

一种改进的 Weibull 分布杂波仿真方法

姜 斌^{1,2}, 和 湘², 黎 湘¹, 王宏强¹, 郭桂蓉¹

(1. 国防科技大学四院空间信息技术研究所, 长沙 410073; 2. 通信指挥学院, 武汉 430010)

[摘要] 针对目前 Weibull 分布杂波仿真中没有考虑线性滤波器物理可实现性问题, 首先深入研究了该杂波模型的统计特性及其 ZMNL 仿真方法; 在此基础上, 引入最小相位特性与复倒谱技术, 提出了一种物理可实现的滤波器产生方法, 同时详细阐述了物理可实现 Weibull 分布杂波随机序列产生的流程; 最后, 进行了仿真实验, 仿真结果证明了该方法的准确性和有效性。该方法产生的杂波可用于雷达信号模拟、雷达图像分析及雷达最优信号处理器设计。

[关键词] Weibull 分布杂波; ZMNL; 复倒谱; 物理可实现线性滤波器; 仿真

[中图分类号] TP391.9 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 01-0044-05

1 引言

雷达的基本任务是利用目标的电磁散射特性发现和识别目标, 而目标存在或隐蔽于周围环境之中, 环境电磁散射对雷达目标信号检测产生的干扰称为雷达杂波, 对杂波特性的深入了解并通过雷达信号处理可以最大地发挥雷达在杂波环境中的工作性能^[1]。

随着人们对雷达杂波特性逐渐深入的研究, 先后建立了几种雷达杂波统计模型, 主要有 Rayleigh 分布、Log-normal 分布和 Weibull 分布、复合 K 分布等^[2~8]。

在高分辨力雷达、低入射角的情况下, 一般海情的海浪杂波通常可以用 Weibull 分布精确地描述, 地物杂波也能用 Weibull 分布描述。

找到一种快速、准确地模拟雷达杂波方法, 在雷达最优信号处理器的设计及雷达系统模拟中都是十分重要的。无论是 Rayleigh 分布、Log-normal 分布和 Weibull 分布还是复合 K 分布杂波, 杂波信号的起伏均表现为一个具有一定概率分布的相关序列

的调制过程, 因此, 雷达杂波模拟的实质是要求产生一定概率分布的相关序列。具有一定概率分布的相关随机序列可以描述成维纳模型和球不变随机过程模型, 相应的模拟方法为 ZMNL 方法和 SIRP 方法。针对上述杂波统计模型, 国内外研究者已经得到了较好的杂波模拟方法^[2~8], 在上述杂波模拟的方法中, 存在一个共同的缺点, 就是在线性滤波器处理过程中, 没有考虑其物理可实现性。这必将导致仿真产生的杂波序列不能保证物理可实现性, 从而给后续的雷达信号处理带来难以预计的误差。

针对该问题, 深入研究了 Weibull 杂波模型的统计特性及其 ZMNL 仿真方法, 在此基础上, 引入最小相位特性与复倒谱技术^[9], 提出了一种物理可实现的滤波器产生方法, 同时深入阐述了物理可实现 Weibull 分布杂波随机序列产生的流程, 最后利用修正的 ZMNL 法进行了杂波仿真实验。

2 Weibull 分布杂波模型研究与 ZMNL 方法

2.1 Weibull 分布杂波模型研究

[收稿日期] 2005-08-08; 修回日期 2005-10-09

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (60402032); 国防预研基金资助项目 (41303040203); 国家杰出青年基金资助项目 (60025102)

[作者简介] 姜 斌 (1973-), 男, 湖南邵阳市人, 博士, 通信指挥学院讲师, 主要研究方向一维距离像、杂波建模仿真与雷达检测技术

在高分辨力雷达、低入射角的情况下，一般海情的海浪杂波通常用 Weibull 分布精确地描述，地物杂波也能用 Weibull 分布描述。其概率密度函数

$$p(z) = \frac{\rho \ln 2}{\gamma_m} \left[\frac{z}{\gamma_m} \right]^{\rho-1} \exp \left[-(\ln 2) \left[\frac{z}{\gamma_m} \right]^\rho \right] \quad (1)$$

ρ 为形状参数，表示分布的倾斜度。当 $\rho=2$ 时，Weibull 分布退化成 Rayleigh 分布。 γ_m 是尺度参数，表示分布的中位数。由式 (1)，推导可得：

累积分布函数(CDF) $1 - \exp[-\ln 2(z/\gamma_m)^\rho]$ (2)

