

一种 INSAR 原始数据的幅相分离压缩算法

麻丽香^{①②} 王岩飞^① 张冰尘^① 汪沛^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100080)

摘要: 该文针对干涉合成孔径雷达(INSAR)系统的大数据量问题,提出了一种用于 INSAR 原始数据的幅相压缩算法。该方法利用 SAR 回波信号的特性以及干涉测量时对于干涉数据高相关性要求的特点,对两路 INSAR 信号的幅度及相位做去相关性压缩。该文进行了详细的理论分析,并利用实际 INSAR 数据进行了压缩试验,在相关系数、条纹相似度、残余点的压缩效果等方面,与 BAQ 算法进行了比较。结果表明在相同压缩比下,该文给出的算法优于 BAQ 算法,保留了更多的信号幅度和相位信息。

关键词: 干涉合成孔径雷达;幅相压缩算法;原始数据压缩;相关系数

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0546-04

An Irrelevant Amplitude-Phase Algorithm for INSAR Raw Data Compression

Ma Li-xiang^{①②} Wang Yan-fei^① Zhang Bing-chen^① Wang Pei^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: An irrelevant Amplitude-Phase (AP) algorithm is used in raw data compression according to the bulky raw data of Interferometric Synthetic Aperture Radar(INSAR) system. The new algorithm is based on the statistical property and the high correlation between the two channels of INSAR. Amplitude and phase of raw data are compressed irrelevantly. Detail analysis in theory is given and experiment with real data is undertaken. Comparisons are made with BAQ algorithm at aspects of correlation, fringe similarity index and residuals. The results show that AP algorithm is superior to BAQ algorithm at the same reduction ratio. Thereby AP algorithm preserves more information of amplitude and phase.

Key words: SAR Interferometry; Amplitude Phase(AP) algorithm; Raw data compression; Correlation

1 引言

干涉合成孔径雷达(INSAR)技术是在 SAR 的基础上发展起来的新技术,它将传统的二维测量拓展到空间三维的测量,可用于生成地面数字高程图(DEM)以及测量微小的地表形变等。随着 INSAR 技术应用领域的不断扩大,测量精度的不断提高,INSAR 系统的原始数据量迅猛增加,给存储设备及下传链路提出了更高的要求。数据压缩技术是解决这些问题的有效途径之一。在以往的 SAR 雷达系统中,分块自适应量化方法(BAQ)^[1]、分块浮点量化方法(BFPQ)^[2]等数据压缩方法已经成功地用于实际雷达系统中,并发挥了重要的作用。BAQ 和 BFPQ 算法都是把分块的方差归一化原始数据看作为高斯分布数据来进行处理。如果将其直接应用于 INSAR 系统^[3],即分别对形成干涉的两路 SAR 原始回波信号进行压缩,在硬件实现上比较简单,但是由于这些算法没有考虑到 INSAR 系统本身的特点,没有利用两路回波数据之间的相关性,因而得到的压缩效果和性能有限。

本文根据 SAR 原始信号的幅度和相位相互统计独立的特性以及对 INSAR 回波信号之间的高相关性要求,提出了根据 INSAR 信号的相关性来进行幅度和相位压缩的方法,利用回波幅度之间的相关性对两路幅度进行量化和压缩,利用相位之间的相关性对两路相位进行量化。通过理论分析和对实际数据的压缩试验,在相关系数、条纹相似度以及残余点数目等方面对压缩算法性能进行了评估,并与 BAQ 算法进行了比较。结果表明在相同压缩比下,本文提出的方法较 BAQ 算法有更优的性能:单视复图像相关性更强,条纹相似度更高,残余点更少,更好地保留了 INSAR 回波信号的幅相信息。

2 INSAR 信号特性分析

通常, SAR 雷达发射线性调频信号。假设 t 时刻第一副天线的位置用 x' 表示,则 t 时刻两副天线接收到的回波信号用极坐标形式可表示为

$$s_{1,2}(x', x_p, r', r_p) = A_{1,2}(x', x_p, r', r_p) \cdot \exp[j\phi_{1,2}(x', x_p, r', r_p)] \quad (1)$$

