

欺骗干扰对 INSAR 复图像配准的影响分析

贾 丽¹ 贾 鑫¹ 胡华超²

(1. 装备学院光电装备系, 北京 101416; 2. 63880 部队, 洛阳 471000)

摘 要: 干涉式合成孔径雷达(INSAR)利用 SAR 图像对获得观测区域的高程信息, 其准确性与 SAR 图像对的相关性有着密切的联系。受到干扰的 SAR 图像对间相关性会发生变化, 这将直接影响 INSAR 的成像处理结果。该文首先阐述了间歇采样转发干扰、弹射式干扰的原理, 分析了其对主辅天线回波信号相位的影响; 接着计算机仿真了两种干扰条件下的复图像对配准情况; 然后通过配准相关系数特性及干涉相位图质量分析了两种干扰方式对 INSAR 复图像对配准的影响, 结论如下: 间歇采样转发干扰能够破坏复图像对的相关性; 弹射式干扰条件下, SAR 图像对仍能保持较高的相干性, 但 SAR 图像对配准后形成的干涉相位图所代表的地形与真实地形存在较大差异, 即与间歇采样转发干扰相比, 弹射式干扰对 InSAR 具有更强的欺骗效果。

关键词: 干涉式合成孔径雷达; 间歇采样转发干扰; 弹射式干扰; 相关系数; 干涉相位图
中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)10-1394-08

Analysis on the effects of deceived jamming on the co-registration of INSAR imaging

JIA Li¹ JIA Xin¹ HU Hua-chao²

(1. Dept. of Photoelectric & Electronic Warfare Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. The 63880 troops, Luoyang 471000, China)

Abstract: Interferometric Synthetic Aperture Radar (INSAR) altimetry technique is using a pair of SAR images to obtain the elevation information of the observation region. Its accuracy is closely linked to the correlation between the SAR images. The correlation between the disturbed SAR images will be changed, which will directly affect the InSAR imaging results. Firstly, the paper has described the principle of the interrupted sampling repeater jamming and the rebound jamming and then, the effects of the jamming on the echo phase of the master and the slave antennas are researched. Secondly, it has simulated co-registration processing between a pair of complex SAR images under the different deception jamming conditions. Then the effects of the deception jamming on the co-registration processing are analyzed according to the characteristics of the correlation coefficient and the quality of the interference pattern. Last, The paper has concluded that the interrupted-sampling jamming can make the correlation between the SAR images worse, and the SAR images maintain the high coherence under the rebound jamming but the elevation information represented by the new interference pattern is very different from the real one, that is to say, compared with the interrupted-sampling repeater jamming, the rebound jamming has more deception effects on the InSAR.

Key words: Interferometric Synthetic Aperture Radar; interrupted-sampling repeater jamming; rebound jamming; correlation coefficient; the interference pattern

1 引言

根据干涉式合成孔径雷达(INSAR)测高的原理^[1], 所获得观测区域的高程信息的准确性与 SAR 图

像对的相关性有着密切的联系, 干扰的存在会直接影响到高程信息的准确性。在 SAR 的干扰技术的研究中, 欺骗干扰得到了迅速的发展并取得了重要的研究成果。间歇采样转发干扰和弹射式干扰均能对 SAR

形成一定覆盖面积的欺骗效果,因此本文研究了这两种干扰对 INSAR 的成像处理中复图像配准的影响,并得出相关结论。

2 复图像对配准方法及质量评价

由于观测角度的不同,同一目标在不同图像上将会出现在不同的位置。图像对配准是通过一定的校正处理使不同图像上的同一目标能够对应起来。精确的图像配准能够提高图像相关性和干涉相位纹图的质量,若配准精度不够高,必然导致较大的测量误差甚至后续处理无法进行。因此,复图像对的配准至关重要,直接影响干涉相位的精度和质量,最终影响测高精度。配准标准和方法有很多,本文为了研究并突出欺骗干扰对配准质量的影响采用比较基础的最大相关法^[2]。

相似性测度是估计复图像对之间配准精度的指标。相关系数计算公式^{[3][4]}如式(1)所示,其含义是逐点计算以某一像素点 (i, j) 为中心的窗口大小为 $N \times N$ 的窗内的 γ 值,取绝对值后作为该像素点相关系数的值。相关系数值越大表示两幅图像的相似性越大,配准质量越好,因此,它可以作为配准质量评价的一个重要指标。

$$\gamma(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M s_1(n, m) \cdot s_2^*(n, m)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |s_1(n, m)|^2 \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |s_2(n, m)|^2}} \quad (1)$$

3 干扰方法及原理

3.1 间歇采样转发干扰

间歇采样转发欺骗干扰^[5]的基本思想:干扰机在整个工作过程中,分时交替地进行,将截获到的大时宽雷达信号分段进行同样的采样转发处理,即对每一小段信号都进行采样、处理、转发工作,直到处理完整个大时宽信号。间歇采样转发干扰原理如图 1 所示。



