

基于图像信息损失率的合成孔径 雷达干扰效果评估指标

刘志伟¹, 许克峰²

(1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083; 2. 北京融信博通科技发展有限公司, 北京 100081)

摘要: 本文给出了有、无干扰时合成孔径雷达图像的统计模型以及图像间的统计关联, 对合成孔径雷达图像的信息量以及干扰造成的图像信息损失进行了定量分析, 从而建立了基于图像信息损失率的干扰效果指标, 为合成孔径雷达干扰效果的综合定量描述提供了基础。

关键词: 合成孔径雷达; 噪声压制干扰; 效果评估; 图像的信息量; 信息损失

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06 1042-04

The Effectiveness Index of SAR Jamming Based on Information Loss of Images

LIU Zhi-wei¹, XU Ke-feng²

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Rosyntech Co. Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: The statistical models of SAR image with and without jamming noise and the statistical relationship between these images are presented to give a quantitative analysis on Information measure of SAR image and its Information loss caused by noise jamming. Thereby, an index based on the rate of information loss of SAR image is defined to make a synthetically quantitative description on the effect of SAR jamming.

Key words: SAR; noise jamming; effectiveness evaluation; information of image; information loss

1 引言

目前, 合成孔径雷达已经成为全天时、全天候的高分辨率对地侦察手段^[1]. 因此, 对合成孔径雷达干扰技术的研究越来越受到重视。

与用于检测目标、测量目标空间位置及运动状态的传统雷达不同, 合成孔径雷达是一种利用相干测量和数据处理来获取地面二维电磁散射信息的成像系统. 因此, 对合成孔径雷达进行干扰的主要目的是通过破坏其成像机制或降低其图像质量来阻止敌方从图像中检测、识别目标来获得有价值信息. 由于合成孔径雷达的工作方式及成像算法与传统雷达有很大不同, 所以, 对合成孔径雷达实施干扰有其特殊的不利和有利因素。

作为效能评估的前提, 必须掌握噪声信号干扰合成孔径雷达成像的破坏机制和作用效应, 并且找出能够定量描述合成孔径雷达图像因干扰作用而降质的有效方式. 高分辨力合成孔径雷达能够实现目标的精细成像. 合成孔径雷达侦察目标的能力更多地通过图像像素间亮度相对关系的大范围特征表现出来, 而并不仅仅是在背景中检测某些特征点的存在. 因此, 对合成孔径雷

达信息获取能力的评价也就不能限于目标检测概率等传统的雷达性能指标. 噪声信号干扰合成孔径雷达的效能指标也必然涉及到合成孔径雷达图像的主、客观评价标准, 并且会与对抗双方的系统参数有很复杂的依赖关系。

为了实现噪声信号对合成孔径雷达干扰效果的定量表征, 本文依据现代信息理论, 提出了图像信息损失率的概念, 建立了基于图像信息损失率的对合成孔径雷达干扰效果指标, 为合成孔径雷达干扰效能的定量评估提供了一种新的途径。

2 合成孔径雷达的成像处理

雷达系统在正常工作时是一个线性系统, 系统的 Green 函数 $h(\xi|\eta)$ 可以显式地给出, 其中向量 ξ 和 η 都是用快变时间和慢变时间表示的二维位置向量. 如果在 η 处有一个散射截面为 σ_0 的点散射体, 那么它在整个合成孔径时间内所产生的回波信号为

$$\hat{s}(\xi) = \sqrt{\frac{PG^2\lambda^2}{(4\pi)^3 R_i^4}} \sigma_0 \cdot h(\xi|\eta) \quad (1)$$

其中 P_t 为雷达的峰值功率, G_t 为雷达天线的增益, R_t 为目标与雷达间的距离, λ 为载波波长. 设 $u(\eta)$ 为目标区域的后向散射复振幅, 则合成孔径雷达接收到的信号 $s(\xi)$ 为

$$s(\xi) = \int h(\xi|\eta)u(\eta)d\eta \quad (2)$$

合成孔径雷达的成像处理是一个线性的变换

$$\int \overline{h(\xi|\eta)}s(\xi)d\xi = \widehat{u}(\eta) \quad (3)$$

这正是所谓的“匹配滤波”. 将式(1)代入式(3), 可得成像处理后实图像在对应点处的亮度为

$$|\widehat{u}(\eta)|^2 = \left[\int \overline{H(\xi|\eta)} \overline{h(\xi|\eta)} d\xi \right] \cdot \left[\int s(\xi) \overline{s(\xi)} d\xi \right] \quad (4)$$

记

$$K_h(\eta) = \int \overline{h(\xi|\eta)} h(\xi|\eta) d\xi \quad (5)$$

实际上 $K_h(\eta)$ 随 η 的变化很小, 可近似为常数 K_h . 而

$$\mathcal{E} = \int s(\xi) \overline{s(\xi)} d\xi \quad (6)$$

则为合成孔径时间内雷达接收到的回波信号的总能量. 于是式(4)成为

$$|\widehat{u}(\eta)|^2 = K_h \cdot \mathcal{E} \quad (7)$$

即实图像中像素的亮度正比于回波信号的总能量.

