

基于二维查找表结构的SAR原始数据自适应频域压缩算法

祁海明 禹卫东

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘要: 该文针对实际SAR多普勒中心偏移及多普勒谱分裂问题, 提出基于一维查找表的自适应多普勒非均匀压缩比分配方法, 该方法结合一维量化编码查找表构成二维查找表结构的SAR原始数据自适应频域压缩算法。该文推导了SAR距离向回波频谱解析式, 给出距离向非均匀压缩比分配通用方案。实际数据处理结果表明, 该方法比传统频域类压缩算法具有更好的信噪比及鲁棒性。理论分析结果表明, 其运算量提高很小, 易于工程实现。

关键词: 合成孔径雷达; 原始数据; 压缩; 自适应; 频谱; 鲁棒性

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)03-0592-04

Adaptive Frequency Domain Algorithm for SAR Raw Data Compression Based on Two Dimensions Look-up Table

Qi Hai-ming Yu Wei-dong

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

Abstract: According to Doppler centroid shift and Doppler spectrum split, this paper proposes an adaptive Doppler nonuniform bit allocation approach based on one dimension Look-Up Table (LUT). Combined with one dimension quantization and coding LUT this approach forms the adaptive compression algorithm in frequency domain. Meanwhile, this paper deduces the spectrum analytic function of the echo in range and provides with the general scheme for nonuniform compression ratio allocation. Numerical experiments results based on real SAR data show that new algorithm has higher SNR and better robustness than traditional frequency domain algorithms. Theoretical analysis shows that the calculation load is small and can be easily applied in engineering.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Raw data; Compression; Adaptive; Spectrum; Robustness

1 引言

为了改善传统BAQ^[1](Block Adaptive Quantization)算法的性能, 文献[2-5]提出对SAR原始数据二维FFT变换后的I, Q两路信号作BAQ压缩。文献[6]提出对SAR原始数据二维FFT变换后的幅度和相位作幅、相最优标量化。以上两种方法本质上均是利用SAR原始数据频域的去相关性, 通过压缩比非均匀分配, 达到平均压缩比下压缩性能最优的目的。实际SAR回波信号往往存在多普勒中心偏移以及谱分裂^[7,8]现象, 此时多普勒非均匀压缩比分配方式的压缩性能将急剧下降。而应用多普勒中心估计的方法自适应实现多普勒非均匀压缩比分配的运算量很大^[4,6,9], 无法满足星载SAR数据实时处理的要求。为了解决上述问题, 本文提出基于一维查找表(Look up Table, LUT)的自适应多普勒非均匀压缩比分配方法结合一维量化编码LUT的处理方式, 即二维LUT结构的SAR原始数据自适应频域压缩算法。该算法既满足多普勒非均匀压缩比分配需要自适应于多普勒谱的非理想性, 同时运算量小, 适用于星载SAR系统。文章结构如

下: 第2节给出SAR距离向回波信号频谱解析式的推导结果, 提出距离向非均匀压缩比分配方案。第3节详细分析SAR回波信号多普勒谱特性, 提出二维LUT结构的自适应多普勒非均匀压缩比分配方案, 并对其计算量进行理论分析。第4节应用European Space Agency (ESA)提供的ERS-1/2数据和中科院电子所某机载SAR数据进行数值试验。第5节给出文章的结论。

2 SAR回波的距离向频谱推导及非均匀压缩比分配方案

设线性调频信号为

$$s_{\text{LFM}} = a \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi\left(f_0 t + \frac{kt^2}{2}\right)} \quad (1)$$

其中 a 为脉冲幅度; τ 为 LFM 脉冲宽度; f_0 为载频; k 为调频斜率; $k = B/\tau$; B 为 LFM 信号带宽。

其频谱为

$$S_{\text{LFM}}(f) = A e^{j\phi} \quad (2)$$

其中 A 为其幅度谱; ϕ 为其相位谱。并且,

$$|S_{\text{LFM}}(f)| = \frac{a}{\sqrt{2k}} \left\{ [c(k_1) + c(k_2)]^2 + [s(k_1) + s(k_2)]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\Phi_{\text{LFM}}(f) = \Phi_1 + \Phi_2 = -\frac{\pi}{k}(f - f_0)^2 + \arctg\left[\frac{s(k_1) + s(k_2)}{c(k_1) + c(k_2)}\right] \quad (4)$$

