

合成孔径雷达噪声干扰研究

李 兵¹, 洪 文²

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘 要: 本文首先从信号—干扰功率比(信干比)的角度分析了合成孔径雷达(SAR)噪声干扰的效果及特点, 分析了对 SAR 系统实施噪声干扰的特殊性以及影响 SAR 噪声干扰效果的因素. 然后, 利用机载 SAR 原始数据进行了噪声干扰仿真实验, 给出了仿真结果并进行了分析.

关键词: 合成孔径雷达; 噪声干扰; SAR 图像

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12-2035-03

Study of Noise Jamming to SAR

LI Bing¹, HONG Wen²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, P. R. China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, P. R. China)

Abstract: The effectiveness and characteristics of noise jamming to synthetic aperture radar (SAR) are firstly analyzed through signal-to-jam ratio (SJR) in this paper, and the particularity of jamming a SAR and the factors which impact the effectiveness of noise jamming are studied. Furthermore, the simulation of noise jamming to airborne SAR is executed through SAR raw data, and the initiated results are given and analyzed.

Key words: SAR; noise jamming; SAR image

1 引言

目前, 合成孔径雷达凭借高分辨率、全天时、全天候和可直接观察的特点在军事领域发挥着日益重要的作用, 所以针对合成孔径雷达的干扰与抗干扰技术研究具有十分重要的意义.

根据干扰信号作用原理的不同, 雷达干扰可分为遮盖性干扰和欺骗性干扰两种^[2]. 其中, 遮盖性干扰主要采用噪声的形式, 即通过发射大功率的噪声干扰信号进入雷达接收机来遮盖或者淹没有用信号, 甚至造成接收机饱和而无法正常工作^[6,7]. 由于噪声干扰信号失配于 SAR 成像处理中的匹配滤波器, 所以 SAR 噪声干扰的效率比较低, 且容易被发现; 而噪声干扰的优点在于实施此种干扰所需的信息量比较少, 实施起来比较简单, 且一般对所有的雷达均有效, 而且实际上 SAR 特殊的工作模式也为噪声干扰的实施提供了一些有利因素.

目前国内外对 SAR 噪声干扰进行了一定的研究, 其中文献[3]给出了噪声干扰环境下的 SAR 雷达方程, 文献[5]简述了对 SAR 系统进行干扰的特殊性, 并推导了恒虚警概率检测条件下的 SAR 雷达方程, 而文献[6]对噪声干扰 SAR 图像的特征进行了分析. 本文主要对 SAR 噪声干扰的效果及特点进行了分析, 并进行了基于机载 SAR 真实数据的仿真. 本文的

内容主要分为两部分: 第一部分首先从雷达接收信号的信干比的角度分析了 SAR 特殊工作模式下实施噪声干扰的有利因素, 然后通过 SAR 成像处理后的信干比对 SAR 噪声干扰的效果及特点进行了分析; 第二部分则针对机载 SAR 进行了仿真实验, 并对仿真结果进行了分析.

2 SAR 噪声干扰的效果及特点

噪声干扰的目的就是使强干扰功率进入雷达接收机, 尽量降低信噪比, 因而对 SAR 噪声干扰效果的分析也要根据不同的侦察任务中所需的信噪比和杂噪比来进行^[2,3]. 在噪声干扰环境下 SAR 图像的噪声将主要来自于干扰噪声, 在此通过信干比对 SAR 噪声干扰的效果进行分析.

2.1 雷达接收信号的信干比

根据雷达方程^[3]可以得到雷达接收信号的信干比为

$$(S/N_j) = \frac{1}{4} \frac{P_t G_t}{k_j P_j G_j} \frac{G_r}{G_j} \frac{R_j^2}{R_t^4} \quad (1)$$

其中: P_t 为雷达发射的峰值功率, G_t 为雷达发射天线的增益, k_j 为干扰功率的失配损失因子, P_j 为干扰机发射的平均功率, G_j 为干扰机天线在雷达方向的增益, G_r 为雷达接收天线的增益, G_{jr} 为雷达接收天线在干扰机方向的增益, R_j 为干扰机到雷达的距离, R_t 为目标到雷达的距离, R_t 为点目标的雷

达截面积.