一阶矩 $E(z) = \gamma_m \Gamma(1+1/\rho)/(\ln 2)^{1/\rho}$ (3)

二阶矩 $E(z^2) = \gamma_m^2 \Gamma(1+2/\rho)/(\ln 2)^{2/\rho}$ (4)

2.2 零记忆非线性变换方法

基于维纳随机过程模型的 ZMNL 方法原理，如图 1 所示。

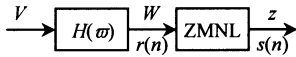


图 1 ZMNL 方法原理

Fig.1 The principle of ZMNL method

独立的白谱复高斯过程 V 经过滤波器 $H(\omega)$ 后，引入 z 所需要的相关特性。ZMNL 方法将 W 的 Pdf 变成所需信号 z 的 Pdf，并保持 W 的相位特性不变。经过 ZMNL 变换后， W 的自相关函数 $r(n)$ 与 z 的自相关函数 $s(n)$ 之间存在一定的非线性关系，即

$$r(n) = g[s(n)] \quad (5)$$

基于普通维纳模型的随机序列产生方法直观、简洁，易于用快速算法实现。但存在一个明显的不足，就是由于输入序列 W 与输出序列 z 有复杂的非线性关系，所以只利用简单的 $g(\cdot)$ 一般无法得到所求的序列。

3 物理可实现 Weibull 分布杂波序列的产生方法

3.1 物理可实现 Weibull 分布杂波随机序列产生流程

物理可实现 Weibull 分布杂波随机序列的产生流程如图 2 所示，其中，随机序列 x_j, y_j 是独立的、不相关的高斯分布随机向量。 $H(\omega)$ 是物理可实现线性滤波器。

3.2 高斯分布随机序列与 Weibull 分布随机序列

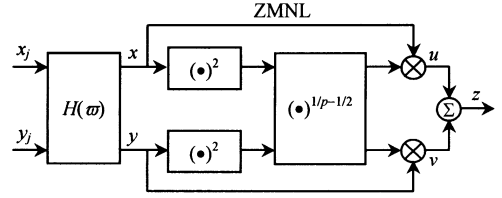


图 2 物理可实现 Weibull 分布杂波随机序列产生流程

Fig.2 The simulation flow of Weibull clutter sequence based on the realizable filter in physical

的相关函数间的关系

由于 ZMNL 模型的非线性，要获得精确的 Weibull 分布杂波模型，首先必须建立相关高斯分布随机序列与 Weibull 分布杂波随机序列的相关函数间的关系。

对于仿真 Weibull 分布模型来说，ZMNL 变换的输入和输出自相关函数 (ACF) 都是复数序列^[9]

$$R_y(k) = E[(u(m) + jv(m))(u(m+k) + jv(m+k))] = 2[R_{uu}(k) - R_{vv}(k)] \quad (6)$$

定义归一化的自相关函数

$$r_y(k) = R_y(k)/R_y(0) = r_{uu}(k) - j r_{vv}(k) \quad (7)$$

对于输入复高斯过程 W ，其相应归一化自相关函数为

$$r_w(k) = r_{xx}(k) - j r_{xy}(k) \quad (8)$$

利用文献 [3] 给出的简化求解非线性方程的关系式：

$$\mu(k) = R_{vv}(k)/R_{uu}(k) = r_{uv}(k)/r_{uu}(k) = r_{xy}(k)/r_{xx}(k) \quad (9)$$

可以推导出 r_{xx} 和 r_{uu} 之间的映射关系为

$$r_{uu}(k) = [\rho r_{xx}(k)/2\Gamma(2/\rho)] \cdot [1 - (1 + \mu^2(k)) r_{xx}^2(k)]^{2/\rho+1} \Gamma^2(1/\rho + 3/2) \cdot {}_2F_1[1/\rho + 3/2, 1/\rho + 3/2; 2; (1 + \mu^2(k)) r_{xx}^2(k)] \quad (10)$$

其中，超几何函数表达式为

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(a+n)\Gamma(b+n)}{\Gamma(c+n)} \frac{z^n}{n!} \quad (11)$$

