

改进的对星载SAR的应答式欺骗干扰

甘荣兵, 王建国

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】分析了对星载SAR的应答式欺骗干扰, 并对其进行了改进。改进后的干扰方式只需从敌方雷达信号中估计信号的多普勒斜率、雷达飞行速度和脉冲重复频率, 并且实现简单。讨论了参数估计精度对干扰信号成像的影响, 结果表明该方法对参数精度要求不高。指出了多普勒斜率估计的方法, 通过仿真实验验证了理论分析的正确性和方法的有效性, 这对欺骗干扰信号生成算法和欺骗干扰的实现具有重要意义。

关键词 合成孔径雷达; 电子对抗; 欺骗干扰; 多普勒频率

中图分类号 TN972.32; TN958 **文献标识码** A

Improvement of the Responsive Deception for Spaceborne SAR

GAN Rong-bing, WANG Jian-guo

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The responsive deception for spaceborne SAR is studied and improved. The algorithm is got by analyzing the range domain and cross-range domain respectively. This algorithm provides high precision compress of cheat targets. And merely need the estimation of few radar parameters as: Doppler frequency rate from the echoes, radar velocity and radar pulse repeat frequency. The demand of the precision of parameters is analyzed and the result shows that the request is little. The method of the estimation of Doppler frequency rate is worked out. The correctness of theoretic analyze and the validity of the algorithm are proved by computer simulation. The algorithm is of good signification for the theory and the practice of jamming signal production.

Key words synthetic aperture radar; electronic countermeasures; cheat jamming; Doppler frequency

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)对于军事和民用都具有重要意义。研究合成孔径雷达的干扰和抗干扰已成为电子对抗领域的重要课题之一。文献[1]分析了对合成孔径雷达的各种可能的干扰方式。文献[2]分析了噪声干扰的SAR图像特征和噪声干扰对点目标的影响。文献[3]对噪声干扰作了研究, 分析了SAR干扰对雷达方程的影响。文献[4]分析了噪声干扰, 在主瓣和旁瓣干扰的情况作了分析, 得到了一些结果, 对SAR的欺骗式干扰已经有了一些研究。文献[5]研究了星载SAR的应答式欺骗干扰, 通过分析回波中多普勒频移和多普勒调频率, 计算出干扰机相应的干扰信号。该方法能很好地解决距离向压缩和方位向压缩的问题, 然而它需要确知敌方雷达的载频、雷达飞行速度、斜距等物理量, 实现的难度较大, 它没有指出欺骗目标的距离定位的问题。文献[6]研究了对SAR的欺骗式干扰, 对干扰方法作了较深的研究, 但是并未解决具体实现的问题。本文对该应答式欺骗干扰作了改进, 对参数误差造成的干扰效果进行了定量分析, 通过仿真实验证实了方法的有效性。

收稿日期: 2004-09-20

作者简介: 甘荣兵(1975-), 男, 博士生, 主要从事雷达信号处理和电子对抗方面的研究。

1 干扰模型

雷达、干扰机、虚假目标空间模型如图1所示。干扰机接收SAR发射的信号,通过调制再发射回SAR。使SAR接收到干扰信号与虚假目标处散射到SAR的信号在SAR的成像处理后的图像上具有相同的位置,就可以达到在指定位置产生虚假目标的目的。

1.1 信号分析

设SAR发射线性调频信号 $p(t) = a(t) \exp(j\beta t + j\alpha t^2)$, 其傅里叶变换为 $P(\omega)$ 。干扰机接收到敌方雷达信号,进行处理,最后发射出去。若干扰机的系统相应为 $H(\omega)$, 则雷达接收到的干扰信号频谱:

$$S_j(\omega) = P(\omega)H(\omega)\exp(j\omega 2R_j/c) \tag{1}$$

欺骗目标处的回波应具有的信号形式为:

$$s_i(t) = p(t - 2R_i/c) \tag{2}$$

其傅里叶变换为:

$$S_i(\omega) = P(\omega)\exp(j\omega 2R_i/c) \tag{3}$$

为使干扰信号与欺骗目标信号具有相同的信号,干扰机的系统相应为:

$$H(\omega) = \sigma \exp[j\omega 2(R_i - R_j)/c] = \sigma \exp(j\omega \tau_j) \tag{4}$$

