

利用多干扰机对抗 SAR 双通道干扰对消技术的研究

黄龙* 董春曦 赵国庆

(西安电子科技大学电子信息攻防对抗与仿真技术教育部重点实验室 西安 710071)

摘要: 双通道合成孔径雷达(SAR)和单航过的干涉合成孔径雷达(InSAR)有很强的抗干扰能力, 固定的单站有源干扰机所发射的干扰信号到两通道的相位差是缓变的, 可以被用来做干扰对消。该文提出利用双(多)干扰机对抗双通道干扰对消的方法, 分析了双通道对消原理和双干扰机的信号特点, 给出了双干扰机的干涉相位条件, 讨论了干扰机干涉相位的估计方法。理论分析和仿真实验表明, 该方法能有效减弱双通道雷达的抗干扰能力。

关键词: 电子对抗; 合成孔径雷达; 干涉合成孔径雷达; 干扰; 双通道干扰对消

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)04-0903-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00887

Investigation on Countermeasure against SAR Dual-channel Cancellation Technique with Multi-jammers

Huang Long Dong Chun-xi Zhao Guo-qing

(Key Laboratory of Electronic Information Countermeasure and Simulation, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Dual-channel SAR system and single-look InSAR system are characterized by strong anti-interference capability. In this paper, a countermeasure method against dual-channel cancellation is proposed based on two jammers, the principle of dual-channel cancellation is reviewed, the interference signals of two jammers are analyzed, the requirement of the interference phase of the two jammers and the estimation method are studied. Theoretical analysis and simulation experiment verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: Electronic CounterMeasure (ECM); SAR; InSAR; Interference; Dual-channel cancellation

1 引言

成像雷达如 SAR, InSAR^[1,2]是一种微波测量技术, 不但能对目标进行高分辨成像, 还能通过多通道相位干涉测量获取目标的高程信息, 在军事、勘探等领域发挥着极其重要的作用^[3,4]。因此, 对成像雷达的干扰研究具有重要意义。成像雷达具有很强的抗干扰能力, 单通道 SAR 能通过图像滤波抑制相干斑噪声^[5-7], InSAR 可以通过干涉相位滤波去除噪声干扰对干涉相位图的影响^[8-10]。而对抗地面固定干扰站的噪声压制干扰时, 双通道 SAR 和单航过的 InSAR 能利用干扰信号对应双通道回波的干涉相位的缓变, 通过相位补偿和干扰对消来削弱干扰信号, 得到受干扰影响很小的 2 维 SAR 图像^[11]。文献[12]提出通过干扰机的运动使干扰信号在 InSAR 双通道内的相位差发生快速变化, 给干扰信号相位差的估计带来困难, 但是干扰机的位置对干扰效果

影响较大, 无法实现成像期间的全程干扰。

多航过的 InSAR 是分时分通道接收, 所以无法进行干扰对消。本文针对双通道 SAR 和单航过 InSAR 的干扰对消问题, 通过分析指出, 双干扰机能使双通道内干扰信号的相位差在同一方位向的不同采样时间上发生快变, 从而有效对抗双通道干扰对消。为达到相同的干扰效果, 每部干扰机发射的干扰信号的功率也仅为单部干扰机的一半。

2 双通道对消原理

双通道对消技术的思想来自于杂波抑制的偏置相位中心天线(DPCA)技术^[13]。DPCA 的原理是把两个或多个天线的相位中心在飞行方向上作补偿, 然后通过抵消抑制慢变的杂波。

以单航过 InSAR 系统为例, 建立如图 1 所示的正侧视双通道 SAR 模型, 两个 SAR 天线 R_1 和 R_2 的基线长度为 B , 天线 R_1 发射, 两部天线同时接收。雷达沿 x 轴正方向以速度 v 匀速飞行, 高度为 H , 成像区域为 F 。在慢时间 t_m 时刻, 两通道接收到区域 F 内点目标 (x, y) 的回波聚焦后的复图像 $s_{r1}(x, y)$ 和 $s_{r2}(x, y)$ 为

