

雷达相关杂波的建模与仿真研究

沈慧芳¹, 赖宏慧²

(1. 江西理工大学信息工程学院, 江西赣州 341000;

2. 赣南医学院信息工程学院, 江西赣州 341000)

摘要: 为了研究杂波环境下的信号处理问题, 需要对雷达杂波环境进行建模与仿真。文中归纳了雷达杂波的统计模型, 包括幅度分布和功率谱模型, 以及杂波的相应类型, 并对服从一定幅度分布和功率谱分布的相关杂波序列产生方法进行了分析, 给出了每种统计模型的仿真过程, 最后根据杂波仿真的两种主要方法——无记忆非线性变换法 ZMNL 和球不变随机过程法 SIRP 对相关杂波进行了仿真, 解决了仿真过程中成型滤波器设计和特殊函数求值问题。仿真结果表明, 用文中所述方法进行仿真可得到较好的结果。

关键词: 雷达杂波; 幅度分布; 功率谱分布; 无记忆非线性变换法; 球不变随机过程法

中图分类号: TN911.7; TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2009)06-0447-05

Research on Modeling and Simulation of Radar Coherent Clutter

SHEN Hui-fang¹, LAI Hong-hui²

(1. School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Information Engineering, Gannan Medical University, Ganzhou 341000, China)

Abstract In order to make research on the signal processing problem under the clutters, it is necessary to model and simulate the radar environment. This paper summarizes the statistical models of radar clutters, including amplitude distribution and power spectrum models, as well as the corresponding types of clutter, analyses some methods of generating clutter series that submit to amplitude distribution and power spectrum distribution, and presents the simulation process of each model. At last, the simulation is implemented by use of two main methods——ZMNL and SIRP, and the design of the shaping filter and the evaluation of special function during the simulation are solved. Simulation results show that the methods described in this paper obtain better results.

Key words: radar clutter; amplitude distribution; power spectrum distribution; zero memory nonlinearity(ZMNL); spherically invariant random process(SIRP)

1 引言

雷达接收的信号一般包括三个组成部分^[1]: (1)有用的雷达目标回波; (2)由天电干扰和雷达设备本身等形成的噪声; (3)地面、海面、空中的云雨和干扰箔条等背景形成的杂波。杂波信号的强度经常远远超过目标信号, 且杂波谱常常接近于目标, 同时还受雷达设备参数的影响。因此在杂波背景下进行信号处理是雷达的基本任务之一。为了有效地在杂波背景下进行雷达信号的检测,

必须对雷达杂波进行准确建模与仿真。

目前常用的杂波模型主要有^[1-2]:

- (1)描述杂波散射单元机理的机理模型;
 - (2)描述由实验数据拟合后向散射系数 σ^0 与频率、极化、俯角、环境参数等物理量的依赖关系的关系模型;
 - (3)描述杂波幅度和功率谱的统计模型。
- 由于杂波的起伏统计特性对杂波相消处理器输入信杂比有关, 杂波的频谱特性直接关系到 MTI 滤波器的设计, 根据动目标后置处理器的要求, 本文主要通过统计模型对杂波进行建模。

2 杂波统计模型以及相应的杂波类型

采用统计模型对雷达杂波进行仿真,要求杂波幅度和功率谱都要满足一定的概率分布。

常用的描述雷达杂波幅度分布模型^[2-3]有:

(1) 瑞利模型

适用于描述低分辨率雷达和擦地角比较大、高分辨率雷达下的气象杂波、箔条杂波、海杂波,以及在未开发地形下的大擦地角的地杂波。其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right), x > 0 \quad (1)$$

(2) 对数正态模型

适用于描述雷达分辨率比较高、擦地角比较小的海杂波,以及小擦地角的地杂波。其概率密度函数为

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c z} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_c^2} \ln^2\left(\frac{z}{\mu_c}\right)\right) \quad (2)$$

$$z > 0, \sigma_c > 0, \mu_c > 0$$

式中, μ_c 为尺度参数,表示分布的中位数; σ_c 为形状参数,表示分布的偏斜度,对数正态分布的右尾随 σ_c 的增加而提升。 σ_c 相应的变化范围是[0.355, 1.147]。

