

采用酉 ESPRIT 算法处理多基线 InSAR 层叠效应

柳祥乐 宋岳鹏 杨汝良
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要:“层叠效应”(Layover)是 SAR 成像技术的一个难点,本文在多基线 InSAR 的框架下,将谐波恢复与信号重构的酉 ESPRIT 算法应用于解决层叠效应问题。文中建立了存在层叠效应的多基线 InSAR 的数据模型,指出经典算法在估计精度与视数之间的矛盾,阐明了酉 ESPRIT 算法的基本原理与优点。进行了仿真实验,实验结果表明在视数较少时,酉 ESPRIT 算法具有很好的性能。

关键词:多基线 InSAR; 层叠效应; 酉 ESPRIT

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1731-05

Layover Solution Based on Unitary ESPRIT Algorithm in Multibaseline InSAR

Liu Xiang-le Song Yue-peng Yang Ru-liang
(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: “Layover” is a nodus in SAR imaging. The unitary ESPRIT algorithm was introduced to resolve the layover problem on the frame of multibaseline InSAR in this paper. The data model of multibaseline InSAR with layover was expatiated firstly, and the layover problem in multibaseline InSAR was boiled down to the estimation of the interferometric phase angle. The basic principle and advantage of the unitary ESPRIT algorithm was depicted, its efficiency was validated by the Monte Carlo simulations. The simulations indicate that unitary ESPRIT algorithm can work well when the looks are very small but the performance of other algorithms degrade sharply.

Key words: Multibaseline InSAR; Layover; Unitary ESPRIT

1 引言

合成孔径雷达(SAR)通过在距离向采用脉冲压缩、方位向合成孔径技术来实现高分辨率的二维地形成像。SAR 成像时存在“层叠效应”(Layover)^[1, 2]现象,层叠效应可以用图 1 来说明,图 1 中 P_1 , P_2 , P_3 是 3 个高度互不相同的散射点,它们方位坐标都相同并且距雷达的斜距都等于 r ,它们在图像中会叠加在一起而成为一个像素。

层叠效应是 SAR 成像原理带来的问题,在 SAR 成像处理中是一个技术难点。目前已经研究出了多种层叠效应的处

理方法,多基线 InSAR(Multibaseline InSAR)^[3-5] 技术就是其中的一种。

多基线 InSAR 是传统干涉 SAR(InSAR)的扩展,传统的 InSAR 系统只有一条基线,多基线 InSAR 在垂直于视线的方向依次增加多幅天线^[5],利用多幅天线同时对某一地区成像,或者一幅天线多次飞过同一地区成像^[3, 4],利用所得到的多幅 SAR 复图像进行干涉处理可以实现垂直于视线方向的分辨能力。图 1 是多基线 InSAR 的示意图,图中上方的小黑点表示的是一条垂直于纸面向里的航线,共有 K 条航线,它们排成一列。

由于多基线 InSAR 有了高度向上的分辨能力,因此它能够分辨出方位、斜距相同而高度不同的散射点,从理论上讲它能够彻底地解决层叠效应问题。文献[6-8]提出了一种多基线 InSAR 框架下解决 SAR 的层叠效应的数学模型,将解决 SAR 的层叠效应问题归结为层叠在一起的各个散射源的干涉相位的估计问题,并采用了几种经典的算法如 Capon, MUSIC 和 RELAX 等进行了仿真实验。

文献[6-8]中的模型是一种使用多个单视图图像数据的模型,为了能使用超分辨率的算法,多基线 InSAR 要求在常规的二维 SAR 成像步骤中存储多个单视图图像数据。通常,