2013-06-24 收到, 2013-10-11 改回

国家“十二五”预研基金(41101020301)资助课题

*通信作者: 黄龙 longhll123@gmail.com

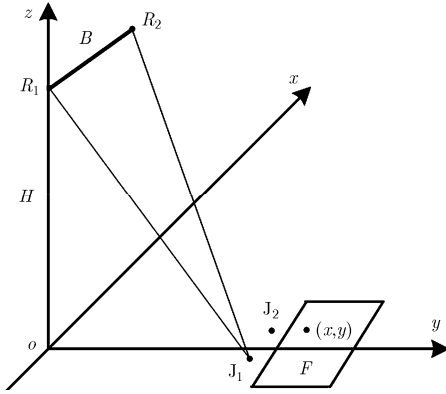


图1 InSAR 双通道模型

$$s_{i1}(x, y) = A_i(x, y) \exp[j\phi_{i1}(x, y)] \quad (1a)$$

$$s_{i2}(x, y) = A_i(x, y) \exp[j\phi_{i1}(x, y) + j\Delta\phi_i(x, y)] \quad (1b)$$

其中 $A_i(x, y)$ 是点 (x, y) 的回波聚焦后的幅度, 且认为两通道幅度是相等的。 $\phi_{i1}(x, y)$ 是点 (x, y) 在通道 1 中聚焦后的相位, 且 $\phi_{i1}(x, y) = -4\pi R_{B1} / \lambda$, 其中 R_{B1} 为点 (x, y) 到雷达通道 1 航线上的最短直线距离。 $\Delta\phi_i(x, y)$ 是点 (x, y) 到两通道的相位差, 且 $\Delta\phi_i(x, y) = -2\pi(R_{B2} - R_{B1}) / \lambda$, R_{B2} 为点 (x, y) 到雷达通道 2 航线上的最短直线距离。

地面有一干扰机 J_1 对雷达进行干扰。干扰信号进入雷达后, 雷达回波信号既包含目标回波, 也包含干扰信号。在 t_m 时刻, 雷达两通道接收同一干扰机信号的相位差为

$$\Delta\phi_j(t_m) = -(2\pi/\lambda)[R_{j2}(t_m) - R_{j1}(t_m)] \quad (2)$$

其中 $R_{j1}(t_m)$ 和 $R_{j2}(t_m)$ 分别是 t_m 时刻干扰机 J_1 到两接收通道的距离。

设 J_1 坐标为 $(x_c, y_c, 0)$, R_1 坐标为 $(X, 0, H)$, R_2 坐标为 $(X, B_h, H + B_v)$ 。其中, X 代表不同的方位向距离, B_h 和 B_v 分别为基线在水平和垂直方向上的分量。则有

$$\begin{aligned} R_{j2}(t_m) - R_{j1}(t_m) &= \sqrt{(X - x_c)^2 + (B_h - y_c)^2 + (H + B_v)^2} \\ &\quad - \sqrt{(X - x_c)^2 + y_c^2 + H^2} \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)进行泰勒展开并忽略二次项得

$$R_{j2}(t_m) - R_{j1}(t_m) \approx \sqrt{(B_h - y_c)^2 + (H + B_v)^2} - \sqrt{y_c^2 + H^2} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 当基线垂直于航迹方向时, $\Delta\phi_j(t_m)$ 近似不变, 可记为 $\Delta\phi_j$ 。将双通道中干扰信号聚焦后的复图像表示为

$$s_{j1}(x, y) = A_j(x, y) \exp[j\phi_{j1}(x, y)] \quad (5a)$$

$$s_{j2}(x, y) = A_j(x, y) \exp[j\phi_{j1}(x, y) + j\Delta\phi_j] \quad (5b)$$

根据式(1a), 式(1b), 式(5a)和式(5b), 目标和干扰的复合信号在两通道内的复图像可以表示为

$$s_1(x, y) = A_t(x, y) \exp[j\phi_{t1}(x, y)] + A_j(x, y) \exp[j\phi_{j1}(x, y)] \quad (6a)$$

$$s_2(x, y) = A_t(x, y) \exp[j\phi_{t1}(x, y) + j\Delta\phi_t(x, y)] + A_j(x, y) \exp[j\phi_{j1}(x, y) + j\Delta\phi_j] \quad (6b)$$