3 合成孔径雷达图像的统计模型

3.1 无干扰合成孔径雷达图像的统计模型

在大多数情况下, 可以认为分辨单元内各散射体的辐射特征彼此间是统计独立的, 一个分辨单元在合成孔径时间内的后向散射满足“中心极限定理”的条件, 因而分辨单元内所有散射体在合成孔径时间内的回波之和应当符合正态分布的规律^[2]; 同时, 各分辨单元的后向散射情况是不相关的, 因而图像中各像素的亮度彼此间是统计独立的. 如果一幅合成孔径雷达图像的像素总数为 M , 那么可以将复图像视为一个 M 维的复随机向量 Z , 其各个分量 $Z_i, i = 1, 2, \dots, M$, 是相互统计独立的, 且 Z_i 的概率分布密度为

$$P_{Z_i}(z) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_r^2} \left((z - \zeta_r) \cdot \overline{(z - \zeta_r)}\right)\right] \quad (8)$$

其中 $\zeta_r = \mu_r \exp(i\varphi_r)$. 实际上, μ_r^2 对应于规则回波能量, 而 σ_r^2 则对应于杂波能量.

合成孔径雷达通常都要采用“多视”处理技术. 可以认为各视的数据是彼此不相关的. 假设合成孔径雷达成像时采用了 L 视处理, 那么实图像的像素亮度 $R_i^{(L)}$ 就是

$$R_i^{(L)} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L Z_i \overline{Z_{i,l}}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

上式右端各个 $Z_{i,l}$ 均满足同样的概率分布(8). $R_i^{(L)}$ 满足 $2L$ 自由度的偏心 χ^2 分布, 其均值和方差分别为 $E(R_i^{(L)}) = \mu_r^2 + 2\sigma_r^2$ 和 $\sigma_{R_i^{(L)}}^2 = 4\sigma_r^2(\mu_r^2 + \sigma_r^2)/L$. 于是, 像素的理想亮度为 $s = \mu_r^2 + 2\sigma_r^2$. 它正比于一次单视成像过程中雷达所接收到的该分辨单元在整个合成孔径时间内后向散射的总能量. 由式(5)~(7)式知 $L \cdot s = K_h \mathcal{E}$. 其中 \mathcal{E} 为合成孔径时间内雷达接收到的回波信号的总能量.

3.2 受干扰合成孔径雷达图像的统计模型

通常情况下, 干扰信号的总功率中只有一部分能够对合成孔径雷达信号产生遮蔽效应^[3]. 假定干扰信号的有效功率谱密度为 \bar{p}_j , 那么当干扰信号的带宽覆盖合成孔径雷达的信号带宽时, 就可以认为有效干扰 $J(\xi)$ 是满足 0 均值 Gauss 分布的随机变量. 并且

$$E[J(\xi)\overline{J(\xi)}] = \frac{\bar{p}_j G_r G_t(\theta) \lambda^2 L_j \gamma K_f}{(4\pi R_j)^2} \delta(\xi - \eta) \quad (10)$$

其中 λ 为工作波长, $G_t(\theta)$ 为雷达天线副瓣增益, θ 为波束方向间的夹角, $\bar{p}_j G_r$ 为干扰机辐射的等效平均功率谱密度, R_j 为干扰机与雷达之间的距离, L_j 为干扰机的各种损耗, γ 为天线极化失配因子, K_f 为干扰信号功率谱形状的加权系数.