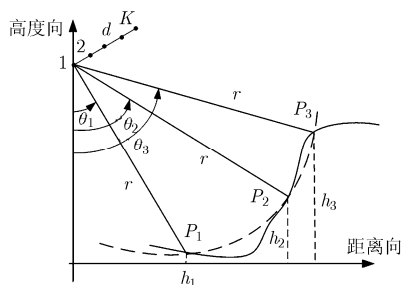


图 1 存在层叠效应时多基线 InSAR 的几何模型

SAR 成像系统中存储各个单视图像是为了将它们叠加平均而降噪, 叠加平均会降低 SAR 图像的分辨率, 因此用于平均的单视图像个数一般不会太多, 甚至只存储一幅单视复图像而将叠加平均处理放在图像域进行。然而要想提高干涉相位的估计精度, 超分辨率算法模型要求采用更多的单视复图像, 因此成像系统对视数的限制与干涉相位的估计精度之间形成了一对矛盾。鉴于此, 本文使用谐波恢复与信号重构的西 ESPRIT(Unitary ESPRIT)算法^[9]来解决多基线 InSAR 的层叠效应问题。酉 ESPTIT 算法利用了复数数据的共轭所包含的有用信息, 等效于将视数增倍, 或者在相同的视数下可以使估计精度大大提高, 这对于视数受到制约的多基线 InSAR 有着特别重要的意义。

2 数据模型与干涉相位估计问题

考虑图 1 中的多基线 InSAR 模型, 假设 K 个天线沿着一条直线均匀排列, 各个天线间的间距都为 b , 即形成一个均匀的天线阵列(ULA)。

SAR 的成像处理中为了降低纹斑(speckle)噪声的影响, 通常都要进行多视平均处理^[1], 在有多个单视数据的情况下多基线 InSAR 可以建模为^[6-8]:

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{m=1}^M \sqrt{\tau_m} \mathbf{a}_m \odot \mathbf{x}_m(n) + \mathbf{v}(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

这是一个多基线 InSAR 高度维超分辨率成像模型。式中, 变量 n 表示第 n 视。 M 表示重叠在一起的散射源的个数, 本文中假定散射源的个数是已知的。对一个确定的视 n , $\mathbf{y}(n)$, \mathbf{a}_m , $\mathbf{x}_m(n)$ 以及 $\mathbf{v}(n)$ 都是 K 维复矢量, $\mathbf{y}(n)$ 表示接收数据矢量, $\mathbf{v}(n)$ 表示加性噪声。 τ_m 是一个实正的值, 表示第 m 个散射源的平均散射强度, 对应着归一化的雷达散射截面。由于 K 个天线的入射角差异很小, 所以可认为从 K 个位置进行观察时 τ_m 的值是不变的^[5, 6]。式中的 \odot 表示向量的 Hadamard 乘积。 \mathbf{a}_m 是第 m 个源的方向矢量, 在均匀阵列的情况下, $\mathbf{a}_m = [1, e^{j\phi_m/(K-1)}, e^{j2\phi_m/(K-1)}, \dots, e^{j\phi_m}]^T$, 其中 ϕ_m 是对应于全长基线(即在阵列中最外侧的两个天线间的基线长度)的干涉相位, 根据 InSAR 的模型^[1], 可以表示为 $\phi_m = (4\pi/\lambda)B \sin(\theta_m - \alpha)$, θ_m 是参考天线(如第一个, 或第 K 个)对第 m 个源的入射角。 α 是天线倾角, B 是全基线长度, λ 是雷达波长。

\mathbf{a}_m 也可以表示成另外一种形式, 设以第 1 个天线为参考天线, 第 2 个天线与第 1 个天线间的干涉相位为: $\omega_m = (4\pi/\lambda)b \sin(\theta_m - \alpha)$, b 是各个天线间的间距, 即基本基线的长度, 下标 m 表示是对第 m 个源进行干涉。在均匀阵列的情况下, 各个基线对应的干涉相位为 $\phi_{mk} = (k-1)\omega_m$, ($k = 2, 3, \dots, K$), 于是方向矢量就为 $\mathbf{a}_m = [1, e^{j\omega_m}, e^{j2\omega_m}, \dots, e^{j(K-1)\omega_m}]^T$ 。

