

合成孔径雷达数据压缩的研究¹

谢列宾 王贞松*

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

*(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

摘 要 该文对合成孔径雷达数据相关特性进行了分析研究, 提出对合成孔径雷达的成像数据采用区域自适应量化的 JPEG 方法进行压缩. 并且在此基础上, 提出对 SAR 复数图像进行压缩保留相位信息的方法.

关键词 合成孔径雷达, 图像压缩, JPEG, 区域自适应

中图分类号 TN951, TN911.72

1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种成像雷达, 具有高分辨率, 全天候和全天候的优点, 是现代雷达技术之一.

由于数字信号处理相比于模拟信号处理具有的巨大优越性, 雷达接收到的回波信号在正交解调后, 先被两路 A/D 变换器采样转换为数字信号, 然后进行数字信号处理. 合成孔径雷达原始数据的数据率等于脉冲重复频率、回波信号采样频率和每个采样点的量化比特数的乘积. 由于合成孔径雷达产生的数据量特别大, 即便进行实时成像处理后, 合成孔径雷达的图像仍有很大的数据量. 而合成孔径雷达成像系统受到雷达信号处理器中存储容量以及数据下传带宽的限制, 因此, 须要通过数据压缩技术减少 SAR 的数据量和数据率.

本文对 SAR 原始数据、中间数据以及成像数据的相关性质进行研究, 论证了对成像数据进行压缩的有效性; 并且在 JPEG 图像压缩标准的基础上, 提出了一种对 SAR 复数图像数据进行压缩的方法. 这一方法将使 SAR 的复数图像数据可以根据 SAR 图像的分区特性自适应地进行压缩, 既压缩了数据又有很好的保真度, 同时能保持复数图像数据的相位, 可以供以后各种不同类型的应用, 包括干涉 SAR 处理的应用.

2 SAR 原始数据、中间数据以及成像数据

对 SAR 数据中像素间的相关性进行研究, 定义间隔为 r 个像素的距离向以及方位向数据相关系数为 $\rho_R(r)$ 和 $\rho_A(r)$, 其计算式如下:

$$\rho_R(r) = \frac{\sum_{i,j} [(P_{i,j} - \bar{P})(P_{i,j-r} - \bar{P})]}{\sum_{i,j} [(P_{i,j} - \bar{P})^2]}, \quad \rho_A(r) = \frac{\sum_{i,j} [(P_{i,j} - \bar{P})(P_{i-r,j} - \bar{P})]}{\sum_{i,j} [(P_{i,j} - \bar{P})^2]}, \quad (1)$$

其中 $P_{i,j}$ 为图像中像素的数值, \bar{P} 为整幅图像像素值的均值.

以 RadarSAT 数据为研究对象, 取大小为 1024×1024 的未经成像处理的原始图像数据, 该原始数据的幅值灰度图像如图 1 所示.

分析该原始数据的幅值图像, 计算该原始数据图像距离向以及方位向 0~15 个像素间隔的像素相关系数, 结果如图 2 所示.

对于图 1 所示的原始图像数据, 从图 2 所示的 SAR 原始数据幅值图像的相关特性曲线得知, 原始数据在距离向以及方位向上像素间的相关性很小, 并且与间隔像素的数目无关, 相关

