

## 一种虚假大场景 SAR 快速转发式欺骗干扰方法研究

赵博\* 杨军 孙光才 周峰 保铮  
(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文提出一种适用于大场景的实时欺骗干扰算法, 该算法在对 SAR 欺骗干扰几何模型分析的基础上, 对大场景干扰图像模板进行分块并行调制, 从而保证了大场景欺骗干扰算法的实时性。根据 SAR 成像的距离聚焦深度与方位频率混叠的限制对欺骗干扰范围进行了分析, 为大场景欺骗干扰分块提供了理论依据, 并通过实时调整欺骗干扰子块聚焦中心使各个欺骗干扰子块都能够在敌方合成孔径雷达成像系统中得到较好的聚焦效果, 从而实现对合成孔径雷达的有效欺骗干扰。大场景欺骗干扰仿真试验结果验证了算法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 欺骗干扰; 实时处理; 干扰范围分析

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0963-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00501

## A Method of SAR Fast Repeater Deception Jamming for Large False Scene

Zhao Bo Yang Jun Sun Guang-cai Zhou Feng Bao Zheng  
(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on analyzing the geometric model of SAR deception-jamming, a real-time deception-jamming algorithm for large scene is proposed. For real-time jamming, a large scene is divided into several sub-blocks and modulated separately. An analysis of jamming range is done according to the depth of focus in range and ambiguity of frequency in azimuth, which provides theory foundation for blocking partition. By real-time adapting the focus-center of each sub-block, a good focusing image is obtained. Simulation results verify the effectiveness of this algorithm.

**Key words:** SAR; Deception-jamming; Real-time processing; Jamming range analysis

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天候、全天时、远距离、宽观测带和高分辨的优点<sup>[1]</sup>, 随着它在军事领域的应用越来越重要, 目前 SAR 的电子干扰和抗干扰已成为 SAR 和电子对抗领域的研究热点。SAR 的干扰技术可分为压制式干扰和欺骗式干扰。压制式干扰原理相对简单, 但对干扰机的功率要求很高。欺骗式干扰则是在侦察得到敌方 SAR 信号的中心频率、调频率、带宽等关键参数的基础上, 通过模拟雷达回波或者回波转发等方式对 SAR 系统进行干扰, 虽然干扰原理相对复杂且干扰效果很大程度上依赖于侦察系统的精度<sup>[2, 3]</sup>, 但对干扰机功率的要求就大大降低了<sup>[4-6]</sup>。SAR 欺骗式干扰使得敌方 SAR 系统获得的回波信号中包含欺骗信息, 从而使成像结果中出现虚假干扰场景, 达到“以假乱真”的干扰效果和对真实目标进行隐藏、保护的战术目

的。

文献[7]通过模拟 SAR 信号并延时转发来降低对干扰功率的需求, 但其本质上仍属于噪声压制干扰。文献[8]对散射波欺骗干扰(弹射干扰)方法进行了探讨, 但该方法实施必须以地面场景为调制模板, 存在一定的局限性。文献[9]研究了 SAR 欺骗式干扰的原理, 对干扰信号模型进行了分析, 并对干扰方法作了较深入的研究, 但是并未详细论述具体实现的问题。文献[10-12]研究了欺骗式干扰的实施方法, 并对算法的实时性进行了分析, 但这些方法对点目标的干扰比较有效, 对于面目标则不能满足实时性的要求。文献[13]实现了面目标的欺骗干扰, 但并未考虑 SAR 平台运动误差<sup>[14]</sup>。文献[15]采用距离频率——方位多普勒 2 维频域卷积的方法生成欺骗干扰, 但并未考虑距离弯曲差的影响, 且实现困难。文献[16]提出一种快速的实时欺骗干扰算法, 通过实时调制转发实现了虚假场景的欺骗干扰。该算法具有很好的实时性和很强的工程应用价值, 但该算法仅在一定范围内能够得到较好的聚焦图像, 当虚假场景目标偏离干扰机较远时, 成像结果