2007-10-23 收到, 2008-07-17 改回

中国科学院优秀博士论文, 院长奖学金专项科研启动基金项目
(0813260042)资助课题

其中 ϕ_1, ϕ_2 分别为平方律相位项和残余相位项, 并且

$$k_1 = \sqrt{2k} \left(\frac{\tau}{2} - \frac{f - f_0}{k} \right) \quad (5)$$

$$k_2 = \sqrt{2k} \left(\frac{\tau}{2} + \frac{f - f_0}{k} \right) \quad (6)$$

c, s 均为 Fresnel 积分, 即

$$c(u) = \int_0^u \cos \left(\frac{\pi x^2}{2} \right) dx \quad (7)$$

$$s(u) = \int_0^u \sin \left(\frac{\pi x^2}{2} \right) dx \quad (8)$$

略去固定的平方律相位项, 可见 LFM 信号频谱的幅频特性和相频特性均取决于 Fresnel 积分。根据 Fresnel 积分的性质, 当 $\tau B \gg 1$ 时, Fresnel 波纹很小, 信号能量的 95% 以上集中在 $|f - f_0| < B/2$ 的范围内。

假设 SAR 照射到的距离分辨单元数为 N ; 各距离分辨单元的后向散射系数为 σ_i , $i = 1, \dots, N$; SAR 距离向天线方向图对应各距离分辨单元的天线增益为 G_i , $i = 1, \dots, N$, 且天线收发增益相同; 则 SAR 距离向回波信号频谱为(鉴于篇幅, 详细推导见参考文献[10]):

$$A \left\{ \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 G_i^4 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_i \sigma_j G_i^4 \cos \left(\frac{2\pi f(j-i)}{B} \right) \right\}^{1/2} \quad (9)$$

式(9)即为 SAR 距离向回波信号的幅度谱。由式(9)可见, SAR 距离向回波信号幅度谱是由三部分构成, 即: (1) LFM 信号的幅度谱, (2) 与频率无关的常数求和项(括号中的第 1 个求和项), (3) 与频率有关的求和项(括号中的第 2 个求和项)构成。

通常, SAR 系统的采样频率高于 LFM 信号的带宽(即所谓的过采样)。因此, LFM 信号的幅度谱由高能量区与近似为零的低能量区构成。当 $\tau B \gg 1$ 时(通常 SAR 系统都满足), 低能量区与高能量区的带宽比为 $K-1$, K 为过采样系数。因此, 式(9)中第 1 项与后两项的乘积结果也将产生所谓的“高、低能量区”, 其带宽比与 LFM 信号相同; 式(9)中第 2 项提供幅度谱增益; 而第 3 项由于余弦函数的作用, 对幅度谱将产生随机周期调制, 表现为幅度谱包络的“毛刺”。

图 1 给出 SAR 距离向幅度谱的仿真结果, 其中 LFM 信号带宽 110MHz, 过采样系数为 2。由图 1 可见, 距离单元数越多, 幅度谱增益越大; 同时距离分辨单元数不影响幅度谱能量高、低区带宽比; 分辨单元数越多幅度谱包络调制现象越明显, 以上结果与式(9)分析结果相一致。

图 2 给出 ERS-1 及中国科学院电子学研究所某机载 SAR(简称电子所 SAR)的距离向幅度谱实测结果。

ERS-1 系统带宽 15.5MHz, 采样频率 18.96MHz; 中国科学院电子学研究所某机载 SAR 系统带宽 60MHz, 采样频率 66.67MHz。由图 2 可见, 实测数据幅度谱与理论分析结果相一致。(图 2 中, 低能量区频谱幅度较高是实际系统噪声叠加的结果。)