¹ 2001-07-16 收到, 2002-10-18 定稿
国家自然科学基金 (NFNS 69896250-2) 资助项目

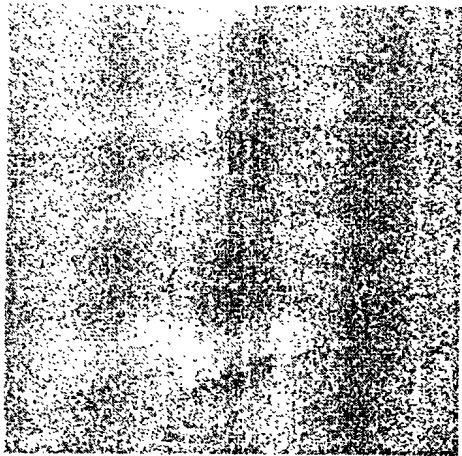
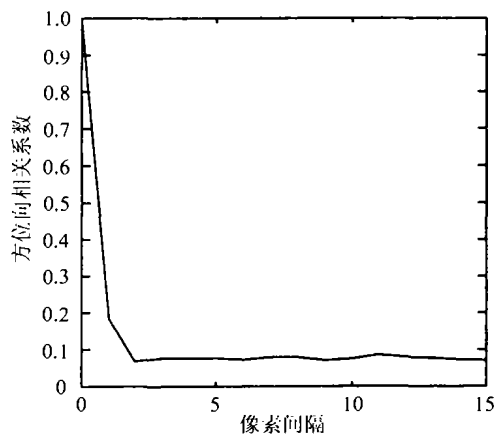
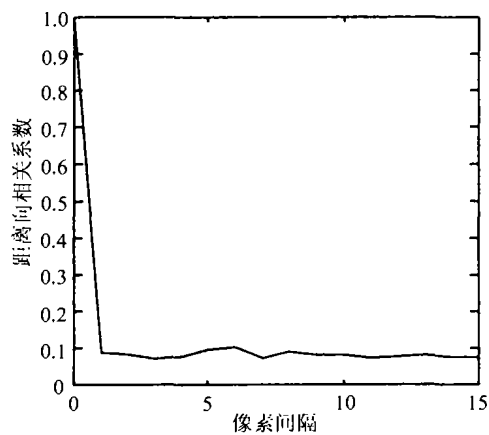


图 1 RadarSAT 原始数据幅值图像

系数在 0.1 以下。这是因为 SAR 原始数据图像中每一个采样点的信号,实际上是由地面大量的散射单元回波信号叠加而成。这些散射单元本身的统计特性被分散累计到各个采样点样本中。因此,传统的应用像素间相关性来消除图像内的冗余度达到对图像数据进行压缩的方法对 SAR 原始数据的压缩效果很不理想,无法直接用于对 SAR 原始图像数据的压缩。所以,合成孔径雷达的原始数据的压缩一般采用量化手段,常用的方法是块自适应量化 (Block Adaptive Quantization)^[1]。



(a) 幅值数据方位向相关特性



(b) 幅值数据距离向相关特性

图 2 原始数据幅值图像相关特性曲线

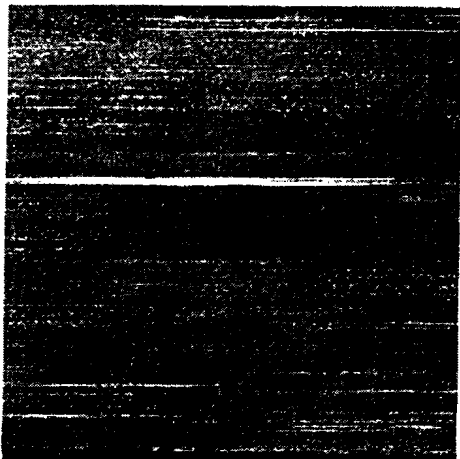


图 3 距离向压缩后数据

SAR 数据的成像聚焦过程可以分成两个步骤: 距离向压缩和方位向压缩^[2]。以图 1 中所示的 RadarSAT 数据为例,经过距离向压缩处理后的 SAR 中间图像数据如图 3 所示,其方位向和距离向上的像素相关特性如图 4 所示。

由图 3 可以看到,原始数据经过距离向压缩处理以后,其幅值图像在方位向上呈现明显的线条状。图 4 结果表明:方位向像素的相关性明显增加,随着像素间距离的增加,不同距离像素在方位向上的相关系数大致稳定在 0.5 左右;距离向像素的相关性也有一定程度的增加,相关系数随着像素距离的增大而减少。

