

# 基于SSC的星载SAR有源干扰方法

朱良\*, 李博

中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

**摘要** 不同干扰方式对星载SAR的干扰效果主要取决于干扰信号与SAR回波信号的相似度,即干扰信号在信号结构和特征方面与星载SAR回波的相似程度。通过提出一种基于散射统计特性(SSC)的星载SAR有源干扰方法,构建用于干扰星载SAR的类杂波信号数学模型,分析该信号与星载SAR回波信号的散射统计特性相似度,并进行了仿真分析。仿真结果表明该方法在相同的干信比下有更好的干扰效果,具有较好的应用前景。

**关键词** 星载SAR;散射统计特性;类杂波信号;散射统计特性相似度

星载合成孔径雷达(SAR)作为一种重要的空间对地探测与成像雷达,具有对一定范围场景的成像能力,具有分辨率高、处理增益高、机动能力强、探测范围大等特点。因此,对其有效干扰方法成为目前研究的热点方向之一。基于星载SAR的成像原理,其成像目标区域的背景杂波,如地杂波、海杂波必然会对星载SAR的目标检测、目标成像造成一定的影响。针对背景杂波对SAR成像的影响,本研究以类杂波干扰信号的产生作为研究对象,根据需要产生模拟的背景杂波并叠加到SAR的目标回波信号中,通过构建与SAR目标回波信号在散射统计特性上具有较高相似度的干扰信号,从而产生参数与目标参数相近的模拟背景杂波干扰图像,实现对星载SAR的有效干扰。

目前有代表性的杂波模拟方法有球不变随机过程法(SIRP)和无记忆非线性变换法(ZMNL)<sup>[1-3]</sup>,SIRP方法受所求随机序列的阶数和自相关函数限制,并且运算量大,不易形成快速算法,而ZMNL是一种经典方法,能够较好地模拟雷达杂波后向散射系数分布的模型:Rayleigh分布、Lognormal分布、Weibull分布和K分布。

## 1 类杂波信号分析与建模

假设星载SAR发射的线性调频信号<sup>[4]</sup> $p(t)$ 如式(1)所示:

$$p(t) = A_0 \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j(2\pi f_c t + \pi k_t t^2)] \quad (1)$$

式中,  $\text{rect}(\mu) = \begin{cases} 1, & |\mu| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |\mu| > \frac{1}{2} \end{cases}$ ,  $f_c$ 为信号载频,  $k_t$ 为调频率,

$T_p$ 为脉冲宽度,线性调频信号的带宽为 $k_t T_p$ 。

如图1所示,SAR沿 $x$ 轴正方向以速度 $v$ 匀速运动,SAR距地面高度为 $h$ ,通过位于 $(x_s, R_{s0})$ 的干扰机产生雷达杂波覆盖在以 $(x_s, R_{s0})$ 为中心的目标区域上。假设干扰信号是由干扰机基于电子侦察截获的SAR信号而生成的,则SAR接收到的干扰信号在快时间域的FFT为

$$J(w, \tau) = P(w) H_f(w) \exp\left(-jw \frac{R_f(\tau)}{c}\right) \quad (2)$$

式中,  $H_f(w)$ 为干扰机的系统响应。

同时,SAR接收到的以 $(x_s, R_{s0})$ 为中心得目标区回

收稿日期:2018-05-09;修回日期:2018-11-29

作者简介:朱良,研究员,研究方向为舰载电子对抗及协同电子对抗技术等,电子邮箱:l\_zhu2014@163.com。

引用格式:朱良,李博.基于SSC的星载SAR有源干扰方法[J].科技导报,2019,37(13):83-87;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2019.13.012

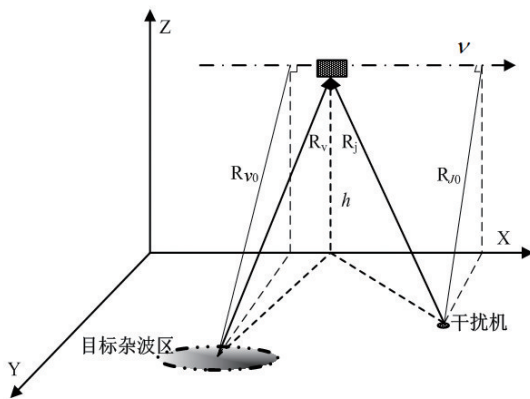


图1 类杂波干扰原理示意

Fig. 1 The principle diagram of similar clutter interference

波信号频谱为

$$S(w, \tau) = B_v P(w) \exp\left\{-j2w \frac{R_v(\tau)}{c}\right\} \quad (3)$$

要使干扰机产生的信号与以 $(x_v, R_{j0})$ 为中心目标区的SAR回波信号相同,那么干扰机的响应函数为

$$H_j(w, \tau) = B_v \exp\left\{-jw[2R_v(\tau) - R_j(\tau)]/C\right\} \quad (4)$$