2011-05-25 收到, 2011-10-11 改回

教育部博士点基金(200807010002)资助课题

\*通信作者: 赵博 b\_zhao@126.com

会发生散焦,严重时甚至不能成像。文献[17]采用数据复用的方式实现方位向干扰范围的扩大,但该方法并未考虑运动误差的影响,且数据的重复大大降低了干扰的欺骗性。

本文采用距离向预先生成、方位向实时调制的方法快速实现对 SAR 的欺骗干扰,方位向干扰数据的实时产生能够很好地包含载机平台的运动误差信息。针对文献[16]算法在产生远距离欺骗干扰时发生散焦的情况,提出了聚焦中心的概念,并依据聚焦深度和方位混叠的限制,通过调整场景聚焦中心从而实现大范围场景的欺骗干扰。为解决大场景条件下产生干扰数据运算量过大的问题,提出了分块并行处理的方法保证干扰的实时性。

## 2 SAR 欺骗干扰算法

如图 1 所示,以干扰机为  $O$  点,以平行于 SAR 平台理想航线的方向为  $x$  轴(方位向),垂直航线的方向为  $y$  轴(距离向),建立坐标系。 $(x, y)$  是干扰机产生的虚假场景的某一点。SAR 系统工作在正侧视模式下,载机平台的真实速度为  $v(t_m)$ ,理想速度为  $v$ ,  $t_m$  为慢时间。合成孔径长度为  $L$ 。

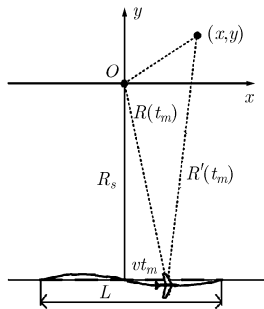


图 1 欺骗干扰几何关系

图中实线为载机平台运动的实际轨迹,虚线所示为理想轨迹。若用  $R(t_m)$  表示载机平台与干扰机的瞬时斜距,  $R'(t_m)$  表示载机平台到虚假场景点的瞬时斜距,根据 SAR 系统的几何关系,二者可分别表示为

$$R(t_m) = \sqrt{R_s^2 + [v(t_m)t_m]^2} \quad (1)$$

$$R'(t_m) = \sqrt{(R_s + y)^2 + [x - v(t_m)t_m]^2} \quad (2)$$

对式(2)进行泰勒级数展开,并考虑到  $R_s \gg v(t_m)t_m$ ,  $(-L/(2v) \leq t_m \leq L/(2v))$ ,  $R_s \gg x$ ,  $R_s \gg y$ ,  $R'(t_m)$  可近似为

$$R''(t_m) \approx R_s + y + \frac{x^2}{2R_s} - \frac{xv(t_m)t_m}{R_s} + \frac{[v(t_m)]^2 t_m^2}{2R_s} = R(t_m) + \Delta R(t_m) \quad (3)$$

其中  $\Delta R(t_m) = y + x^2/(2R_s) - xv(t_m)t_m/R_s$ 。

为了达到欺骗干扰的目的,  $O$  点处干扰机产生的虚假干扰点的瞬时斜距须和真实点  $(x, y)$  的瞬时斜距基本相等。由于到载机斜距不同的目标点回波信号的延时量也不同,根据式(3),虚假干扰点的回波信号可以通过对干扰机截获的信号进行延时而获得<sup>[16]</sup>。

则对于点  $(x, y)$  处的虚假场景点的回波信号为

$$s'(\hat{t}, t_m) = s(\hat{t}, t_m) \otimes \sigma(x, y) \delta\left(t - \frac{2\Delta R(t_m)}{c}\right) \quad (4)$$

式中  $\otimes$  表示卷积,  $t = \hat{t} + t_m$  为全时间,  $\hat{t}$  为快时间,  $\sigma(x, y)$  表示  $(x, y)$  处的虚假场景点的散射系数,  $s(\hat{t}, t_m)$  表示干扰机处的回波信号。为了实时地处理虚假场景点信号,采用了虚假场景的两步生成方法<sup>[16]</sup>。虚假场景的回波可以看作目标点相对于干扰机回波的延时,并且该时延可以分为两部分,即与慢时间相关项和与慢时间无关项。