图 1 间歇采样转发干扰的基本原理

Fig. 1 the principle of interrupted-sampling jamming

设间歇采样脉冲信号 $g(t)$ 是一个矩形包络脉冲串,重复周期为 T_s ,其脉宽为 τ ,即:

$$g(t) = \text{rect}(t/\tau) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (2)$$

设截获的常规雷达信号为 $s(t)$,脉宽为 T ,干扰机对其进行间歇采样处理,其中脉宽远大于采样周期,则采样后的信号 $s_s(t)$ 为:

$$s_s(t) = g(t) * s(t) \quad (3)$$

因此有:

$$s_s(t) = g(t) * s(t) = \frac{\tau}{T_s} s(t) + \frac{2\tau}{T_s} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi f_s \tau}{n\pi f_s \tau} \cos 2\pi n f_s t \cdot s(t) \quad (4)$$

设雷达匹配滤波器用 $h(t)$ 表示,则真实目标回波信号通过匹配滤波的响应为:

$$y(t) = s(t) * h(t) \quad (5)$$

于是干扰信号通过匹配滤波后输出信号可表示为:

$$y_s(t) = s_s(t) * h(t) = \frac{\tau}{T_s} s(t) * h(t) + \frac{2\tau}{T_s} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi f_s \tau}{n\pi f_s \tau} \cos 2\pi n f_s t \cdot [s(t) * h(t)] = \frac{\tau}{T_s} y(t) + \frac{2\tau}{T_s} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi f_s \tau}{n\pi f_s \tau} \cos 2\pi n f_s t \cdot y(t) \quad (6)$$

显然,式(6)可以理解为由两部分组成,第一部分为主假目标;第二项是由所有幅度皆低于主假目标的假目标组成的次假目标群,它们都是真目标回波的精确复制,存在差异的只是幅度,即主、副假目标的脉冲宽度、波形形状与真目标完全相同。为增强其效果本文后续仿真中设置了多部干扰机。

3.2 弹射式干扰

弹射式干扰原理^[6]如图 2 所示。

图中, r_{t1} 、 r_{t2} 分别表示目标与主辅天线的距离; r_{s1} 、 r_{s2} 分别表示干扰机与主辅天线的距离; r_{j1} 表示干扰机与目标点的距离。这里以主天线 s_1 为例阐述对 SAR 的弹射式干扰原理。

假设 SAR 发射的线性调频信号表达式为:

$$p(t) = a(t) \exp(j\beta t + j\alpha t^2) \quad (7)$$

弹射式干扰条件下,雷达接收到的回波信号可以表示为:

$$s(t) = \sigma_p p(t - R_{t1}/c) + \sigma_j p(t - R_{j1}/c - \tau_j)$$

$$\begin{aligned}
 &= \sigma_t a(t-R_{n1}/c) \exp[j\beta(t-R_{n1}/c) + j\alpha(t-R_{n1}/c)^2] \\
 &+ \sigma_j a(t-R_{j1}/c-\tau_j) \exp[j\beta(t-R_{j1}/c-\tau_j) \\
 &+ j\alpha(t-R_{j1}/c-\tau_j)^2] \quad (8)
 \end{aligned}$$

其中, τ_j 是干扰机转发信号的延迟时间, σ_t 和 σ_j 分别代表回波中目标信号和干扰信号的强度, R_{n1} 为雷达目标的回波距离历程, R_{j1} 弹射式干扰信号产生到干扰信号被接收的整个过程中空间传播距离。其中:

$$\begin{aligned}
 R_{j1}(t) &= r_{s11} + r_{n1} + r_{j1} \\
 R_{n1}(t) &= 2r_{n1} \quad (9)
 \end{aligned}$$

雷达将接收信号变换到基带后结果为

$$\begin{aligned}
 \hat{s}(t) &= \sigma_t a(t-R_{n1}/c) \exp(-\frac{j2\pi R_{n1}}{\lambda}) \\
 &\exp[j\alpha(t-R_{n1}/c)^2] \\
 &+ \sigma_j a(t-R_{j1}/c-\tau_j) \exp(-\frac{j2\pi R_{j1}}{\lambda}) \\
 &\exp[j\alpha(t-R_{j1}/c-\tau_j)^2] \quad (10)
 \end{aligned}$$