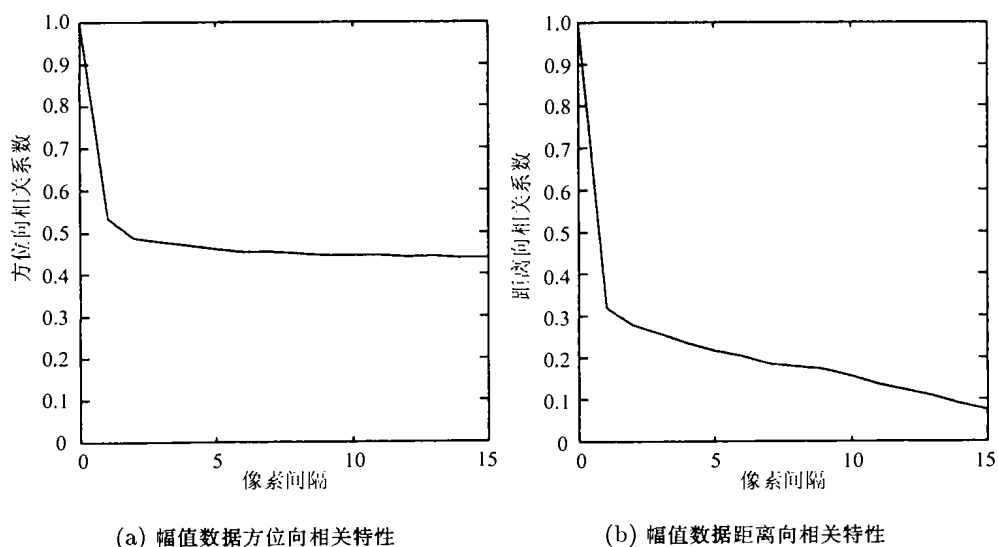


图 4 中间数据幅值图像相关特性曲线

对数据进行进一步方位向成像处理, 得到最终成像数据如图 5 所示, 其相关特性曲线如图 6。

由图 5 图像及相关特性曲线图 6 的结果可以看到: 成像数据的方位向相关特性曲线走势由原来中间数据的平坦变为随着像素间距离的增大而减少, 表明方位向数据被进一步压缩, 能量集中到某些点上。SAR 原始数据在经过距离向压缩以及方位向压缩以后, 在两个方向上的相关特性曲线走势以及数值趋向一致。经过成像处理, SAR 图像数据在两个方向上的不相关因素已经被压缩聚焦处理减小, 利于对图像进行压缩编码处理。



图 5 成像数据

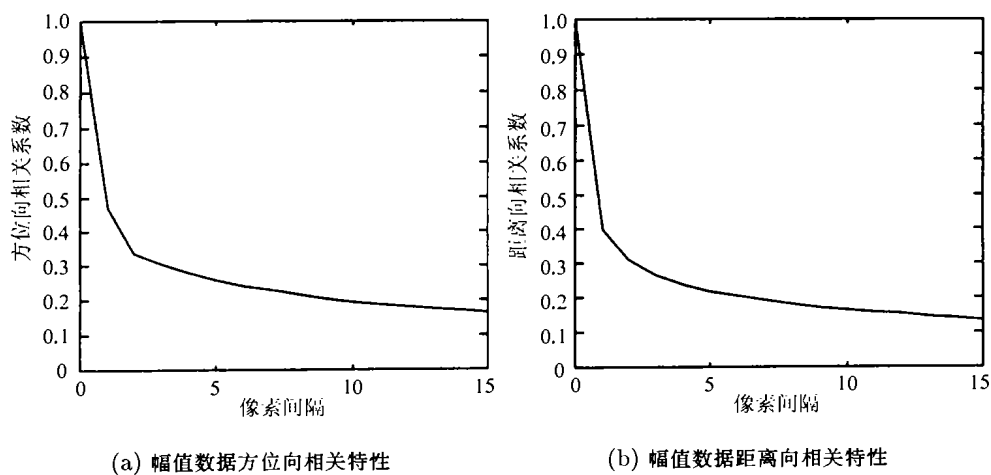


图 6 成像数据幅值图像相关特性曲线

从合成孔径雷达的数据处理过程来看,合成孔径雷达信号处理成像的过程实际上是一个使用匹配滤波器对雷达回波信号进行压缩(从信号处理的角度)聚焦,增强数据相关性的过程。要获得好的压缩效果,对图像数据进行编码最为有效。

3 区域自适应量化的 JPEG 算法^[3-5]

JPEG(Joint Photographic Experts Group)是一个由 ISO 和 IEC 两个组织机构联合组成的一个专家组,负责制定静态的数字图像数据压缩编码标准,这个专家组开发的算法称为 JPEG 算法。JPEG 算法流程如图 7 所示。

如图所示,待编码图像首先被分割成为 8×8 的对象,然后进行二维的正向离散余弦变换(FDCT),对得到的离散余弦变换系数矩阵进行量化,将量化后系数矩阵按照 Zig-Zag 方式重新排序,对重新排序后的数字序列采用游程编码来减少相邻重复数据的冗余,最后采用 Huffman 熵编码技术精简数据量。

