

合成孔径雷达原始数据压缩¹

杨耀增

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 本文首先论述了合成孔径雷达原始数据压缩的意义和重要性,接着简要回顾了它的发展历史,着重讨论了分块自适应量化(BAQ)和矢量量化(VQ)两种数据压缩方法,最后展望了合成孔径雷达原始数据压缩的发展前景。

关键词 合成孔径雷达, 数据压缩, 矢量量化

中图分类号 TN958

1 引 言

合成孔径雷达(SAR)是一种数据率高、数据量大的全天候、全天时有源微波成像遥感器。在国民经济和国防事业中起着日益重要的作用。自本世纪 70 年代以来,合成孔径雷达开始从机载向星载发展,成像处理和记录手段从光学向数字发展。成像处理多数情况仍在地面进行,这就要求把原始数据从卫星上实时传输到地面接收站,数据传输对数据率的限制就构成制约图象质量和观测效率提高的重要因素。减少合成孔径雷达数据量降低数据率的方法有以下几种可供选择^[1]:(1)增加 SAR 天线的方位向长度,降低脉冲重复频率(PRF)和方位向过采样系数,这些方法的代价是增加了天线的重量和降低了方位分辨率;(2)牺牲距离分辨率,以减小系统带宽和距离向过采样系数;(3)减小波束视角或入射角,增加图象的几何失真,或者减小测绘带宽度;(4)减少量化位数/采样,代价是加大了失真噪声,使冲激响应函数和复辐射分辨率变差。上述减少数据量降低数据率的措施皆以改变系统设计降低系统性能为代价,不属于本文的讨论范围。于是人们想到可否将数据压缩技术用于合成孔径雷达,从本世纪 70 年代起开始了这方面的研究。

合成孔径雷达原始数据压缩与一般的数据压缩不同,它具有以下特点:(1)合成孔径雷达相邻分辨单元回波信号的相关性很小,因此基于消除数据间相关性的许多数据压缩方法在此效果不好。(2)数据量大,数据率高,且要求压缩过程实时完成,这将使得一些复杂度高,运算时间长的压缩算法不适用。(3)压缩过程在原始数据域进行,而压缩效果评估在图象域进行,中间相隔着一个成像处理过程,由于原始数据中含有丰富的相位信息,在数据压缩过程中必须保持相位关系才不会影响成像处理。

本文仅限于讨论那些能用于 SAR 原始数据的压缩方法,一般的图象数据压缩方法,大部分可用于 SAR 图象数据压缩,不属于本文的讨论范围。

2 合成孔径雷达原始数据压缩的发展

1976 年 G. W. Zeoli^[2]从信息论的率失真理论出发,将合成孔径雷达看成一个通信系统,假设 SAR 回波为零均值的高斯分布信号,在均方差保真度准则下推导了给定输出图象信/噪比时数据率的下界。虽然他并未给出接近以至达到下界的具体方案,但是他指出了在一定条件下数据压缩效果的界限。1977 年 R. G. Lipes 和 S. A. Butman^[3]以及 1978 年 Chialin Wu^[4]都