以上的两种方向向量形式中都使用干涉相位来代替两个天线上接收回波的相位延迟, 这在基线间隔 b 远小于雷达和目标间的距离时是完全允许的。

式(1)中的 $\mathbf{x}_m(n)$ 表示第 m 个源第 n 视的 speckle 过程进行 K 次观测所得的结果。这里假定 $\mathbf{x}_m(n)$ 是均值为零, 方差为 1 的平稳复高斯随机矢量, 其协方差矩阵为 $\mathbf{C}_m = E\{\mathbf{x}_m(n)\mathbf{x}_m^H(n)\}$, ($m = 1, 2, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$), 其对角线上诸元均为 1。同时假设 $\mathbf{x}_m(n)$ 对各视是独立同分布(IID)的, 因此各视下协方差矩阵 \mathbf{C}_m 都相同, 简言之就是对任意的第 n 视都有 $\mathbf{x}_m(n) \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{C}_m)$ (高斯分布), 这样的假设在 SAR 的信号处理中是非常常见的。在不考虑多径效应的情况下, 还可以认为各个源也是相互独立的, 并且对不同的 m , $\mathbf{x}_m(n)$ 服从相同的分布, 也就是说 $\mathbf{x}_m(n)$ 对 m 也是独立同分布(IID)的。值得注意的是, $\mathbf{x}_m(n)$ 的各个分量之间并不独立, 它们是相关的, 相关特性取决于干涉基线的长短, 而且对不同的源, \mathbf{C}_m , τ_m 是互不相同的。

有两个问题需要注意:

(1)如果把 speckle 看作是一种噪声的话, 本文的模型就是一种带有乘性噪声的模型。通常涉及到噪声的时候都希望要将其滤除, 然而本文的 speckle 向量和 τ_m 放在一起考虑时, 它表示的只是散射强度 τ_m 在 K 次观测时的随机起伏, 从这个意义上讲, 它并不是真正的噪声, 而是信源的一部分, 不是需要滤除的对象, 消除斑噪的影响不是本文考虑的对象。

(2)变量 n 表示的是第 n 视, 共有 N 个视数, 它对应于 DOA 估计问题中的 N 个快拍。应注意的是这里 N 视并不是指“ N 视叠加平均”, 而是“ N 个单视”图像数据。多基线 InSAR 超分辨率高度维成像模型要求在常规 SAR 二维成像过程中存储 N 个单视复图像, 这可以通过存储多视处理滤波器组的各个滤波器输出结果来得到。为了便于描述, 本文下面仍用“多视”而不用“多个单视”这种说法, 但要注意的是它是指多个单视而不是指多视平均。说视数太少, 指的是单视图像数据太少, 即每一个阵元上接收的数据长度太短。

3 使用酉 SPRIT 算法估计干涉相位角

从模型(1)中可以看出, 只要能够估计出每个源的干涉相位 ω_m ($m = 1, 2, \dots, M$) 和幅度 τ_m , 再结合雷达系统参数, 就可以将层叠在一起的 M 个源区分开来。因此, 在多基线 InSAR 的框架下解决层叠效应问题就变成了干涉相位与散射源的散射强度的估计问题。只要将干涉相位估计出来, 幅度就很容易计算^[6, 8], 故本文只讨论干涉相位的估计问题。

文献[6-8]中使用了经典的波束形成, Capon, MUSIC 和 RELAX 算法进行了干涉相位估计, 存储多个二维单视复图像是这些算法的基本要求。实际 SAR 成像中, 为了保持一定的分辨力, 多视叠加时所用的视数比较少, 成像系统存储的单视复图像很少, 对 DOA 估计的算法而言就是快拍数比较少, 或采样数比较少, 数据序列很短, 这对多基线 InSAR 高度维分辨是非常不利的。使用过短的数据必然会使干涉相位估计精度下降, 使得算法在视数较少时的估计结果没有实际价值, 因此希望二维 SAR 成像系统存储尽量多的单视复

图像。

从空域(图像域)来看,多视处理就是把若干个相邻的像素叠加求平均当作一个像素。在多基线 InSAR 的高度维,成像平面上的一个像素对应着高度维上的很多个散射源,它们都是叠加在一起的,当成像平面多个像素叠加平均时,那些像素对应的高度维上的各个散射源又会来一次叠加,这对高度维的成像或者分辨层叠效应也是非常不利的,因此又希望在二维 SAR 成像时视数不要太高。