超几何级数收敛的条件是

$$(1 + \mu^2(k)) r_{xx}^2(k) < 1, k > 0 \quad (12)$$

对于 ACF 是实数的情况，也就是当 x, y 和 u, v 分别独立时， $r_{uv}(k) = r_{xy}(k) = 0$ ，即 $\mu(k) = 0$ 的情况下， r_{xx} 和 r_{uu} 之间的映射关系简化为

$$r_{uu}(k) = [\rho r_{xx}(k)/2\Gamma(2/\rho)] \cdot [1 - r_{xx}^2(k)]^{2/\rho+1} \Gamma^2(1/\rho + 3/2) \cdot {}_2F_1[1/p + 3/2, 1/p + 3/2; 2; r_{xx}^2(k)] \quad (13)$$

由于无法从式 (10) 或式 (13) 中得出 $r_{ij}(t)$ 的表达式, 所以在实际计算中, 可以将 $r_{uu}(k)$ 与 $r_{xx}(k)$ 的关系曲线存入一个表中, 然后根据给定的 $r_{uu}(k)$ 序列, 通过查表来求得 $r_{xx}(k)$ 序列。

3.3 常规物理不可实现的滤波器 $H(\omega)$ 产生方法

线性滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的作用是把独立高斯噪声变为相关高斯噪声, 其幅频响应 $|H_1(\omega)|$ 和 $|H_2(\omega)|$ 的产生具体产生步骤为^[3, 7, 8]:

1) 根据具体模拟目的的需要, 适当选择 Δf , 对于给定的功率谱密度函数 S_s 进行采样得到序列 $\{S_k\}$;

2) 对于已得到的序列 $\{S_k\}$, 进行 IFFT 变换, 获得所求的随机序列的自相关函数序列 $R_r(k)$, 从而计算出实数序列 $R_{uu}(k)$ 和 $R_{uv}(k)$;

3) 计算 $r_{uu}(k)$ 和 $\mu(k)$;

4) 步骤 3 的结果代入 r_{xx} 和 r_{uu} 之间的非线性方程式 (10) 或式 (13), 求解得到 $r_{xx}(k)$ 和 $r_{xy}(k)$;

5) 由自相关系数 $r_{xx}(k)$ 和 $r_{xy}(k)$ 计算出线性滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的幅频特性。

$$S_1(\omega) = \sum_k r_{xx}(k) e^{-j\omega k},$$

$$S_2(\omega) = \sum_k r_{yy}(k) e^{-j\omega k} \quad (14)$$

$$|H_1(\omega)|^2 = S_1(\omega) / \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_1(\omega) d\omega \quad (15)$$

$$|H_2(\omega)|^2 = S_2(\omega) / \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_2(\omega) d\omega \quad (16)$$

由上述求解过程可知, 常规 Weibull 分布杂波模拟滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的产生只考虑了幅频响应特性, 而没有考虑物理可实现性要求。

3.4 一种物理可实现的 $H(\omega)$ 处理方法

式 (15)、式 (16) 得到的线性滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 没有考虑滤波器相频响应, 不能满足物理可实现性的要求。为了解决这个问题, 可以引入最小相位特性和复倒谱技术^[10], 求解 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的相频响应, 从而满足物理可实现性要求。令 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的统一表达式为 $H(\omega)$ 。

首先, 对线性滤波器 $H(\omega)$ 求对数

$$H(\omega) = \ln(H(\omega)) =$$

$$\ln(|H(\omega)|) + j\arg(H(\omega)) \quad (17)$$

则称 $h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\omega) e^{j\omega n} d\omega$ 为 $h(n)$ 的复倒谱,

其中 $h(n)$ 为线性滤波器 $H(\omega)$ 的时域响应。如果要求 $h(n)$ 是最小相位序列, 则 $h(n)$ 是因果序列, 因此 $h(n)$ 的偶部

$$h_e(n) = (h(n) + h(-n))/2 \quad (18)$$

它与 $H(\omega)$ 实部 $H_r(\omega) = \text{Re}(H(\omega)) = \ln(|H(\omega)|)$ 是傅利叶变换对, 故由 $h_e(n)$ 可以完全恢复 $h(n)$, 进而得到 $h(n)$ 和 $H(\omega)$ 。

在数字仿真环境下, 该方法的主要步骤为:

1) 对 $|H(k)|$ 求对数, 得到 $H_r(\omega) = \ln|H(\omega)|$;

2) 对 $H_r(k)$ 求傅立叶反变换得到复倒谱 $h(n)$ 的偶部 $h_e(n)$;

3) 由 $h_e(n)$ 恢复 $h(n)$, 即 $h(n) = h_e(n) \cdot u_+(n)$, 其中

$$u_+(n) = \begin{cases} 2, & n > 0 \\ 1, & n = 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (19)$$