(3) 韦布尔模型

其动态范围介于上两种分布之间,能在更宽广范围内精确表示实际的杂波分布。通常描述高分辨率雷达、低入射角的情况下一般海情的海杂波。其概率密度函数为

$$f(z) = \left(\frac{p}{q}\right) \left(\frac{z}{q}\right)^{p-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{z}{q}\right)^p\right] \quad (3)$$

$$z > 0, p > 0, q > 0$$

式中, q 为尺度参数,与分布的均方值有关; p 为形状参数,控制分布尾部的形状。

(4) K 分布模型

适用于描述高分辨率雷达的非均匀杂波,多用于描述海杂波。其概率密度函数为

$$K[z, a, v] = \frac{2}{a \Gamma(v+1)} \left(\frac{z}{2a}\right)^{v+1} \cdot K_v\left(\frac{z}{a}\right) \quad (4)$$

$$z > 0, v > -1, a > 0$$

式中, a 为尺度参数,仅与杂波的平均值有关; v 为形状参数,控制分布尾部的形状,其取值范围是[0.1, $+\infty$),当 $v \rightarrow 0.1$ 时, K 分布的右尾较长,可

描述尖峰类杂波,而当 $v \rightarrow +\infty$ 时, K 分布接近于瑞利分布; $K_v(\cdot)$ 为修正的 v 阶贝塞尔函数; $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数。

雷达杂波仿真除上述具有特定概率密度函数外还需知道雷达杂波功率谱分布,常见的有:

(1) 高斯型

$$S(f) = \exp\left\{-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

式中, f_d 为多普勒频率; σ 为杂波分布的标准差。

(2) 立方型

$$S(f) = 1/[1 + |f/f_0|^3] \quad (6)$$

式中, f_0 为杂波功率谱的半功率点频率。

(3) 指数型

$$S(f) = S(0) \exp(-f/f_e) \quad (7)$$

式中, f_e 为归一化等效频率。

杂波是雷达波束在物体表面形成的后向散射,根据反射物不同及反射特性的差别,常见的杂波可分为地杂波、海杂波、气象杂波、箔条杂波以及其他的环境效应等。综上所述,地杂波可采用幅度为瑞利分布、对数正态分布和韦布尔分布,功率谱为高斯型、立方型和指数型的杂波模型;海杂波可采用幅度为对数正态分布、韦布尔分布和 K 分布的高斯型杂波模型;气象杂波和箔条杂波可采用瑞利分布的高斯型模型。具体对应某种杂波,采用何种幅度分布及功率谱由实际情况决定。选择好杂波类型及模型后,就可根据所选模型输入适当参数进行建模。

3 杂波仿真方法

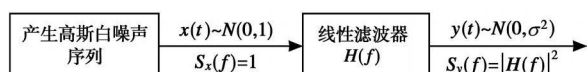
产生具有一定概率分布的相关随机序列的方法^[3-4]主要有:无记忆非线性变换法 ZMNL 和球不变随机过程法 SIRP。

(1) ZMNL 法的基本思路是:首先产生相关的高斯随机序列,然后经某种非线性变换得到需要的相关非高斯随机序列。该方法较为经典,理论推导简单、运算量小、工程实用性强,但是不能直接产生相参雷达的杂波数据,只能产生满足幅度特性的实序列,不包含相位信息;

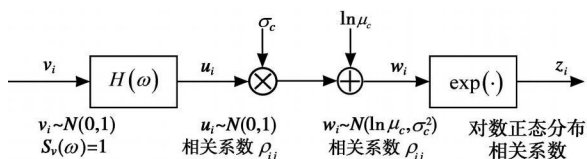
(2) SIRP 法的基本思路是:产生一个相关的高斯随机过程,然后用具有所要求的概率密度函数的随机序列进行调制。该方法允许对杂波的边

缘概率密度函数和自相关函数独立进行控制, 克服了 ZMNL 法中非线性变换对相关函数的影响, 可以用于产生相参的非高斯相关雷达杂波, 但由于用到了矩阵分解, 计算量大且不易形成快速算法, 实用性大大下降。

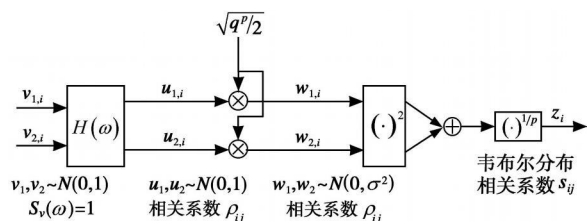
具体而言, 产生相关瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布和 K 分布杂波序列的过程分别如图 1 所示。