其中 $A_{1,2}$, $\phi_{1,2}$ 分别表示两副天线接收回波的幅度和相位,

在对单路 SAR 回波信号的研究中, 我们知道幅度和相位是相互统计独立的, 其中幅度服从瑞利分布, 相位服从均匀分布^[1]。

INSAR 技术的原理便是利用两副天线接收回波的相位差来重建地面高程的。由于干涉 SAR 的两路回波信号之间存在相关性^[4], 表示成 A_1 , A_2 , ϕ_1 , ϕ_2 的联合概率密度函数为

$$f_{A_1, A_2, \phi_1, \phi_2}(A_1, A_2, \phi_1, \phi_2) = \frac{1}{4\pi\sqrt{\Delta}} A_1 A_2 \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}[a_1 A_1^2 + a_2 A_2^2 - 2a_3 A_1 A_2]\right\} \quad (2)$$

其中 $\sqrt{\Delta} = E\{R_1^2\}E\{R_2^2\} - [E\{R_1 R_2\}]^2 - [E\{I_1 I_2\}]^2$;

$$a_1 = \frac{E\{R_2^2\}}{\sqrt{\Delta}}, \quad a_2 = \frac{E\{R_1^2\}}{\sqrt{\Delta}},$$

$$a_3 = \frac{[E\{R_1 R_2\} \cos(\phi_2 - \phi_1) + E\{I_1 I_2\} \sin(\phi_2 - \phi_1)]}{\sqrt{\Delta}};$$

$R_{1,2}$ 、 $I_{1,2}$ 分别表示两路复信号的实部和虚部。

因为 A_1 与 ϕ_1 , A_2 与 ϕ_2 相互统计独立, A_1 与 ϕ_2 , A_2 与 ϕ_1 也相互统计独立。由概率统计的知识可知, 式(2)可以表示为幅度和相位的边缘概率密度相乘的形式, 即

$$f_{A_1, A_2, \phi_1, \phi_2}(A_1, A_2, \phi_1, \phi_2) = f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) f_{\phi_1, \phi_2}(\phi_1, \phi_2) \quad (3)$$

将式(2)对相位进行积分, 便可得 A_1 , A_2 的联合边缘概率密度函数, 如式(4):

$$f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f_{A_1, A_2, \phi_1, \phi_2}(A_1, A_2, \phi_1, \phi_2) d\phi_1 d\phi_2 \quad (4)$$

即

$$f(A_1, A_2) = \frac{4A_1 A_2 \exp\left[-\frac{A_1^2/E\{A_1^2\} + A_2^2/E\{A_2^2\}}{1 - |\rho|^2}\right]}{E\{A_1^2\}E\{A_2^2\}(1 - |\rho|^2)} \cdot I_0\left[\frac{2A_1 A_2}{\sqrt{E\{A_1^2\}E\{A_2^2\}}(1 - |\rho|^2)}\right] \quad (5)$$

其中 ρ 表示干涉 SAR 回波信号 s_1 , s_2 之间的复相关系数,

$$\rho = \frac{E[s_1 s_2^*]}{\sqrt{E[|s_1|^2]E[|s_2|^2]}}.$$

同样, 将式(2)对幅度进行积分, 便可得 ϕ_1 , ϕ_2 的联合边缘概率密度函数, 如式(6):

$$f_{\phi_1, \phi_2}(\phi_1, \phi_2) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f_{A_1, A_2, \phi_1, \phi_2}(A_1, A_2, \phi_1, \phi_2) dA_1 dA_2 \quad (6)$$

即

$$f_{\phi_1, \phi_2}(\phi_1, \phi_2) = \frac{(1 - |\rho|^2) \left\{ [1 - q^2]^{\frac{1}{2}} + [q][\pi - \cos^{-1} q] \right\}}{2\pi(1 - q^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

式中 $q = |\rho| \cos(\phi_2 - \phi_1)$ 。

从式(5), 式(7)可以看出, 干涉 SAR 两路回波信号的幅度联合概率密度函数和相位联合概率密度函数都是相关系数 $|\rho|$ 的函数, 亦即 $|\rho|$ 的大小决定了幅度和相位的分布特性。在通常的数据压缩算法中, 是要根据信号的统计特性来进行最优的压缩方案的选取的。针对这一特点, 可以利用干涉

SAR 信号的相关性来进行相应的数据压缩方案的选取。

3 算法原理及实现

根据上面的 INSAR 回波信号的分析可知, 利用 SAR 回波信号的幅度和相位相互统计独立的特性以及 INSAR 两路回波信号之间的相关性, 可分别对两路回波信号的幅度及相位进行量化编码。这样既利用了 SAR 原始数据的特点, 又充分利用了两路干涉 SAR 回波信号之间的相关性, 从而达到最优的压缩性能。文中采用均方误差最小的量化原则作为最优量化准则, 来实现干涉 SAR 原始信号压缩的最优化器设计。