4) 求 $h(n)$ 傅立叶反变换得到 $H(k)$;

5) 由 $H(k) = \exp(H(k))$ 得到所需物理可实现的线性滤波器频率响应函数。

综上所述, Weibull 分布杂波随机序列产生的步骤为: 首先将独立高斯分布随机序列通过物理可实现线性变换滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$, 得到相关高斯分布随机序列; 进而通过 ZMNL 变换, 分别得到 u, v ; 最后, u 和 v 的和构成物理可实现的 Weibull 分布杂波随机序列 z 。

4 仿真实验及结果分析

仿真环境: 杂波功率谱采用文献 [8] 给出的相参脉冲雷达杂波模型的杂波功率谱,

$$r_z(k) = 2[1 + \cos(4\pi k V_{or}) \exp(-8\pi^2 k^2 \sigma_a^2)/2] \cdot \exp(-j2\pi k V_{od} - 2\pi^2 k^2 \sigma_a^2 - k^2/2 T_0^2)/3 \quad (20)$$

其中, $\sigma_a, V_{od}, V_{or}, T_0$ 为杂波相关函数的参数, 典型值为 0.025, -0.05, 0.03, 24。脉冲重复周期为 20 ms, 相关系数 $r_{uu}(k)$ 实部和虚部 $r_{uv}(k)$ 。

Weibull 分布参数 $\gamma_m=1.65$, $\rho=1.6$ 。

不同 p 值时, 理想的 Weibull 分布曲线如图 3 所示, 形状参数 p 反映了 Weibull 分布的偏斜度, p 越小, 分布的不对称性越明显, 杂波有较长的拖尾。

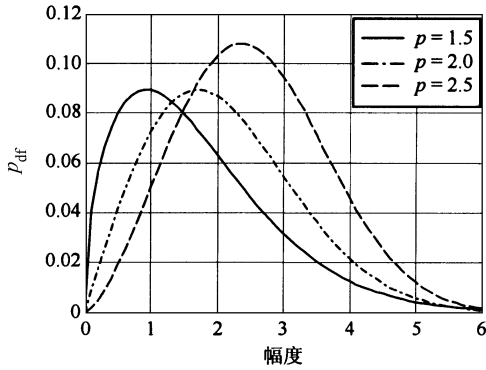


图 3 不同 p 值对应理想 Weibull 分布曲线
Fig.3 The curve of theory Weibull distribution corresponding to different p

$p=0.5$, $\mu = [0 \ 0.2 \ 0.4 \ 0.6]$ 时, 对应 r_{xx} , r_{uu} 曲线如图 4 所示, 分析可知, μ 值越小, r_{xx} 与 r_{uu} 的非线性性最小。

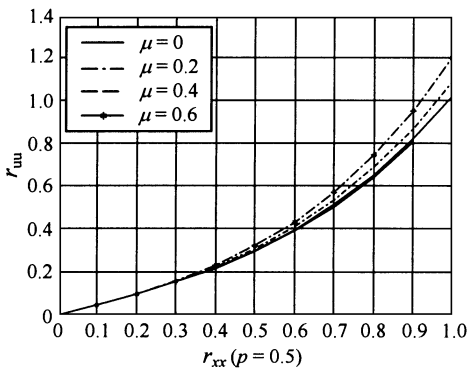


图 4 不同 μ 值对应 r_{xx} , r_{uu} 曲线
Fig. 4 The curve of r_{xx} and r_{uu} corresponding to different μ

图 5 中, $\mu=0$, 即, x, y 和 u, v 分别独立, 对应 $r_{xy}(k) = r_{uv}(k) = 0$ 。分析可知, p 值越小, r_{xx} 与 r_{uu} 的非线性程度越小。当 $p > 1$ 时, p 值的增大对曲线形状基本上没有影响。

分析图 6 可知, 理论 Weibull 分布曲 (图 6 中实线) 与实际 Weibull 分布曲线非常接近, 说明此方法可以准确地模拟 Weibull 分布杂波。

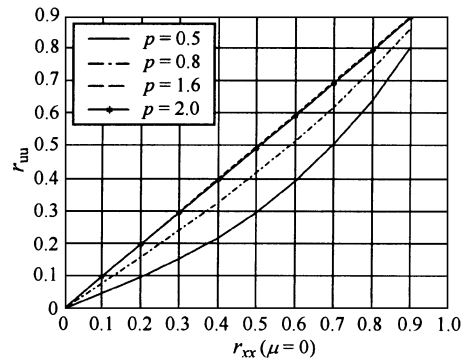


图 5 不同 p 值对应 r_{xx} , r_{uu} 曲线
Fig.5 The curve of r_{xx} and r_{uu} corresponding to different p