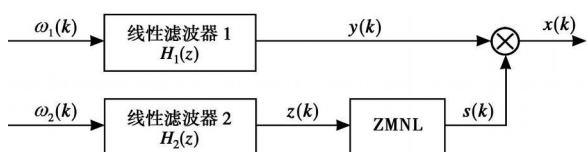
(a) 相关瑞利分布随机序列的产生框图



(b) 相关对数正态分布随机序列的产生框图



(c) 相关韦布尔分布随机序列的产生框图



(d) 相关 K 分布随机序列的产生框图

图 1 相关杂波随机序列的产生过程

4 仿真过程中遇到的难点问题

(1) 线性滤波器的设计

从以上的分析可知, 无论使用 ZMNL 法还是 SIRP 法都要用到线性滤波器的设计。也就是通过输出杂波序列的自相关系数, 得到线性滤波器的结构。通常采用以下几种方法^[9]:

① 傅里叶级数法

也称为傅里叶级数展开法, 通过对所希望的滤波器的频率特性进行傅里叶级数展开, 求 FIR 滤波器的权系数。FIR 滤波器的频率响应为 $H(f) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{j2\pi f n T}$, 其中 a_n 为滤波器权系数, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。希望得到的滤波器频率特性可表示

为 $|H(f)|^2 = S_y(f)$, 通过所期望得到的功率谱 $S_y(f)$ 的公式, 即可得到 $|H(f)|$, 对其进行傅里叶级数的展开, 便可得到滤波器的权系数与傅里叶级数的系数之间的关系, 从而得到滤波器的频率响应。

② 频率采样法^[6]

已知滤波器的频率特性 $H_d(e^{j\omega})$, 它在 $0 \sim 2\pi$ 中间等间隔采样 N 点得到 $H_d(k) = H_d(e^{j\omega})|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k} = H_d(e^{j\frac{2\pi}{N}k})$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。选择一个合适的物理可实现的相位即可确定滤波器的频率响应。

③ AR 模型法

相关高斯随机序列是一个 $\text{ARMA}(p, q)$ 过程, 由于一个 ARMA 过程可由一个足够高阶的 AR 过程来近似, 所以可以选用 p 阶 AR 模型来模拟相关高斯随机序列。已知了输出杂波序列的功率谱, 通过逆傅里叶变换求得其自相关函数, 可以通过修正的 Yule-Walker 方程确定 AR 模型的阶数和参数。

(2) 特殊函数的求解

在瑞利分布和对数正态分布杂波的求解过程中, 杂波序列的自相关系数 s_{ij} 与所求线性滤波器的自相关系数 ρ_{ij} 之间可以通过明确的函数表达式得到。对于瑞利杂波, $s_{ij} = \rho_{ij}$ 。对数正态分布杂波:

$$\rho_{ij} = \frac{\ln[1 + s_{ij}(e^{\sigma_c^2} - 1)]}{\sigma_c^2} \quad (8)$$

在韦布尔和 K 分布杂波中, 由于用到了高斯超几何函数和伽马函数, 很难求从 s_{ij} 到 ρ_{ij} 的显式封闭解。可以采用最小二乘法拟合出一些抽样点的值, 保存在一个曲线表里。要用到某个数值时, 通过插值的方法求解。

(3) 多普勒频移

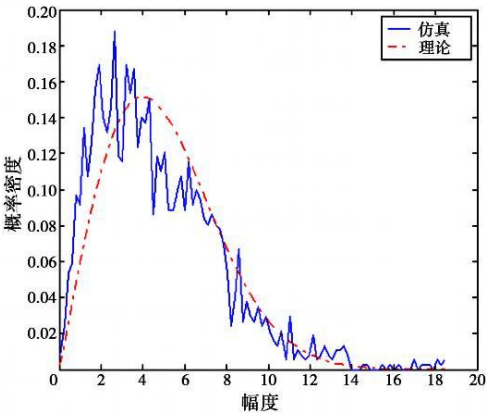
在产生有多普勒频移的谱模型的杂波时, 一般先不考虑杂波的多普勒频移, 即先产生没有多普勒频移的关于零频对称的谱的杂波, 然后再乘以一个单频信号 $\exp(j2\pi f_d t)$, 即可得到一幅度分布不变, 功率谱形状和谱参数均不改变的杂波, 而且该杂波频谱相对零频有一个多普勒频移 f_d 。