为了达到干扰的目的,干扰机需要发射强的干扰功率来尽量降低信干比.由式(1)中的不同因子可知实施 SAR 噪声干扰的有利因素主要包括:由于 SAR 回波信号要保持在方位向的相关性,因而一般 SAR 不具有频率捷变能力^[3],这使得干扰机较容易瞄准 SAR 的频率,从而减小由于频谱失配造成的能量损失;此外由于 SAR 的运动轨迹和速度具有很强的限制,这意味着干扰机容易对 SAR 进行跟踪,因而针对 SAR 的干扰机天线可具有较高的增益,而对于条带 SAR,其天线增益要受到成像条带宽度及方位分辨率的限制;另外,由于 SAR 方位向分辨率是由合成孔径的长度决定的,因而 SAR 天线在方位向的波束不能很窄,这使得噪声干扰可以在 SAR 图像中形成较大范围的干扰.

噪声干扰除了降低信噪比,还可引起雷达接收机过载饱和,从而造成雷达接收机输出信号中目标回波信号的失真甚至丢失.这会严重影响目标成像的质量,同时使图像中真实的目标信息容易被噪声干扰信号淹没.

2.2 SAR 成像处理后的信干比

SAR 成像处理实际上是通过两维的相关处理进行压缩.因而经过成像处理,点目标回波信号将获得比不相干的噪声干扰大得多的处理增益.对于一般发射 Chirp 脉冲的 SAR 而言,假设雷达接收的方位向干扰噪声在整个带宽内具有均匀的功率谱密度,若不考虑加权的影响,则此时信干比的处理增益可表示为^[3]:

$$= (B_r \tau) \cdot (f_p t_s) \quad (2)$$

其中: B_r 为雷达带宽, τ 为脉冲宽度, $B_r \tau$ 为距离向处理增益; f_p 为脉冲重复频率, t_s 为处理的合成孔径时间, $f_p t_s$ 为方位向处理增益.

对于固定在 SAR 照射条带内的干扰机,雷达接收的干扰噪声强度在方位向的变化主要受雷达天线方位波束的影响.不过在成像处理后,雷达天线波束的影响将被“平滑”^[4].因而由式(1)、(2)可得经过成像处理后的信干比:

$$(S/N_j)_{ra} = \left[\frac{1}{4} \cdot \frac{P_m G_r}{k_j P_j G_j} \cdot \frac{G_r}{G_{\bar{G}_j}} \cdot \frac{R_j^2}{R_t^4} \right] \cdot (B_r \tau) \cdot (f_p t_s) \quad (3)$$

其中, \bar{G}_j 是被“平滑”后的雷达天线在干扰机方向的增益,由于 $\bar{G}_j > G_j$, 因而一般可忽略它们之间的区别.

为了更清楚的分析影响 SAR 噪声干扰效果的因素,下面分析自卫干扰的情况.此时 $G_r = \bar{G}_j$, $R_j = R_t$, 雷达平均发射功率 $P_{av} = P_t f_p$, 而对于不考虑加权影响的单视 SAR 图像而言, $t_s = R_t l / (2w_a) / v_a$ (l 为雷达发射信号的波长, w_a 为 SAR 图像方位向分辨率, v_a 为雷达速度). 这样式(3)可表示为:

$$(S/N_j)_{ra} = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_m G_r}{k_j P_j G_j} \cdot \frac{1}{R_t} \cdot \frac{B_r}{2w_a v_a} \quad (4)$$

由于 SAR 图像具有很高的分辨率,因而 SAR 图像中的目标一般多视为分布式目标.如果将 SAR 图像像素的后向散射截面用后向散射系数 σ_0 与像素所代表面积的乘积来代替,即令 $\sigma_0 = \frac{c}{2B_r \cos \theta_g} \cdot w_a$ (c 为光速, θ_g 为电磁波入射方向与地平面的夹角). 则式(4)可表示为:

$$(S/N_j)_{ra} = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_m G_r}{k_j P_j G_j} \cdot \frac{1}{R_t} \cdot \sigma_0 \cdot \frac{c}{2v_a \cos \theta_g} \quad (5)$$

式(4)、(5)清楚的表明了自卫干扰下影响 SAR 噪声干扰效果的因素,同时通过它们也可对 SAR 噪声干扰的效果进行评估.