根据 SAR 距离向幅度谱能量分布特点, 可将过采样部

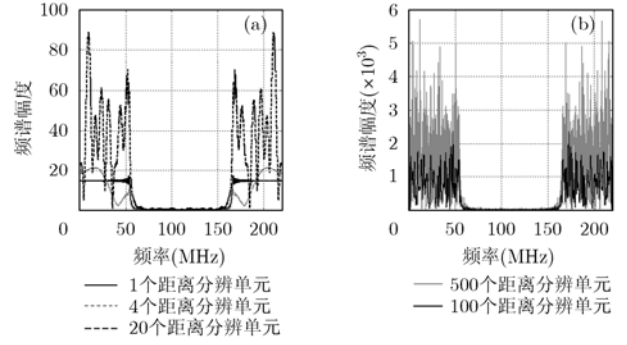


图 1 不同距离分辨单元数的 SAR 距离向回波信号幅度谱

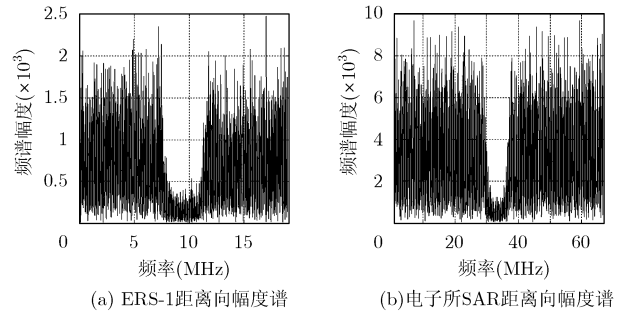


图 2 ERS-1 与电子所 SAR 距离向幅度谱

分的压缩比设置成无穷大, 而将其余部分压缩比按系统总体要求设置。

3 SAR 多普勒谱分析及基于二维 LUT 结构的自适应频域压缩算法

3.1 SAR 多普勒谱结构分析及多普勒非均匀压缩比分配方法

在大时宽带宽积条件下, 由相位驻留原理可知, 调频信号的时域包络和频域幅度谱之间满足对应关系^[11], 即多普勒谱形状由天线方位向波束方向图加权决定^[7]。多普勒包络的“毛刺”现象, 除了系统噪声因素外, 还由不同“慢时刻”相同视角照射下, 不同方位目标回波叠加有关。当对 SAR 方位向回波作 FFT 时, 超过 PRF/2 的杂波分量将因 FFT 的周期性而反折, 使得多普勒谱能量集中在 $[-PRF/2, PRF/2]$ 的两端, 即所谓的“谱分裂”^[8]。

多普勒非均匀压缩比分配以多普勒能量非均匀分布特性为依据, 因此频域去相关类压缩算法必须进行多普勒中心估计, 以使多普勒非均匀压缩比分配方式自适应于多普勒能量分布特性变化。现有的基于 FFT 的谱分析方法利用杂波谱的对称性来估计杂波谱中心。按照主要的运算方式可以分成两类: 一类基于相关运算, 例如能量均衡法、匹配相关法、最大似然法、相关函数法, 它们的基本思想是把多普勒谱与不同参考函数作相关运算, 然后寻找零点位置作为谱中心的估计; 另一类基于内积运算, 例如频率质心法, 借用物理学质心的概念, 以杂波谱为权值, 把频率的加权平均值作为谱中心的估计。以上多普勒中心估计方法均为“精估计”, 目

的在于补偿由于平台非理想运动造成的多普勒中心偏移。从总体上讲，“精估计”的运算量大，不适用于多普勒非均匀压缩比分配实时处理。压缩算法通常采用分块处理，因此仅需要估计出多普勒中心位于哪一分块，即可由多普勒谱的先验形状知识，对其进行非均匀压缩比分配。即通过所谓的多普勒中心“粗估计”，保证多普勒非均匀压缩比分配的可靠性与实时性。具体思想如图3所示。

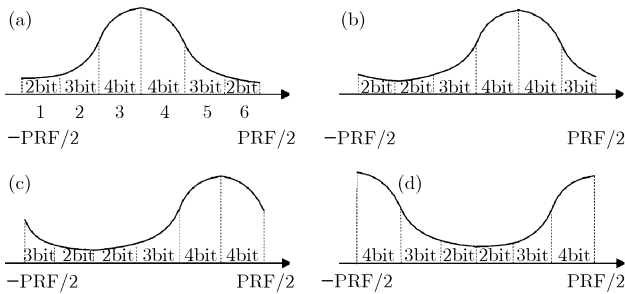


图3 基于多普勒谱先验知识的非均匀压缩比分配示意图

如图3所示，3(a)为多普勒中心没有平移的多普勒谱，将其分成6个子块，根据其能量分布特性，以平均3bit/sample为例，可以对1~6个子块进行非均匀压缩比分配。当多普勒中心平移甚至多普勒谱分裂时(如图3(b)-3(d)所示)，若仍沿用图3(a)中的压缩比分配方式，性能必将恶化。此时，统计各子块的幅度均值，通过比较得到均值最大的子块序号，应用多普勒谱的先验知识，可以估计出谱中心偏移程度，进而得到此时的非均匀压缩比分配方式。将均值最大的子块序号与非均匀压缩比分配方式关系制成查找表，即可在硬件中通过查表的方式进行非均匀压缩比分配。同时，基于BAQ的处理过程本身包含求解各子块幅度均值的操作，因此均值求取不属于额外开销。