式(10)右边第一项是雷达接收到的真实目标回波信号,第二项是雷达接收到的干扰信号,上述表达式就是弹射式干扰条件下的信号模型。

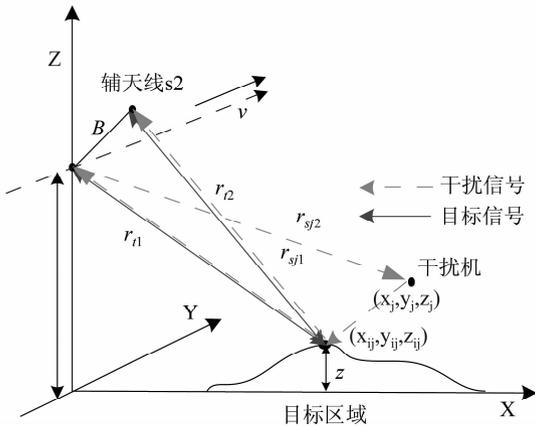


图2 弹射式干扰原理

Fig. 2 the principle of rebound jamming

雷达接收信号经过距离压缩后的结果为:

$$\begin{aligned}
 \hat{g}(s, r) &= \exp[-j\frac{4\pi R_{n1}(s)}{\lambda}] \text{sinc}\{\frac{2\pi B}{c}[r-R_{n1}(s)/2]\} \\
 &+ \exp[-j\frac{4\pi R_{j1}(s)}{\lambda}] \text{sinc}\{\frac{2\pi B}{c}[r-R_{j1}(s)/2-c\tau_j/2]\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

式中 $r=ct/2$, s 为方位向慢时间序列, 并且上述公式忽略了目标散射效应等因素的影响。

由上述分析可见, 弹射式干扰条件下, 单个真实点目标回波经过成像处理后将会出现虚假目标, 真、假目标对应的斜距分别为:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= R_{n1}(s)/2 \\
 r_2 &= R_{j1}(s)/2 \quad (12)
 \end{aligned}$$

对于 INSAR 成像的双天线而言, 未受干扰时两副天线收到的信号可以表示为:

$$\begin{aligned}
 s_{n1}(x, y) &= A_t(x, y) \exp[j\phi_{n1}(x, y)] \\
 s_{n2}(x, y) &= A_t(x, y) \exp[j\phi_{n2}(x, y)] \\
 &= A_t(x, y) \exp[j\phi_{n1}(x, y) + j\Delta\phi_t(x, y)] \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中 $\phi_{n1}(x, y)$ 表示未受干扰情况下, 主天线接收到回波信号的相位信息, $\Delta\phi_t(x, y)$ 表示两天线所接收目标回波信号的相位差。本文采用单发双收的工作模式, 该值与回波路径的关系可表示为:

$$\Delta\phi_t = k \cdot (r_{n1} - r_{n2}) \quad (14)$$

其中, $k=2\pi/\lambda$ 为电波传播波数。

当 SAR 受到弹射式干扰时, 由于目标对发射信号会产生散射波, 对弹射式干扰信号也会产生散射波, 他们共同构成弹射式干扰下主、辅天线所接收到的回波信号。经过分析忽略多径效应, 干扰信号的存在使得主、辅天线接收回波信号相位差表示为:

$$\begin{aligned}
 \phi_{jr} &= k \cdot [(r_{n1} + r_{s11} + r_{j1}) - (r_{n2} + r_{s11} + r_{j1})] \\
 &= k \cdot (r_{n1} - r_{n2}) \quad (15)
 \end{aligned}$$

可以得出, 弹射式干扰引入的干涉相位与真实目标回波引起的干涉相位形成原理相同, 则经过复图像对配准处理后, 干扰信号也能形成具有一定地形信息的干涉条纹。

4 仿真分析

本节通过相关系数图、相关系数特性等指标对间歇采样转发干扰、弹射式干扰图像配准质量的影响进行分析比较。仿真参数如表 1 所示。由于篇幅限制, 下文仅给出干扰前后主图像仿真结果, 如图 4 所示。

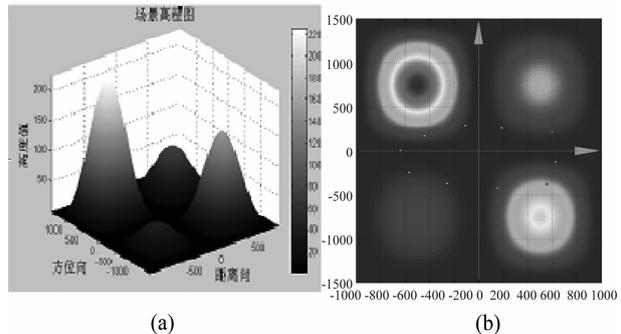


图3 (a) 地形图; (b) 间歇采样干扰机分布

Fig. 3 (a) relief map; (b) the distribution of the interrupted-sampling jamming

表 1 仿真参数
Tab. 1 the parameters of simulation

参数类型	参数值	参数类型	参数值
载波频率/GHz	5.3	轨道半长轴: $a=7169.9\text{km}$	
脉冲宽度/ μs	42	轨道偏心率: $e=0.0011416$	
信号带宽/MHz	30	右旋升交点赤经: $\Omega=99.4416^\circ$	
脉冲重复频率/Hz	1972.35	卫星轨道六根数	轨道倾角: $i=98.6^\circ$
天线侧视角/ $^\circ$	45		近地点幅角: $\omega=90^\circ$
天线波束宽度/ $^\circ$	2×0.2 (距离 \times 方位)	弹射式干扰机位置/m	初始近点角: $\omega_0=0^\circ$
合成孔径时间/s	0.62	间歇采样转发干扰机分布	(0, -2000, 1000)
信号采样频率/MHz	40	距离向间歇周期/ μs	图 3 中以白点表示
基线 B 长度/m	300	占空比	3.9
基线水平夹角/ $^\circ$	30	方向向调制方法	等差 3 个多普勒频率调制
场景大小	$2\text{km} \times 3\text{km}$ (距离 \times 方向)	间歇维数	二维间歇