对式(4)中的 $R_j(\tau)$ 和 $R_v(\tau)$ 分别在 $\tau_j$ 和 $\tau_v$ 展开

$$R_j(\tau) \approx R_{j0} - \frac{\lambda f_{DJ}}{2}(\tau - \tau_j) - \frac{\lambda f_{RJ}}{4}(\tau - \tau_j)^2 \quad (5)$$

式中, $R_{j0}$ 为干扰机至星载SAR垂直斜距, $f_{DJ}$ 为多普勒中心频率, $f_{RJ}$ 为多普勒调频斜率,且 $f_{DJ} = \frac{2v}{\lambda} \sin\theta_g$ ,

$$f_{RJ} = -\frac{2v^2}{\lambda R_{j0}}。$$

假设SAR正侧式成像,则 $f_{DJ} = 0$ 。式(5)展开并化简后为

$$R_j(\tau) \approx R_{j0} + \frac{\lambda f_{RJ}}{2} \tau \tau_j - \frac{\lambda f_{RJ}}{4} \tau^2 \quad (6)$$

同理,可以得到

$$R_v(\tau) \approx R_{j0} + \frac{\lambda f_{RV}}{2} \tau \tau_v - \frac{\lambda f_{RV}}{4} \tau^2 \quad (7)$$

因此,将式(6)和式(7)带入式(4)后, $H(w, \tau)$ 可以近似为<sup>[5-6]</sup>

$$H_j(w, \tau) = B_v \exp\left\{j \frac{w}{c} \left[ (R_{j0} - 2R_{v0}) + \frac{\lambda}{2} \left( f_{RJ} \frac{x_j}{v} - 2f_{RV} \frac{x_v}{v} \right) \tau - \frac{\lambda}{4} (f_{RJ} - 2f_{RV}) \tau^2 \right] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,要达到类杂波干扰目的,干扰机的系统函数必须考虑干扰机与目标区相对SAR的垂直斜距距离差和与干扰机和目标区有关的多普勒调频斜率对类杂波成像质量的影响。假设干扰机和目标区

中心在SAR的同一个距离波门内或邻近的距离波内,则他们的多普勒调频斜率近似相同,式(8)可以简化为

$$H_j(w, \tau) = B_v \exp\left\{-j \frac{w}{c} R_{j0} + \frac{\lambda w}{2c} f_{RJ} \left( \frac{x_j - 2x_v}{v} \right) \tau + j \frac{\lambda w}{4c} f_{RJ} \tau^2 \right\} \quad (9)$$

式(9)描述了实现单点目标类杂波干扰的干扰机系统函数。如果要想实现 $M \times N$ 大小的区域类杂波覆盖干扰,并且杂波拟覆盖分布区域的大小所带来的干扰机和分布区域内各点目标与SAR的垂直斜距差可以忽略不计的情况下,干扰机系统函数可以利用式(9)表示为

$$H_j(w, \tau) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{m,n} \exp\left\{-j \frac{w}{c} R_{j0} + \frac{\lambda w}{2c} f_{RJ} \left( \frac{x_j - 2x_{m,n}}{v} \right) \tau + j \frac{\lambda w}{4c} f_{RJ} \tau^2 \right\} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,影响干扰机系统函数的主要有干扰机的布局、杂波拟覆盖区内点目标的横向位置及各点的散射系数。

根据式(3)、式(4),并利用式(10),可以得到类杂波干扰信号,

$$\begin{aligned} \text{点目标: } J(t, \tau) &= B_v p(t - \Delta t_0) \varphi_v(\tau) \\ &= B_v p\left(t - \frac{R_{j0}}{c}\right) \exp\left\{-j\pi f_{RJ} \left(\frac{2x_v - x_j}{v}\right) \tau + \frac{1}{2} j\pi f_{RJ} \tau^2\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{分布目标: } J(t, \tau) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{m,n} p(t - \Delta t_0) \varphi_{m,n}(\tau) \\ &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{m,n} p\left(t - \frac{R_{j0}}{c}\right) \exp\left\{-j\pi f_{RJ} \left(\frac{2x_{m,n} - x_j}{v}\right) \tau + \frac{1}{2} j\pi f_{RJ} \tau^2\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