由于难以精确估计雷达和干扰机的距离, 干扰信号的相位差 $\Delta\phi_j$ 很难通过式(2)计算, 一般采用搜索法估计干扰信号相位差^[14]: 首先建立代价函数, 然后在 $[0, 2\pi]$ 范围内搜索, 找到函数的极值。当干信比较大时, 干扰信号能量大于地物回波能量, 干扰信号的干涉相位还会体现在复图像的相位图上, 即干信比的增大会使 $\Delta\phi_j$ 的估计变得容易。

将通道 1 的复图像进行 $\exp(j\Delta\phi_j)$ 的相位补偿后与通道 2 的复图像相消, 得到对消后的图像为

$$s(x, y) = s_2(x, y) - s_1(x, y) \exp(j\Delta\phi_j) = s_{i2}(x, y) \cdot \{1 - \exp[j\Delta\phi_j - j\Delta\phi_t(x, y)]\} \quad (7)$$

其中, $s_{i2}(x, y)$ 为无干扰时通道 2 的成像结果, 从式(7)可以看出, 双通道对消后的图像消除了干扰分量的影响, 但是由于 $\exp[j\Delta\phi_j - j\Delta\phi_t(x, y)]$ 相位项的影响, 当 $\Delta\phi_t(x, y) - \Delta\phi_j \approx 2k\pi$, k 为整数时, 图像会变暗; 而当 $\Delta\phi_t(x, y) - \Delta\phi_j \approx (2k + 1)\pi$ 时, 图像会变亮。

3 双干扰机信号分析

通过一部固定的干扰机对 SAR 进行干扰, 干扰信号的干涉相位很容易被雷达方估计, 从而用于 SAR 图像的干扰对消。文献[12]和文献[15]提出用运动的干扰机使干扰信号在不同的慢时间上发生快变, 因此雷达必须在每个慢时间上都要对干扰信号的干涉相位进行估计, 无疑增加了干扰对消的难度。但是干扰效果和干扰机的运动方向、干扰机飞行速度及干扰机和雷达的距离有关, 由于干扰机运动是连续的过程, 无法实现成像期间的全程干扰。另一方面, 尽管干扰信号的干涉相位估计变得困难, 雷达方并不一定要对信号进行实时处理, 干扰对消还是可以通过增加算法复杂度得以实现。

如图 1 所示, 两部干扰机 J_1 和 J_2 同时对雷达进行噪声压制干扰。两部干扰机发射的干扰信号在两通道内聚焦后的复图像分别表示为 $s_{j1r1}(x, y)$, $s_{j1r2}(x, y)$, $s_{j2r1}(x, y)$, $s_{j2r2}(x, y)$ 。设干扰机 J_1 发射信号在双通道内的相位差为 $\Delta\phi_1$; J_2 发射信号在双通道内的相位差为 $\Delta\phi_2$, 则有

$$s_{j1r2}(x, y) = s_{j1r1}(x, y) \exp(j\Delta\phi_1) \quad (8a)$$

$$s_{j2r2}(x, y) = s_{j2r1}(x, y) \exp(j\Delta\phi_2) \quad (8b)$$

两通道内, 干扰的和信号分别表示为

$$s_{j1}(x, y) = s_{j1r1}(x, y) + s_{j2r1}(x, y) \quad (9a)$$

$$s_{j2}(x, y) = s_{j1r1}(x, y) \exp(j\Delta\phi_1) + s_{j2r1}(x, y) \exp(j\Delta\phi_2) \quad (9b)$$

将式(9a)代入式(9b), 有

$$s_{j2}(x, y) = s_{j1}(x, y) \exp(j\Delta\phi_1) + s_{j2r1}(x, y) [\exp(j\Delta\phi_2) - \exp(j\Delta\phi_1)] \quad (10)$$