为了提高虚假数据产生的快速性和精确性,通常利用 FFT 变换在频域乘以线性相位来完成时域的时延,将式(4)对快时间做傅里叶变换,得到频域表达式为

$$s'_r(f_r, t_m) = s_r(f_r, t_m) \sum_x \exp\left\{j2\pi f_r \frac{2xv(t_m)t_m}{cR_s}\right\} \cdot \sum_y \sigma(x, y) \exp\left\{-j2\pi f_r \left[\frac{2y}{c} + \frac{x^2}{cR_s}\right]\right\} \quad (5)$$

式(5)是实时信号生成分两步的基础,虚假场景的调制信号(延时信号)的后半部分和慢时间及雷达平台的运动参数无关,它由虚假目标点相对于干扰机的位置和相对场景中心的距离所决定,因此在实施干扰时,该信号可以预先生成。而前半部分的延时信号与慢时间及雷达平台的速度有关,因此在实施干扰时,该信号需要实时生成。

而且我们注意到,实时生成的延时信号仅与方位位置有关,因此在进行干扰时,对于预先生成的部分延时量可以进行距离向的叠加,即对不同距离位置干扰点的延时量进行叠加,从而减少了数据量。而仅与方位位置有关的实时生成部分也可在实时产生后进行方位向的叠加,这样就将虚假面目标内的所有点的延时合并至一个延时信号中,因此每段  $1/\text{PRF}$  的时间内,只需完成一次延时转发即可。

## 3 大场景 SAR 欺骗干扰算法

在 SAR 成像的过程中,目标点的聚焦情况将直接影响成像的质量。SAR 图像的距离-方位 2 维高分辨率是通过匹配滤波获得的。同时,当匹配滤波器不精确时,会发生滤波器失配的情况,从而造成目

标点的散焦<sup>[18]</sup>, 严重时甚至无法成像, 这也是在进行欺骗干扰时不容忽视的问题。

在用以描述线性调频信号匹配滤波器的 3 个参数(持续时间、中心频率、调频率)中, 调频率的误差对成像质量的影响最严重<sup>[19]</sup>。以下将针对该参数进行分析。

欺骗干扰采用“接收→调制→转发”的工作方式, 即干扰机接收 SAR 系统发射的线性调频信号, 对其进行实时延时调制并转发。以上操作并不会影响信号的调频率, 因此欺骗干扰信号在距离向的调频率是精确的, 在成像时不会造成散焦。

由于目标与雷达平台之间存在着相对运动, 多普勒相位为线性调频信号<sup>[1]</sup>, 其调频率表达式为

$$\gamma_m(R_0) = -\frac{2}{\lambda} \frac{d^2 R}{dt_m^2} = -\frac{2V^2}{\lambda R_B} \quad (6)$$

其中  $\lambda$  为信号波长,  $V$  为载机平台飞行速度,  $R_B$  为虚假目标点到航线的垂直距离。

在式(3)中由于  $R_s \gg y$ , 即  $R_B = R_s + y \approx R_s$ , 这一近似会使得  $\gamma_m$  存在  $-(2V^2/\lambda)(y/(R_s + y)R_s)$  的误差。当  $y$  较小, 即虚假目标点在距离向偏离干扰机较近时,  $\gamma_m$  的误差  $\Delta\gamma_m$  可以忽略。随着  $y$  的增大,  $R_s \gg y$  的近似条件不再满足, 而多普勒调频率的误差也将逐渐增大从而不能被忽略, 这将造成匹配滤波器的失配, 出现明显的方位向散焦的现象。对其进行定量分析, 根据聚焦深度定义, 方位向不发生散焦的条件<sup>[1]</sup>为

$$|y| < \frac{\lambda R_s^2}{2(T_a v)^2} \quad (7)$$

其中  $T_a$  为合成孔径时间。当  $y$  满足式(7)条件时, 成像结果在方位向不发生散焦。

因此, 为解决成像结果方位向的散焦问题, 则需要考虑  $y$  的影响, 即  $R_s \gg y$  的条件不再适用。重新对式(2)进行近似得

$$R''(t_m) \approx R(t_m) + y + \frac{x^2}{2(R_s + y)} - \frac{xv(t_m)t_m}{(R_s + y)} + \frac{[v(t_m)]^2 t_m^2}{2} \left( \frac{1}{(R_s + y)} - \frac{1}{R_s} \right) \quad (8)$$