干扰信号经成像处理后得干扰噪声复图像 J . 实际的合成孔径雷达系统在距离向和方位向都具有很大的时宽-带宽积, 这时 J 的各像素间可视为互不相关, 且各像素的干扰噪声都满足概率分布

$$P_{J_i}(z) = \frac{1}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_q^2} z \overline{z}\right] \quad (11)$$

其中

$$\sigma_q^2 = E[J(\xi)\overline{J(\eta)}] = K_h \cdot \frac{\bar{p}_j G_r G_t(\theta) \lambda^2 L_j \gamma K_f}{(4\pi R_j)^2} \quad (12)$$

在有干扰的情况下, 合成孔径雷达所接收到的信号为成像地域后向散射的雷达信号与干扰信号之和 $\tilde{s}(\xi) = s(\xi) + J(\xi)$. 经过成像处理后得

$$\tilde{Z} = Z + J \quad (13)$$

由于 Z 和 J 是统计独立的, 并且其各个分量彼此统计独立, 所以各个 $\tilde{Z}_i, i = 1, 2, \dots, M$, 也是相互统计独立的, 且由式(8)和式(11)知 \tilde{Z}_i 的概率分布密度为

$$P_{\tilde{Z}_i}(z) = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_g^2} \left((z - \zeta_r) \cdot \overline{(z - \zeta_r)}\right)\right] \quad (14)$$

其中 \tilde{Z}_i 的方差为 $\sigma_g^2 = \sigma_r^2 + \sigma_q^2$. 如果合成孔径雷达成像时采用了 L 视处理, 那么实图像 G 的各个像素间相互统计独立, 且像素亮度 $G_i^{(L)}$ 满足 $2L$ 自由度的偏心 χ^2 分布.

3.3 图像间的统计关联

由于 Z_i 和 J_i 是统计独立的, 所以有

$$p_{Z_i, \tilde{z}_i}(z, \tilde{z}) = p_{Z_i}(z) \cdot p_{J_i}(\tilde{z} - z) \quad (15)$$

假定合成孔径雷达成像地域的辐射特征满足

$$p_{\mu_r, \sigma_r}(\mu_r, \sigma_r) = q(\mu_r, \sigma_r), \mu_r, \sigma_r \geq 0$$

那么经过推演可得无干扰图像与受干扰图像的联合概率分布密度为

$$p_{R_i G_i}(r, g) = A(r) \cdot B(r, g) \quad (16)$$

其中

$$A(r) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_r^2}(r + \mu_r^2)\right] J_0\left[\frac{\mu_r}{\sigma_r} r\right] q(\mu_r, \sigma_r) d\mu_r d\sigma_r$$

$$B(r, g) = \frac{1}{2\sigma_g^2} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_g^2}(g + r)\right] J_0\left[\frac{\sqrt{gr}}{\sigma_g}\right] d\phi$$

如果合成孔径雷达图像是经过 L 视平均处理后获得的, 那么

$$p_{R_i^{(L)}, G_i^{(L)}}(r, g) = L^{2L} p_{R_i, G_i}(Lr, Lg) * p_{R_i, G_i}(Lr, Lg) * \dots * p_{R_i, G_i}(Lr, Lg) \quad (17)$$

其中* 表示二维卷积, 上式右端共有 L 重卷积。

4 合成孔径雷达图像的信息损失

干扰信号使图像产生的信息损失是衡量对合成孔径雷达干扰效果的一个重要指标。“信息”意味着从不确定性向确定性的转化。“信息量”就是对这种转化的一个度量。一幅图像致使不确定性丧失的量, 就是这幅图像的信息量。

根据信息论的有关知识^[4,5], 图像的信息量可以用其概率分布的熵来进行定量表征。如果观测图像 R 的概率分布密度为 $p_R(r)$, 那么观测图像 R 的熵定义为

$$H(R) = - \int p_R(r) \ln(p_R(r)) dr \quad (18)$$

其中右端的积分在整个样本空间上进行。

现代的合成孔径雷达都采用数字化处理方式, 每个像素的亮度都是离散量化的。这样, 图像的统计模型就成为离散的随机向量。只有对于离散的随机向量 R , 熵 $H(R)$ 才具有一个反映该图像所提供的平均信息量的确定量值。下面的讨论中所涉及的图像统计模型均为离散的随机向量。

干扰作用于合成孔径雷达系统的效应, 就是使无干扰时的图像 R 转变为受干扰时的图像 G 。在获得了一幅受干扰的图像后, 无干扰图像仍存在的不确定性正是干扰所造成的合成孔径雷达图像的信息损失。为了描述这种不确定性, 定义无干扰图像与受干扰图像的“(平均)互信息量”为

$$I(R; G) = - \iint p_{R, G}(r, g) \ln\left[\frac{p_R(r) \cdot p_G(g)}{p_{R, G}(r, g)}\right] dr dg \quad (19)$$