假设 (X, Y) 是二维随机变量, (x, y) 落入以 $[X_0, Y_0]$, $[X_0, Y_N]$, $[X_M, Y_0]$, $[X_M, Y_N]$ 为顶点的二维平面内, 其概率密度函数分布为 $f(x, y)$ 。当 x 落入 $[X_i, X_{i+1}]$ ($i = 0, 1, \dots, M-1$) 子区间, y 落入 $[Y_j, Y_{j+1}]$ ($j = 0, 1, \dots, N-1$) 子区间时的输出电平为 $[\hat{X}_i, \hat{Y}_j]$, 量化误差分别为 $x - \hat{X}_i$, $y - \hat{Y}_j$, 则在 $M \times N$ 个子区间内总的均方误差为

$$\bar{\varepsilon}^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \int_{Y_j}^{Y_{j+1}} \int_{X_i}^{X_{i+1}} \left[(x - \hat{X}_i)^2 + (y - \hat{Y}_j)^2 \right] \cdot f(x, y) dx dy \quad (8)$$

要使均方误差最小, 亦即

$$\text{Min}(\bar{\varepsilon}^2) = \text{Min} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \int_{Y_j}^{Y_{j+1}} \int_{X_i}^{X_{i+1}} \left[(x - \hat{X}_i)^2 + (y - \hat{Y}_j)^2 \right] f(x, y) dx dy \right\} \quad (9)$$

判决门限 (X_i, Y_j) 和量化输出电平 (\hat{X}_i, \hat{Y}_j) 的取值应满足:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\varepsilon}^2}{\partial X_i} &= 0, & \frac{\partial \bar{\varepsilon}^2}{\partial Y_j} &= 0 \\ \frac{\partial \bar{\varepsilon}^2}{\partial \hat{X}_i} &= 0, & \frac{\partial \bar{\varepsilon}^2}{\partial \hat{Y}_j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因此, 将式(5)代入式(9), 式(10)可得两路 INSAR 回波信号的幅度量化后的输出电平 $(\hat{A}_{1,i}, \hat{A}_{2,j})$ 和判决门限 $A_{1,i}$, $A_{2,j}$ 必须满足:

$$\left. \begin{aligned} \hat{A}_{1,i} &= \frac{\int_{A_{2,j}}^{A_{2,j+1}} \int_{A_{1,i}}^{A_{1,i+1}} A_1 f(A_1, A_2) dA_1 dA_2}{\int_{A_{2,j}}^{A_{2,j+1}} \int_{A_{1,i}}^{A_{1,i+1}} f(A_1, A_2) dA_1 dA_2}, \\ & \quad i = 0, 1, \dots, M-1 \\ \hat{A}_{2,j} &= \frac{\int_{A_{2,j}}^{A_{2,j+1}} \int_{A_{1,i}}^{A_{1,i+1}} A_2 f(A_1, A_2) dA_1 dA_2}{\int_{A_{2,j}}^{A_{2,j+1}} \int_{A_{1,i}}^{A_{1,i+1}} f(A_1, A_2) dA_1 dA_2}, \\ & \quad j = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{1,i} &= \frac{\hat{A}_{1,i} + \hat{A}_{1,i+1}}{2}, & i &= 0, 1, \dots, M-2 \\ A_{2,j} &= \frac{\hat{A}_{2,j} + \hat{A}_{2,j+1}}{2}, & j &= 0, 1, \dots, N-2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于相位信息,将式(7)代入式(9),式(10)中,可得两路回波的相位量化输出电平 $(\hat{\phi}_{1,i}, \hat{\phi}_{2,j})$ 和判决门限 $\phi_{1,i}, \phi_{2,j}$ 必须满足:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\phi}_{1,i} &= \frac{\int_{\phi_{2,j}}^{\phi_{2,j+1}} \int_{\phi_{1,i}}^{\phi_{1,i+1}} \phi_1 f(\phi_1, \phi_2) d\phi_1 d\phi_2}{\int_{\phi_{2,j}}^{\phi_{2,j+1}} \int_{\phi_{1,i}}^{\phi_{1,i+1}} f(\phi_1, \phi_2) d\phi_1 d\phi_2}, \\ & i = 0, 1, \dots, M-1 \\ \hat{\phi}_{2,j} &= \frac{\int_{\phi_{2,j}}^{\phi_{2,j+1}} \int_{\phi_{1,i}}^{\phi_{1,i+1}} \phi_2 f(\phi_1, \phi_2) d\phi_1 d\phi_2}{\int_{\phi_{2,j}}^{\phi_{2,j+1}} \int_{\phi_{1,i}}^{\phi_{1,i+1}} f(\phi_1, \phi_2) d\phi_1 d\phi_2}, \\ & j = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_{1,i} &= \frac{\hat{\phi}_{1,i} + \hat{\phi}_{1,i+1}}{2}, \quad i = 0, 1, \dots, M-2 \\ \phi_{2,j} &= \frac{\hat{\phi}_{2,j} + \hat{\phi}_{2,j+1}}{2}, \quad j = 0, 1, \dots, N-2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

