

干涉合成孔径雷达抗干扰性能分析

唐波^{①②} 王卫延^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 在合成孔径雷达的电子对抗研究中,有源欺骗干扰方法得到了很大程度的重视。从合成孔径雷达反对抗的角度出发,就需要研究对有源欺骗干扰方法的反对抗措施。因此,该文对干涉合成孔径雷达(InSAR)的抗干扰性能进行了分析。该文指出利用 InSAR 可有效地识别有源欺骗干扰,并可在一定程度上消除有源欺骗干扰的影响。其中,对欺骗干扰的识别利用了 InSAR 的干涉相位图,干扰将使干涉相位图发生畸变。

关键词 合成孔径雷达(SAR),干涉合成孔径雷达(InSAR),电子战,反对抗,欺骗干扰

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1809-03

The Study of the Characteristic of InSAR in ECCM

Tang Bo^{①②} Wang Wei-yan^①

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

^②(Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The active deception jamming is paid much attention in SAR ECCM. So how to deal with the active deception jamming is a problem in SAR ECCM. This paper presents that InSAR can recognize the active deception jamming and suppress it. The interferometric phase graph is used to recognize the active deception jamming. The active deception jamming will make the interferometric phase graph disturbed.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), InSAR, EW, ECCM, Active deception jamming

1 前言

合成孔径雷达具有高分辨率成像能力和全天候全天时工作能力,在资源探查、环境监测和科学研究等领域发挥着越来越大的作用。伴随着科学技术的飞速发展和军事需求的牵引,各种先进的机载、星载合成孔径雷达在军事斗争中也扮演着更加重要的角色。许多研究者围绕着对合成孔径雷达的干扰开展了研究^[1-5],提出可以采用压制、欺骗等有源干扰来对抗对方的合成孔径雷达。然而针对如何增强己方合成孔径雷达的反干扰能力国内却很少有研究报道,国外关于这方面研究的详细公开报道也很少。由于SAR是成像雷达,其识别和抑制干扰的方法与普通雷达不尽相同。本文基于干涉合成孔径雷达双通道中干扰信号的相位特征,对干涉合成孔径雷达的抗干扰性能进行了分析和仿真计算,提出利用单过航干涉合成孔径雷达,可以有效识别和抑制地面固定有源单站对合成孔径雷达图像干扰的结论。

2 InSAR 简介

干涉合成孔径雷达(InSAR)最早由Grahamm提出^[6],用于地形测绘。InSAR获取地形高程信息的原理可以通过图1的示意简单说明。图1中A1和A2是InSAR的两部天线,r是A1指向地面观测点的斜距矢量,B是描述两天线相对位置的干涉基线矢量,B=|B|,β为B在yz平面坐标中的幅角;当干涉基线与飞行方向垂直且干涉SAR正侧视工作时,

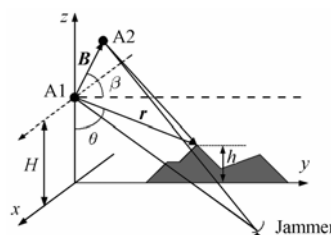


图1 干涉 SAR 示意图

Fig.1 InSAR sketch map

它们分别表达为

$$\mathbf{r} = r \sin \theta \cdot \hat{y} - r \cos \theta \cdot \hat{z} \quad (1a)$$

$$\mathbf{B} = B \cos \beta \cdot \hat{y} + B \sin \beta \cdot \hat{z} \quad (1b)$$

可以将雷达波束入射角表达为斜距、干涉基线矢量、双通道信号相位差以及干涉天线工作方式的函数:

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{-(r + \varphi / (k \cdot a))^2 + r^2 + B^2}{2rB} \right] + \beta \quad (1c)$$

其中φ为双通道相位差,k为波数,常规模式时a为1,乒乓模式时a为2。这样,当载机飞行高度H确定后,利用高程表达式(1d)实现地形测绘。

$$h = H - r \cdot \cos \theta \quad (1d)$$

3 受到干扰的 InSAR 信号

在未受到任何有源干扰的情况下,InSAR 双通道复图像信号可以分别表示为

$$\left. \begin{aligned} s_{r1}(x,y) &= A_r(x,y)\exp(i\phi_{r1}(x,y)) \\ s_{r2}(x,y) &= A_r(x,y)\exp(i\phi_{r2}(x,y)) \\ &= A_r(x,y)\exp(i\phi_{r1}(x,y) + id\phi_l(x,y)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $d\phi_l$ 表示双通道目标复图像信号的相位差。

当干扰信号通过天线主瓣或旁瓣进入合成孔径雷达系统, 它可以在雷达图像中形成强烈的压制干扰或虚假的欺骗干扰。这时雷达的两个接收通道中既包含目标的信号, 也包含了不同电平的干扰信号。对于每一个采样时刻, 由 InSAR 两部天线分别接收的来自同一干扰源的干扰信号的瞬时相位差表达为