3.2 基于二维LUT结构的自适应频域压缩算法

基于二维LUT结构的自适应频域压缩算法原理方案如图4所示。

如图4，首先在多普勒域对二维FFT后的数据分块(分块数通常为2的整数次幂)，计算各子块的幅度均值并通过二

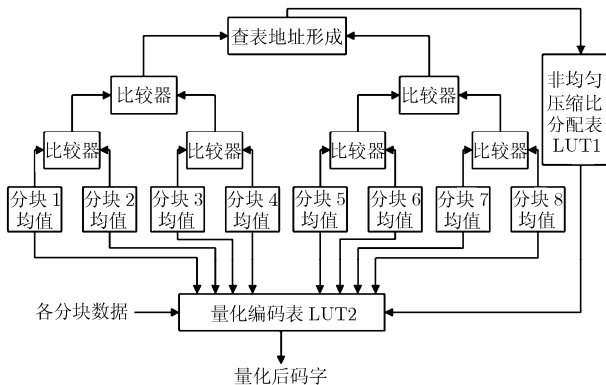


图4 基于二维LUT结构的自适应频域压缩算法原理方案

分法进行寻“最大值”的比较运算；然后将比较结果作为查找非均匀压缩比分配表LUT1的地址码，进行查表操作；最后对各子块数据进行量化编码，量化与编码处理仍然采用查表方式，查表地址由数据符号位、数据所在子块均值码和LUT1输出码构成。量化算法为频域幅相压缩算法。

3.3 计算量分析

假设做多普勒非均匀压缩比分配时，方位向分块个数 2^M 。则方位向的比较操作数为 $2^M - 2$ 。比较结果作为查表地址进行一次查表操作。由于数据形成分系统的存储量限制，方位向FFT的脉冲数一般取1024^[2]，因此当方位向分块尺寸为32个脉冲时，比较操作数为30，查表操作为1，可见该计算量对总体计算复杂度的影响很小。

新算法的小运算量是由额外存储非均匀压缩比LUT1为代价换取的。当分块个数为 2^M 时，最大均值所在的分块号可能值为 2^M ，显然对应存储的LUT1容量为 2^M 。由计算量分析过程可知：对于实际SAR系统，方位向FFT的脉冲数一般取1024，即使当方位向分块尺寸取极限值1个脉冲时，需要的存储量仅为1kb，显然对于数据形成分系统造成的存储负担很小，易于硬件实现。

