和SAR原始数据的特点,提出了基于提升小波变换的SAR原始数据压缩算法。通过计算解压缩原始数据和成像后图像的相关质量参数,以及与其他原始数据压缩算法结果的比较说明了这一方法的有效性。

### 2 基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法

基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法属于变换编码。与直接编码方法不同,变换编码首先对原始数据进行变换,然后量化编码变换系数。变换的目的是将空间域像素阵映射成不相关的、能量分布紧凑的变换系数阵。这时占少数的大变换系数代表了图像中最主要的能量成分,占多数的小变换系数表示了一些不重要的细节分量,通过量化去除小系数所代表的细节分量,用少量的码字来描述大系数所代表的

主要能量从而达到高的压缩比。基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法包含进行分解和重构的提升小波算法、位分配准则和量化器 3 个部分。

Sweldens<sup>[5]</sup>给出的提升方案作为第二代小波的简单构建,可以产生更快速的原址小波变换。与基于Fourier分析的第一代小波不同,第二代小波不一定由某个固定函数经平移和缩放所构成,因此更加灵活。提升的分解方式与离散小波变换的思想一致,它将序列分解成更紧凑的表示。由于通过多步提升可以增加小波消失矩阶数,改善小波的性质,因此选定特定尺度函数,由它构造小的多尺度分析,然后利用提升方案能够实现有特殊性质的多尺度分析。同时有理论证实,已有的双正交小波都可以通过提升方案实现<sup>[6]</sup>。

提升结构本身决定了提升算法的优点。提升算法中,只需改变正变换中运算符和运算流方向就得到逆变换。此外它是一种典型的同址运算,即不需要额外的存储空间,原始信号本身就可以被它们的小波系数所代替。特别值得指出的是,提升算法使得运算速度加快,对于长滤波器,计算小波变换的提升算法的花费接近于标准算法的一半<sup>[5]</sup>。

下面针对 SAR 原始数据,分析提升小波变换的能量紧缩作用,小波变换后不同子带系数的统计特性和量化时的位分配准则,说明基于提升小波的压缩算法对 SAR 原始数据的压缩有效。

本文采用数值分析的方法对模拟数据和实际数据进行分析,这里仅仅讨论了 2D 小波变换的一级分解。分解结构如图 1 所示,其中 L 和 H 分别表示经低通和高通滤波器的输出。因此经过一级分解后,得到了近似分量 LL,水平细节分量 LH,垂直细节分量 HL 和对角线细节分量 HH。图 1 同时给出了 4 个分量的对应频率关系,其中近似分量 LL 代表水平和垂直方向的低频,水平分量 LH 代表水平方向低频,垂直方向高频,垂直分量 HL 代表水平方向高频,垂直方向低频,对角线分量 HH 代表水平和垂直方向的高频。这种频率关系体现了小波变换的时(空)频局部性的优势。

首先以正交 Daubechies 小波系(DN)为例分析小波变换对 SAR 原始信号的能量紧缩作用。普通图像中,大部分信号集中在低频部分中,所以经小波分解后,小波系数中代表低频的 LL 子带所占能量较大,其他 3 个高频子带所占能量

都较小。而 SAR 原始数据相关性差,信号分布在整个频带范围内,中、高频的信息也很丰富。表 1 给出了模拟 SAR 原始数据经小波变换一级分解后各子带的能量占总能量的百分比。根据表 1, SAR 数据经小波分解后 LL 子带能量约占分解系数总能量的近一半,HL 子带占分解系数总能量的三分之一。因此 SAR 原始数据的压缩与图像数据的压缩不同,变换后的能量主要集中于 HL 和 LL 子带系数,所以不能简单地完全放弃所有高频子带。由于相同的相对误差在高能量系数上所产生的绝对误差大于在低能系数上所产生的绝对误差,因此给高能量的系数分配更多的编码资源有利于获得更高的压缩性能。

为了定量说明小波变换对 SAR 原始数据的能量紧缩,引入变换增益(Gain)<sup>[6]</sup>度量变换编码中变换对于压缩的作用。

$$\text{Gain} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 / N}{\left( \prod_{i=1}^N \sigma_i^2 \right)^{1/N}} \quad (1)$$

