

Airborne PD Radar's Sea Clutter Emulation Based on K Distribution

Xubin Dai¹, Dong Xia², Jindong Song³

¹PLA 92916 Troop, Lingshui Hainan

²Qingdao Branch of Navy Aviation University, Qingdao Shandong

³PLA 91046 Troop, Lingshui Hainan

Email: xcdo@163.com

Received: Oct. 4th, 2018; accepted: Oct. 19th, 2018; published: Oct. 26th, 2018

Abstract

When airborne radar radiates to the sea, targets' echoes follow with sea clutter of much more power, and the work of sea clutter emulation does much help to the suppress of sea clutter. Sea clutter's intensity is stochastically changing in time and space with some relativity. In order to simulate sea clutter's characteristic simulation, K distribution is selected to achieve the simulation of sea clutter's intensity's fluctuant characteristic, while cubic power spectrum is selected to carry out relativity characteristic simulation with Doppler frequency effect introduced by wave and platform moving. Emulation result shows that the built model could reflect fluctuant characteristic and relativity characteristic of sea clutter perfectly.

Keywords

Airborne PD Radar, Sea Clutter, K Distribution Model, Power Spectrum, Time Correlation

机载脉冲多普勒雷达基于K分布的海杂波仿真

代旭斌¹, 夏 栋², 宋金东³

¹中国人民解放军92916部队, 海南 陵水

²海军航空大学青岛校区, 山东 青岛

³中国人民解放军91046部队, 海南 陵水

Email: xcdo@163.com

收稿日期: 2018年10月4日; 录用日期: 2018年10月19日; 发布日期: 2018年10月26日

摘要

机载雷达对海探测过程中目标回波会伴随着大量的海杂波，对海杂波进行仿真有助于提升雷达海杂波抑制能力。海杂波的幅度在时间和空间上随机起伏，并且存在一定的相关性。为逼真地模拟海杂波的特性，采用K分布模型实现了海杂波幅度起伏特性的模拟，采用立方功率谱实现了海杂波相关特性的模拟，并考虑了海浪运动和雷达平台运动引起的多普勒效应。仿真结果表明，该模型能够较好反应机载脉冲多普勒雷达海杂波幅度的起伏特性和时间相关性。

关键词

机载脉冲多普勒雷达，海杂波，K分布模型，功率谱，时间相关

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

机载雷达采用下视方式对海探测时，海表面会反射大量的电磁波，即海杂波。海杂波严重影响了雷达对海上舰船、低飞导弹等海上目标的探测，一直是雷达系统设计人员非常关心的课题。机载雷达对海探测时决定雷达探测性能的不是接收机内部噪声，而是环境杂波中的海杂波。因此研究海杂波的形成机理、海杂波的分布特性，对海杂波进行建模仿真可以为制定雷达设计方案、选择雷达参数、采取各抗杂波的措施等工作提供理论依据[1]。本文将通过研究海杂波时间起伏特性和相关性，根据K分布起伏模型实现海杂波时域和频域的仿真。

2. 海杂波K分布起伏模型

海杂波产生是由于海面后向反射的原因，而海杂波强幅度则是因为海浪破坏了海面光滑度，并且海杂波后向反射能力强弱即后向散射系数，随频率、入射角和海况级别而增加。因此，海杂波强度的影响因素包括海况(即风速)、风向、观测时间、擦地角、电磁波极化和波长。海杂波幅度随时间和空间随机起伏，若海杂波视为大量的独立随机散射体的回波合成，其幅度可用Rayleigh分布模型仿真。高分辨率雷达可以把不同的波浪结构分辨开，海杂波便呈现尖峰状，而在波浪后面区域会被遮挡，该情况下对数正态分布能更好的逼近海杂波的起伏特性。韦布尔分布是另一种常用的海杂波模型。与对数正态和Rayleigh模型相比，韦布尔模型在很宽的条件范围内很好地与实验数据相匹配。对数正态分布模型和韦布尔分布模型对长拖尾的非高斯杂波模拟有比较好的改善，但不能很好地模拟尖海杂波等非均匀区域杂波的特性[2]。

根据高分辨率雷达在低视角的实际海杂波数据，K分布的复合形式可以很好地与观测数据匹配[3]。该模型不仅可以在很宽的范围内与杂波幅度分布相匹配，还能够正确地模拟出杂波回波脉冲间的相关特性，并且K分布可以从原理上很好的解释海杂波的形成过程。用K分布模型表示海杂波基于以下假设[4]：在每个给定的距离-角度分辨单元中，海杂波的幅度起伏服从高斯分布(称为散斑，speckle)，其方差在时间和空间上服从Gamma分布。这相当于用Gamma分布的随机变量(称为纹理，texture)在时间和空间上调制散斑功率。该过程称之为“调制过程”，也就是用空间上服从Gamma分布的强度来乘以一个独立的