由于噪声干扰信号失配于 SAR 成像处理的匹配滤波器,因而此种干扰的效率比较低,为了压制 SAR 图像中的强目标点,此时干扰机一般需要发射较大的功率.不过由于噪声干扰信号不会在成像过程中被压缩,因而它将形成大范围的遮盖干扰效果.在 SAR 噪声干扰图像中,噪声干扰可对整个距离向的目标进行压制,而方位向的干扰范围主要受雷达天线方位波束宽度的影响.

3 仿真

本文利用德国宇航院机载 E-SAR 系统原始数据进行仿真.仿真的方法是将模拟的干扰信号直接加在原始数据上,然后进行成像处理.在仿真中,

干扰机与雷达的位置关系如图 1 所示,即干扰机固定在雷达地面成像条带中心,而且在雷达运动过程中干扰机天线主瓣始终对准雷达的方向.假设干扰机瞄准了雷达频率,而且干扰信号带宽大

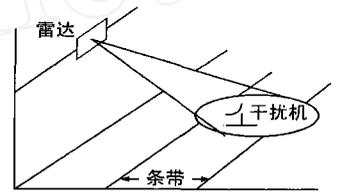


图 1 干扰机与雷达的位置关系

于雷达带宽,即干扰频率占据了雷达整个带宽.仿真主要考虑噪声干扰对真实目标的压制效果以及噪声干扰的遮盖范围.

3.1 模拟干扰信号

精确模拟加在 SAR 原始数据上的干扰信号需要考虑干扰信号模型,雷达与干扰机的距离、相对运动速度以及天线增益等对雷达接收干扰信号的影响,以及雷达接收机可能造成的干扰信号波形失真等因素.不过在此主要关心噪声干扰的干扰强度及遮盖范围,因而模拟的干扰信号可用高斯噪声来代替,而干扰信号的强度可通过雷达接收信号的杂波—干扰功率比(杂干比)得到.

根据雷达方程^[3]可以得到雷达接收信号的杂干比为:

$$(C/N_j) = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_m G_r}{k_j P_j G_j} \cdot \frac{G_r}{G_j} \cdot \sigma_0 R_t \frac{c}{L \cos \theta_g} \quad (6)$$

其中, L 为雷达天线的实际孔径长度.

对于固定在雷达地面成像条带内的干扰机,雷达接收信号的杂干比在距离向的变化很小,而在方位向的变化主要受雷达天线方位向波束的影响.雷达天线方位向的波束宽度决定了干扰机通过天线主瓣进行干扰的范围,同时由式(6)可知也将影响雷达接收信号的杂干比.在估计出 SAR 原始数据中的杂波信号强度后,通过式(6)便可以得到模拟干扰信号的强度.

仿真中,雷达系统及干扰机的相关参数为:

$\sigma_0 = 0.0313\text{m}$, $\tau = 5\mu\text{s}$, $\theta_g = 38^\circ$, $B_r = 50\text{MHz}$, $f_p = 1200\text{Hz}$, $v_a = 76.59\text{m/s}$, 雷达平台高度 $h = 3500\text{m}$, $P_t = 5\text{KW}$, $P_j = 1.5\text{kW}$, $k_j = 0.5$, $G_j = 15\text{dB}$.

仿真中取分布目标的后向散射系数 $\sigma_0 = -15\text{dB}$. 由于仿真的 SAR 原始数据的方位向长度有限,同时考虑计算的方便,仿真中取雷达天线方位向波束宽度为 3° ,不过此数值要比实际天线的波束宽度小得多,考虑到它对杂干比的影响,仿真中取 $G_r = 30\text{dB}$. 这样当干扰机位于雷达天线主瓣中心时,雷达接收信号的杂干比约为 -23.33dB ,而对于 $=10\text{m}^2$ 点目标而言,由式(1)可得此时的信干比约为 -52.85dB .

3.2 仿真结果

图 2 和图 3 的是仿真结果的 3 视 SAR 图像,图像的分辨率为 3m (不考虑加权的影响),其中图 2 是没有干扰的 SAR 图像,图 3 是存在噪声干扰时的 SAR 图像. 图像的方位向所代表的长度约为 1600 米,而距离向约为 1000 米.