5 仿真结果

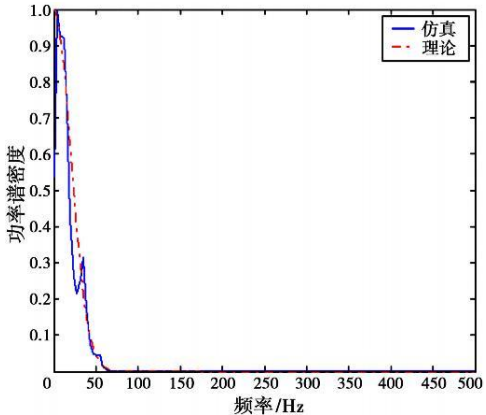
根据杂波模型和仿真方法, 在多普勒频率为 0 的条件下, 分别利用 ZMNL 法仿真得到瑞利分布高

斯谱杂波($\hat{\varphi}=20\text{Hz}$, $\sigma=4$)、对数正态分布立方谱杂波($f_0=20\text{Hz}$, $\mu_c=1.2$, $\sigma_c=1.0$)、韦布尔分布高斯谱杂波($\hat{\varphi}=40\text{Hz}$, $p=1.5$, $q=2.0$)以及利用SIRP法仿真得到K分布高斯谱杂波($\hat{\varphi}=40\text{Hz}$, $\nu=1.0$, $\alpha=0.5$)。