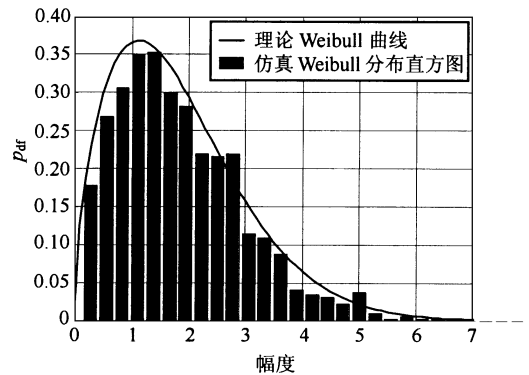


图 6 理论 Weibull 分布与仿真 Weibull 分布
Fig.6 The relative curves between the distribution of theory amplitude and simulation amplitude

5 结论

由于现代雷达技术的不断发展, 对雷达杂波的精确建模和仿真已越来越重要, 它是实现雷达优化设计的先决条件。但是在以往的杂波仿真中, 都没有考虑线性滤波器的物理可实现性问题。笔者深入研究了 Weibull 杂波模型的统计特性及其 ZMNL 仿真方法; 在此基础上, 引入最小相位特性与复倒谱技术, 提出了一种物理可实现的滤波器产生方法, 同时深入阐述了 Weibull 分布杂波随机序列产生的方法。最后, 利用修正的 ZMNL 方法进行仿真实验, 结果证明了这种方法的准确性与有效性。这种方法产生的 Weibull 分布杂波, 可用于雷达信号模拟、雷达图像分析以及雷达最优信号处理器的设计。所采用的物理可实现滤波器方法, 已应用在 Log-Normal 分布、复合 K 分布杂波模拟仿真中, 均

取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 黄培康. 雷达目标特征[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [2] 张志勇, 曹治国, 张天序. 相关 Weibull 分布雷达杂波的模拟[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(1): 93~95
- [3] Li Gang, Yu K-B. Modelling and simulation of coherent Weibull clutter [J]. IEE PROCEEDINGS-F, 1989, 136(1): 2~12
- [4] 申玉, 陶然, 单涛. 相关对数正态分布雷达杂波的建模与仿真[J]. 火控雷达技术, 2001, 30(4): 1~5
- [5] 王颖, 毛二可, 韩月秋. 相关 K 分布的建模与仿真[J]. 信号处理, 1997, 13(2): 141~146
- [6] 蒋咏梅, 陆铮. 相关非高斯分布杂波的建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(10): 27~30
- [7] Marier L J Jr. Correlated K-distributed clutter generation for radar detection and track [J]. IEEE Trans on AES, 1995, 31(2): 568~580
- [8] Hawkes C D, Haykin S S. Modeling of clutter for coherent pulse radar [J]. IEEE Trans on AP, 1975, 31(8): 1013~1023
- [9] 张长隆. 杂波建模与仿真技术及其在雷达信号模拟器中的应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004
- [10] 奥本海姆 A V, 谢弗 R W. 离散信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2000

An Ameliorated Method of Simulation for the Weibull-distributed Clutter

Jiang Bin^{1,2}, He Xiang², Li Xiang¹, Wang Hongqiang¹, Guo Guirong¹

(1. *Research Institute of Space Electronics Information Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*; 2. *Command Academy of Communication, Wuhan 430010, China*)

[**Abstract**] To solve the question that the realizable linear filter in physics is not considered in the simulation of the Weibull-distributed clutter, firstly, this paper studies the statistic characteristic of the clutter model and the simulation method of ZMNL(zero memory nonlinearity). Then adopting minimum phase feature and complex cepstrum technology, this paper proposes the technique for the realizable filter in physics. Then the method of generation of random Weibull-distributed sequences is set forth profoundly. Finally, the simulation is carried out and the results prove the validity and veracity of the method proposed in this paper. The clutter generated by this method can be used in the simulation of radar signal, analysis of radar image and optimization of radar signal processor.

[**Key words**] Weibull-distributed clutter; ZMNL; complex cepstrum; realizable linear filter in physics; simulation