式中 $\tau_j = 2(R_i - R_j)/c$ 。可见,只要准确计算出 τ_j 就能产生准确的干扰信号,然而这是非常困难的。因为:(1) 要准确计算 τ_j 必须准确知道雷达的位置,这是不可能的;(2) τ_j 随雷达的位置变化而变化,对每个脉冲必须重新计算 τ_j 的值,这是实时处理不允许的。因此必须考虑其他处理方法。

1.2 干扰信号的产生

在干扰机到雷达距离与虚假目标到雷达距离近似相等的情况下,干扰信号和目标信号的距离徙动曲线为^[7]:

$$R_j(s) \approx [R_{jc} + \frac{\lambda f_{Dc} s_{jc}}{2} - \frac{\lambda f_R s_{jc}^2}{4}] + [-\frac{\lambda f_{Dc}}{2} + \frac{\lambda f_R s_{jc}}{2}]s - \frac{\lambda f_R}{4} s^2 \tag{5}$$

$$R_i(s) \approx [R_{ic} + \frac{\lambda f_{Dc} s_{ic}}{2} - \frac{\lambda f_R s_{ic}^2}{4}] + [-\frac{\lambda f_{Dc}}{2} + \frac{\lambda f_R s_{ic}}{2}]s - \frac{\lambda f_R}{4} s^2 \tag{6}$$

式中 f_{Dc} 为多普勒质心, f_R 为多普勒斜率。将式(5)、(6)带入式(4)得到:

$$H(\omega) = \sigma \exp[2\pi f_{Dc}(s_{ic} - s_{jc}) - \pi f_R(s_{ic}^2 - s_{jc}^2)] \exp[j\omega 2(R_{ic} - R_{jc})/c] \exp[2\pi f_R(s_{ic} - s_{jc})s] \tag{7}$$

式中 第1个指数项是常数项,对成像结果无影响,可以忽略,第2个指数项的作用是将信号作延时 τ_j , 第3个指数项是方位压缩必需的项。因此此系统的作用是将信号延时 τ_j 再乘以相位 $g(s)$ 和散射系数 σ 。

$$\tau_j = 2(R_{ic} - R_{jc})/c = 2x_{ji}/c \sin(\theta) \tag{8}$$

$$g(s) = \exp[-j2\pi f_R(s_{ic} - s_{jc})s] = \exp[-j2\pi f_R(y_{ji}/V_s)s] \tag{9}$$

式中 $y_{ji} = V_s(s_{ic} - s_{jc})$ 是干扰机与欺骗目标的方位距离。要得到式(9)给出的相位项,必需的参数是卫星速度 V_s 、雷达脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)、多普勒斜率。合成孔径雷达卫星的速度在5000m/s左右,在估计速度的过程中可能存在偏差,从后面的分析可以知道,本算法对速度的精度要求不高。雷达PRF可以通过接收敌方雷达脉冲间隔得到,并且可以保证较高精度。多普勒斜率的估计可以通过接收敌方雷达信号,从信号的分析中提取多普勒斜率。

1.3 多普勒斜率的估计

合成孔径雷达的多普勒斜率估计已经有成熟的技术^[8],本文中的多普勒斜率估计是干扰机接收敌方合成孔径雷达信号后进行的估计,其多普勒效应是单程的,而合成孔径雷达自身的多普勒斜率是双程的,存在一个2倍的关系。但是传统的多普勒斜率估计的方法可以借鉴,首先接收敌方雷达的 N 个脉冲信号,然后对方位作快速傅里叶变换,得到这段时间的多普勒带宽 B_d ,然后再除以时间长度。计算公式为:

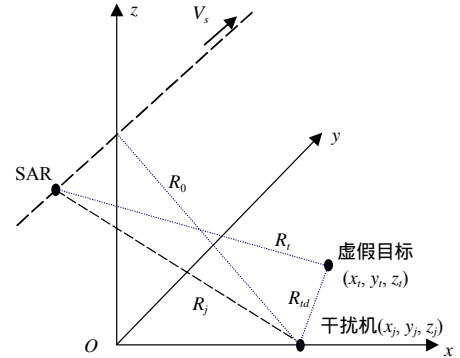


图1 干扰空间区域模型图

$$f_R = B_d / (N PRT) \quad (10)$$

因此产生干扰信号的过程是：(1) 干扰机侦收敌方雷达信号，估计敌方雷达的位置、信号载频、脉冲重复频率、飞行速度。(2) 信号处理机将信号作一延迟，然后再乘以式(9)给出的相位。(3) 将调制后的信号发射出去。

2 参数精度需求分析

从干扰目标信号的生成方式可知，产生欺骗目标的各个参数仅影响为了欺骗目标的位置精度，而不影响欺骗目标信号在成像处理过程中的压缩效果。距离成像精度只与对敌方雷达信号的到达角有关，本文只重点分析方位定向精度。

将式(9)中各个参数加上盖帽，表示估计值，然后将式(5)、(7)带入式(1)，再作傅里叶反变换，去载频变

到基带后与方位有关的项为 $\exp\{j\pi f_R [s - \frac{\hat{f}_R}{f_R} \frac{y_{jt}}{\hat{V}_s} - s_{jc}]^2\}$ 。因此成像后的方位位置为：

$$\hat{y}_t = \frac{\hat{f}_R}{f_R} \frac{V_s}{\hat{V}_s} y_{jt} + s_{jc} V_s = \frac{\hat{f}_R}{f_R} \frac{V_s}{\hat{V}_s} y_{jt} + y_j \quad (11)$$

式中 y_{jt} 为干扰机与欺骗目标在方位上的期望距离； y_j 为干扰机的方位位置。二者之和为欺骗目标的方位位置。欺骗目标在方位上的误差：

$$\Delta y_t = (\frac{V_s}{\hat{V}_s} \frac{\hat{f}_R}{f_R} - 1) y_{jt} \quad (12)$$

2.1 卫星速度

从前面的分析可知，干扰机发射信号时延与卫星速度无关，因此卫星速度的估计误差对欺骗目标的距离向位置无关。从式(12)可以看出，欺骗目标的方位位置精度与卫星速度有关。

若估计的卫星速度有一个偏差 ΔV_s ，在其他参数准确估计的情况下，根据式(12)，可以得到由速度估计误差带来的欺骗目标方位向的偏移：

$$\Delta y_t = -\frac{\Delta V_s}{V_s + \Delta V_s} y_{jt} \approx [-\frac{\Delta V_s}{V_s} + (\frac{\Delta V_s}{V_s})^2] y_{jt} \quad (13)$$

式(13)中略去了3阶以上的高阶项。在 $\Delta V_s / V_s$ 足够小的情况下，可以略去2阶项，欺骗目标的方位偏差与斜距的估计偏差成线性关系。设雷达载频为5 357 MHz，卫星高度是800 km，卫星照射角度是45°，卫星飞行速度是5 000 m/s，干扰机与欺骗目标的方位上的距离是600 m，如果速度误差为10%，则欺骗目标的方位向偏移-9%，偏移量为-54 m。

2.2 多普勒斜率

从式(12)可以看出，对欺骗目标的方位位置精度与对敌方雷达信号多普勒斜率的估计精度有关。设多普勒斜率估计有一个偏差 Δf_R ，而敌方使用的多普勒斜率为 f_R ，则在其他参数均无估计偏差的情况下，欺骗目标的方位向偏移：

$$\Delta y_t = (\Delta f_R / f_R) y_{jt} \quad (14)$$

可见，欺骗目标方位位置的误差百分比是与多普勒斜率估计误差百分比相同。假设与前面相同的雷达参数条件下，多普勒斜率为-789 Hz/s。对雷达多普勒斜率估计的偏差为10%，即误差79 Hz/s。则欺骗目标的方位向偏移10%，偏移量为60 m。

所以，对各个参数的估计精度不影响欺骗信号的压缩效果，雷达速度、多普勒斜率的估计精度影响了虚假目标的方位定向精度。图2给出了各个参数误差与欺骗目标方位定位误差的曲线关系。横坐标是参数误差百分比，纵坐标是欺骗目标方法误差百分比。