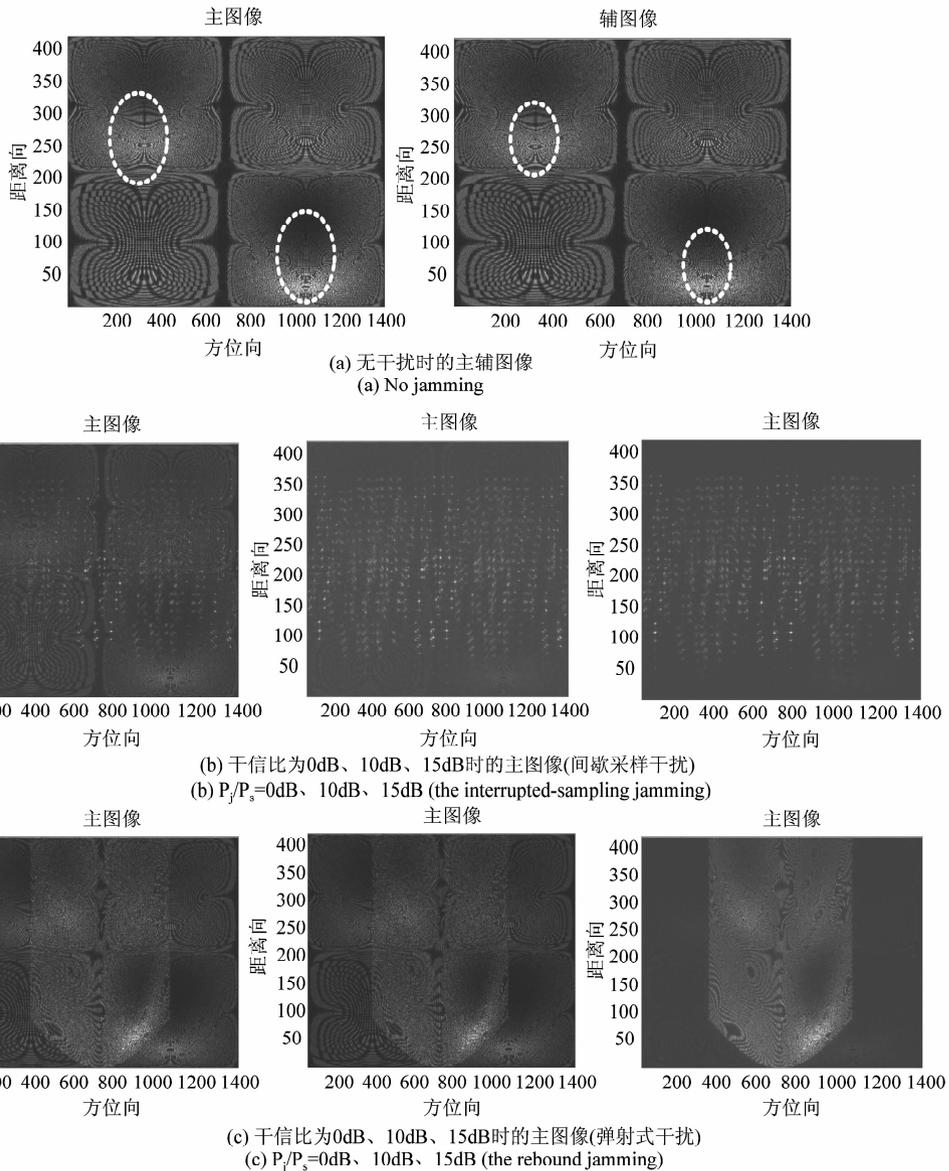


图 4 不同干扰条件下的主图像

Fig. 4 the master images before and after the different jamming

从图4可以看出间歇采样转发干扰以虚假目标群的形式覆盖了大部分目标区域,普通的弹射式干扰形成的虚假面目标覆盖区域有限但是很规则。

4.1 间歇采样转发干扰对复图像对配准的影响

(1) 干涉相位图

图5是复图像对配准之后得到干涉相位纹图,可看出:在间歇采样转发欺骗干扰下,随着干信比的增

强,SAR图像对配准后的干涉条纹越来越模糊,原地形的“指纹”特征受到的破坏越来越严重。

(2) 相关系数图

由图6、图7、表2可看出:随着干信比的增大,SAR图像对相关性的大幅度下降。方差明显增大说明某些局部的相关性恶化较为严重,这些为INSAR的后续处理以得到较为精确高程信息带来了一定的难度。