其中  $N$  为子带数目,  $\sigma_i$  为第  $i$  个子带的方差。各子带的方差  $\sigma_i$  差别越大,变换增益 Gain 值越大。当各子带的方差相等时,变换增益 Gain 取得最小值 1。变换增益越大则变换编码的压缩特性也就越好。表 2 给了选择不同阶数的 Daubechies 小波时的变换增益,可以看出变换增益都大于 1,所以小波变换对与其后的量化压缩有效。随着小波阶数  $N$  的增加,小波变换所获得变换增益增大,因此选择阶数越大的小波越有利,这对于小波基的选择具有指导意义。

其次研究各子带小波系数的统计分布特性可以帮助选择合适的量化器。普通图像数据经小波变换后,各子带小波系数的统计分布在零点处往往很尖锐。而 SAR 原始数据的独特性导致各子带小波系数不满足这样的性质。图 2 为 SAR 原始数据经提升 D4 小波分解的小波系数的统计分布。一般假定 SAR 原始数据为方差缓变的高斯分布,且对高斯分布信号进行线性变换后,所得到的信号仍然满足高斯分布<sup>[6]</sup>,因此可以考虑对小波变换系数采用分块自适应量化(BAQ)。

表 1 选择不同小波基时,一级分解后各子带能量分布(%)

小波	LL	LH	HL	HH
D1	44.52	11.43	34.69	9.36
D4	47.47	8.16	37.56	6.81
D6	48.21	8.08	36.90	6.81
D8	47.64	7.86	37.76	6.74
D20	48.22	7.59	38.10	6.09

表 2 不同小波基的编码增益(一级分解)

小波	D1	D4	D6	D8	D20
Gain	1.2614	1.4132	1.4431	1.4752	1.4918

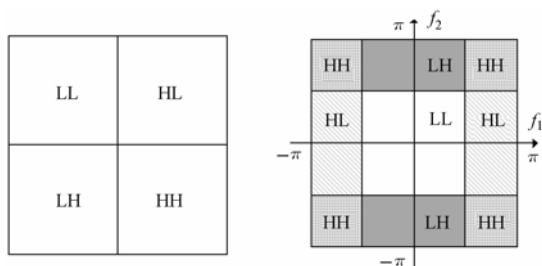


图 1 2D 小波变换一级分解框图及频率关系

最后由于不同子带中小波系数的能量分布和统计特性不同,给不同的子带分配不同码率,可以使得最终解码结果实现最小失真,最大可能的合理利用编码资源,提高信噪比。本文中考虑的位分配准则为<sup>[4]</sup>

$$R_i = \bar{R} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_i^2}{\left(\prod_{i=1}^K \sigma_i^2\right)^{1/K}} \quad (2)$$

其中  $R_i$  为第  $i$  个子带的比特率,  $\sigma_i^2$  为第  $i$  个子带的方差,  $\bar{R} = R/K$  为平均比特率,  $K$  为子带数目。

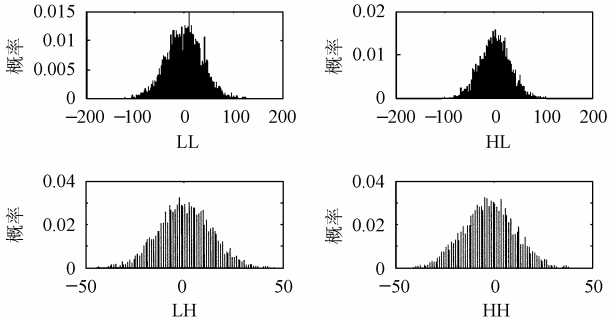


图 2 提升小波变换各频带统计特性(D4 小波, 一层分解)

### 3 算法实现及试验

结合提升小波变换的优点和 SAR 原始数据的特性,本文提出了基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法,编码算法如图 3 所示。

基于提升小波的压缩算法的编、解码工作过程如下:

- (1) 对 8b/s 的 SAR 原始数据分块,对每个分块进行提升小波变换;
- (2) 根据小波系数不同子带的统计特性分配量化比特数;
- (3) 对不同子带的小波系数用相应的 BAQ 量化器进行量化;
- (4) 地面接收端进行解码时,先进行量化器的解码,再对解码后数据进行提升小波逆变换,最后重建出 8b/s 的解压缩数据。

根据前述分析讨论,基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法保留 DWT 对信源的去相关作用,可以获得最大可能的能量紧缩,使变换域内的信源更适合压缩;根据各频带的不同统计分布特性分配量化比特数,优化相应的量化器;减小计算复杂性,加快运算速度,同址计算,减少存储花费,有利于满足星上实现的要求。

为了验证算法的压缩性能,取实际 SAR 原始数据进行压缩实验。考虑到计算复杂性和变换性能,以 D4 小波为实验小波。图 4 为 D4 小波的尺度函数和小波函数的波形。其

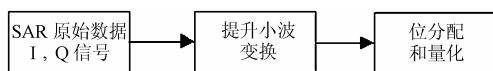


图 3 基于提升小波变换的 SAR 原始数据压缩算法编码框图

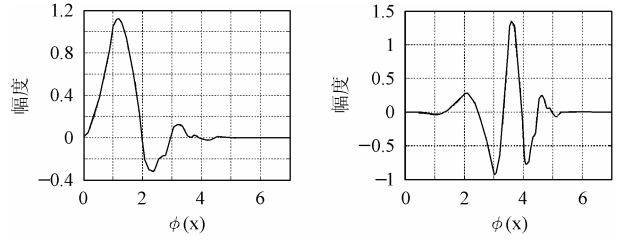


图 4 D4 小波的尺度和小波函数

中尺度函数  $\phi$  对应为低通滤波器,小波函数  $\psi$  对应为带通滤波器。因而利用与尺度函数和小波函数对应的滤波器组可以分离信号的低频、高频分量,也可实现信号的完全重建。

D4 小波分解的提升步骤为

$$\left. \begin{aligned} s_{j-1}^{(1)}[n] &= s_j[2n] + \sqrt{3}s_j[2n+1] \\ d_{j-1}^{(1)}[n] &= s_j[2n+1] - \frac{1}{4}\sqrt{3}s_{j-1}^{(1)}[n] \\ &\quad - \frac{1}{4}(\sqrt{3}-2)\sqrt{3}s_{j-1}^{(1)}[n-1] \\ s_{j-1}^{(2)}[n] &= s_{j-1}^{(1)}[n] - d_{j-1}^{(1)}[n+1] \\ s_{j-1}[n] &= \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}}s_{j-1}^{(2)}[n] \\ d_{j-1}[n] &= \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}}d_{j-1}^{(1)}[n] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $s_j[n]$  为待分解信号,而  $s_{j-1}[n]$  和  $d_{j-1}[n]$  分别表示经 D4 小波分解后的近似分量和细节分量。通过改变运算流方向和运算符的正负可以直接获得由分解系数重建原始信号的 D4 小波重构算法。

首先利用实际 SAR 原始数据进行试验,分析提升小波与标准小波计算速度之间的关系。为了获得更可靠的结果,选取 8 块不同数据分别利用 D4 小波的标准算法和提升算法进行一级小波分解。表 3 列出了两种实现方案的计算时间和统计出的平均时间,提升算法的计算速度较标准算法快 46%,与前面的分析基本相符,说明提升小波运算速度较标准 DWT 更快。因而基于提升小波的 SAR 原始数据压缩算法具有实时实现的前景。

其次进一步分析基于提升小波的压缩算法压缩 SAR 原始数据的效果,取数据编码率  $R$  分别为 2.00, 1.75, 1.50, 1.25 和 1.00bit/sample,对比矢量量化(VQ)、分块自适应矢量量化(BAVQ)和基于提升小波的压缩算法(LS)的压缩结果。表 4 为 SAR 原始数据压缩试验对比表,其中  $R$  为编码率,CR 为压缩比,SNR 为信噪比。与 VQ 比较,基于提升小波的压缩算法获得的信噪比改善约为 1.5dB;与 BAVQ 比较,基于提升小波的压缩算法获得的信噪比改善约为 1.0dB。同时压缩试验说明,在压缩比很大时,基于提升小波的压缩算法仍然可获得很高的量化信噪比。因此基于提升小波的压缩算法对 SAR 原始数据压缩有效。

