

合成孔径雷达极坐标数据编码器*

郑伟强** 赵志钦 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 合成孔径成像雷达的观测区域广阔,图像分辨精度高,具有数据率高、数据量大的特点。这就对数据的传输和存储提出了较高的要求。采取数据压缩方法,在不降低测绘带宽和测绘精度条件下,降低遥感雷达数据率和数据量,从而降低对数据链和星上数据存储设备的要求。文中在对块自适应 BAQ 原始数据压缩算法研究基础之上,提出了极坐标量化数据压缩算法,并对 X-SAR 原始数据进行了压缩试验,获得了满意的结果。

关键词 合成孔径雷达; 信源编码; 数据压缩; 量化

中图分类号 TN957.52

成像雷达获得了常规雷达无可比拟的距离和方位分辨能力,而且其工作不受云雾遮挡、天气变化和黑夜的影响,还具有一定的微波透射能力。1978年6月,NASA成功发射的 SEASAT-A 合成孔径雷达,使人类第一次成功地从空间对地球进行了大面积的微波成像。此后,世界许多发达国家纷纷发射星载合成孔径雷达,使得星载合成孔径雷达技术在军事侦察、地形测绘、资源考察等方面得到了广泛的应用。

合成孔径雷达数据率与雷达脉冲重复频率 PRF 采样点数目以及量化比特数成正比。如果降低 PRF,虽然可以降低数据率,但这样会带来方位向的模糊;如果增加天线尺寸来减小方位模糊,这样又会导致方位分辨力降低;如果降低采样率,会造成信号失真;简单地减少量化比特,会增加量化噪声,从而使脉冲响应 IRF 图像动态范围、图像辐射分辨力变差。

我们将合成孔径雷达看作信息系统,采用信源编码理论对遥感数据进行压缩编码,去掉遥感数据中不重要的部分,就可以在一定的图像辐射分辨条件下降低遥感数据率,而不降低合成孔径雷达的方位和距离分辨力指标。信源编码就是力求尽可能减少信源的冗余度或在允许的失真范围内,尽量降低数据率。

1 合成孔径雷达原始数据统计模型

信源编码器性能的优劣,最主要取决于编码器的结构与信源模型的匹配程度。成像雷达对其视场内的区域进行无线电照射,并对地面反射回波信号进行记录,反射回波是许许多多小散射回波的迭加。点目标 (x, y, z) 的相干雷达回波矢量 $A(x, y, z)$ 可以表示为

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N a_k e^{j\theta_k} \quad (1)$$

式中 a_k 是反射强度; θ_k 是与雷达波长和路径相关的相位延迟,与 a_k 无关。可以假设: 1) a_k, θ_k 统计

1996年8月30日收稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 31岁 博士生 工程师

独立; 2) Q 服从 $[-\pi, +\pi]$ 均匀分布

将 $A(x, y, z)$ 分解为正交 I - Q 通道信号表示

$$A(x, y, z) = I(x, y, z) + jQ(x, y, z) \quad (2)$$

由上面的假设可推知: 式 (2) 的实部 $I(x, y, z)$ 、虚部 $Q(x, y, z)$ 分别服从 0 均值高斯分布, 它们具有相同的方差, 且互不相关^[1]。假设 f_A 表示 $A(x, y, z)$ 的概率密度函数, f_I 和 f_Q 分别表示 $I(x, y, z)$ 、 $Q(x, y, z)$ 的概率分布函数, 有下式

$$f_A = f_I f_Q = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{(I^2 + Q^2)}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

进行直角坐标—极坐标变换得

$$f_A = f_{R\theta}(r, \theta) = f_R(r)f_\theta(\theta) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$0 \leq r < \infty, 0 \leq \theta < 2\pi$$

式中 $R = (I^2 + Q^2)^{1/2}$, $\theta = \tan^{-1}(Q/I)$; $f_R(r)$ 服从瑞利分布, $f_\theta(\theta)$ 服从均匀分布。

2 极坐标最优量化

由式 (4) 的中心对称性可以想到采用极坐标量化器。设量化器输出 bit 数为 B , 则总共有 $N = 2^B$ 个分区, 将极坐标平面进行划分为

$$A_{mp} = \{a = r e^{j\theta} : r_{m-1} \leq r \leq r_m, \theta_{p-1} \leq \theta < \theta_p\} \quad (5)$$