于是,干涉相位的估计精度与成像时采用的视数之间成了一对矛盾。如何充分地利用长度有限的的数据,最大可能地利用这些数据所包含的有用信息就成了多基线 InSAR 技术解决层叠效应问题的重要内容。鉴于此,本文将酉 ESPRIT 算法引入到干涉相位的估计中来。酉 ESPRIT 算法原本是一种谐波恢复和波前重构的高效算法,它巧妙地利用了复观测数据的共轭里面所包含的有用信息,使得在相同的精度要求下数据长度能够减半,或者在相同的数据长度下使估计精度大为提高。同样地,当把它应用于本文的干涉相位估计时,它能在较少的视数下提高估计的精度,或者在相同的精度要求下所要求的视数较少,这一点对于实际的 SAR 成像系统有特别重要的意义。

将式(1)中的观测数据向量 $\mathbf{y}(n)$ 按视数排列写成一个矩阵的形式,得到观测数据矩阵为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_1(2) & \cdots & y_1(N) \\ y_2(1) & y_2(2) & \cdots & y_2(N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_K(1) & y_K(2) & \cdots & y_K(N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中的每一列对应着阵列的 K 个阵元在某一个视时的观测数据,它是一个复矩阵。

用 \mathbf{Y} 作观测数据矩阵,只要把酉 ESPRIT 算法中的谐波频率换成干涉相位角即可将其应用于本文的场合,酉 ESPRIT 算法提高干涉相位估计性能的关键是:利用复观测数据矩阵 \mathbf{Y} 构造中心 Hermitian 矩阵:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{Y}, \mathbf{\Pi}_K \mathbf{Y}^* \mathbf{\Pi}_N] \in C^{K \times 2N} \quad (3)$$

它是由 \mathbf{Y} 及其共轭 \mathbf{Y}^* 合成的观测数据矩阵,式中 $\mathbf{\Pi}_K$ 和 $\mathbf{\Pi}_N$ 分别是 $K \times K$ 和 $N \times N$ 的互换矩阵。与原始数据矩阵 \mathbf{Y} 相比,合成数据矩阵 \mathbf{M} 的长度增倍了,因而可以提高干涉相位估计精度。另外,酉 ESPRIT 算法将合成的复矩阵 \mathbf{M} 通过双射映射变换为一个实矩阵再去估计信号和噪声子空间,这可以大大减小计算量,提高数值计算的稳定性,而双射映射本身并不会增加额外的计算负担^[9],这一点也是酉 ESPRIT 算法的优越性所在。

酉 ESPRIT 算法的步骤可以概括为:将合成数据矩阵 \mathbf{M} 通过双射映射变换成一个实矩阵,再对这个实矩阵进行奇异值分解求解信号子空间,有了信号子空间后就可以构造出相似变换矩阵,然后对旋转矩阵进行相似变换,求相似变换后的矩阵的特征值,即可求得干涉相位的估计值。

4 数据模拟与算法性能评估

为了验证酉 ESPRIT 算法在多基线干涉相位估计方面的有效性和优越性,本文进行了计算机仿真实验。实验将从干涉相位的估计偏差与精度两个方面对酉 ESPRIT 算法进行考察,具体分为两个部分:首先是模拟多视的、存在层叠效应的多基线 InSAR 数据;然后是利用模拟的数据考察酉 ESPRIT 算法的干涉相位估计性能随着视数、信噪比和归一化基线长度的变化情况,并与 MUSIC 算法和标准 ESPRIT 算法的结果进行对比。

4.1 多视情况下多基线 InSAR 数据模拟

仿真实验中所使用的参数如下:基线条数 $K = 8$, 相互层叠的源的个数 $M = 2$, 它们的基本干涉相位分别为 $\omega_1 = 10^\circ$ 及 $\omega_2 = 90^\circ$ 。各个源的信噪比定义为: $\text{SNR} = \tau_m / \sigma_v^2$ ($m = 1, 2$)。另外,假设模型式(1)中各视的加性噪声均为零均值、单位方差的高斯白噪声,即 $\mathbf{v}(n) \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{I})$, ($n = 1, 2, \dots, N$)。