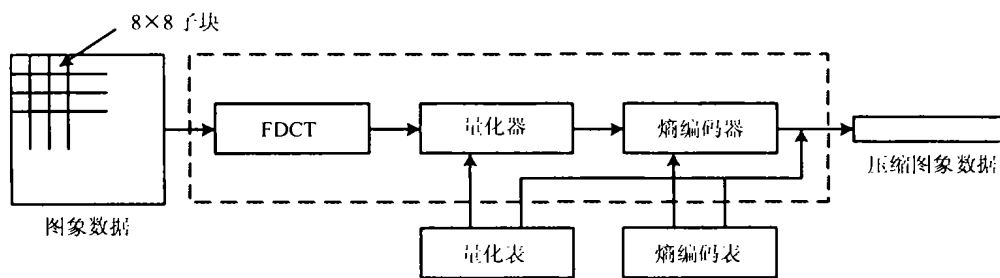


图 7 JPEG 算法编码

JPEG 标准对图像压缩的结构有严格的限制,但是它同时又允许对其中的具体算法进行一定程度的修改,具有一定的可扩充性。

JPEG 算法利用 DCT 变换将图像变换到频域,采用量化手段根据人类视觉系统有选择地保留人眼敏感的数据,从而达到对图像的压缩。JPEG 算法压缩的关键部分是量化。如果对图像中的低频区域进行粗量化,高频区域进行细量化,就可以提高图像的压缩比,同时保证图像的细节质量。基于区域自适应的改进 JPEG 压缩算法流程如图 8 所示。

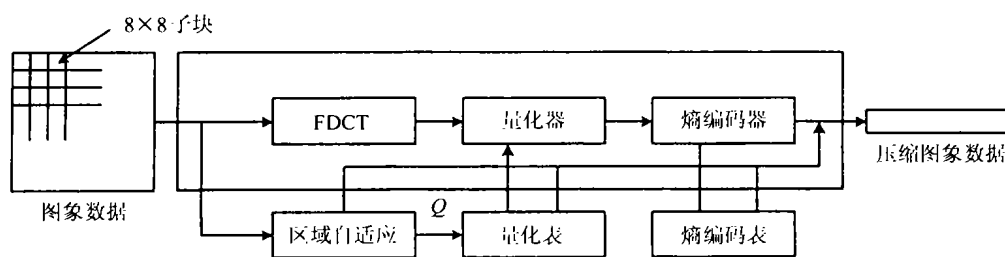


图 8 改进的压缩流程

以温哥华地区的 ScanSAR 图像为例,取 512×512 大小的区域,如图 9 所示。

将图像划分成为高细节区域以及低细节区域两种, 采用不同的压缩品质因素进行压缩。以方差作为对图像根据细节来分类的评判标准: 取图像块的方差门限为 10, 对于方差大于 10 的块, 用品质因素 $Q = 40$ 压缩; 方差小于 10 的图像块, 用品质因素 $Q = 10$ 压缩。

对温哥华地区的 SAR 图像应用区域自适应的压缩方法进行压缩, 图像压缩比 (CR) 为 8.5, 峰值信噪比 (PSNR) 为 28.10dB。应用标准 JPEG 方法对图像进行压缩, 在相同的图像压缩比 8.5 下, 其 PSNR 为 27.96dB, 比区域自适应方法少 0.14dB。



图 9 温哥华地区的 ScanSAR 图像

对于 SAR 图像来说, 图像细节部分包含的信息要比水域以及山体阴影等灰度变化平缓区域的信息更为重要。所以, 根据图像块的内容的不同, 采用不同的压缩策略, 对于减小 SAR 图像的数据率来说具有实用价值。尤其对于那些在图像中存在较大比例低频细节的 SAR 图像来说, 应用区域自适应的方法可以在控制重要图像信息的失真度的同时提高图像数据的压缩比。

4 SAR 复数图像的压缩

合成孔径雷达的成像数据是复数图像, 灰度图像是复数图像的模值图像, 然而, SAR 复数图像中的相位信息在 SAR 图像的信息提取中同样十分重要。对于干涉 SAR 系统, 依据两幅同一地区不同视角的 SAR 图像中的信息 (相位信息), 进行一定的信号处理就可以重现该地区的三维数字高程 (DEM) 图像。所以, 复数图像中相位信息的保存具有相当重要的意义。

经过对 SAR 复数成像数据的研究, 在区域自适应 JPEG 算法的基础上, 提出对 SAR 复数图像数据压缩以及解压缩的流程如图 10 所示:

对复数成像数据的压缩可以分为两部分: 模值数据的压缩以及实部 (虚部) 数据的压缩。这两部分数据的编码采用基于 JPEG 算法的区域自适应的编码方式。数据解压时, 恢复的模值图像可以直接用于观察, 而重建实部 (虚部) 数据加上模值数据可以根据三角函数关系重新计算出复数数据中包含的相位信息。