即

$$R''(t_m) - R(t_m) = y + \frac{x^2}{2(R_s + y)} - \frac{xv(t_m)t_m}{(R_s + y)} + \frac{[v(t_m)]^2 t_m^2}{2} \left( \frac{1}{(R_s + y)} - \frac{1}{R_s} \right) \quad (9)$$

其中前两项为距离延时项, 可以预先生成, 并不影响算法的实时性。实时调制项修正为  $-\frac{xv(t_m)t_m}{(R_s + y)}$

$+ \frac{[v(t_m)]^2 t_m^2}{2} \left( \frac{1}{(R_s + y)} - \frac{1}{R_s} \right)$ 。因此, 修正后的式(5)

可写为

$$s'_r(f_r, t_m) = s_r(f_r, t_m) \cdot \sum_{xy} \sigma(x, y) \exp \left\{ -j2\pi f_r \left( \frac{2y}{c} + \frac{x^2}{c(R_s + y)} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ j2\pi f_r \left( \frac{2xv(t_m)t_m}{c(R_s + y)} - \frac{[v(t_m)]^2 t_m^2}{c} \left( \frac{1}{(R_s + y)} - \frac{1}{R_s} \right) \right) \right\} \quad (10)$$

需要注意的是, 此时的实时生成项已不仅仅与  $x$  有关, 还与  $y$  有关, 不能再对预先生成部分进行距离向的求和, 必须在实时调制后进行距离和方位向的 2 维求和。这将大大增加欺骗干扰算法的运算量, 降低算法的实时性。以  $M \times N$  的场景为例, 原算法只需要  $N$  次列信号乘法和一次延时性卷积<sup>[6]</sup>, 而修正后的算法则需进行  $M \times N$  次列信号的乘法和一次延时性卷积, 这样会使算法的实时性大大降低, 严重时甚至不能够满足实时转发的要求。且由于 2 维耦合, 预先生成部分不能在距离向预先求和, 从而使存储预先生成数据的存储空间由  $nrm \times N$  变为  $(nrm \times M) \times N$ , 大大增加了 ROM 空间的需求, 增加了设备的成本。

我们注意到, 当虚假场景的边缘点距离中心点的距离向偏移在一定范围内, 即  $y$  较小时,  $\gamma_m$  的误差可以忽略, 成像结果散焦现象并不严重。故对一定范围内的虚假场景, 只需调整参数使虚假场景的中心能够准确聚焦, 即可保证该区域内的虚假点都能够较好地聚焦。因此, 定义  $y_c$  为虚假场景中心的距离向偏移量, 则式(10)的  $y$  可用  $y_c$  替代。对于某一虚假场景, 其中心相对于干扰机的距离偏移量  $y_c$  为常量, 由此便将  $y$  替换为常数  $y_c$ , 从而将式(10)调整为

$$s'_r(f_r, t_m) = s_r(f_r, t_m) \sum_x \exp \left\{ j2\pi f_r \left( \frac{2xv(t_m)t_m}{c(R_s + y_c)} - \frac{[v(t_m)]^2 t_m^2}{c} \left( \frac{1}{(R_s + y_c)} - \frac{1}{R_s} \right) \right) \right\} \cdot \sum_y \sigma(x, y) \exp \left\{ -j2\pi f_r \left( \frac{2y}{c} + \frac{x^2}{c(R_s + y)} \right) \right\} \quad (11)$$

此时的实时产生延时项仍然仅与  $x$  有关, 可以进行 2 维的分维处理, 以  $M \times N$  的场景为例, 仍然

只需要  $N$  次列信号乘法和一次延时性卷积，实时运算量不变，从而保证了算法的实时性。

该算法将虚假场景的聚焦中心由于干扰机  $(0,0)$  调整至  $(0, y_c)$ ，使得虚假场景偏离干扰机较远时仍然能够很好的聚焦，从而扩大了欺骗干扰的范围。此时欺骗干扰的实时运算量和预先生成部分的存储量仍与原算法相同，但此时的虚假场景是以  $(0, y_c)$  为中心呈现散焦，即可以通过调整  $y_c$  的值将虚假场景置于距干扰机较远的位置，而不再局限于干扰机附近，并且该干扰算法支持并行计算，其实时性较强。