图2~5分别给出了各种分布杂波的概率密度和功率谱的理论值(虚线)和仿真结果的比较。可以看出,本文方法仿真具有一定概率分布的相关杂波序列,可以得到较理想的效果。

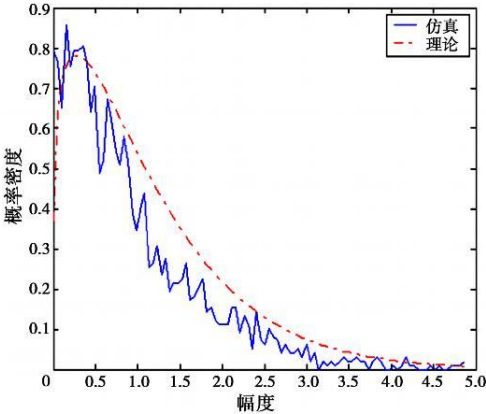


(a) 瑞利分布杂波的幅度分布

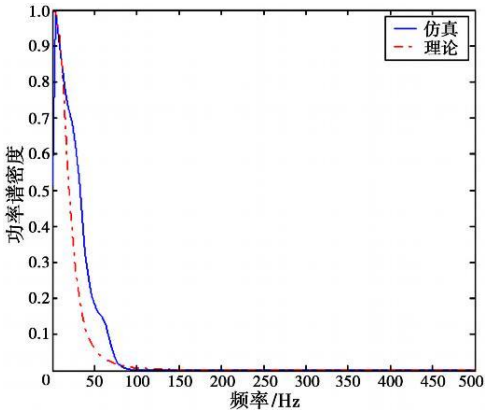


(b) 杂波功率谱

图2 瑞利分布杂波幅度分布和功率谱与理论值的比较

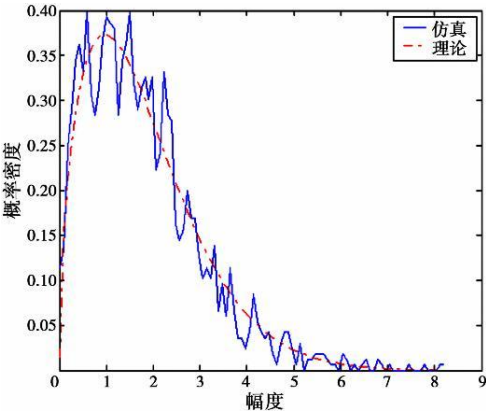


(a) 对数正态分布杂波的幅度分布

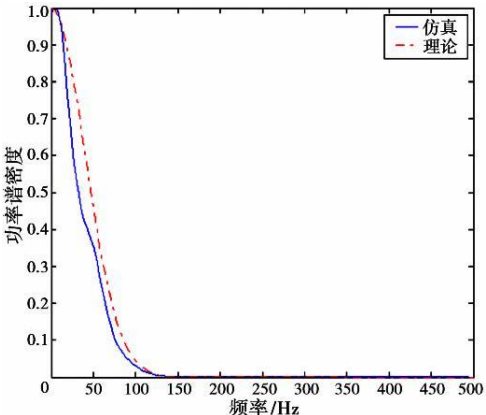


(b) 杂波功率谱

图3 对数正态分布杂波幅度分布和功率谱与理论值的比较



(a) 韦布尔分布杂波的幅度分布

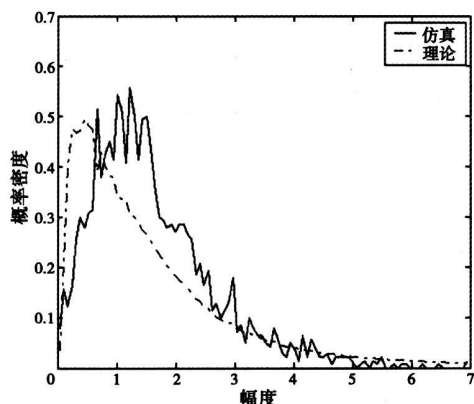


(b) 杂波功率谱

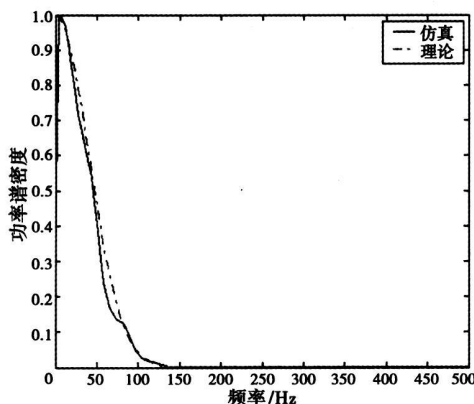
图4 韦布尔分布杂波幅度分布和功率谱与理论值的比较

6 结束语

本文首先归纳了雷达杂波的统计模型,包括幅度分布和功率谱模型,以及杂波的主要类型。然后利用杂波仿真的两种方法:无记忆非线性



(a) K 分布杂波的幅度分布



(b) 杂波功率谱

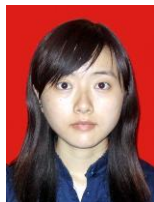
图 5 K 分布杂波幅度分布和功率谱与理论值的比较
性变换法 ZMNL 和球不变随机过程法 SIRP 给出了各种杂波统计模型的仿真步骤, 并分析了设计成型滤波器的方法, 给出了解决特殊函数求值的

方法。最后分别利用 ZMNL 法对瑞利分布、对数正态分布以及韦布尔分布杂波进行仿真, 利用 SIRP 法对 K 分布杂波进行仿真。从仿真结果可以看出, 利用本文所述的方法仿真具有一定概率分布的相关杂波序列, 能够得到较理想的效果。

参考文献:

- [1] 朱先正. 雷达杂波研究及模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [2] 杨凤凤, 周智敏. 基于 ZMNL 法的雷达杂波仿真[J]. 现代雷达, 2003, 25(9): 22-24.
- [3] 田甜. 雷达杂波信号的特性分析及仿真[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [4] 吕雁, 史林, 杨万海. SIRP 法相干相关 K 分布雷达杂波的建模与仿真[J]. 现代雷达, 2002, 24(2): 13-16.
- [5] 沈慧芳, 罗丰. 雷达相关杂波的仿真及其 AR 谱模型[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(2): 124-127.
SHEN Hui-fang, LUO Feng. Simulation of Radar Coherent Clutters and its AR Spectral Model[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(2): 124-127. (in Chinese)

作者简介:



沈慧芳 女, 1983 年出生于江西瑞金, 2007 年 4 月毕业于西安电子科技大学, 获工学硕士学位, 现为江西理工大学信息工程学院助教, 主要研究方向为信号与信息处理。

(上接第 446 页)

- [2] 王金刚, 宫霄霖, 杨锡励, 等. 基于 VxWorks 的嵌入式实时系统设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 69-109.
- [3] 【美】River W. Tornado 用户指南[M]. 王金刚, 王达心, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004: 143-271.
- [4] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 448-470.
- [5] 李川. 利用凝聚点迹来分析雷达的探测精度[J]. 雷达科学与技术, 2003, 1(2): 80-83.
LI Chuan. Analysis of Radar Detection Accuracy by Use of Clotting Plot[J]. Radar Science and Technology, 2003, 1(2): 80-83. (in Chinese)

作者简介:



熊毅 男, 1981 年出生于江西景德镇, 2006 年 4 月毕业于西北工业大学, 获硕士学位, 现为中国电子科技集团公司第三十八研究所工程师, 主要从事雷达数据处理研究工作。

张承志 男, 1967 年生, 1986 年毕业于合肥联大, 现为中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师, 主要从事雷达数据处理算法研究及软件开发工作, 先后参加并主持过多项国家重点雷达产品的软件设计工作。