在仿真的成像处理中,加权在两个方向造成的信干比处理增益损失约为 0.79 ,同时考虑多视处理的影响,可得在成像处理中信干比的处理增益约为 54.40dB . 因而对于

SAR 图像主瓣干扰中心一个 $=10\text{m}^2$ 点目标象素而言,在 SAR 噪声干扰图像中其信干比约为 1.55dB . 由图 3 和图 4 可以看出,通过雷达天线主瓣进入的噪声干扰基本淹没了真实的目标信息,只有部分强点目标信息没有被完全压制;而由图 3 可以看出通过天线旁瓣进入的干扰仅对低灰度的目标信息起到了一定的遮盖效果.

仿真中雷达天线方位波束的旁瓣电平

约为 -13.5dB ,图 5 中的虚线即是仿真的干扰噪声在方位向的强度的变化曲线,而图中的实线是经过成像处理后被“平滑”的干扰噪声强度. 由图 5 可看到雷达天线方位波束对 SAR



图 2 没有噪声干扰的 SAR 图像



图 3 存在噪声干扰的 SAR 图像



图 4 主瓣干扰区域的对数 SAR 图像

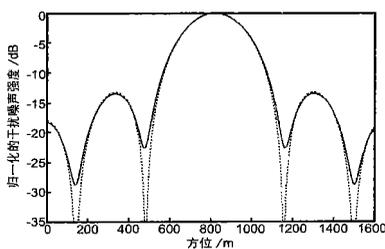


图 5 方位向上的干扰噪声强度

噪声干扰图像的影响,同时利用图 5 也可对噪声干扰在 SAR 图像中的干扰宽度进行评估. 不过需要注意实际天线波束的旁瓣电平会比 -13.5dB 低,此时通过天线旁瓣进入的干扰很弱,因而难以起到在 SAR 图像中起到遮盖效果,另外实际天线波束要比仿真的波束宽度宽得多,因而噪声干扰实际达到的干扰宽度要比仿真结果大得多.

4 结束语

噪声干扰通过发射大功率的噪声干扰信号,降低信噪比来达到干扰的目的. 实施此种干扰所需要的信息量比较少,实施起来比较简单,而且此种干扰可在 SAR 图像中形成大范围的遮盖干扰的效果. 不过 SAR 噪声干扰的效率比较低,一般需要干扰机发射较高的功率,同时也容易被发现. 实际上为了更好的对 SAR 实施干扰,需要采用多种干扰方式来进行,因而需要对更多的针对 SAR 的干扰方式进行研究.

参考文献:

- [1] D Crutis Schleher. Electronic Warfare in the Information Age [M]. Boston: Artech House, 1999. 147 - 161.
- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. 1 - 11, 124 - 157.
- [3] W W Gaj. Synthetic Aperture Radar and Electronic Warfare [M]. Massachusetts: Artech House, 1993.
- [4] K Dumper, P S Cooper, A F Wons, C J Condley, P Tully. Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming [A]. Proc IEE Radar 97 [C]. Edinburgh: IEE, 1997. 411 - 414.
- [5] 花磊、李景文. 合成孔径雷达 (SAR) 干扰技术研究 [J]. 遥测遥控, 2003, 24(2): 14 - 18.
- [6] 吴彦洪、叶伟、刘树贤、贾鑫. 噪声干扰的 SAR 图像特性研究 [J]. 装备技术指挥学院学报, 2002, 13(3).
- [7] 周一宇、徐晖、安玮. 电子战原理和技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [8] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [9] 刘永坦. 雷达成像技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.

作者简介:



李 兵 男, 1979 年 5 月出生于山东肥城, 2001 年取得北京航空航天大学电子信息工程专业学士学位, 现为北京航空航天大学在读硕士生, 主要从事合成孔径雷达信号处理, SAR 干扰与抗干扰研究.

洪 文 1997 年获北京航空航天大学工学博士学位, 1997 至 2002 年就职于北京航空航天大学电子工程系, 任讲师、副教授. 2002 年至今任中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达处理及应用.