利用式(11)–式(14)即可求得 INSAR 系统幅相压缩算法中两路信号的幅度和相位的输出电平和判决门限。INSAR 原始数据的幅相压缩算法的压缩/解压缩流程图如图 1 所示。

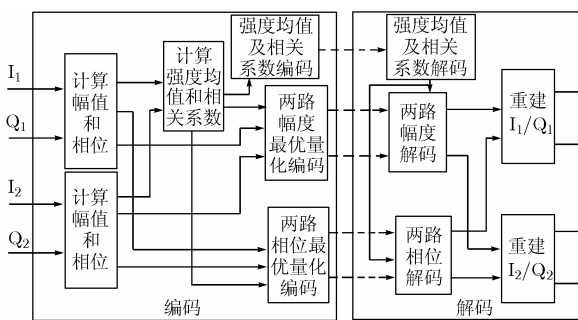


图 1 INSAR 原始信号幅相算法压缩/解压缩流程图

在压缩端,首先要将两路复信号的实部和虚部的表示形式转换为幅值和相位的表示形式,再按前面的最优量化器分别对两个幅度和两个相位进行压缩。对于幅度部分,分别求出两路信号强度的均值 $E\{A_i^2\}$ ($i=1,2$)以及相关系数 ρ ,由式(11)得两路幅度量化的判决门限,从而可根据系统的要求,将两路幅度值进行量化形成幅度位图,然后传输 8bit 表示的 $E\{A_i^2\}$ ($i=1,2$), ρ 以及两路幅度位图。同样,根据式(13)可得两路相位量化的判决门限,根据系统的要求,将两路相位进行量化形成相位位图,然后传输两路相位位图。

在解压缩端,首先解码得到两路回波信号强度的均值以及相关系数;对于两路幅值编码结果,根据式(12)所得的输出电平以及幅度位图,即可重建两路信号的幅度信息;对于相位编码结果,由式(14)的输出电平,可得两路相位的重建值。利用重建的两路幅度值及相位可得到,便可进行 I'_2, Q'_1, I'_1, Q'_2 , SAR/INSAR 处理。

4 试验分析

根据本文给出的算法,对实际 INSAR 数据进行了压缩处理试验,对幅相压缩算法在不同的量化组合方式下的性能进行比较分析,其中对两路回波的幅度分配相同的比特数,对两路相位也分配相同的比特数,并将幅相算法与 BAQ 算法进行比较。试验采用机载双天线干涉 SAR 数据,图像区域大小为 $2\text{km} \times 2\text{km}$,其幅度图和相关系数图如图 2,图 3 所示。

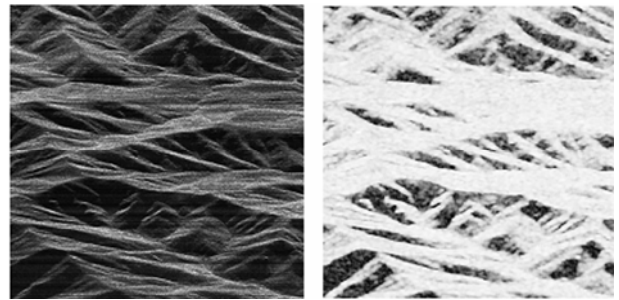


图 2 幅度图

图 3 相关系数图

为了评价数据压缩算法的性能,并考虑到 INSAR 数据处理的最终结果是高质量的 DEM,在试验中,重点在相关系数 γ ,条纹相似度 v_Φ 以及残余点数目进行了计算分析。干涉图像对 g_1 和 g_2 的相关系数定义为^[6] $\gamma = \frac{E\{g_1 g_2^*\}}{\sqrt{E\{g_1 g_1^*\} E\{g_2 g_2^*\}}}$,相关系数的模满足 $0 \leq |\gamma| \leq 1$,相关系数的相位是干涉相位 $\arg\{g_1 g_2^*\}$ 的均值。相关系数决定了干涉相位的相位噪声大小,相关系数越大,噪声越小,由于整幅图像的相关系数是变化的,本文用相关系数的均值来衡量整幅图像的相关性。