¹ 1996-01-31 收到, 1996-07-25 定稿

研究了采样和量化对于合成孔径雷达图象质量的影响, 得到了类似的结论. 采样率受 Nyquist 定律的限制不能任意降低. 他们通过对原始数据采用不同位数量化后的输出图象研究了量化的影响, 结论认为量化比特数/样本可以适当减少, 这将引起量化噪声增加和辐射分辨率下降. 而增加多视数可以改善图象质量. 关于传输误差, R. G. Lipes 和 S. A. Butman^[3] 指出, 比特误码率小于 2^{-7} 对于 SAR 图象质量就没有什么影响. 1981 年 F. Li 和 D. Held 等^[5] 用计算机仿真验证了 SAR 回波信号数字化过程中不同的增益调整, 不同采样率和不同误码率下, 由数字化过程引入的失真噪声, 与解析研究结果比较, 两者相当一致. 在有些 SAR 中距离向的脉冲压缩已在雷达接收机中进行, 接收机输出的视频信号经数字化后直接得到距离压缩后的数据. 1987 年 P. Lafrance 和 J. J. Osborne^[6] 以 SEASAT-A 的数据为例研究了用只取同相分量、只取相位分量、2bit、1bit 等方法减少数据量后的成象效果. 指出这些方法引起的空间分辨率变坏很小甚至没有变化, 只是随着数据率的降低, 信/杂比缓慢减小. 1989 年 S. A. Mongo 和 K. W. Hoppel 等人^[7] 的研究指出: 自适应离散余弦变换 (ADCT) 和自适应阿达玛变换 (AHT) 对于距离向处理后的数据进行数据压缩, 其效果比用于原始数据要好.

早在 1975 年 B. D. Steinberg^[8] 就研究了 SAR 信号处理中的硬限幅问题, 指出动态范围压缩的极限是对回波信号进行 1bit 量化, 给出了点目标的模型和结果, 分析了硬限幅对于图象质量的影响. 到 1991 年 G. Franceschetti 等^[9,10] 给出了一位编码 (Signum code) SAR 信号的理论 and 实验结果. 1994 年许东翔等^[11] 也进行了 SAR 原始数据一位编码成象系统的研究和计算机仿真, 指出一位编码是 SAR 原始数据压缩的一种简便有效的方法. 一位编码成象系统可用于对图象质量要求不高的场合, 亦可作为精确成象系统的快视浏览或检索设备. 然而由于一位编码将对图象质量尤其是辐射分辨率有严重影响, 因而不能用于具有广大不同用户的星载合成孔径雷达系统.

1995 年中国科学院电子学研究所的陈宗鹭, 舒士畏, 肖永新^[12,13] 用信息论研究了合成孔径雷达原始数据压缩, 使我们对此问题的认识加深了一步. 他们首先将输入 SAR 原始数据的成象系统视为一个广义通信系统, 而原始数据压缩过程与成象处理过程组成一个串联信道如图 1 所示.

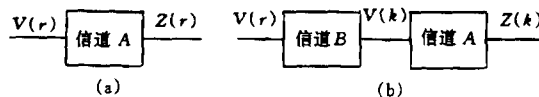


图 1 (a) 输入为原始数据的 SAR 成象系统 (b) SAR 数据压缩和成象系统

图中 $V(r)$ 代表原始数据集合, $Z(r)$ 表示用原始数据成象后得到的图象数据集合, $V(k)$ 表示 r bit 原始数据经压缩后得到的 k bit 压缩数据集合, $Z(k)$ 表示用 k bit 压缩数据成象后得到的图象数据集合. 数据压缩过程, 即图 1 中的信道 B, 可看作一个无噪有损信道, SAR 数据压缩和成象处理系统总的平均互信息取决于成象过程的平均互信息, 即 $I(V(r), Z(k)) = I(V(k), Z(k))$. 进而指出 r bit 原始数据压缩成 k bit 后 ($k < r$), 在系统允许的误差范围内, 若假设该 k bit 数据与 r bit 原始数据具有相同的概率分布, 则数据压缩前后系统的平均互信息量保持不变, 即 $I(V(r), Z(r)) = I(V(r), Z(k))$. 文中还讨论了数据压缩对于辐射分辨率的影响. 指出在系统允许的误差范围内, 若假设 k bit 压缩数据的概率分布与 r bit 原始数据的概率分布保持一致, 则两个系统产生的雷达图象的辐射分辨率将保持不变. 上述结论尽管是在一定的系统误差条件下得到的, 但是对于 SAR 原始数据压缩仍具有指导意义. 这就是要使压缩后数据的概率分布与原始数据的概率分布尽量保持一致, 对于同质均匀粗糙地域, 其概率分布应尽量接近高斯分布. 例如, 对字长为 5bit 的原始数据, 压缩到 4bit 或 3bit 可保证成象质量较好, 而 2bit 或 1bit 则得到的图象质量较差, 不宜采用, 因此对于 5 bit 的 SAR 原始数据, 最短压缩字长应为 3 bit.