因为两部干扰机固定不动, $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 近似不变。式(10)的第1项为对通道1中干扰和信号进行固定相位补偿后的结果, $s_{j2r1}(x, y)$ 是干扰机 J_2 的干扰信号在通道1的聚焦结果, 对于不同的点 (x, y) , 其聚焦结果类似噪点, 有随机的幅度和相位。第2项的相位项为 $\exp(j\Delta\phi_2) - \exp(j\Delta\phi_1)$, 当 $\exp(j\Delta\phi_2) \approx \exp(j\Delta\phi_1)$ 时, 式(10)第2项约等于0, 导致干扰信号在通道2内的和信号总是比通道1中的和信号多了相位 $\exp(j\Delta\phi_1)$, 所以依然可以用相位补偿和对消来消除干扰。当 $\exp(j\Delta\phi_2) \neq \exp(j\Delta\phi_1)$ 时, 式(10)的第2项为对 $s_{j2r1}(x, y)$ 进行 $\exp(j\Delta\phi_2) - \exp(j\Delta\phi_1)$ 的相位补偿, 两通道干扰的和信号对于不同的点 (x, y) 没有固定的相位差。由于 $\exp(j\Delta\phi_2) \neq \exp(j\Delta\phi_1)$, $s_{j1}(x, y)$ 和 $s_{j2}(x, y)$ 经式(9a)和式(9b)做矢量叠加后, 幅度是不一样的。若用一个估计相位 $\Delta\hat{\phi}_j$ 去补偿对消, 则对于大部分干扰相位差与 $\Delta\hat{\phi}_j$ 不同的干扰点, 对消不能消除干扰; 而对于小部分干扰相位差与 $\Delta\hat{\phi}_j$ 相同(或接近)的干扰点, 由于幅度不同, 也不能完全对消。

4 双干扰机布置及干涉相位估计

雷达通过主瓣照射地物目标, 为了对雷达进行主瓣干扰从而降低干扰机的功率需求, 两部干扰机都要位于雷达主瓣内, 所以干扰机要布置在尽量靠近被保护区的位置。为了进一步降低干扰功率, 可以采用相干噪声干扰。同时, 为了使双通道对消失效, 两干扰机的干涉相位 $\Delta\phi_1 \neq \Delta\phi_2 + 2k\pi$, k 为整数。

对于沿距离向不同位置摆放的干扰机, 将式(4)中的 y_c 替换为变量 Y , 并在 y_c 处进行泰勒展开, 忽略高次项得

$$\begin{aligned} R_{j2}(t_m) - R_{j1}(t_m) &\approx \sqrt{(B_h - Y)^2 + (H + B_v)^2} - \sqrt{Y^2 + H^2} \\ &\approx \sqrt{(B_h - y_c)^2 + (H + B_v)^2} - \sqrt{y_c^2 + H^2} \\ &\quad + k_{y_c}(Y - y_c) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $k_{y_c} = \frac{y_c - B_h}{\sqrt{(B_h - y_c)^2 + (H + B_v)^2}} - \frac{y_c}{\sqrt{y_c^2 + H^2}}$, 由式(11)可以看出, 距离向位置在 y_c 附近的干扰机到

雷达两通道的距离差与其到 y_c 点的距离成正比。则两部距离向位置在 y_c 附近的干扰机干涉相位差的估计值为

$$\Delta\hat{\phi}_2 - \Delta\hat{\phi}_1 \approx 2\pi k_{y_c}(y_2 - y_1)/\lambda \quad (12)$$

其中, y_1 和 y_2 分别为两干扰机的距离向距离。如果沿距离向摆放了多个干扰机, 能够根据式(12)的线性关系和干扰机之间的距离得到两干扰机干涉相位的差值, 并且要保证此差值不是 2π 的整数倍, 这个条件一般情况下都能满足。

图2所示为正侧视工作时不同基线长度和倾角下干涉相位随距离变化的仿真结果, 仿真参数设置如下: 雷达高度 10 km, 波长 0.03 m, 信号带宽 200 MHz, 距离向波束宽度 3.2° , 下视角 70° 。考虑到雷达波束照射的范围, 只对 27~28 km 的距离向范围进行了仿真。为了体现干涉相位与距离向距离的线性关系, 干涉相位没有对 2π 进行折叠, 且各距离点的干涉相位均减去了最近点的干涉相位, 使纵轴值从 0 开始。能够看出, 当雷达与干扰机位置较远时, 干涉相位与距离向距离呈线性关系, 这与式(11)的分析一致。