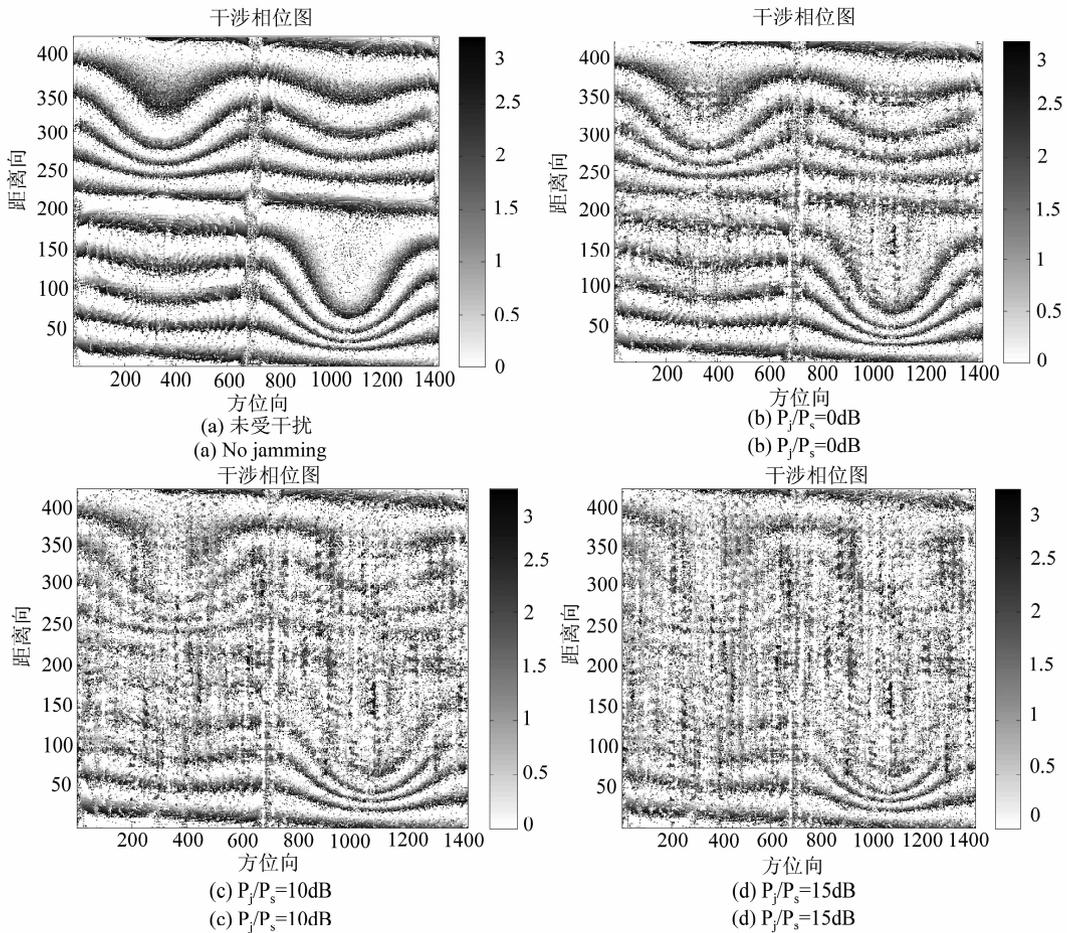
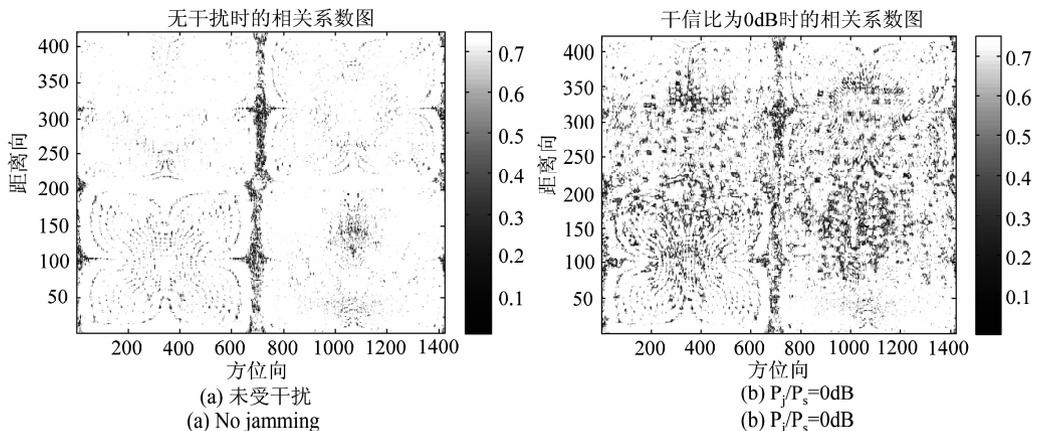


图5 间歇采样干扰前后的干涉相位图

Fig. 5 the interference pattern before and after the interrupted-sampling jamming