1996年白平、杨汝良、陈宗鹭^[14]研究了小波分析在SAR原始数据压缩中的应用。他们先用小波变换对SAR原始数据进行正交分解,然后对小波系数进行矢量量化,实现SAR原始数据压缩。白平等用该方法对SEASAT星载SAR原始数据进行了计算机仿真实验,取得了令人满意的效果。在文献[14]中给出了原始图象和压缩后图象的比较。

3 分块自适应量化 (BAQ)

星载合成孔径雷达系统中,第一种实用的数据压缩方法是分块自适应量化,或称为分块浮点量化(BFPQ)。它首次用于1989年5月发射的Magellan金星探测器中^[15,16],在1994年4月发射的航天飞机成像雷达SIR-C^[17]中也采用了类似的方法。

自适应量化器估计信源的统计特性,并设法使量化器与观测到的时变特性相匹配。设计分块自适应量化器,首先要对输入数据样本块的统计特性进行估计,并选择对于信源模型最佳的一个工作状态用来量化数据,因而在设计最佳量化器时首先要了解信源的统计特性。

合成孔径雷达的回波是许多小散射体的叠加,由于实际天线的照射面积很大,这些小散射体的数目就非常多,因而回波信号的实部和虚部都是大量的独立随机变量之和。由中心极限定理可知:当这些独立随机变量的数目趋向于无限大时,实部和虚部都是具有未知方差的渐近高斯分布。可以证明^[18],复回波信号的实部和虚部均值皆为零,具有相同的方差且互不相关。

分块自适应量化能实现数据压缩的依据是,较小数据块的熵低于全体数据集合的熵,或者说较小数据块的动态范围低于整个数据集合的动态范围。于是我们可以从Lbit均匀量化器中选出nbit传输,记为(L,n)BFPQ。设计一个(L,n)BFPQ可按下列步骤进行:(1)确定全部数据的标准差 σ ;(2)确定标称情况下的起始比特位 n' ;(3)对nbit均匀量化器,求出使总量化误差 $E(\alpha)$ ^[15]最小的 α 值,则有 $X_{\max} = \alpha \cdot \sigma$ 。(4)设 Δ 为Lbit量化器的量化阶距,则 $\Delta = 2X_{\max}/(2^n \cdot 2^{n'-1}) = 2\alpha \cdot \sigma / (2^n \cdot 2^{n'-1})$ 。

在实际应用中,如果 α 不合适,均匀量化器的性能会有很大程度的下降(见图2)。而分块浮点量化器总误差随 α 的变化则有明显的改善(图3)。将图2与图3比较可以看出,(8,3)BFPQ与3bit均匀量化器的信噪比相同,但复盖了较大的动态范围。