式中 $m = 1, 2, \dots, M$; $p = 1, 2, \dots, P$; $r_0 = 0$, $r_M = \infty$; $\theta_0 = 0$; $\theta_p = 2\pi$; $N = MP$ 。

这样就可将任一复数信号 $a = r e^{j\theta}$ 量化为 $\hat{a}_{mp} = \hat{r}_m e^{j\hat{\theta}_p}$ 。如果设 $D(N)$ 表示均方误差, 就有

$$D(N) = \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \int_{r_{m-1}}^{r_m} \int_{\theta_{p-1}}^{\theta_p} \left| r e^{j\theta} - \hat{r}_m e^{j\hat{\theta}_p} \right|^2 f_R f_\theta dr d\theta \quad (6)$$

$D(N)$ 最小的必要条件是

$$\frac{\partial D}{\partial \theta_p} = 0 \quad p = 1, 2, \dots, P-1 \quad (7a)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \theta_p} = 0 \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (7b)$$

$$\frac{\partial D}{\partial r_m} = 0 \quad m = 1, 2, \dots, M-1 \quad (7c)$$

$$\frac{\partial D}{\partial r_m} = 0 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7d)$$

由式 (7a)、(7b) 可得相位角的判决输出电平如下

$$\theta_p = \frac{p}{P} (2\pi) \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (8a)$$

$$\hat{\theta}_p = \left[\left(p - \frac{1}{2} \right) / P \right] (2\pi) \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (8b)$$

由条件 (7c)、(7d) 可得幅度的判决输出电平如下

$$r_m = \frac{c/P}{\sin^c/P} \left[\frac{\hat{r}_m + \hat{r}_{m-1}}{2} \right] \quad m = 1, 2, \dots, M-1 \quad (8c)$$

$$\hat{r}_m = \sin^c/P \int_{r_{m-1}}^{r_m} r f_R(r) dr \left/ \left[\int_{r_{m-1}}^{r_m} f_R(r) dr \right] \right. \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (8d)$$

因为 $\bar{r}_m = \int_{r_{m-1}}^{r_m} r f_R(r) dr \left/ \int_{r_{m-1}}^{r_m} f_R(r) dr \right.$ 是瑞利分布在 $r_{m-1} \leq r \leq r_m$ 内的形心, 对给定的 M 值, 就可

解得 \bar{r}_m , 代入式 (8c)、(8d) 就有使得 $D(N)$ 最小的幅度判决和输出电平。

对给定的 N 值, 可以有不同的 M, P 。William A. Pearlman^[2] 采用群净法, 以最小均方误差为准则, 获得了 $N=1 \sim 1020$ 的最优 M, P 分配方案, 此时每一幅度分区内的相位分区数都一样, 被称为严格相位分区法 SPQ。如 $N=16$, 则有 $M=2, P=8$ 。此时归一化均方误差 $D=0.120$ 。Stephen G. Wilson^[3] 打破了上述限制, 对不同的幅度分区, 分配不同的相位分区数目, 并将其称为非严格相位分区法 UPQ, 当 $N=16$ 时, $M=3, P$ 从轴心向外依次分 1, 6, 9, $D=0.109$, 可见 UPQ 较 SPQ 优越。

3 块自适应极坐标量化器

美国的 Lipes 和 Butman 等人对数据量化电平进行了研究^[4], 实验表明: 采用 8 bit 量化器对 SAR 产生的 I、Q 通道分别进行量化, 和用 2 bit 量化所产生的数据分别成像后, 其图象质量的降低从主观视觉上来说是可以容忍的。但当信号动态范围较大时, 这样的量化压缩带来的失真较大。

由于 SAR 信号的慢变化特性, 使我们可以取一个数据块, 对其统计特性 (幅度方差) 进行估计, 然后自适应地调整编码器结构, 从而尽可能少的比特率, 低失真地完成 SAR 信号的压缩。数据块的大小应遵循两点要求: 1) 数据块应足够大以便较好地服从前述统计分布; 2) 数据块的取值应尽可能小, 以便根据输入数据实时调整编码器参数, 降低量化误差。