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= k \cdot (r_2 - r_1) \\ &= k \cdot \left(\sqrt{(x-x_j)^2 + R_{j2}^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + R_{j1}^2} \right) \end{aligned} \quad (3a)$$

式中 k 为电波传播波数, r_1 和 r_2 分别为天线 1 和天线 2 至干扰站的距离, R_{j1} 和 R_{j2} 分别为天线 1 和天线 2 至干扰站的斜距, x_j 为干扰机方位坐标, x 为雷达方位坐标。经过合成孔径处理, 双通道图像对应像素中干扰信号的相位差可以表示为

$$d\phi_j(x) = \text{Arg} \{ \exp(i\varphi(x)) \otimes s_a(x) \} \quad (3b)$$

式中 $s_a(x)$ 是合成孔径雷达的方位向匹配处理函数。尽管 $\varphi(x)$ 伴随着雷达载机的飞行而变化, 但这个变化比较缓慢, 致使双通道干扰复图像相位差 $d\phi_j(x)$ 也是 x 的缓变函数。双通道的干扰复图像信号可以表示为

$$\left. \begin{aligned} s_{j1}(x,y) &= A_j(x,y)\exp(i\psi(x,y)) \\ s_{j2}(x,y) &= A_j(x,y)\exp(i\psi(x,y))\exp(id\phi_j(x)) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这样, 双通道复图像全信号表达为

$$\left. \begin{aligned} s_1(x,y) &= A_l(x,y)\exp(i\phi_{l1}(x,y)) + A_j(x,y)\exp(i\psi(x,y)) \\ s_2(x,y) &= A_l(x,y)\exp(i\phi_{l1}(x,y) + id\phi_l(x,y)) \\ &\quad + A_j(x,y)\exp(i\psi(x,y))\exp(id\phi_j(x)) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

我们看到, 尽管干扰信号可以如目标信号一样分布在双通道雷达图像中的任意位置, 但是在双通道图像的对应该像素中, 目标信号的相位差是随目标位置变化的, 而干扰信号的相位差却只是 x 的缓变函数。正是这一区别, 使我们有可能通过对 InSAR 的双通道图像进行相位加权处理, 抑制地面固定干扰站的有源干扰。

从式(5)可以给出两通道全信号的比值:

$$\frac{s_2(x,y)}{s_1(x,y)} = \frac{1 + R_{j/l} \cdot \exp[id\phi_j(x) - i\phi_{l1}(x,y) - id\phi_l(x,y)]}{1 + R_{j/l} \exp(-i\phi_{l1}(x,y))} \cdot \exp(id\phi_l(x,y)) \quad (6)$$

其中 $R_{j/l} = A_j/A_l$ 是衡量干信比的比值。从式(6)可以看到, 当雷达没有受到干扰或干扰极弱时 ($R_{j/l} \ll 1$), 双通道信号比值近似为 $\exp(id\phi_l(x,y))$, 它可以用来进行目标高程测绘; 当雷达遭受严重干扰时 ($R_{j/l} \gg 1$), 双通道信号比值近似为 $\exp(id\phi_j(x))$, 已失去沿距离向的干涉条纹。当雷达接收的干扰信号与目标信号电平相当 ($R_{j/l} \approx 1$), 例如在一定的成像范围内受到欺骗干扰时, 双通道图像的比值沿距离向会发生跳变。

4 对有源干扰的抑制

基于式(5)给出的双通道全信号的复图像表达, 给出抑制合成孔径雷达图像中有源干扰的方法。将一通道的复图像进行 $\exp(id\phi_j(x))$ 相位加权并与二通道复图像相减, 得到抑制干扰后的复图像为

$$\begin{aligned} s(x,y) &= s_2(x,y) - s_1(x,y) \cdot \exp(id\phi_j(x)) \\ &= s_2(x,y) [1 - \exp(id\phi_j(x) - id\phi_l(x,y))] \end{aligned} \quad (7)$$

从式(7)看到, 通过这样的双通道图像加权处理, 可以消除雷达图像中的干扰图像。但由于 $\exp(id\phi_j - id\phi_l)$ 相位项的作用, 会引起恢复的图像中出现明暗条纹。

为了验证式(7)对合成孔径雷达图像中干扰信号的抑制作用, 进行了干扰抑制的仿真实验。仿真实验中双通道的目标图像数据采用 X 波段 InSAR 的实际测绘数据, 包括来自两个通道的 I、Q 分量共 4 组数据; 仿真地面干扰站设置在距离向的给定位置; 干扰方式可以选择高功率噪声压制和低功率欺骗干扰。