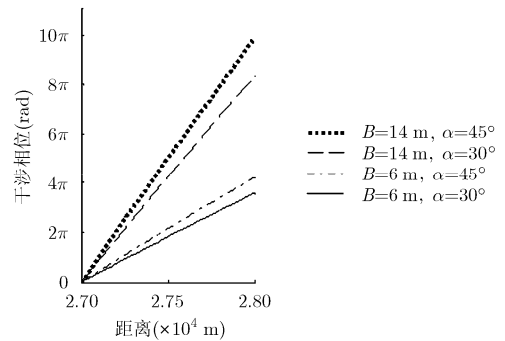


图2 干涉相位随距离变化曲线

因为无法预知雷达参数及雷达与干扰机的空间关系, 所以应该在被保护区的不同位置上布置两部以上的干扰机, 且它们距离向的距离差不相等, 并根据实际情况选择其中两部或两部以上的干扰机对其进行干扰。由于雷达接收的干扰信号功率为两干扰机发射功率之和, 为达到相同的干扰效果, 每部干扰机的发射功率只需要为单部干扰机时的一半。

5 仿真

本节利用第4节中的雷达参数对双干扰机对抗干扰对消的方法进行仿真研究。图3为无干扰时任一通道的 SAR 图像。场景中心位于雷达在方位向零点时的波束中心与地面的交点, 固定单站干扰时,

干扰机位于场景中心点；双站干扰时，两干扰机分别位于场景中心点沿距离向两侧各 50 m 处。

图 4 为利用 10 dB 干信比的噪声压制干扰时任一通道的 SAR 图像，此处干信比定义为进入接收机时干扰信号的平均功率与所有目标回波的平均功率之比。存在强噪声干扰时，图像表现为强噪点，目标信息几乎完全被遮盖^[16]。

图 5 为固定单站干扰源发射时，双通道干扰对消的结果。图像中的干扰被对消掉，但是出现了沿方位向的黑色条纹，这是因为条纹处的干涉相位与干扰信号的干涉相位接近，导致式(7)的信号接近零。又因为平地的干涉相位是周期的，所以黑色条纹周期出现。

图 6 为采用双干扰机时的干扰对消效果，此时两个干扰信号的功率都是目标回波的 7 dB，其和信号的功率为目标回波的 10 dB。图中有周期的黑色条纹，但在噪声的遮盖下，表现得不明显。能看出干扰信号没有得到明显的对消，说明双干扰机能有效对抗双通道的干扰对消。

为了客观说明双干扰机对成像雷达双通道抗干扰能力的削弱，分别对固定单站干扰机和双干扰机时，干扰对消后的图像和无干扰时的成像的相关系数图进行仿真。2 维图像的相关系数是将矩阵变为向量，然后用式(13)进行求解。但是此方法会损失图像的区域信息，所以此处先将图像分割成 $M \times N$ 个 3×3 的子块，再对每个子块用式(13)求解，得到的相关图的长和宽都为之前的 $1/3$ 。图 7 是用上述

方法得到的固定单站干扰时干扰对消后的图像与无干扰图像的相关系数图，图中亮处相关性强，暗处相关性弱，能明显看到 3 条暗线，此处对应图 5 中的暗条纹。图 8 为采用双干扰机时干扰对消后的图像与无干扰图像的相关系数图，图中没有明显的白色区域，其相关系数较小。

$$\text{corr} = \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}^T}{|\mathbf{a}| \times |\mathbf{b}|} \quad (13)$$

另一种方法是对两幅图像分别求一阶梯度，再用式(13)求解相关系数。噪声图像突变较快，无干扰的图像变化缓慢，一阶梯度能突出噪声图像和普通图像的差异。在对不同干信比下的固定单站干扰机和双干扰机干扰对消后的相关系数进行求解后，得到如图 9 所示的两条曲线，其中相关性越小表示干扰效果越好。单部干扰机时，干扰对消后图像的相关性在各干信比下都处于较高的水平，这是因为准确对消时，干扰总是能完全被对消，而图像的周期明暗使相关性不为 1；双干扰机时，干扰对消后图像的相关性随着干信比的增加而减小，干扰对消并没有带来图像质量的提升。能直观地看出，双干扰机干扰效果要优于单部干扰机，说明双干扰机能减弱成像雷达的双通道抗干扰能力。