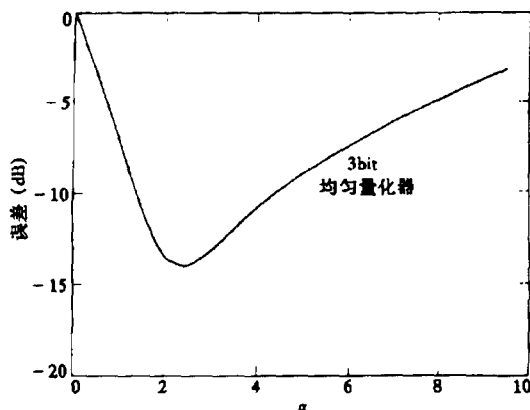


图2 3bit均匀量化器的总误差

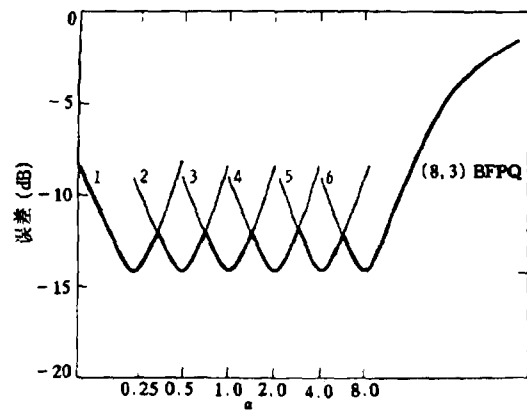


图3 (8,3)BFPQ的总误差

(L,n)BFPQ的工作过程如下:(1)对信号按量化阶距 Δ 进行Lbit均匀量化;(2)计算数据块的局部标准差 σ_j ;(3)按下式计算起始位 n_j ; $n_j = \text{Int}[\log_2(\sigma_j/\sigma)] + n'$,其中 $\text{Int}[\]$ 表示取整函数;(4)传输符号位和 n_j 起始的另外 $n-1$ 位。

分块自适应量化 (BAQ) 或分块浮点量化 (BFPQ) 目前是星载合成孔径雷达系统中唯一实用的一种原始数据压缩方案。张安安等^[19]利用一段 SEASAT-A 原始数据进行了 I, Q 和幅度、相位的分块自适应量化数据压缩和成象处理的计算机仿真研究。

4 矢量量化 (VQ)

矢量量化是先将模拟信号的每 K 个顺序样本分成一组, 形成 K 维欧氏空间中的一个矢量, 然后将此 K 维模拟矢量 X 映射成另一个 K 维量化矢量 $Y: Y = Q(X)$ 。所有可能的输入矢量组成一个 K 维实空间 R^K , 然后按一定规则将 R^K 分成 N 个区间 S_1, S_2, \dots, S_N , 在每个区间中确定一个代表值 $Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 称为量化矢量, 凡落入区间 S_i 中的模拟矢量 X_i , 就用 Y_i 作为输出矢量。这就构成了一个大小为 N 的 K 维矢量量化器^[20]。

对处于 K 维空间中的一个模拟矢量 X 进行量化, 首先要选择一个失真测度, 继而分别计算用量化矢量 $Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 替代 X 所带来的失真, 根据最小失真原理, 其中失真最小的那个矢量 $Y_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 就是模拟输入矢量 X 的重构矢量。所有 N 个量化矢量的集合 $\{Y_i\}$ 称为码书 (codebook)。设计矢量量化器的主要任务是设计码书。在给定码字数目的情况下, 1980 年 Linde, Buzo 和 Gray 三人提出了两种迭代算法, 后人称之为 LBG 算法^[21]。LBG 算法利用已知信源分布或已知一段训练序列, 从选定的初始码书出发, 计算平均失真, 反复修改这些区间 $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的划分方式, 直到平均失真 $D \leq \epsilon$ 给定的停止门限, 这时就得到了所要求的码书。

矢量量化的工作过程, 是对输入矢量与存储在码书中的量化矢量进行比较, 分别计算出它们的失真, 搜索到失真最小的量化矢量 Y_j , 将其序号 j (或码书中的地址) 传输到译码端。由于在译码端有一本完全相同的码书, 可根据收到的序号 j (或地址), 从码书中查出相应的重构矢量 Y_j , 此时失真 $d(X, Y)$ 最小。由于信道中传输的不是矢量 Y_j 本身, 而是其序号 (或地址), 因此需要的传输速率大大降低。

矢量量化是一种高效数据压缩技术, 是一种去掉多余度的过程, 它有效地利用了矢量中各分量之间相互关联的四种性质, 即线性依赖 (相关性), 非线性依赖 (统计不独立), 概率密度函数的形状和矢量维数。