### 4 干扰范围分析

距离向干扰范围由式(7)根据聚焦深度的限制给出。方位向欺骗干扰的范围由 SAR 系统的脉冲重复频率(PRF)决定。理想虚假点目标与欺骗干扰信号在多普勒域的斜距历程分别如图 2(a)和图 2(b)所示(多普勒频率的计算采用小角度近似，即  $\sin \theta \approx \theta$ )。

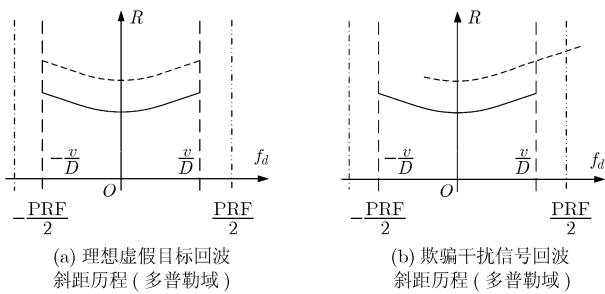


图2 欺骗干扰信号斜距历程示意图

由图可知，理想的虚假点目标的斜距历程在多普勒域的分布区间为  $(-v/D, v/D)$ ，与干扰机截获的 SAR 信号相同，如图 2(a)所示；而欺骗干扰产生的虚假回波虽然可以同理想的虚假点目标回波斜距历程部分重合，但在多普勒域的分布区间为  $(2v(-L/2 + x)/(\lambda R_s), 2v(L/2 + x)/(\lambda R_s))$ 。根据奈奎斯特采样定律，当该区间不包含于区间  $(-PRF/2, PRF/2)$  时，将发生多普勒模糊，在方位向产生虚像，影响成像

质量。综上， $x$  需满足式(12)：

$$|x| \leq \frac{\lambda \cdot PRF}{4v} R_s - \frac{L}{2} \quad (12)$$

由于实际成像时会进行加窗处理以压低副瓣，故实际的多普勒分布区间可以扩展为  $\left[-\frac{PRF}{2} - \left(\frac{PRF}{2} - \frac{v}{D}\right), \frac{PRF}{2} + \left(\frac{PRF}{2} - \frac{v}{D}\right)\right]$ ，即  $(-PRF + v/D, PRF - v/D)$ ，示意图如图 3 所示。从而可以求得实际可进行欺骗干扰的方位范围为

$$|x| \leq \frac{\lambda R_s (PRF - v/D)}{2v} - \frac{L}{2} \quad (13)$$

### 5 仿真结果及分析

由第 3 节中的理论分析可以知道，虚假目标成像时发生的散焦主要是由于距离向偏离干扰机造成的，而本文的大场景欺骗干扰算法通过调整虚假目标的聚焦中心很好地解决了这一问题。通过对大场景图像模板进行分块处理，用大场景欺骗干扰算法对子图像模板进行并行处理得到欺骗干扰数据。通过调整每一块场景的  $y_c$ ，使得这些回波数据都能够很好地聚焦。将不同块的欺骗干扰数据进行叠加即可获得大场景的欺骗干扰数据。

利用上述方法对某次机载 SAR 数据进行仿真处理，雷达工作在 X 波段，信号带宽为 180 MHz，脉冲重复频率 1.7 kHz，天线相位中心到场景中心的斜距为 10500 m，距离向为 2048 点，方位向为 1024 点，SAR 系统工作模式为正侧视，分辨率为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。大场欺骗干扰图像模板约为  $2 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  ( $2048 \times 1024$  点)。根据上述参数可以求得当  $|y| \leq 128 \text{ m}$  时可以满足聚焦深度的要求，因此将干扰场景模板沿距离向以 256 m 为单位进行分块。由式(13)可知方位向的干扰范围为  $|x| \leq 928 \text{ m}$ ，可见该场景方位向不需要分块即可满足要求。但考虑到计算效率，在距离向也以 256 m 为单位进行分块，以便进行并行运算。这样将干扰场景模板分为 32 个  $256 \times 256$  的子图像模板，根据实时侦察得到的载机速度等参数，利用式(10)对各子块进行并行