4 数值试验

本节应用ERS-1/2数据和中国科学院电子学研究所某机载SAR数据进行数值实验。图5给出存在多普勒中心平移和分裂现象的多普勒谱与没有上述现象的多普勒谱。

图6为本文算法与FFT-BAQ及FFT-AP的SNR计算结果。计算中，方位向共10块数据，除第1块外，其余9块有不同程度的多普勒中心平移和多普勒谱分裂。

如图6所示，传统算法在多普勒中心存在偏移或多普勒

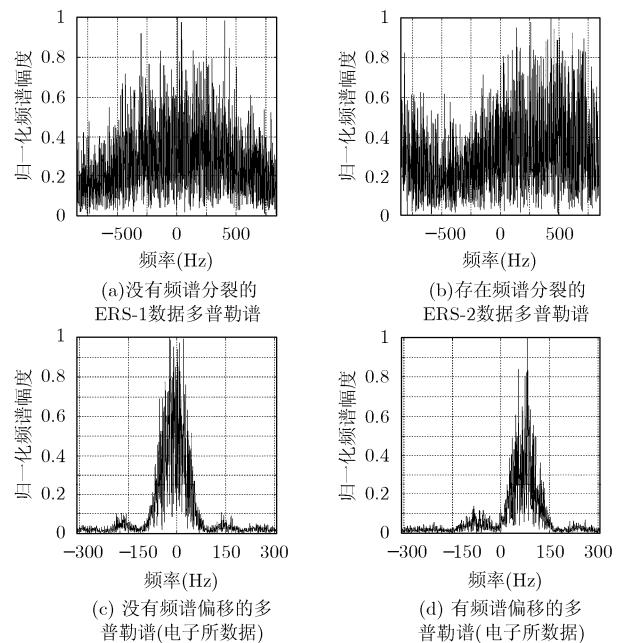


图5 ERS-1/2与电子所SAR数据的多普勒谱

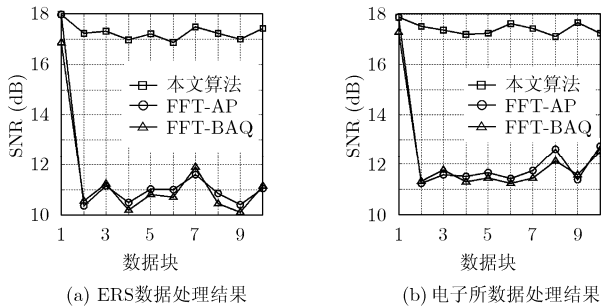


图6 本文算法与FFT-BAQ及FFT-AP的SNR计算结果

谱分裂时, SNR 下降 6dB 左右, 而本文算法的性能比较稳健。

5 结束语

本文完整推导了SAR回波信号的距离向频谱解析式。深入分析了距离向频谱非均匀压缩比分配问题。同时, 针对多普勒中心偏移及多普勒谱分裂现象, 提出基于二维LUT结构的自适应频域压缩算法。详细讨论了实现本文算法的计算量问题。实际数据的数值实验结果表明, 本文提出的算法比传统的FFT-BAQ, 以及FFT-AP算法具有更好的鲁棒性和信噪比。同时, 本文算法计算量和存储量提升有限, 算法结构易于硬件实现, 具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] Kwok R and Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data. *IEEE Trans. on Geosciences Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375-383.
- [2] Benz U, Strodl K, and Moreria A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression. *IEEE Trans. on Geosciences Remote Sensing*, 1994, 33(5): 1266-1276.
- [3] Kuduvalli G, Dutkiewicz M, and Cumming I. Synthetic aperture radar signal data compression using block adaptive quantization. in *GSFC Space Earth Sci. Data Compression Conf. Goddard Space Flight Center, USA*, 1994: 43-58.
- [4] Fischer J, Benz U, and Moreira A. Efficient SAR raw data compression in frequency domain. in *proceedings IGARSS, Wessling, Germany, July 1999*: 2261-2263.
- [5] 杨云志, 黄顺吉, 王建国. SAR原始数据的频域量化编码方法研究. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(12): 2107-2111.
Yang Yun-zhi, Huang Shun-ji, and Wang Jian-guo. Frequency region quantization coding method researching of SAR raw data. *System Engineering and Electronics*, 2005, 27(12): 2107-2111.
- [6] 祁海明, 禹卫东, 陈曦. 基于方位向滑窗处理的极坐标格式SAR原始数据频域压缩算法. *数据采集与处理*, 2008, 23(3): 300-305.
Qi Hai-ming, Yu Wei-dong, and Chen Xi. Frequency domain amplitude phase algorithm for SAR raw data compression based on azimuth sliding window processing. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2008, 23(3): 300-305.
- [7] 李刚. 合成孔径雷达运动目标检测、定位与成像研究. [博士论文], 北京: 清华大学, 2007.
- [8] 许稼, 李骏, 彭应宁等. 合成孔径雷达多普勒频谱的盲分裂解法. *电子学报*, 2005, 33(6): 974-976.
Xu Jia, Li Jun, and Peng Ying-ning, *et al.* Blind splitting solution of Doppler spectrum for synthetic aperture radar. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 974-976.
- [9] 潘志刚. 低比特率合成孔径雷达数据压缩算法研究. [博士论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006.
- [10] 祁海明. 星载合成孔径雷达原始数据压缩技术研究. [博士论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 2008.
- [11] 张澄波. 综合孔径雷达-原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989, 第4章.

祁海明: 男, 1980年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为SAR系统设计、SAR数据压缩技术。

禹卫东: 男, 1969年生, 博士, 研究员, 研究方向为SAR系统设计、SAR信号处理。