第 II 部分曾指出, $\mathbf{x}_m(n)$ 是一个 K 维的复矢量,其 K 个分量之间是相关的,相关特性与多种因素都有关^[10],相关函数模型也比较复杂。为了讨论方便,这里选用一种最简单的去相关模型,即三角形自相关函数模型,其自相关序列表达为^[6, 8]

$$c_{xm}(l) = E\{[x_m(n)]_l [x_m^*(n)]_{l+l}\} = \begin{cases} 1 - \frac{|l|}{K-1} b_m, & |l| \leq \frac{K-1}{b_m} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $b_m = B/B_{cm}$ 是第 m 个源的归一化基线,其中 B 是全基线长度, B_{cm} 是极限基线长度, $B_{cm} = \lambda r / 2 \rho_r \cos(\theta_m - \alpha_m)$, θ_m 是第 m 个源的本地入射角, α_m 是地形倾角^[1]。 b_m 跟雷达系统参数、波束入射角和地形倾角是相关的。这种三角形的自相关函数较好地模拟了基线去相关效应。

使用式(4)的自相关函数模型可以生成自协方差矩阵 \mathbf{C}_m :

$$\mathbf{C}_m = \begin{bmatrix} c_{xm}(0) & c_{xm}(1) & \cdots & c_{xm}(K-1) \\ c_{xm}(-1) & c_{xm}(0) & \cdots & c_{xm}(K-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{xm}(-(K-1)) & c_{xm}(-(K-2)) & \cdots & c_{xm}(0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

\mathbf{C}_m 是一个对称正定矩阵,其对角线上的诸元为各个分量的方差,它们都为 1。

接着再来生成自协方差矩阵为 \mathbf{C}_m 的 speckle 向量 $\mathbf{x}_m(n)$,这可以通过 Cholesky 分解来实现。首先,生成一个 K 维的零均值的,方差为 1 的高斯白噪声矢量 $\mathbf{x}'_m(n)$,然后对协方差矩阵 \mathbf{C}_m 进行 Cholesky 分解,设为

$$\mathbf{C}_m = E\{\mathbf{x}_m(n) \mathbf{x}_m^H(n)\} = \mathbf{P} \mathbf{P}^H \quad (6)$$

则 $\mathbf{x}_m(n) = \mathbf{P} \mathbf{x}'_m(n)$ 。容易证明:

$$E\{\mathbf{x}_m(n)\mathbf{x}_m^H(n)\} = E\{\mathbf{P}\mathbf{x}'_m(n)[\mathbf{x}'_m(n)]^H\mathbf{P}^H\} = \mathbf{P}E\{\mathbf{x}'_m(n)[\mathbf{x}'_m(n)]^H\}\mathbf{P}^H = \mathbf{P}\mathbf{P}^H = \mathbf{C}_m \quad (7)$$

上述变换得到某一视的 speckle 向量, 对每一视都先生成一个零均值、单位方差的高斯白噪声向量, 再作相应的变换, 重复操作 N 次, 即可得到 N 视的 speckle 向量 $\mathbf{x}_m(n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$), 把它和高斯白噪声向量 $\mathbf{v}(n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 一起代入到式(1)表示的模型中即可生成多视的、有若干个源层叠的多基线 InSAR 数据。

4.2 仿真结果分析

从模型式(1)可知, 视数 N 、归一化基线长度 b_m 以及信噪比 SNR 都对干涉相位的估计偏差与精度都有影响, 下面的仿真试验考察这三者对酉 ESPTIT 算法的影响。为了比较, 同时也使用 ESPRIT 算法和 MUSIC 算法进行了试验。

在仿真实验中要计算估计偏差与方差(或均方差), 本文是通过运行 1000 次 Monte Carlo 仿真来进行估算的, 其估计公式为: 偏差 $\text{bias}(\omega_m) = E\{(\hat{\omega}_m - \omega_m)\}$, 均方根误差(精度) $\text{RMSE}(\omega_m) = \sqrt{E\{(\hat{\omega}_m - \omega_m)^2\}}$ 。此外, 实验中还求出了方差估计的 Cramber-Rao 界^[6, 8] (CRB), 以考察各种算法的优越性。

首先来考察视数对酉 ESPTIT 算法干涉相位估计性能的影响。这里归一化基线取 $b_1 = 0.1, b_2 = 0.1$, SNR=15dB。图 2 是干涉相位 ω_2 的估计性能与视数的关系的仿真结果。(本文的各个实验中 ω_1 与 ω_2 的仿真结果都很接近, 而且变化趋势也基本一致, 因此不给出 ω_1 的结果。)