70 年代, 在 G. W. Zeoli 的文章^[2]中已经表现出将矢量量化用于合成孔径雷达原始数据压缩的思想, 但是他没有采用矢量量化这一术语。将矢量量化用于合成孔径雷达, 80 年代在国外展开了广泛的讨论^[22,23], 在国内许东翔^[24]和齐焯^[25]分别利用一段 SEASAT-A 和 ERS-1 的原始数据作为训练序列进行了矢量量化编码、解码和成象处理的计算机仿真研究, 许东翔^[24]研究了压缩数据成象后图象的信噪比, 动态范围, 图象保真度与码本长度的关系 (图 4, 图 5, 图 6)。齐焯^[25]还提出了一种改进的多级矢量量化器和快速搜索算法。在文献^[24]和^[25]中给出了压缩后图象与原始图象的比较。

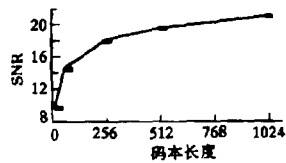


图 4 矢量量化 SAR 图象信噪比与码本长度的关系

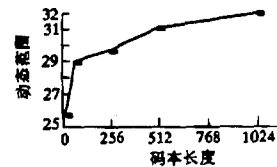


图 5 矢量量化 SAR 图象的动态范围

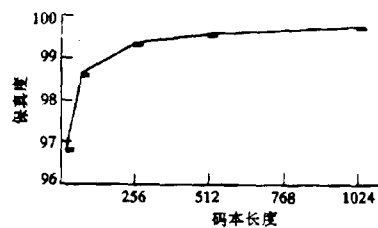


图 6 矢量量化 SAR 图象保真度指数与码本长度的关系

5 展 望

当前合成孔径雷达原始数据压缩仍然是一个尚未圆满解决的问题。国内外的许多学者还在不断研究, BAQ 或 BFPQ 虽然是已经实际应用的方案, 但并非最佳方案还可以改进。VQ 虽然是一种很有潜力的方案, 但离实际应用尚有距离。1993 年, A. Moreira 和 F. Blaser^[26] 将 BAQ 与 VQ 融合在一起以发挥各自的优势, 这也是个可取的方法。还有人试图将神经网络^[27] 用于合成孔径雷达, 然而目前只限于用在 SAR 图象数据压缩中, 尚未见有用于 SAR 原始数据压缩的报道。现在就断言何种压缩方案最佳尚为时过早, 不过参照当前的科学技术水平和这方面的已有成果我们可以预言, 小波变换加上某种改进的量化技术可以发展成未来的合成孔径雷达原始数据压缩的一种实用的优选方案。这是由于经小波变换后信号有效成份的能量相对集中, 信号的动态范围相对变小, 可更好地发挥高效量化技术的优势。随着半导体技术的迅速发展, 以硬件实现这种方案的可行性将逐渐提上日程。

致谢 在准备和撰写本文的过程中, 曾得到中国科学院电子学研究所研究员陈宗鹭、朱敏慧、杨汝良、王贞松研究员的指导、支持和帮助, 在此向他们衷心地表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. New York: John Wile & Sons INC 1991, 283-294.
- [2] Zeoli G W. A lower bound on the data rate for synthetic aperture radar. IEEE Trans. on IT, 1976, IT-22(6): 708-715.
- [3] Lipies R G, Butman S A. Bandwidth compression of synthetic aperture radar imagery by quantization of raw radar data. Proceedings of the SPIE, 1977, 119: 107-114.
- [4] Wu Chialin. Optimal Sampling and Quantization of Synthetic Aperture Radar Signais. NASA-CR-157339, N78-28301, June 1978.
- [5] Li F, Held D, Huneycutt B, Zebker H. Simulation and Studies of Spaceborne Synthetic Aperture Radar Image Quality with Reduced Bit Rate. Proceedings of the Fifteenth International symposium on Remote Sensing of Environment Vol.1, May 1981, Ann Arbor Michgen: 259-270.
- [6] Lafrance P, Ousborne J J. Effects of reduced SAR azimuth processing. IEEE Trans. on AES, 1987, AES-23(2): 152-157.
- [7] Mango S A, Hoppel K W. Data Compression of Spaceborne Remotely Sensed Imager from Conherent and Incoherent Sensor Systems, Proc. IGARSS. 1989, 912-913.
- [8] Steinberg B D. Hard limiting in synthetic aperture singnal processing. IEEE Trans. on AES, 1975, AES-11(4): 556-561.
- [9] Franceschetti G, Pascasio V, Schirinz G. Processing of signum coded SAR signal: Theory and experiments. IEE Proc.-F, 1991, 138(3): 192-198.
- [10] Alberti G, Franceschetti G, Pascasio V, Schirinz G. Time-domain convolution of one-bit coded radar signals. IEE Proc.-F, 1991, 138(5): 438-444.