上述两式中, $B_v, B_{m,n}$ 为杂波因子,反映了杂波的幅度统计特性和相关特性; $\Delta t_0$ 为距离向的时间延迟; $\varphi(\tau), \varphi_{m,n}(\tau)$ 为多普勒相位补偿。

## 2 散射统计特征相似度分析

通过式(11)和式(12)可以看出,类杂波干扰信号是在SAR信号的基础上通过 $B_v$ 或 $B_{m,n}$ 控制杂波的一阶幅度统计特性和二阶相关特性,通过时间延迟 $\Delta t_0$ 控制干扰信号在距离向上的位置,通过多普勒相位补偿 $\varphi(\tau)$ 或 $\varphi_{m,n}(\tau)$ 控制干扰信号在方位向上与SAR信号匹配。

假设在参数估计无误差情况下,采用ZMNL方法产生Lognormal分布、Weibull分布、K分布和Rayleigh分布的时域波形<sup>[5,7]</sup>见图2,并分析他们与理想的杂波分布的拟合程度见图3。

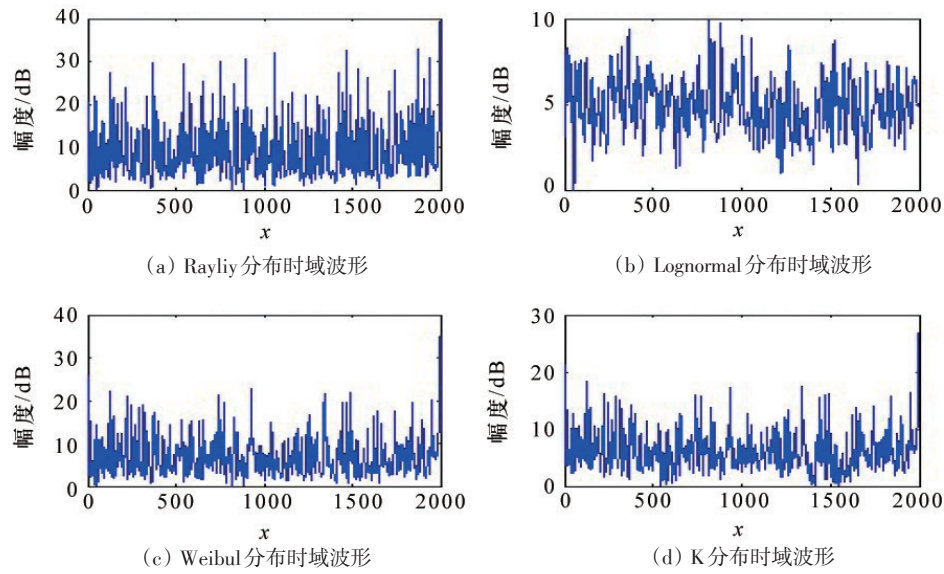


图2 杂波分布的时域波形

Fig. 2 Time-base waveform of several clutter distribution signals

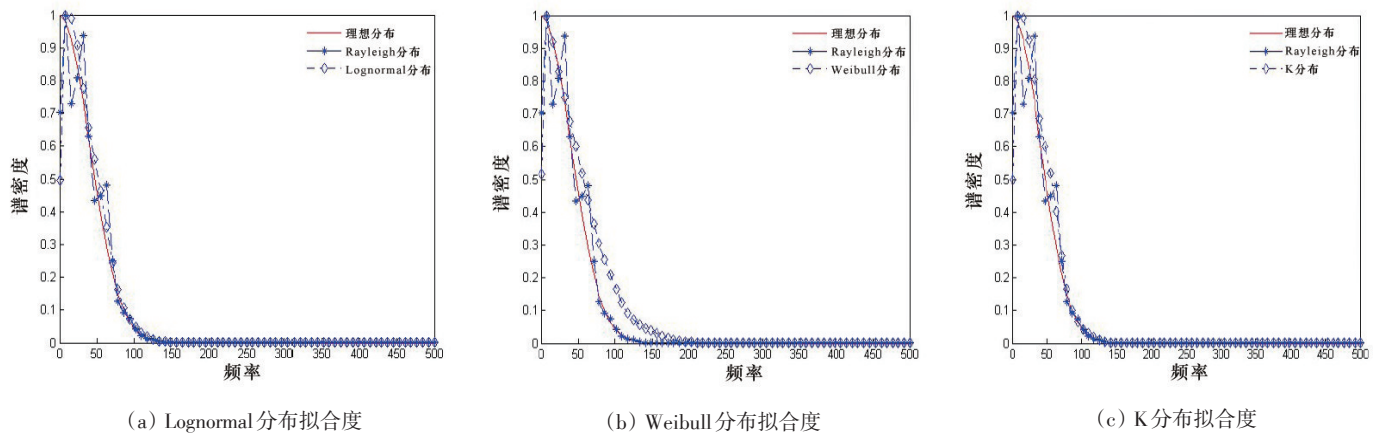


图3 类杂波分布拟合度

Fig. 3 Similarity between similar clutter distribution and ideal clutter distribution