图 2 给出了一组对压制干扰抑制的仿真结果。其中图 2(a) 是未受到干扰时任一通道的二维雷达图像。图 2(b) 是遭受干信比为 10dB 的噪声压制干扰后任一通道的二维雷达图像, 可以明显地看到原来的目标已被强烈的干扰覆盖; 沿方位向出现的明暗条纹是雷达天线波瓣的表现。图 2(d) 选择某一对方位向的所有距离单元, 比较受到干扰前后的双通道复图像相位差; 可以看到, 由于测绘的目标区比较平坦, 在未受到干扰时双通道复图像相位差沿距离向呈现一种准规律变化; 受到干扰后, 由于干扰信号很强, 双通道复图像相位差主要服从干扰信号的相位差, 沿距离几乎不发生变化。图 2(c) 给出了干扰抑制处理后的雷达图像, 可以看到覆盖在目标图像上的大量干扰被有效抑制; 但在抑制干扰的同时目标图像出现部分明暗干涉条纹。

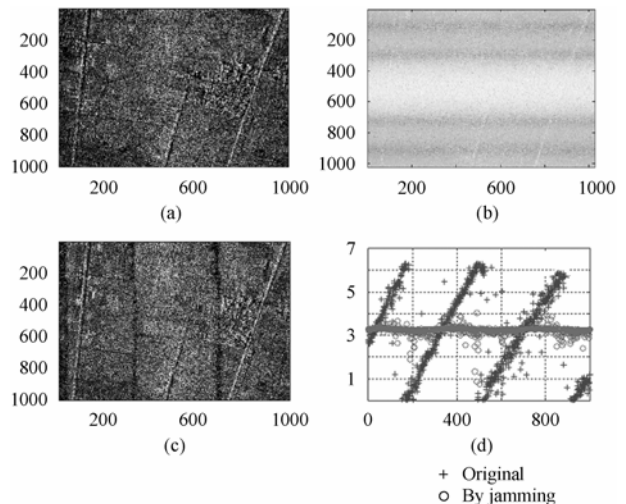


图 2 干扰抑制仿真

- (a) 未受干扰的雷达图像 (b) 受到干扰的雷达图像
(c) 抑制干扰的雷达图像 (d) 受干扰前后干涉相位图剖面
Fig.2 Simulation of suppressing the active jamming
(a) Radar image without jamming (b) Radar image with jamming
(c) Radar image after suppressing the jamming
(d) One line of the interferometric phase graph

图 3 给出了一组对欺骗干扰抑制的仿真结果。图 3(a)仍是未受到干扰的 InSAR 任一通道的二维雷达图像。图3(b)是目标区叠加了欺骗干扰后的图像，欺骗干扰由不同大小、不同强度的亮点和亮斑组成；仿真中欺骗干扰覆盖区域的干信比为 0dB，该区域的总功率比周围环境略高；为了表示欺骗干扰的连续性，仿真中假设干扰信号已经补偿了天线方向图的作用。图 3(d)是严格按照 InSAR 的处理算法获得的干涉相位图，它反映受到欺骗干扰前后的双通道干涉相位图沿距离向的变化；可以看到，受到干扰后在干扰区域的干涉相位图与未受干扰时相比发生了变化，在二维相位差图中可以更明显地观察这一变化；双通道干涉相位图中局部区域的畸变，可以作为识别欺骗干扰的重要依据。图 3(c)是抑制欺骗干扰后的雷达图像；对比图 3(a)和图 3(b)可以看到，雷达图像中的欺骗干扰被抑制；同样图像中也出现了一些明暗条纹。

抑制干扰的仿真实验表明，利用 InSAR 双通道复图像信号提供的信息，有可能识别雷达图像中的欺骗干扰，通过对 InSAR 双通道复图像信号进行相位加权处理，有可能对雷达图像中的干扰信号进行有效抑制。

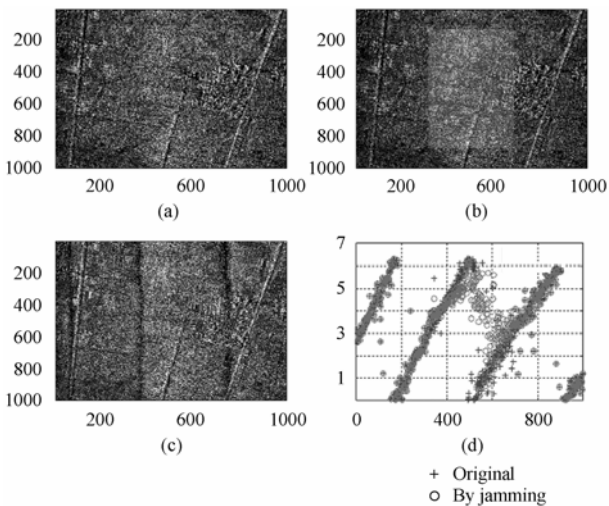


图 3 有源欺骗干扰抑制仿真

(a) 未受干扰的雷达图像 (b) 受到欺骗干扰的雷达图像
 (c) 抑制干扰的雷达图像 (d) 受干扰前后干涉相位剖面

Fig.3 Simulation of suppressing the active deception jamming

(a) Radar image without jamming
 (b) Radar image with deception jamming
 (c) Radar image after suppressing the jamming
 (d) One line of the interferometric phase graph