这是一幅受干扰图像所能提供的无干扰图像的信息量。同时, 定义“(平均)条件信息量”为

$$H(R|G) = - \iint p_{R, G}(r, g) \ln(p_{R|G}(r|g)) dr dg \quad (20)$$

并且, 关系式

$$H(R) = I(R; G) + H(R|G) \quad (21)$$

显然成立。不论 R 和 G 的概率分布具体形式如何, 均有

$$H(R|G) \leq H(R) \quad (22)$$

而且, 当且仅当 R 与 G 相互独立时等号才会成立。

5 基于图像信息损失率的干扰效能指标

由式(20)所定义的条件信息量 $H(R|G)$ 正是对“在获得了受干扰的图像之后, 无干扰图像仍然存在的“不确定性”的一个宏观的定量描述。因此, 可以将由于实施干扰而导致的合成孔径雷达图像的信息损失率定义为

$$\Phi_{R, G} = \frac{H(R|G)}{H(R)} \quad (23)$$

由于图像 R 和图像 G 中的各个像素均彼此独立, 所以有

$$\Phi_{R, G} = \frac{\iint p_{R_i^{(L)}, G_i^{(L)}}(r, g) \ln(p_{R_i^{(L)} | G_i^{(L)}}(r|g)) dr dg}{\int p_{R_i^{(L)}}(r) \ln(p_{R_i^{(L)}}(r)) dr} \quad (24)$$

决定合成孔径雷达图像信息损失率的根本因素是回波信号与有效干扰噪声之间的能量对比关系。而能量的强弱取决于对抗系统的一系列基本参数, 这些因素全部都出现在式(24)右端的各概率分布当中。于是, 可以根据系统的对抗状态, 以数值的方式得出干扰造成的合成孔径雷达图像信息损失率 $\Phi_{R, G}$, 并将其作为评价对合成孔径雷达干扰效果的定量指标。

由于合成孔径雷达必须采取“侧视”的观测方式, 所以上、下行成像时合成孔径雷达与干扰机的空间位置关系是完全不同的, 对应的合成孔径雷达图像的信息损失率往往会有很大的差异。为了保证干扰效果, 应该在对应于卫星上行和下行的合成孔径雷达图像信息损失率中选择较小的一个, 作为评估干扰系统对该点保护效果的指标。

$$\Phi(x; \xi) = \min\left\{\Phi_{R, G}^{(\uparrow/\downarrow)} \mid x \in D; \xi\right\} \quad (25)$$

其中 D 代表干扰系统的保护地域, x 是保护地域中的一点, 而 ξ 表示干扰系统的参数集。就是说, 合成孔径雷达图像的信息损失率不仅是与干扰系统的性能指标和配置参数直接相关的, 而且还随合成孔径雷达成像地点的位置而变化。

6 结束语

图像信息损失率指标的实质, 就是对“在获得观测

图像之后, 被观测地域辐射特性仍然存在的不确定性”做出综合评估. 这种不确定性正是造成合成孔径雷达图像判读困难或产生判读错误的原因, 因为观测地域的辐射特性存在着与合成孔径雷达图像不同的空间秩序和结构.

如果关注特定的目标类型, 那么也可以通过修改合成孔径雷达的图像模型来体现其个性特征. 当然, 图像信息损失率指标并不易于将指定场景下具体细节的丧失程度给以明确的描述, 除非建立非常复杂的图像模型. 但这一点也恰恰符合我们的关注取向: 干扰系统的保护范围要覆盖广阔的地域, 其中包括了辐射特性可能不甚明了的各种目标. 在这种情况下, 不应该针对若干具体图像来做出评价, 而必须采用一个综合的、概括的宏观评估方式.

参考文献:

- [1] 魏钟铨. 合成孔径雷达原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Wei Zhongquan. Elements of Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Science Publish House, 2001. (in Chinese)
- [2] 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.

Zhang Chengbo. Theory, System Analysis and Application of Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Science Publish House, 1989. (in Chinese)

- [3] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
Zhao Guoqing. Elements of Radar Antagonism[M]. Xi'an: Publish House of Xidian University, 1999. (in Chinese)
- [4] 吴乐南, 徐孟侠. 数据压缩的原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
Wu lenan, Xu Mengxia. Theory and Application of Data Compression[M]. Beijing: Publish House of electronics industry, 2001. (in Chinese)
- [5] Proakis J G. Digital Communications, Third Edition[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1995.

作者简介:

刘志伟 男, 1964年11月生于重庆合川, 目前的主要研究方向为信息对抗系统的总体技术和优化方法. E-mail: xy80@sina.com

许克峰 男, 1966年1月生于西安, 主要的研究领域为图像处理与信息恢复, 以及信息系统的评估与优化方法. E-mail: xukefeng66@yahoo.com.cn