(a) No jamming

(b) $P_j/P_s=0\text{dB}$

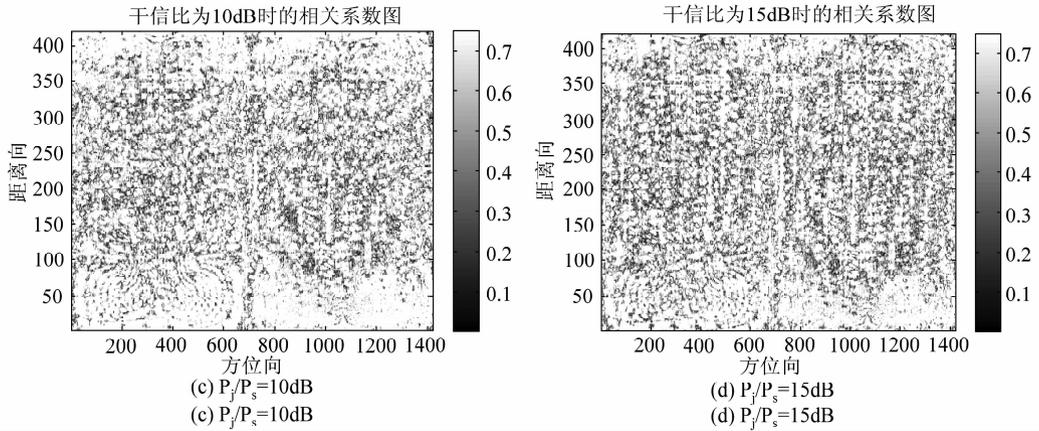


图 6 间歇采样干扰前后复图像对配准的相关系数

Fig. 6 the correlation coefficient of co-registration before and after interrupted-sampling jamming

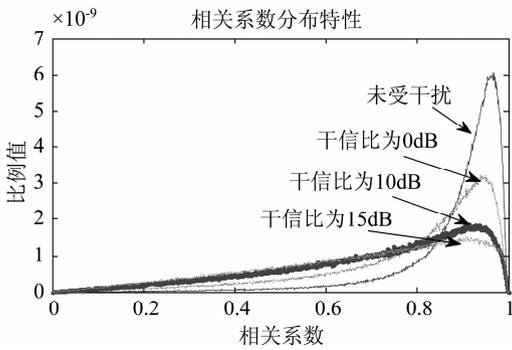


图 7 配准相关系数统计特性

Fig. 7 the Stat. of the correlation coefficient

表 2 相关系数数字特征

Tab. 2 the number character of the correlation coefficient

系数特征 \ 干信比	无干扰	0dB	10dB	15dB
均值	0. 8822	0. 7886	0. 7016	0. 6724
方差	0. 0158	0. 0348	0. 0481	0. 0520

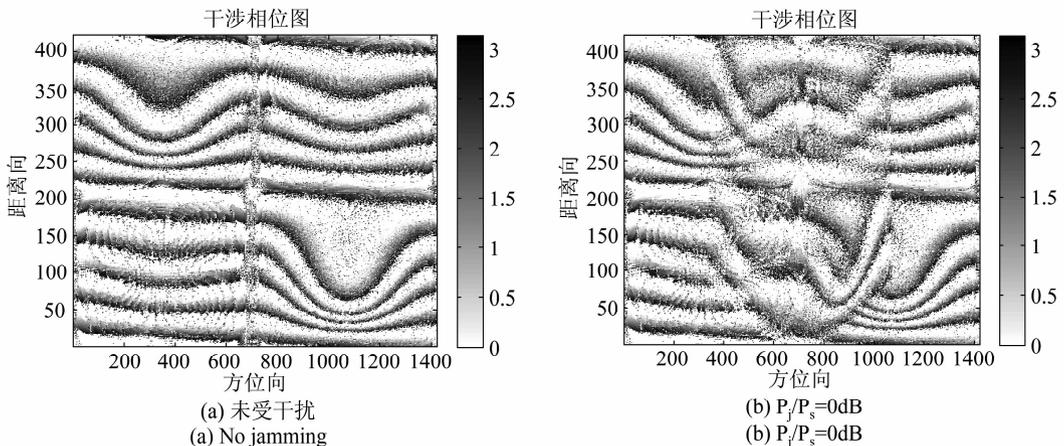
4.2 弹射式干扰对复图像对配准的影响

(1) 干涉相位图

由图 8 可看出:在弹射式干扰下,SAR 图像对配准后仍然能够形成清晰的干涉条纹。弹射式干扰信号分布在一定的成像区域范围内,因干扰信号与目标信号具有相同的参数特性,当干信比为 0dB 时,干扰信号与目标信号具有很高的相似性,叠加以后出现相消的情况,使受干扰区域的干涉条纹出现轻微的模糊;干信比增大后,受干扰区域由干扰信号特性主导,仍表现出较为清晰的干涉条纹。可见:弹射式干扰使原干涉条纹图“指纹”受到了破坏,同时生成了新的“指纹”特征。