计算产生呈 Lognormal 分布、Weibull 分布和 K 分布的类杂波与理想的杂波分布之间的 CV 距离分别为: 1.821、1.874 和 2.367, 根据归一化的相似度计算方法<sup>[8]</sup>可以得到散射统计特征相似度分别为: 0.982、0.981 和 0.973。同时, 呈 Rayleigh 分布的杂波与理想的杂波分布间的 CV 距离为 19.326, 得到的散射统计特征相似度为 0.807。

可见, 类杂波干扰信号在 SAR 场景杂波的散射统计特征上具有较高的相似度, 可以获得较好的干扰效果。

### 3 干扰效果仿真分析

由于类杂波干扰信号形成的机理是在 SAR 信号引导下, 根据需要干扰区域相对于干扰机的位置进行相应的多普勒频率和多普勒斜率补偿和模拟 SAR 的杂波后向散射系数分布的基础上产生的, 与 SAR 的目标回波信号具有较高的相似性, 可以被认为是一种相干干扰方式。

因此, 根据星载 SAR 的相干干扰原理及星载 SAR

接收到的干扰功率计算方法<sup>[9]</sup>,可以认为类杂波干扰信号经过SAR处理后的功率为

$$J = \frac{P_j G_j G'_r}{(4\pi R_j)^2 L_j} n_r^2 n_a^2 \quad (13)$$

假设待干扰覆盖目标区的杂波信号经SAR处理后的分布式目标回波信号功率,及杂波功率为

$$C_{SAR} = n_r^2 n_a^2 \frac{P_i G_i \lambda^2 \sigma_0 \rho_a c}{2(4\pi)^3 R^4 L_s B_r} \sec\beta \quad (14)$$

假设有效干扰所需的干杂比门限为 $(J/C)_{min}$ ,根据上述两式可知所需的类杂波干扰功率为

$$P_j > \left(\frac{J}{C}\right)_{min} \frac{P_i G_i \lambda^2 R_j^2 L_j \sigma_0 \rho_a c}{8\pi R^4 L_s B_r G_j} \sec\beta \quad (15)$$

式中,  $P_i$  为星载SAR发射的峰值功率,  $G_i$  为星载SAR发射天线增益,  $\sigma$  是点目标的散射截面积,  $L_s$  是星载SAR的损耗,  $\sigma_0$  为目标后向散射系数,  $\rho_a$  为方位分辨率,  $B_r$  是SAR信号的带宽,  $R_j$  为干扰机到星载SAR的距离,  $L_j$  为干扰损耗,  $\beta$  为星载的擦地角,  $c$  为光速。

通过仿真分析了采用相同干信比、不同分布杂波的干扰效果,结果如图4所示。

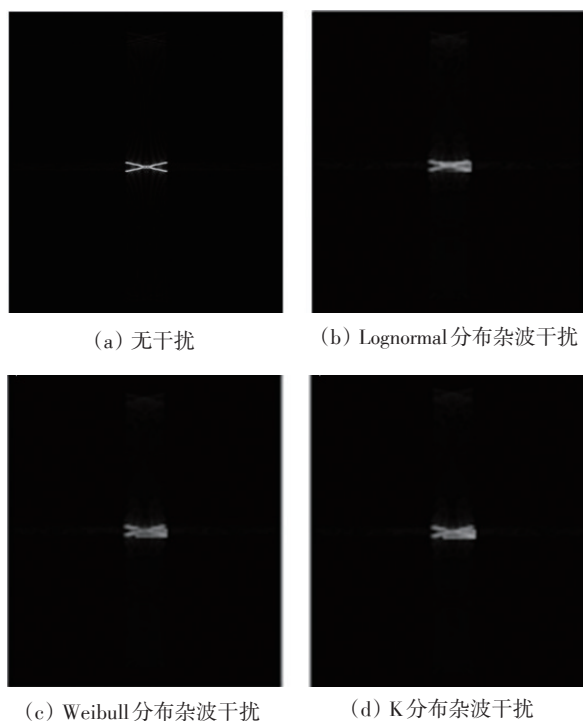
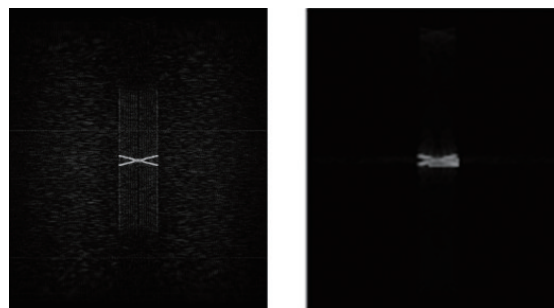