图 5 为原始数据直接成像以及基于提升小波变换的压

表3 小波分解计算时间 (D4小波, 一级分解)

	$t$ (s)								$\bar{t}$ (s)
标准算法	7.328	7.218	7.281	7.281	7.437	7.296	7.297	7.297	7.304
提升算法	3.910	3.922	3.907	3.907	3.922	3.922	3.921	3.907	3.915

缩算法压缩 SAR 原始数据的解压缩数据成像。解压缩数据成像结果表明, 数据压缩比逐渐增大时, 图像主观质量大多较好, 绝大部分的图像纹理和细节被很好保存, 由此可见本文算法的高效性。

表4 实际 SAR 原始数据压缩试验比较

$R$ (bit/sample)	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	
CR	4.00	4.57	5.33	6.40	8.00	
SNR (dB)	VQ	9.140	7.852	6.535	5.263	4.603
	BAVQ	9.391	8.214	7.007	5.756	5.059
	LS	10.463	9.360	8.082	6.822	6.042

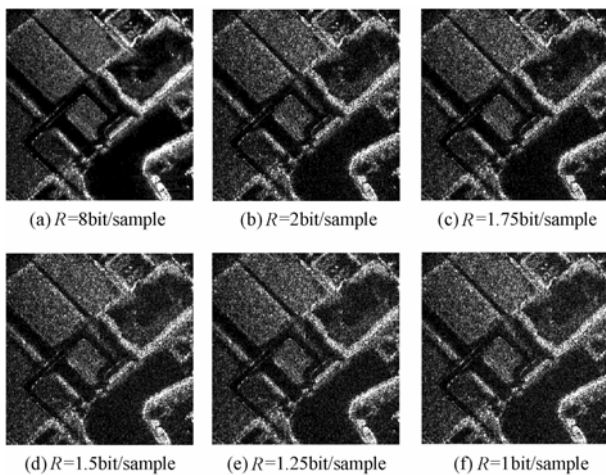


图5 原始数据及解压缩数据成像

#### 4 结束语

本文在前人将小波变换用于 SAR 原始数据压缩经验的基础上, 结合提升小波自身的优势, 提出了基于提升小波变换的 SAR 数据压缩算法。提升小波的变换在空间域内进行原址计算, 可以提高计算效率, 减少内存花费, 因此具有

实时实现的前景。基于提升小波的压缩算法在 SAR 原始数据压缩中取得了较好的效果, 在数据域, SNR 较高, 在图像域, 成像图像主观质量良好。因而基于提升小波的压缩算法对于 SAR 原始数据压缩算法的选择具有参考意义。此外本文仅仅探讨了使用正交小波基(Daubechies 正交小波系), 以后的工作中可以尝试将双正交小波的提升算法用于 SAR 原始数据压缩。

#### 参考文献

- [1] Benz U, Strodl K, Moreira A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1266 – 1276.
- [2] Pascazio V, Schitnizi G. Wavelet transform coding for SAR raw data compression, IGARSS, Hamburg, Germany, 1999, (4): 2251 – 2253.
- [3] Magli E, Olmo G, Penna B. Wavelet-based compression of SAR raw data. IGARSS, Toronto, Canada, 2002, (2): 24 – 28.
- [4] Pascazio V, Schitnizi G. SAR phase history data compression by using wavelet packets. IGARSS, Honolulu, USA, 2000, (6): 2639 – 2641.
- [5] Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet. *SIMA J. Math, Anal*, 1997, 29(2): 511 – 546.
- [6] Mallat S 著, 杨力华等译, 信号处理的小波导引(2nd). 北京: 机械工业出版社, 2002, 第七章.

胡晓新: 女, 1977 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达数据压缩算法。

王岩飞: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。

秦 蕾: 女, 1979 年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达数据压缩算法。