以大小为 512×512 的合成孔径雷达山体的复数图像数据为例, 如图 11 所示。

对于压缩后的复数图像数据, 采用相位标准偏差 (Phase Standard Deviation, PSD) 以及平均相位误差 (Mean Phase Error, MPE) 作为相位信息评估的标准:

$$\text{PSD} = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\tilde{\varphi}_{i,j} - \varphi_{i,j})^2} \quad (2)$$

$$\text{MPE} = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |\tilde{\varphi}_{i,j} - \varphi_{i,j}| \quad (3)$$

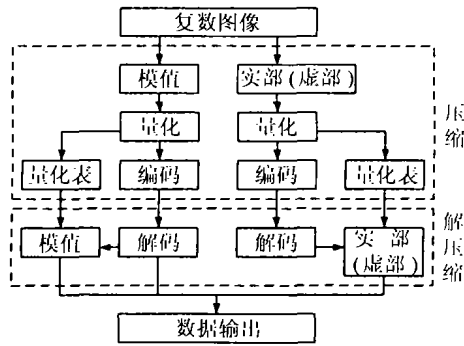


图 10 SAR 复数数据压缩以及解码框图



图 11 SAR 山体图像

采用不同的压缩比对 SAR 山体复数图像进行压缩，并且对解码重建后的图像进行相位信息评估，可以得到结果如表 1。

表 1 复数图像压缩相位误差

CR	9.1	7.5	6.4	4.9	3.6	2.5
PSD (rad)	0.8578	0.8308	0.8007	0.7536	0.6763	0.5185
MPE (rad)	0.6470	0.6191	0.5877	0.5409	0.4671	0.3339

对于 SAR 复数图像，其模值服从瑞利分布，而其相位服从均匀分布，计算采用对相位信息进行均匀量化方法压缩的相位误差，得到的结果如表 2。

表 2 均匀量化相位误差

比特数	1	2	3	4	5	6	7
CR	8	4	2.67	2	1.6	1.33	1.14
PSD (rad)	1.8188	0.9098	0.4547	0.2278	0.1142	0.0578	0.0301
MPE (rad)	1.5749	0.7880	0.3935	0.1971	0.0985	0.0493	0.0246

比较两种不同方法的结果，可以看到，在较大压缩比（压缩比大于 4）的情况下，基于 JPEG 标准的复数图像压缩方法在保留相位信息方面具有比较大的优势。

5 结 论

由对合成孔径雷达数据相关特性进行分析的结果可以看出，对于 SAR 数据最为有效的压缩是对 SAR 成像数据进行编码压缩。对合成孔径雷达的成像数据采用区域自适应量化的 JPEG 方法进行压缩，可以更好地保留图像中的细节信息。在此基础上，提出对 SAR 复数图像进行压缩保留相位信息的方法，得到了良好的结果。同时，也对 SAR 复数图像的压缩编码，保留其中相位信息开辟一种新的思路。

参 考 文 献

[1] R. Kwok, W. T. K. Johnson, Block adaptive quantization of Magellan SAR data, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1989, GE-27(4), 375-383.

[2] G. Franceschetti, R. Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing, Ohio, US, CRC Press LLC, 1999, 1-165.

- [3] ISO/IEC 10918-1:1994, Information technology—Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and Guidelines.
- [4] G. Wallace, The JPEG still picture compression standard, Comm. ACM, 1991, 34(4), 31-44.
- [5] M. Crouse, K. Ramchandran, Joint thresholding and quantizer selection for decoder-compatible baseline JPEG, Proc. ICASSP, Detroit, US, 1995, 2331-2334.

RESEARCH ON SAR DATA COMPRESSION

Xie Liebin Wang Zhensong*

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

Abstract The correlation characteristics of SAR raw data, interim data and image data are studied. A region adaptive compression method based on JPEG algorithm is developed and applied to the compression of SAR image data. Furthermore, on the basis of this method, a compression method of the SAR complex image data is developed, which reserved the phase information and had low bit rate comparing to direct quantization.

Key words Synthetic aperture radar, Image compression, JPEG, Region adaptive

谢列宾: 男, 1974 年生, 硕士生, 研究方向: 通信与信息系统.

王贞松: 男, 1945 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 通信与信息系统.