图4 不同分布杂波干扰效果(干信比5 dB)

Fig. 4 The effect about different type of distribution clutter interference (JSR: 5 dB)

从图4可以看出,类杂波干扰可以实现对场景目标的密集覆盖,还可以根据场景特点选择合适类型的分布杂波进行模拟,以达到最佳的干扰效果。

相对于非相干干扰,类杂波干扰在干扰能量上能获得较高的处理增益,相同的干信比下获得更好的干扰效果。图5反映了在5 dB干信比下,射频噪声干扰与类杂波干扰(Weibull分布杂波)的干扰效果差异。



(a) 射频噪声干扰 (b) Weibull分布杂波干扰

图5 类杂波与非相干干扰的干扰效果差异

Fig. 5 The difference of interference effect between similar clutter interference and incoherent interference

## 4 结论

在星载SAR的干扰方法中,无论是有源压制性噪声干扰还是有源欺骗性干扰,如噪声干扰、移频干扰或数字储频转发干扰,其干扰机理都是基于干扰信号与SAR回波信号的信号形式相似度或信号参数相似度来实现的。通过干扰信号建模、干扰信号与星载SAR目标回波的散射统计特性相似度分析与仿真,该方法能够对局部场景实现干扰能量的有效累积,从而提高了干扰功率的有效利用率,以达到密集覆盖或欺骗掩盖的目的,具有较好的军事应用前景。



## 参考文献(References)

- [1] James L, Marier J R. Correlated K-distributed clutter generation for radar detection and track[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 1995, 31(2): 568-580.
- [2] Rangaswamy M., Weiner D. Computer generation of correlated non-gaussian radar clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 1995, 31(1): 106-116.
- [3] Anastassopoulos V, Lampropoulos G A. A new clutter model for SAR images[C]//In Proceedings of International Conference on Applications of Photonic Technology, ICAPT', Toronto, 1994: 21-23.
- [4] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 86-89.  
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 86-89.
- [5] Bjorklund S, Nelander A. Theoretical aspects on a method for terrain scattered interference mitigation in radar[C]//IEEE International Radar Conference, 2005. IEEE, 2005: 663-668.
- [6] Sekine M, Mao Y. Radar clutter[C]//IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics series 3, London, Peter Peregrinus Ltd. 1990: 534-545.
- [7] Dubois-Fernandez P, Cantalloube H, Dupuis X. Clutter statistical analysis for high resolution SAR data[C]//IGARSS. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2004, 3: 1781-1783.
- [8] Rangaswamy M, Weiner D. Computer generation of correlated non-gaussian radar clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 1995, 31(1): 106-116.
- [9] 邹猛. 对合成孔径雷达的干扰样式及功率分析[J]. 电子对抗技术, 2005(20): 21-23.  
Zou Meng. Analysis of jamming pattern and power of SAR[J]. Electronic Countermeasure Technology, 2005, 20: 21-23.

## Research on spaceborne active jamming on SSC

ZHU Liang\*, LI Bo

Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100094, China

**Abstract** In whichever jamming mode, the jamming effect of spaceborne SAR mainly lies on the similarity between jamming signal and spaceborne SAR echo, namely signal structure and character of similarity between the two. In this paper, an active jamming method for spaceborne SAR based on the scattering statistical characteristics (SSC) is proposed. The mathematical mode of clutter-like signal used for jamming spaceborne SAR is constructed, the scattering statistics characteristic similarity between spaceborne SAR echo and this jamming signal is analyzed and simulated. Results show that this method has a better interference effect under the same jamming signal ratio and a better application prospect.

**Keywords** spaceborne SAR; scattering statistics characteristic; similar clutter signal; scattering statistics characteristic similarity ●



(编辑 徐丽娇)