- [11] Xu Dongxiang, Yang Yaozeng. SAR Raw data Signum-Coded Imaging System, UN/CHINA/ESA Workshop on Microwave Remote Sensing Application, Beijing, 1994, Sept. 14-18.
- [12] 肖永新, 陈宗鹭, 舒士畏. 利用信息论研究合成孔径雷达数据压缩. 信息论与通信理论学术会议论文集, 宁波: 1995年10月, 49-52.
- [13] 肖永新. 应用信息论研究合成孔径雷达. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1995年4月.
- [14] 白平, 杨汝良, 陈宗鹭. 小波分析 SAR 原始数据压缩. 卫星遥感图象数据传输与压缩技术专题研讨会论文集, 国防科工委, 兰州: 1996.
- [15] Joo T H, Held D. An adaptive quantization method for burst mode synthetic aperture. IEEE International Radar Conference, 1985, 385-390.
- [16] Kwok R, Johnson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data. IEEE Trans. on GE, 1989, GE-27(4): 375-383.
- [17] Caro E R. SIR-C The next generation spaceborne SAR, The Second Spaceborne Imaging Radar Symposium, April 1986, JPL.
- [18] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol.2, New York: Artech., 1986.
- [19] 张安安. 合成孔径雷达数据压缩方法的研究. [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1993年5月.
- [20] 胡征, 杨有为. 矢量量化原理与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988年6月.
- [21] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantization design, IEEE Trans. on Communications, 1980, COM-28(1): 84-95.
- [22] Read C J, Arnold D V, Cnabries D M, Jackson P L, Christiansen R W. Synthetic Aperture Radar Image Formation from Compressed Data Using a New Computation technique. IEEE AES Magazine, 1988: 3-10.
- [23] Giotso T, "Vector Quantization Used to Reduce SAR Data Rates" Proceeding of SPIE Vol.1101, 1989, 3: 116-128.
- [24] 许东翔. 数据压缩在合成孔径雷达中的应用. [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1994年12月.
- [25] 齐焯. 矢量量化及其在星载合成孔径雷达原始数据压缩中的应用. [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1995年6月.
- [26] Moreira A, Blaser F. Fusion of Block Adaptive and Vector Quantizer for Efficient SAR Data Compression, Proc. IRARSS'93 Vol. IV, Tokyo, Japan: August 18-21, 1993, 1583-1585.
- [27] Luttrell S P. Image Compression Using a Neural Network. Proceedings of IGARSS'88 Symposium, 1988, 1231-1237.

DATA COMPRESSION OF SYNTHETIC APERTURE RADAR(SAR) RAW DATA

Yang Yaozheng

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Abstract First, the significance and the importance of SAR raw data compression is discussed. Then the brief history of its development is reviewed. Two schemes of data compression namely block adaptive quantization (BAQ) and vector quantization (VQ) is described. Finally, the prospects for synthetic aperture radar raw data compression is looked forward.

Key words Synthetic aperture radar, Data compression, Vector quantization

杨耀增: 男, 1937年生, 研究员, 现主要从事合成孔径雷达信号与信息处理方面研究工作.