我们以 8 bit 输入为例, 为便于同正交 2 bit 量化器进行比较, 设极坐标量化器 $N=16$ 。首先对数据块进行功率估计, 而后利用该估计值产生幅度的门限值, 并和相位门限值一起对输入信号采样进行极坐标量化。幅度和相位总共用 4 bit 表示。在每一数据段之前先传送功率, 而后传送每一采样的 4 bit 量化数据。由于采用了自适应量化电平, 就可以实现 (无论信号大小) 以最小均方误差为准则的最优量化器。同时, 由于信号编码和重建所用的统计参数采用的是 8 bit 传送, 所以该量化器输出的动态范围与输入信号的动态范围保持一致。

4 试验结果及其比较

我们首先用 X-SAR 数据作量化器输入, 分别对输入原始数据进行块自适应 SPQ 和 UPQ 4 bit 量化, 为便于进行比较, 也对该输入数据进行正交块自适应 2 bit 编码^[5], 然后将编码数据分别进行译码重建, 最后对原始信号和译码重建信号进行成像处理, 具体参数见表 1 (其中数据块长度为 32×32)。

设原始数据 $X = r e^{j\theta}$, $X^* = r^* e^{j\theta^*}$ 表示量化—译码输出, Y 表示原始数据成像后图像的幅度值, Y^* 表示压缩—译码输出数据成像后的象素幅度值, $\Delta\theta$ 表示量化器相位误差均值, Δr 表示量化器幅度误差均值, $NMSE$ 表示量化器归一化量化均方误差, $SDNR$ 表示压缩数据成像后信噪比

$$\Delta r = \frac{1}{L} \sum_{L}^1 (r - r^*)^2 \quad (9)$$

$$\Delta\theta = \frac{1}{L} \sum_{L}^1 (\theta - \theta^*)^2 \quad (10)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{L}^1 (X - X^*)^2}{\sum_{L}^1 (X)^2} \quad (11)$$

$$SDNR = 10 \lg \left[\frac{\sum_{L}^1 (Y)^2}{\sum_{L}^1 (Y - Y^*)^2} \right] \quad (12)$$

由表 1 数据可以看到,极坐标量化器较之正交坐标量化器具有更小的相位误差,这是因为对 4 bit 量化器来说, SPQ 量化的相位是 3 bit, UPQ 量化的相位是 2.5 bit,而正交直角量化的相位比特就相当于它的符号位,总共只有 2-bit 尤其是 UPQ 量化器的归一化均方误差和成像 *SDNR* 结果都较正交量化器好。

表 1 量化器测试指标

	SPQ 极坐标	UPQ 极坐标	正交量化
幅度误差 Δ_r	1.85	1.60	1.81
相位误差 $\Delta\theta / (^\circ)$	12.98	32.06	61.06
<i>NMSE</i>	0.254	0.220	0.250
<i>SDNR</i> /dB	8.14	8.73	8.36

5 结束语

本文将极坐标量化器应用于 SAR 合成孔径雷达原始数据压缩,由于极坐标量化器压缩数据的相位误差低,压缩图像信噪比高,具有积极的应用前景。同时,由于试验结果与原始数据统计模型较为吻合,也说明所采用的统计模型是正确的。

参 考 文 献

- 1 Wok R K. Block adaptive quantization of Magellan SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1989, 27: 375~ 383
- 2 Pearlman William A. Polar quantization of a complex Gaussian random variable. *IEEE Trans Communications*, 1979, COM-27(6): 892~ 899
- 3 Wilson Stephen G. Magnitude /phase quantization of independent Gaussian variates. *IEEE Trans on Communications*, 1980, COM-28(11): 924~ 929
- 4 Lipes R G, Butman S A. Bandwidth compression of synthetic aperture radar imagery by quantization of raw radar data. *SPIE*, 1977, 119: 107~ 114
- 5 Max Joel. Quantizing for minimum distortion, *IEEE Trans IRE*, 1960(3): 7~ 12

Data Compression of Synthetic Aperture Radar Using Polar Quantizers

Zheng Weiqiang Zhao Zhiqin Huang Shunji

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Synthetic aperture radar (SAR) produces high bit flow and large amount of data. The compression of data will benefit both data communication and data storage. In this paper, the polar quantization methods are used for SAR raw data compression, the polar quantization methods are introduced, the block adaptive quantization is combined with the polar quantization. At last, the figures of polar quantizers are tested by X-SAR raw data and compared with the quadratic quantizer.

Key words synthetic aperture radar; source code; data compression; quantization
编辑 严孔翌