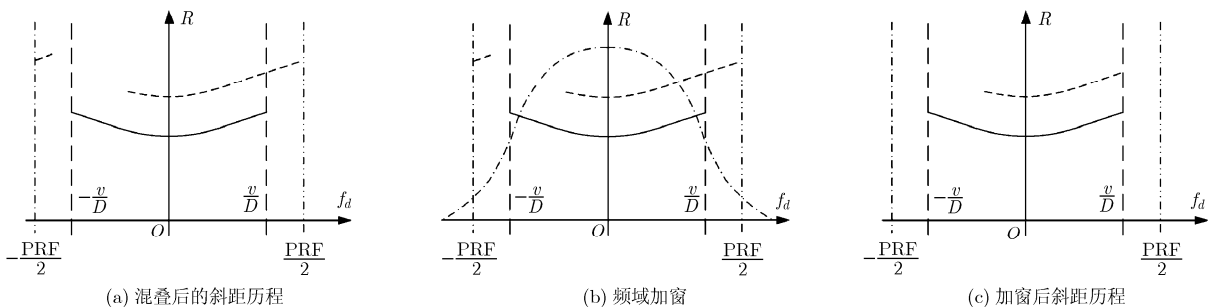


图3 频域加窗示意图

运算生成干扰数据，并实时转发欺骗干扰，与原始 SAR 回波叠加形成存在欺骗干扰的 SAR 数据。由于机载雷达存在运动误差，利用基于瞬时调频率估计的运动补偿方法对 SAR 回波数据进行包络和相位补偿，并通过 CS 算法进行成像。

图 4(a)所示为无干扰的真实场景成像结果，图 4(b)所示为用于进行欺骗干扰的虚假场景，图 4(c)所示为存在欺骗干扰的 SAR 数据成像结果。比较图 4(a)和图 4(c)，虚假场景能够很好地聚焦并覆盖真实场景，从而达到良好的欺骗干扰效果。