6 结束语

地面固定单站干扰机对单航过的 InSAR 进行噪声压制干扰时，干扰信号容易被双通道干扰对消方法抑制掉。使用双干扰机对 InSAR 进行干扰，可

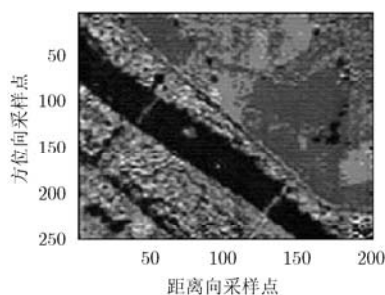


图 3 无干扰时 SAR 图像 6 号

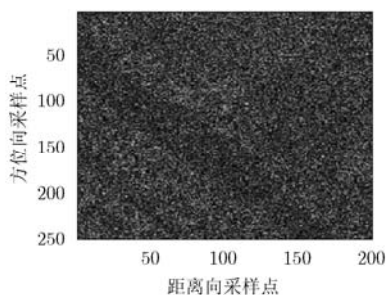


图 4 10 dB 干信比时 SAR 图像

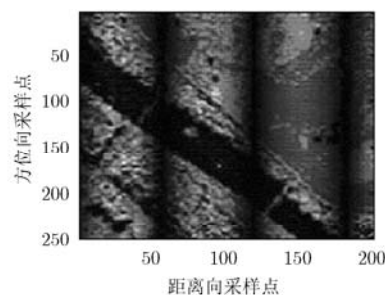


图 5 固定单站干扰时干扰对消结果

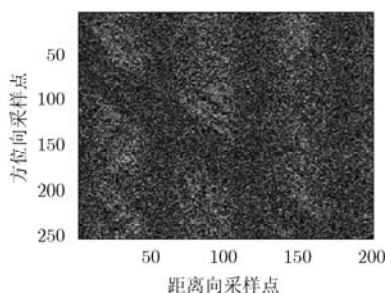


图 6 双干扰机时干扰对消结果

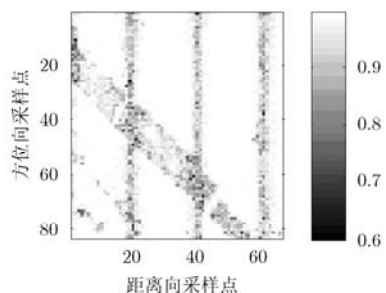


图 7 固定单站时干扰对消后的相关图

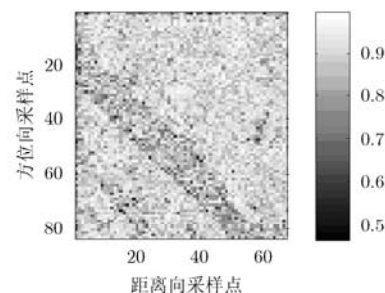


图 8 双干扰机时干扰对消后的相关图

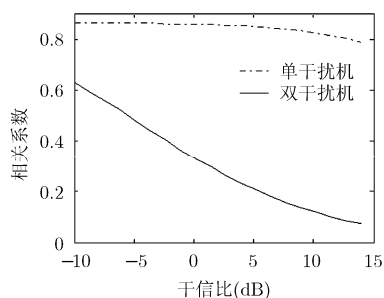


图9 两种干扰机配置下干扰对消后的相关系数

以消除干扰信号在同一慢时间上干涉相位的一致性,从而使干扰对消无效。同理,还可以将此方法推广到多干扰机的分布式干扰中去,一方面可以降低每部干扰机的发射功率需求,另一方面能通过布阵提高干扰实施的灵活性。