(2) 相关系数图

从图 9 看出受到干扰后,大部分区域的相关系数仍然保持在较高的水平,说明配准质量较好,但是局部出现了相关性的恶化,配准有所质量下降。



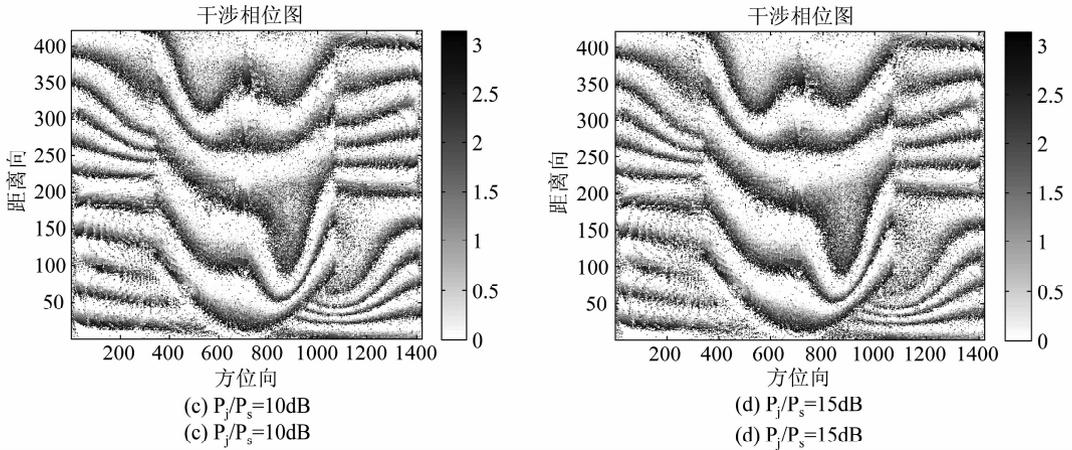


图8 弹射式干扰前后复图像对配准后的干涉相位图

Fig. 8 the interference pattern of co-registration before and after the rebound jamming

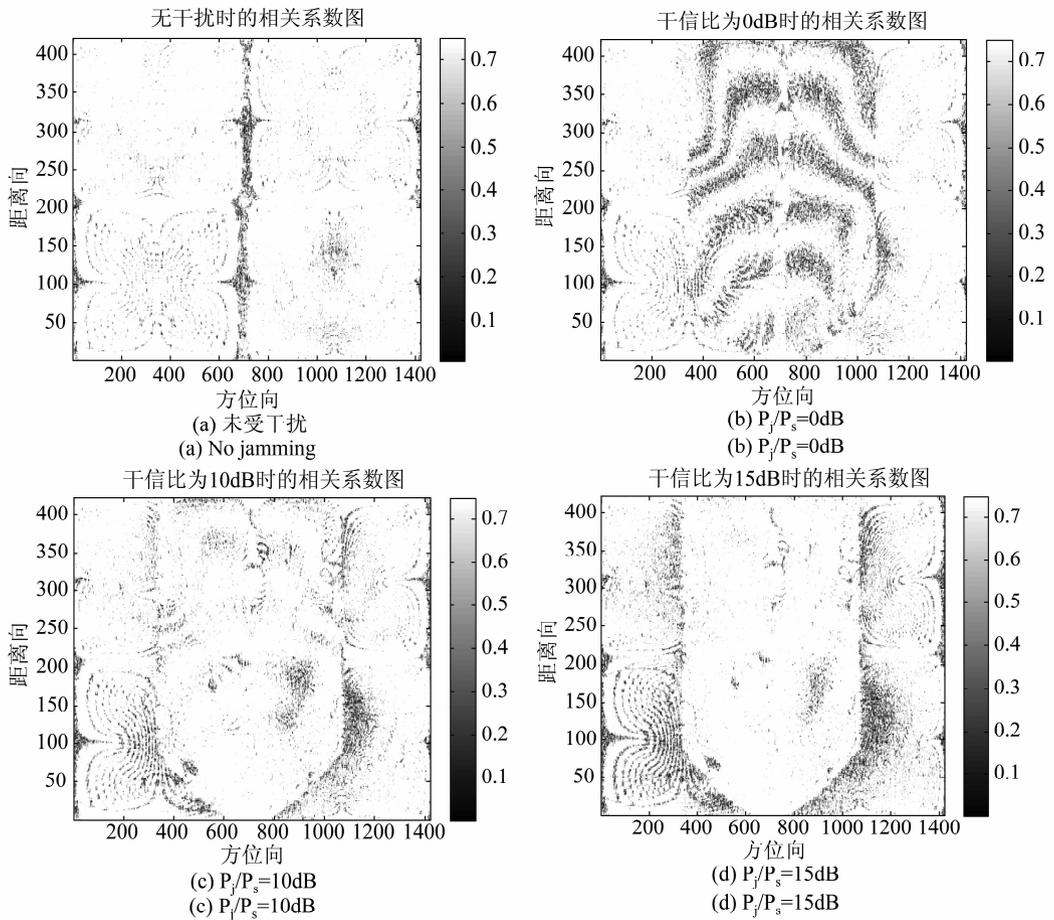


图9 弹射式干扰前后的相关系数图

Fig. 9 the correlation coefficient of re-registration before and after rebound jamming