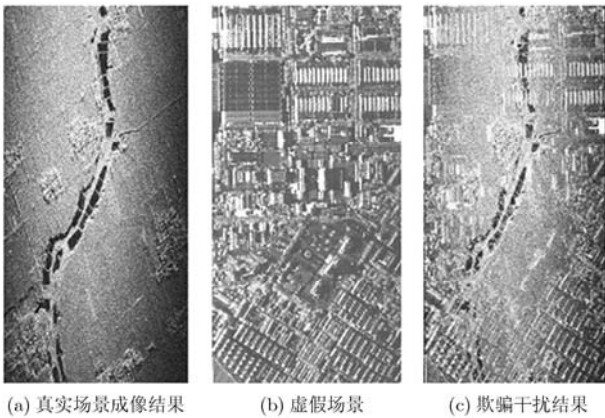


图 4 真实场景欺骗干扰

图 5 为图 4 场景局部放大比较的结果。图 5(a)中的真实场景为村庄，图 5(b)中欺骗干扰后的村庄

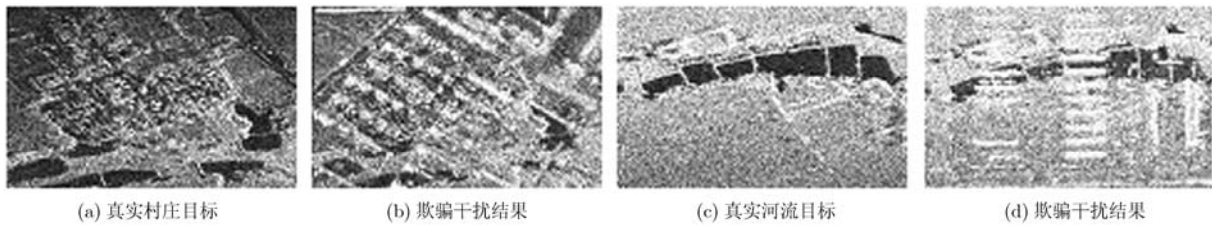


图 5 欺骗干扰局部放大

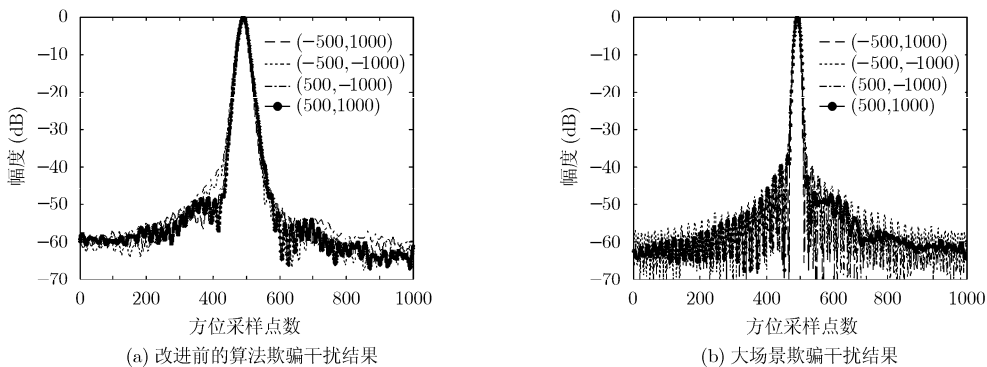


图 6 虚假场景边缘点欺骗干扰结果

已经基本上被虚假的城镇覆盖。同样，图 5(c)中的河流也被图 5(d)中的虚假建筑覆盖，达到了“以假乱真”的欺骗干扰目的。

图 6 将第 2 节欺骗干扰算法的干扰结果与本文提出的大场景欺骗干扰算法的干扰结果进行了比较。对虚假场景的 4 个角进行欺骗干扰，将结果进行比较分析。根据第 3 节分析，散焦主要发生在方位向，故画出各虚假目标点的方位剖面图。由图可以看出，本文的 SAR 欺骗干扰算法在大场景干扰应用中具有良好的聚焦效果，而原欺骗干扰算法的聚焦后主瓣宽度约为本文算法的 1.6 倍，从而验证本算法的有效性。

### 6 结束语

本文采用调整欺骗干扰虚假场景聚焦中心的方法，解决了干扰场景距离干扰机较远时发生散焦的问题，并通过分析聚焦深度、方位频率采样不混叠等要求，对算法的适用范围进行了探讨。分块并行处理为大场景欺骗干扰的实时实现提供了可行的思路。文中对该方法进行了仿真并获得了较好的干扰效果。