参考文献

- [1] Lin Q, Vesecky J, and Zebker H A. A new approach in interferometric SAR data processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 560-567.
- [2] Graham R. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 763-768.
- [3] 刘楠, 刘昕, 张娟, 等. 非正交发射的宽域高分辨 MIMO InSAR 成像模式研究[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 140-147.
Liu Nan, Liu Xin, Zhang Juan, et al. A wide-swath high-resolution imaging mode for MIMO InSAR without transmitting orthogonal signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 140-147.
- [4] 姜丽敏, 陈曙暄, 向茂生. 一种基于连接点的机载 InSAR 区域网 DEM 重建方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(11): 2694-2701.
Jiang Li-min, Chen Shu-xuan, and Xiang Mao-sheng. A method for airborne InSAR block DEM generation based on tie points[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2694-2701.
- [5] 朱磊, 水鹏朗, 程冬. 基于混合迭代滤波的 SAR 图像相干斑抑制[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1038-1044.
Zhu Lei, Shui Peng-lang, and Cheng Dong. SAR image despeckling based on mixed iteration filtering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1038-1044.
- [6] 朱磊, 水鹏朗, 武爱景. 一种 SAR 图像相干斑噪声抑制新算法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 80-86.
Zhu Lei, Shui Peng-lang, and Wu Ai-jing. New algorithm for reducing speckle noise in the SAR image[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(2): 80-86.
- [7] 李光廷, 禹卫东. 基于自适应 Bilateral 滤波的 SAR 图像相干斑抑制[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1076-1081.
Li Guang-ting and Yu Wei-dong. SAR image despeckling based on adaptive bilateral filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1076-1081.
- [8] 汪鲁才, 王耀南, 毛六平. 基于小波变换和中值滤波的 InSAR 干涉图像滤波方法[J]. *测绘学报*, 2005, 34(2): 108-112.
Wang Lu-cai, Wang Yao-nan, and Mao Liu-ping. An algorithm of interferometric phase filter of InSAR based on wavelet analysis and median filter algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(2): 108-112.
- [9] 郭交, 李真芳, 刘艳阳, 等. 一种基于相干本质的 InSAR 方位向预滤波方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(3): 417-421.
Guo Jiao, Li Zhen-fang, Liu Yan-yang, et al. An improved method for InSAR azimuth prefiltering based on coherence principle[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(3): 417-421.
- [10] 李海, 吴仁彪, 廖桂生. 改进的联合子空间投影的 InSAR 干涉相位估计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(1): 45-52.
Li Hai, Wu Ren-biao, and Liao Gui-sheng. Improved joint subspace projection method for InSAR interferometric phase estimation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(1): 45-52.
- [11] 唐波, 王卫延. 干涉合成孔径雷达抗干扰性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(10): 1809-1811.
Tang Bo and Wang Wei-yan. The study of the characteristic of InSAR in ECCM[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(10): 1809-1811.
- [12] 唐波. 干扰机运动对 InSAR 双通道抑制的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(增刊): 719-722.
Tang Bo. Effect of jammer motion on two channels cancellation in InSAR EW[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(Suppl.): 719-722.
- [13] Rosenberg L and Gray D. Anti-jamming techniques for multi-channel SAR imaging[J]. *IEEE Proceedings- Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 234-242.
- [14] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双天线对消弹射式干扰中的相位估计[J]. *电子学报*, 2005, 33(9): 1691-1693.
Gan Rong-bing, Wang Jian-guo, and He Chuan. Phase estimation in rebound jamming suppression by two channel SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1691-1693.
- [15] 唐波. 干扰机运动对 SAR 方位双通道抑制的影响[J]. *雷达科学与技术*, 2009, 7(1): 40-45.
Tang Bo. Effect of jammer motion on SAR Dual-channel cancellation in azimuth[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(1): 40-45.
- [16] 李兵, 洪文. 合成孔径雷达噪声干扰研究[J]. *电子学报*, 2004, 32(12): 2035-2037.
Li Bing and Hong Wen. Study of noise jamming to SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(12): 2035-2037.

黄龙: 男, 1988 年生, 博士, 研究方向为 InSAR 干扰、电子战信号处理。

董春曦: 男, 1970 年生, 副教授, 研究方向为电子对抗技术及电子对抗系统仿真。

赵国庆: 男, 1953 年生, 教授, 研究方向为信息对抗、电子战系统仿真、电子战信号处理。