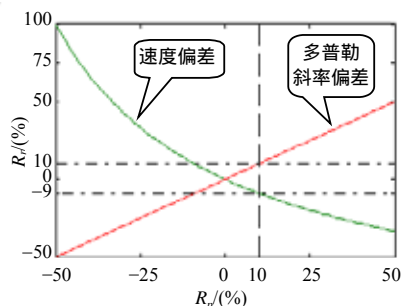


图2 各参数误差与目标方位定位误差关系曲线图

3 仿真结果分析

为了验证算法的正确性,用MATLAB对算法作了仿真实验,所用雷达参数与上一节相同。在地面设置一固有目标作参考点,坐标是(0, 0)。设置干扰机位置为(0, 100),目的是在坐标(600, 2 000)处产生一个欺骗目标。按照本文的算法生成了干扰信号数据,同时生成了固有目标的数据,然后进行成像处理,成像的结果如图3a所示。可见,此时欺骗目标在预定位置准确出现。

为了证明各个参数估计误差给干扰效果带来的影响,将参数的准确值加上一个误差,做同样的仿真实验,得到的实验结果如图3b、3c所示。图3b假设速度估计出现偏大10%后的仿真结果图,由图可见,由此带来了欺骗目标的方位位置相对预期的位置偏小了约50 m,偏小了8.3%,欺骗目标无散焦现象。图3c假设雷达多普勒斜率估计出现了10%的偏大,由图可见,由此带来了欺骗目标的方位位置相对于预期的位置偏大了约60 m,偏大了10%,欺骗目标无散焦现象。这验证了前面关于雷达速度、多普勒斜率估计偏差引起欺骗目标位置偏差分析的正确性,同时验证了参数估计对压缩效果无影响。

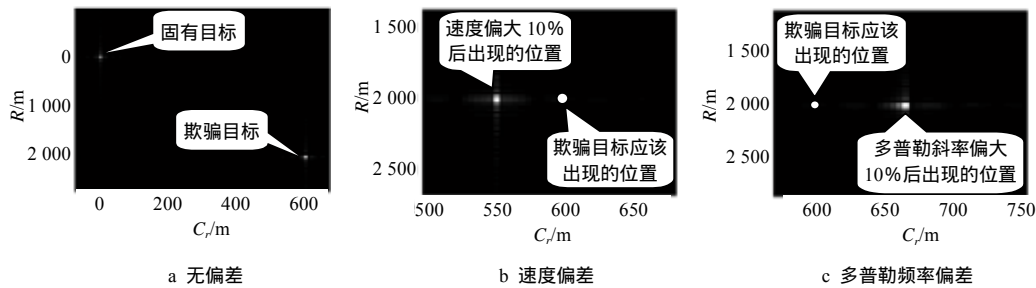


图3 点目标仿真成像结果

4 结 论

本文采用的欺骗式干扰算法是可行的,它弥补了传统的欺骗式干扰算法需要精确参数估计而难于实现的不足。本算法欺骗目标压缩效果与参数估计精度无关。只要求对雷达飞行速度、到达角度、PRF、多普勒斜率进行较低精度的估计便可实现欺骗干扰。

参 考 文 献

- [1] 梁百川. 对合成孔径雷达的干扰[J]. 上海航天, 1995, 1(1): 37-47
- [2] 吴彦鸿, 叶 伟, 刘树贤, 等. 噪声干扰的SAR图像特征研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(3): 70-73
- [3] Dumper K, Cooper P S, Wons A F, et al. Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming[C]. Radar 97, 1997, 14-16: 411-414
- [4] Condley C J. Some system considerations for electronic countermeasures to synthetic aperture radar[M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1990
- [5] 孙云辉, 陈永光, 焦 逊. 星载SAR应答式欺骗干扰研究[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(2): 23-26
- [6] 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): 1 900-1 902
- [7] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999
- [8] 黄永红, 毛士艺. 星载合成孔径雷达多普勒参数估计[J]. 电子学报, 1994, 22(6): 10-16

编 辑 漆 蓉