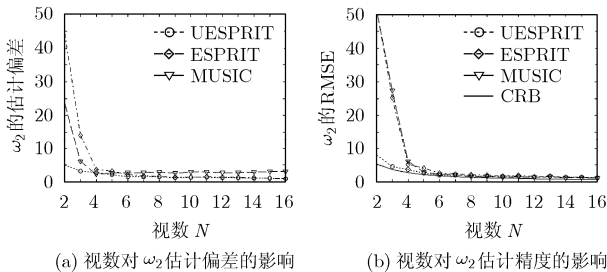


图2 干涉相位的估计性能与视数的关系
($b_1 = 0.1, b_2 = 0.1, \text{SNR}=15\text{dB}$, 纵轴单位是度)

从图中可以看出, 酉 ESPTIT, ESPRIT 和 MUSIC 3 种算法估计偏差和均方差都很小, 证明了这 3 种算法在解决 SAR 层叠效应方面的有效性。3 种算法的估计偏差和方差都随着视数的增大而减小, 并逐渐趋于平缓, 其中估计方差逐渐趋近于 CRB 界(图中的实线)。然而在视数较小时 3 种算法表现出了明显的差异, 酉 ESPTIT 算法的估计偏差和方差明显小于另外两种算法, 这种趋势在视数小于 4 以后尤为明显。当视数小于 4 时, MUSIC 算法和 ESPRIT 算法的性能急剧恶化, 并且对视数变化非常敏感, 而酉 ESPRIT 算法即使是在 2 视时也有不错的估计性能, 且对视数变化不敏感, 这证明了酉 ESPRIT 算法的优越性。

综上所述, 在视数比较多时, 酉 ESPTIT 算法, MUSIC 算法和 ESPRIT 算法的估计性能差异不大, 它们都是在多基线 InSAR 的框架下解决 SAR 的层叠效应的良好算法。但是在视数较少的时候, 酉 ESPTIT 算法无论在偏差还是精度方面都比其它两种算法都要优越, 这一点在保持 SAR 图像的分辨力、降低 SAR 系统的复杂性方面是非常有实际意义的。

下面考察酉 ESPTIT 算法的估计性能随信噪比和归一化基线长度的变化情况, 实验的结果在图 3 和图 4 中给出。与图 2 一样, 图 3 与图 4 中同时也给出了 MUSIC 算法和 ESPRIT 算法的估计性能曲线以作比较, 并且在估计精度性能曲线中给出了 CRB 界。

图 3 描述的是 ω_2 的估计性能随着信噪比而改变的情况, 实验所用的参数是: 归一化基线长度 $b_1 = 0.1, b_2 = 0.1$, 视数 $N = 16$ 。

从图 3 中可以看出, 3 种算法的干涉相位角估计偏差和精度随噪声的变化都比较缓慢, 它们对噪声都不太敏感, 即使在信噪比较小时, 3 种算法也都具有良好的估计性能。其中, 酉 ESPTIT 算法在偏差方面要优于 MUSIC 算法而和 ESPRIT 算法基本一致, 而在精度方面 3 种算法比较接近, 它们都非常靠近 CRB 界。

图 4 描述的是 ω_2 的估计性能随着归一化基线长度 b_m 而变化的情况, 实验参数是: 信噪比 $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = 15\text{dB}$, 视数 $N = 16$ 。为了讨论方便, 实验中让 b_1 和 b_2 同时变化, 即同时从 0.1 变化到 1。

从图 5 中可以看出: 归一化基线长度较短(小于 0.7)时, 3 种算法的估计性能都非常好, 酉 ESPTIT 算法的偏差略小于 MUSIC 而和 ESPRIT 算法相当。当归一化基线较长时(大