5 抑制处理对雷达图像的影响分析

采用相消处理的方法，可以抑制雷达图像中的欺骗干扰信号。但与此同时目标场景的雷达图像也会受到一定影响，包括图像的幅度和相位。影响雷达图像的主要原因在于，抑制干扰的全部处理过程同样施加于目标信号，致使处理形成的雷达图像被 $1 - \exp(id\phi_j - id\phi_t)$ 因子调制。具体地：

(1) 双通道目标复图像相位差满足 $(2n - 1/3)\pi < (d\phi_t - d\phi_j) < (2n + 1/3)\pi$ 的所有目标图像幅度被减弱，满足 $(d\phi_t - d\phi_j) = 2n\pi$ 的目标图像被完全滤除。相位差满足 $(2n + 1/3)\pi$

$< (d\phi_t - d\phi_j) < (2n + 5/3)\pi$ 的所有目标图像幅度被增强，满足 $(d\phi_t - d\phi_j) = (2n + 1)\pi$ 的目标信号增强一倍。

(2) 双通道目标复图像相位差满足 $(2n + 1/2)\pi < (d\phi_t - d\phi_j) < (2n + 3/2)\pi$ 的单元中信噪比增强，满足 $(d\phi_t - d\phi_j) = (2n + 1)\pi$ 的单元信噪比提高 3dB；经干扰抑制的图像信噪比不降低的区域达到全部被干扰观测区域的一半。相位差满足 $(2n + 1/3)\pi < (d\phi_t - d\phi_j) < (2n + 1/2)\pi$ 或 $(2n + 3/2)\pi < (d\phi_t - d\phi_j) < (2n + 5/3)\pi$ 的单元信噪比最多下降 3dB；经干扰抑制的图像信噪比下降不超过 3dB 的区域达到全部被干扰观测区域的 2/3。当雷达图像遭受距离向小区域的欺骗干扰，可以从双通道复图像相位差图确定受干扰的区域，并只对这个干扰区域进行干扰抑制处理，这样整幅雷达图像受抑制处理影响的区域可以减小。

6 结束语

干涉式合成孔径雷达具有两部以上空间位置不同的天线，由地面固定干扰站发射进入不同天线的干扰信号形成的干涉相位图不同于地面目标的干涉相位图；这种区别可能成为识别有源干扰(特别是欺骗干扰)的依据。这与地面雷达中使用全向辅助天线来识别副瓣进入的欺骗干扰^[7]是不同的。

通过测量或图像相位差分析可以获得双通道干扰信号相位差，也可以使用逼近搜索的方法来获得双通道干扰信号相位差，具体地，就是在 $0 - 2\pi$ 的范围内搜索使两幅图像能够很好消去干扰时的该相位，在实际操作中可以根据干涉相位图缩小搜索范围、制定合理的搜索次序来提高搜索效率。对受干扰的双通道 InSAR 图像或原始数据进行处理，可以抑制雷达图像中的干扰；单过航的干涉合成孔径雷达不但可以获得观测区域的高程信息，也具有较好的抗干扰性能。

经过干扰抑制的雷达图像的相位信息发生变化，受干扰区域的高程信息会受影响。

致谢 感谢中国科学院电子学研究所向茂生研究员提供的 InSAR 观测数据和进行的有益讨论。

参考文献

- [1] W W G. Synthetic-Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Boston London: Artech House, 1993.
- [2] 胡东辉, 吴一戎, 王宏琦, 彭海良. 基于移相调制的合成孔径雷达虚假图像干扰. 雷达与对抗, 2002, (2): 1-5.
- [3] 吴一戎, 胡东辉. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法. 电子与信息学报, 2002, 24(11): 1664-1667.
- [4] 胡东辉, 吴一戎. 合成孔径雷达散射波干扰研究. 电子学报, 2002, 30(12): 1882-1884.
- [5] 王盛利, 余立, 倪晋麟, 张光义. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究. 电子学报, 2003, 31(12): 1900-1902.
- [6] Granham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. Proc. IEEE, 1974, 62(6): 763-768.
- [7] 奥古斯特·戈尔登 JR. 著, 总参谋部五十四所译. 雷达电子战 [M]. 1992.

唐 波: 男, 1978 年生, 博士生, 从事微波成像研究。
 王卫延: 男, 1947 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事电磁散射与逆散射、微波成像原理等研究。