从图10、表3可以看出,SAR图像对的相关性一直保持在较高水平,但是干信比为0dB时的相关性较10dB、15dB时的更差,即随着干信比的变化,SAR图像配准的相关系数特性并不是单方向的变化而出现了波

动,出现这种现象的原因:在弹射式干扰下,干扰信号与目标回波信号参数特征相同,当干信比为0dB时,干扰信号与目标信号相似性比较高,叠加以后整体上降低了图像对的相关性,致使配准质量下降;而当干信

比进一步增大以后,在干扰区域,干扰信号占据了主导地位,SAR 图像对配准后仍能得到较高的配准质量,但是在边界区域配准质量有所下降。

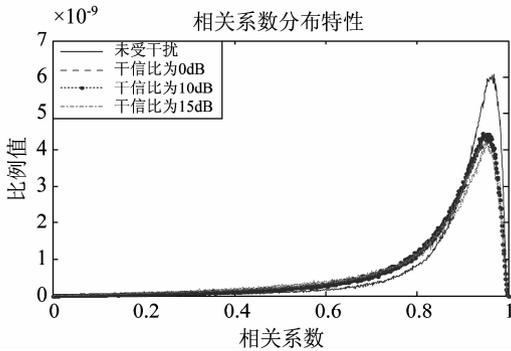


图 10 相关系数分布特性

Fig. 10 the Stat. of the correlation coefficient

表 3 相关系数数字特征

Tab. 3 the number character of the correlation coefficient

系数特征	干信比			
	无干扰	0dB	10dB	15dB
均值	0.8822	0.8160	0.8399	0.8236
方差	0.0158	0.0331	0.0240	0.0295

5 结论

干信比较低时,文中两种欺骗干扰方式下的 SAR 图像均可进行配准处理得到较为清晰的干涉纹图;但随着干信比的增大,间歇采样转发干扰下的干涉条纹质量变差,局部相关性严重恶化;弹射式干扰条件下,SAR 图像对仍能进行较高精度的图像配准,得到清晰的干涉条纹图,但此时获得的干涉条纹与原干涉条纹存在明显的差异,已经不能真实反映观测区域的地形。即弹射式干扰相比于间歇采样转发干扰具有更强的欺骗效果。

常规弹射式干扰覆盖面积有限,干涉纹图边缘特征明显,这些都是对 INSAR 干扰中有待解决的问题。

参考文献

- [1] 张直中. 机载和星载合成孔径雷达导论[M]. 北京:电子工业出版社,2004. 167-174.
- [2] 李红英. InSAR 图像配准方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2007. 3.
LI Hongying. The Research on Image Registration[D]. Chang sha:Hunan University,2007. 3. (in Chinese)

- [3] 王超,张红等. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:北京科学出版社,2002.
- [4] 殷硕文,邓孺孺. InSAR 数据的配准技术研究[J]. 遥感信息,2010(2),93-97.
YIN Shuo-wen,DENG Ru-ru. Registration Technology of InSAR Image Processing Based on ASAR Data[J]. Remote Sensing Information,2010(2),93-97. (in Chinese)
- [5] 吴晓芳,王雪松等. 对 SAR 的间歇采样转发干扰研究[J]. 宇航学报,2009. 9,30(5):2043-2048.
WU Xiao-fang,WANG Xue-song. Study of Intermittent Sampling Repeater Jamming to SAR[J]. Journal of Astronautics,2009. 9,30(5):2043-2048. (in Chinese)
- [6] 甘荣兵,王建国,何川. 对合成孔径雷达的弹射式干扰性能分析[J]. 信号处理(增刊),2003(19):382-385.
Gan Rongbing,Wang Jianguo,He Chuan. Performance of Jamming to SAR By Rebound Mode[J]. Signal Processing. 2003(19):382-385. (in Chinese)
- [7] 甘荣兵,王建国,何川. 双路对消抑制对合成孔径雷达的弹射式干扰[J]. 信号处理. 2005. 2,21(1):27-30.
Gan Rongbing,Wang Jian-guo,He Chuan. Rebound Jamming Suppression by Two-Channel SAR[J]. Signal Processing. 2005. 2,21(1):27-30. (in Chinese)

作者简介



贾 丽(1985-),女,四川人,装备学院博士研究生,研究方向为雷达信号处理、电子对抗。

E-mail:yueyaer_jiali@163.com



贾 鑫(1958-),男,山东人。装备学院教授、博导,研究方向为信号处理、空间信息获取、信息对抗。



胡华超(1981-),男,河南人。毕业于中国人民解放军装备学院,博士,工程师,研究方向为合成孔径雷达信号处理。

E-mail:huhuachao@gmail.com