条纹相似度的定义为^[7] $v_\Phi = \frac{E\{\{\Phi - \Phi'\}^2\}}{E\{\{\Phi\}^2\}}$,其中 Φ' 和 Φ 分

别表示经过压缩和未经压缩的干涉相位。条纹相似度直接表示了干涉条纹的逼真程度, v_Φ 越小说明压缩后条纹的相似度越高,压缩性能越好。在 INSAR 中,残余点指的是干涉相位图上的相位不连续点,即相位突变点。残余点是衡量干涉相位图好坏的一个重要标准,残余点越少,干涉条纹图的质量越高,由于原始数据的压缩引入的噪声会导致干涉相位图中残余点增多,所以可以将残余点作为压缩算法性能的一个评估参数。

通过对试验区域的压缩处理,并对条纹相似度、相关系数、残余点评估参数进行计算,得到表 1 的结果。

从表 1 可以看出,幅相压缩比越小,相关系数越大,意味着用于干涉的两幅复图像质量越好;幅相压缩比越小,条纹图的相似度越高,说明压缩引起的畸变越小;幅相压缩比越小,残余点越少,说明干涉相位图中不连续点越少,干涉相位图的噪声越少。

表1 幅相算法压缩性能

幅度量化 (bit)	相位量化 (bit)	压缩比	相关系数	条纹相似度	残余点 (%)
1	2	5.33	0.692	0.267	3.57
	3	4.00	0.742	0.241	3.44
2	3	3.20	0.761	0.210	3.35
	4	2.67	0.778	0.191	3.27
3	4	2.29	0.783	0.175	3.19
	5	2.00	0.785	0.156	3.11

表2为利用传统的BAQ方法的压缩结果。比较表1和表2,不难发现:当压缩比为4.00, 2.67, 2.00时,幅相算法比BAQ算法的相关系数更大,条纹相似度更高,残余点更少。因此,利用了干涉SAR回波信号的相干性的幅相压缩算法比BAQ算法更好的保持了干涉相位信息,具有更好的压缩性能。

表2 BAQ算法压缩性能

BAQ量化 (bit)	压缩比	相关系数	条纹相似度	残余点(%)
2	4.00	0.713	0.261	3.89
3	2.67	0.761	0.238	3.45
4	2.00	0.779	0.183	3.33

5 结束语

本文充分利用INSAR回波信号的相关性,提出将原始SAR数据的幅相压缩算法应用于INSAR系统中,在最优量化准则下,分别对两路回波的幅度及相位进行量化编码。试验结果表明,在相同压缩比下与传统的BAQ算法相比,利用干涉原始回波信号之间相关性的幅相算法可以更好地保持干涉相位特性,从而获得更优的压缩效果。

参考文献

- [1] Kwok R and Hohson W T K. Block adaptive quantization of Magellan SAR Data. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375-383.
- [2] Strodl K and Moreira A. A comparison of several algorithms for on-board SAR raw data reduction. Proc. IGARSS'94, Pasadena, CA, USA, 1994, 4: 2197-2199.
- [3] McLeod I H, Cumming I G, and Seymour M S. ENVISAT ASAR data reduction: Impact on SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 589-602.
- [4] Lee Jong-Sen, Hoppel K W, Mango S A, and Miller A R. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017-1028.
- [5] Sarabandi K. Derivation of phase statistics from the Mueller matrix. *Radio Science*, 1992, 27(5): 553-558.
- [6] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, Li F K, Madsen S N, Rodriguez E, and Goldstein R M. Synthetic aperture radar interferometry. Proc. *IEEE*, 2000, 88 (3): 333-382.
- [7] Franceschetti G, Merolla S and Tesauro M. Phase quantized SAR signal processing: Theory and experiments. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 201-214.

麻丽香: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为INSAR理论研究及信号处理。

王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 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。

张冰尘: 男, 1973年生, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为SAR成像理论及信号处理。

汪 沛: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为INSAR理论研究及信号处理。