在实际实施干扰时，若能够根据真实场景结构对虚假干扰模板进行设计，使虚假场景与真实场景较好地融合，会取得更佳的结果。

## 参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006, 第5章.  
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006, Chapter 5.
- [2] 黎鑫, 高波, 许心瑜. 星载 SAR 高度误差对欺骗性干扰效果的影响[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 54-56, 76.  
Li Xin, Gao Bo, and Xu Xin-yu. Influence of spaceborne SAR orbit altitude error on jamming effect[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(5): 54-56, 76.
- [3] 陈德峰, 高梅国, 傅雄军, 等. 参数侦测误差对 SAR 欺骗干扰的影响[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(7): 639-643.  
Chen De-feng, Gao Mei-guo, Fu Xiong-jun, et al. Effect of parameters tecton error to SAR deception jamming[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(7): 639-643.
- [4] Dumper K, Cooper P S, Wons A F, et al. Space-borne synthetic aperture radar and noise jamming [C]. Radar 97, October 14-16, 1997: 411-414.
- [5] 赵国庆. 雷达对抗原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999, 第7章.  
Zhao Guo-qing. Radar Counterwork Theory[M]. Xi'an: Publishing House of Xidian University, 1999, Chapter 7.
- [6] 邓云凯, 郑远, 胡英辉. 合成孔径雷达转发式干扰分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 69-73.  
Deng Yun-kai, Zheng Yuan, and Hu Ying-hui. Analysis of synthetic aperture radar repeater jamming[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 69-73.
- [7] Huang Hong-xu, Zhou Yi-yu, Jiang Wen-li, et al. A new time-delay echo jamming style to SAR [C]. International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), Dalian, 2010: 14-17.
- [8] 李涛. SAR 欺骗式干扰方法研究[D]. [硕士论文], 中国科学技术大学, 2007.  
Li Tao. Study on SAR deceptive jamming method [D]. [Master dissertation], China Science Technology University, 2007.
- [9] 王盛利, 于立, 倪晋麟, 等. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰方法研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1900-1902.  
Wang Sheng-li, Yu Li, Ni Jin-lin, et al. Study on synthetic aperture radar active deceptive jamming method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 1900-1902.
- [10] 代大海, 王雪松, 肖顺平. SAR 有源假目标欺骗干扰实施方案研究[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(1): 24-27.  
Dai Da-hai, Wang Xue-song, and Xiao Shun-ping. Implementary schemes of SAR active-decoy jamming[J]. *Aerospace Electronic warfare*, 2007, 23(1): 24-27.
- [11] 甘荣兵, 王建国. 对 SAR 的几何目标欺骗干扰的快速算法[J]. 现代雷达, 2006, 28(2): 40-42, 73.  
Gan Rong-bing and Wang Jian-guo. Fast generation algorithm of geometric target deceive jamming signal to SAR[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(2): 40-42, 73.
- [12] 王迪, 王恩宏, 雷武虎. SAR 欺骗式干扰信号生成与实时性研究[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(1): 30-33.  
Wang Di, Wang En-hong, and Lei Wu-hu. Generation and real-time require of deceive jamming signal against SAR[J]. *Aerospace Electronic warfare*, 2007, 23(1): 30-33.
- [13] 许宝民, 郑光勇, 李宏. 合成孔径雷达有源欺骗干扰仿真分析[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(3): 84-87.  
Xu Bao-min, Zheng Guang-yong, and Li Hong. Simulation research on active deceptive jamming to SAR[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2010, 29(3): 84-87.
- [14] 任三孩, 常文革. 机载 SAR 图像方位向几何畸变研究[J]. 信号处理, 2010, 26(5): 759-765.  
Ren San-hai and Cheng Wen-ge. The research on azimuth geometric distortion of airborne SAR image[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(5): 759-765.
- [15] Sun Long, Zhang Hong-rong, Tang Yue-sheng, et al. Rsearch on deceptive jamming technologies against SAR [C]. APSAR 2009, Xi'an, 2009: 521-525.
- [16] 孙光才, 周峰, 邢孟道, 等. 虚假场景 SAR 欺骗式干扰技术及实时性分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 813-818.  
Sun Guang-cai, Zhou Feng, Xing Meng-dao, et al. Deception-jamming technology against SAR based on deceptive scene and real-time analyses[J]. *Journal of Xiadian University*, 2009, 36(5): 813-818.
- [17] 罗申, 李东生. 一种数据复用的 SAR 欺骗干扰方法研究[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(3): 52-54.  
Luo Shen and Li Dong-sheng. Study on pipeline based SAR jamming framework[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2010, 26(3): 52-54.
- [18] 彭锐晖, 王树宗, 吕永胜, 等. SAR 有源欺骗式干扰模型研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(4): 104-108.  
Peng Rui-hui, Wang Shu-zong, Lü Yong-sheng, et al. Active deception jamming model against SAR[J]. *Modern Defence Technology*, 2009, 37(4): 104-108.
- [19] Gumming I G and Wong F H 著, 洪文, 胡东辉, 等译. 合成孔径雷达数据的数字处理: 算法和实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 10.
- 赵 博: 男, 1986 年生, 硕博连读生, 研究方向为雷达成像.  
杨 军: 男, 1984 年生, 硕博连读生, 研究方向为雷达成像.  
孙光才: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像、动目标检测成像、干扰及其抑制等.  
周 峰: 男, 1980 年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为雷达成像和雷达对抗.  
保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 研究领域为雷达信号处理和现代信号处理等.