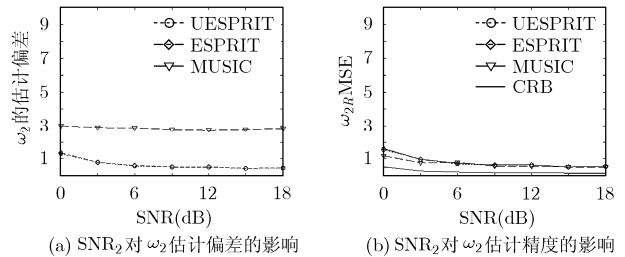


图3 信噪比对干涉相位估计性能的影响
($b_1 = 0.1, b_2 = 0.1, N = 16$, 纵轴的单位是度)

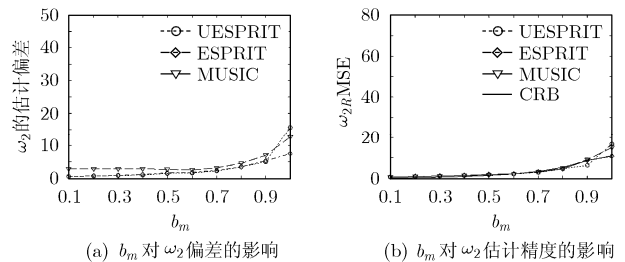


图4 归一化基线长度对干涉相位估计性能的影响
($\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = 12\text{dB}, N = 16$, 纵轴的单位是度)

于 0.7 时), 也就是去相关效应较为严重时, 与其它两种算法一样, 酉 ESPTIT 算法的估计性能逐渐变差。当归一化基线长度达到 1, 即基线长度与极限基线长度相等时, 估计误差约为 $20^\circ \sim 30^\circ$, 这显然是难以接受的。所以, 为了获得可靠的估计精度, 必须对基线的长度进行限制。

5 结束语

在多基线 InSAR 的框架下, 只要能够估计出各个层叠在一起的源的干涉相位, 就可以利用干涉 SAR 的系统参数和几何参数求出各个源的高度坐标, 将层叠在一起的各个源分辨出来。然而, 干涉相位的估计精度与实际成像时的视数之间是一对矛盾, 经典的算法如 MUSIC 等在视数很小时估计精度将会下降。本文采用了酉 ESPTIT 算法来估计干涉相位角, 由于酉 ESPTIT 算法使用了复数数据的共轭所包含的信息, 相当于在不增加视数的情况下使有效数据长度增倍, 因而能够提高估计性能, 或可以在相同的性能要求下只使用较少的视数。仿真实验表明, 在视数非常少时, 其它算法工作性能急剧下降, 甚至失去实际意义, 而酉 ESPTIT 算法却能工作得很好。酉 ESPTIT 算法在小视数时的优越性能对 SAR 成像系统来说是非常具有实际意义的, 它能够在分辨率保持与系统的设计方面留下更大的选择空间。

参 考 文 献

- [1] Rosen P A, Hensley S, and Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [2] Rodriguez E and Martin J M. Theory and design of interferometric Synthetic Aperture Radars. *Proc. IEEE*, 1992, 139(2): 147-159.
- [3] Homer J, Longstaff I D, She Z, and Gray D. High resolution 3-D imaging via multi-pass SAR. *Proc. IEE. Radar Sonar Naving*, 2002, 149(1): 45-50.
- [4] Reigber A and Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [5] Roessing L and Ender J H G. Multi-antenna SAR Tomography Using Superresolution Techniques. in 3rd European Conf. on Synthetic Aperture Radars. Germany, 2000: 55-58.
- [6] Gini F, Lombardini F, and Montanari M. Layover solution in multibaseline SAR interferometry. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1344-1355.
- [7] Lombardini F, Gini F, and Matteucci P. Application of Array Processing Techniques to Multibaseline InSAR for Layover Solution. *Proc. IEEE in Radar Conference*, 2001: 210-215.
- [8] Lombardini F, Montanari M, and Gini F. Reflectivity estimation for multibaseline interferometric radar imaging of layover extended sources. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(6): 1508-1519.
- [9] Haardt M and Nossék J A. Unitary ESPRIT: How to obtain increased estimation accuracy with a reduced computational burden. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1995, 43(5): 1232-1242.
- [10] Zebker H A and Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959.

柳祥乐: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 系统与信息处理。

宋岳鹏: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 系统与信息处理。

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 从事机载及星载合成孔径雷达研究。