复高斯散斑分量。海杂波中散斑的形成来自于毛细浪的作用，而“调制”的纹理(即 Gamma 分布随机变量)相当于米数量级上的海浪的起伏。K 分布随机变量 x 的概率密度函数为：

$$K(x; a; \nu) = \frac{2}{a\Gamma(\nu+1)} \left(\frac{x}{2a}\right)^{\nu+1} K_{\nu}\left(\frac{x}{a}\right), x > 0, \nu > -1 \quad (1)$$

式(1)中， ν 为形状参数， a 为标度参数， $a > 0$ ， $K_{\nu}(x)$ 为 ν 阶第二类修正贝塞尔函数。对于大多数雷达杂波形状参数的取值范围为 $\nu > -1$ ，当 ν 的取值较小时杂波有较长的拖尾，当 $\nu \rightarrow \infty$ 时杂波分布逼近 Rayleigh 分布。

如上所述，K 分布混合模型包含了杂波起伏的两个部分，这两部分具有不同的相关时间。第一部分是基本幅度调制分量，属于慢变化分量，它是由照射区域空间变化引起的电磁波散射电平变化所致。基本幅度调制分量可用取平方根的 Gamma 分布表示，其相关性依赖风速等环境条件，相关时间长达秒量级，并且不受雷达捷变频的影响，可通过对数据进行 1/4 秒的积分而分离出来。第二部分是斑点分量，属于快变化分量，它是由雷达距离单元中杂波的多路径散射特性产生的，可通过散射体内部运动或者频率捷变而去除相关。斑点分量可从短时间序列的杂波数据中分离出来。

3. 机载脉冲多普勒雷达功率谱模型

杂波是随机起伏信号，但是在时间上存在相关性，其时间相关性可用其功率谱密度或自相关函数表示，常用的海杂波功率谱模型有高斯模型和全极点模型两种。

3.1. 高斯功率谱模型

高斯杂波功率谱模型的功率谱密度函数表达式为

$$S(f) = S_0 \exp\left(-\frac{f^2}{2\sigma_f^2}\right) \quad (2)$$

式中， S_0 为杂波中心频率的杂波功率谱密度， σ_f 为杂波频谱的均方根。海浪相对于雷达具有一定的速度[5]，若海浪运动引起的海杂波平均多普勒频率用 \bar{f}_d 表示，则杂波功率谱密度函数可用式(3)表示

$$S(f) = S_0 \exp\left[-\frac{(f - \bar{f}_d)^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad (3)$$

考虑到机载平台的运动，飞机与海面存在相对运动，设换算后的径向速度为 v_r ，则由于飞机平台运动引起的多普勒频移为

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (4)$$

因此海杂波功率谱密度应进一步修正为式(5)

$$S(f) = S_0 \exp\left[-\frac{(f - \bar{f}_d - f_d)^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad (5)$$

3.2. 全极点功率谱模型

高斯功率谱模型简单且容易理解，但不能很好的描述杂波功率谱分布的拖尾效应，全极点模型可以更精确的描述具有拖尾效应的杂波模型。全极点模型函数表达式为：

$$S(f) = S_0 \frac{1}{1 + (f/f_c)^n} \tag{6}$$

式中, f_c 为 3 dB 截止频率(在该频率杂波功率谱值与功率谱最大值相比下降 3 dB), 其它各参数含义与 3.1 节一致。考虑到海浪运动和飞机平台运动引起的多普勒频移, 参照式(5)全极点模型可以表示为式(7)

$$S(f) = S_0 \frac{1}{1 + \left[\frac{(f - \bar{f}_d - f_d)}{f_c} \right]^n} \tag{7}$$

当式(7)中, 当 n 值取 2 时称为马尔科夫模型或柯西模型, n 值取 3 时称为立方谱模型。

4. 相关 K 分布海杂波模型模拟仿真

4.1. 相关 K 分布海杂波模型建立

如前所述, K 分布混合模型包含了杂波起伏的两个部分, 一部分是慢起伏的基本幅度调制分量, 服从 Gamma 分布, 具有长相关时间; 另一部分快起伏的斑点分量, 具有短相关时间, 服从 Rayleigh 分布。若用 z^2 表示海杂波的功率, 则它可以用两个独立随机变量的乘积表示[6]:

$$z^2 = X \cdot Y \tag{8}$$

其中, X 服从 Rayleigh 分布, 代表了快变化分量; Y 服从 Gamma 分布, 代表了慢变化基本幅度调制分量。分别产生服从 Rayleigh 分布的随机数 x 和服从 Gamma 分布的随机数 y , 通过计算 $z^2 = \sqrt{xy}$ 就可得到需要的随机序列。相关 K 分布的产生流程如图 1 所示。

根据图 1, 相关 K 分布杂波数据产生的步骤为[7]:

- 1) 根据仿真需求, 选择合适杂波功率谱函数 $S(f)$, 本文采用的杂波功率谱为立方谱函数, 即式(7)中 n 取 3 后的结果。对 $S(f)$ 进行 N 次采样得到功率谱序列 $\{S(k)\}$, $k=1, 2, \dots, N$ 。
- 2) 对得到的功率谱序列 $\{S(k)\}$ 进行逆傅里叶变换, 得到所求杂波的自相关系数序列 $\{s(j)\}$, $j=1, 2, \dots, N$ 。
- 3) 根据杂波相关系数 $\{s(j)\}$ 利用最小二乘法计算得出图 1 中相关高斯随机序列 $\{w_{n,i}\}$ ($n=1, 2, \dots, \theta$, $i=1, 2, \dots, N$) 的相关系数 r_j 和 $\{w_{\theta+1,i}\}$ 、 $\{w_{\theta+2,i}\}$ ($i=1, 2, \dots, N$) 的相关系数 q_j , $j=1, 2, \dots, N$ 。
- 4) 根据得到的相关系数 r_j 和 q_j , 利用 AR 模型设计图 1 中滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 。

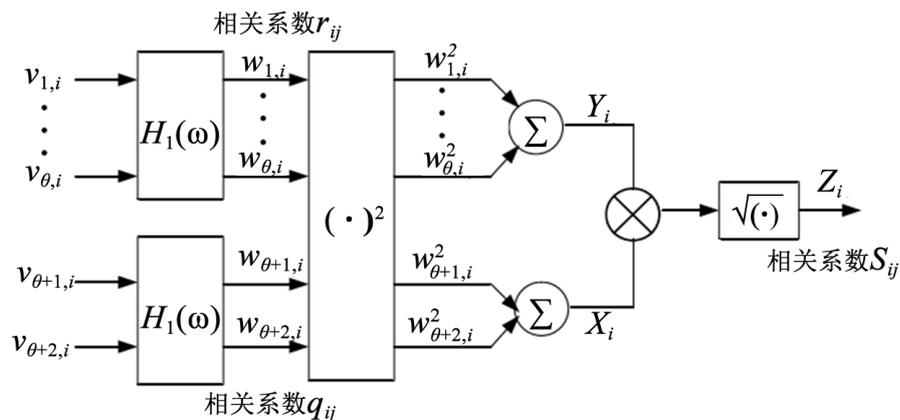


Figure 1. Block diagram of correlated K distribution clutter
图 1. 相关 K 分布杂波产生框图

5) 产生独立的高斯分布序列 $\{v_{j,i}\}$ ($j=1,2,\dots,\theta+2$), 并经过线性滤波器 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 调制产生出满足相应谱特性的相关高斯随机序列 $\{w_{j,i}\}$ ($j=1,2,\dots,\theta+2$)。

6) 根据图(1)所示步骤, 得到所需要的相关 K 分布随机序列 $\{z_i = \sqrt{x_i y_i}\}$ ($i=1,2,\dots,N$), 其中:

$$x_i = w_{\theta+1,i}^2 + w_{\theta+2,i}^2 \quad (9)$$

$$y_i = w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_{\theta,i}^2 \quad (10)$$

4.2. 相关 K 分布海杂波模型仿真分析

根据上一节的模型和步骤对 S 波段雷达下的海杂波进行仿真, 仿真条件如下:

1) 海杂波功率谱模型选择立方谱模型, 3 dB 截止频率 $f_c = 90$ Hz, 海杂波平均多普勒频率用 $\overline{f_d} = 30$ Hz;

2) 雷达飞机平台相对海面的径向速度 $v_r = 100$ m/s, 雷达工作波长 $\lambda = 0.1$ m, 平台运动引起的多普勒频移为 $f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = 2000$ Hz。

由以上仿真条件, 得到的独立不相关高斯随机序列和产生的相关 K 分布杂波如图 2 和图 3 所示, 图 3 中的数据相较于图 2 具有相关性。

对产生海杂波的概率密度分布和功率谱进行计算后得到图 4 和图 5。由图可以看出: 产生的海杂波在幅度分布上具有长拖尾特性, 符合 K 分布特性, 而功率谱关于中心频率左右对称, 符合立方功率谱的特性。

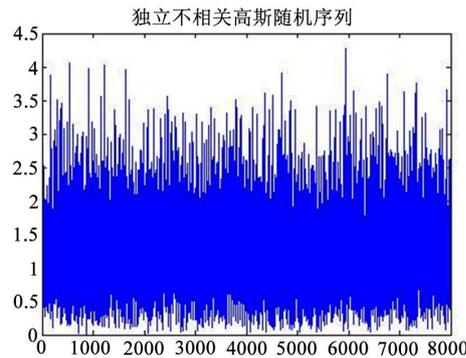


Figure 2. Simulation of independent irrelevant random sequences
图 2. 独立不相关随机序列仿真

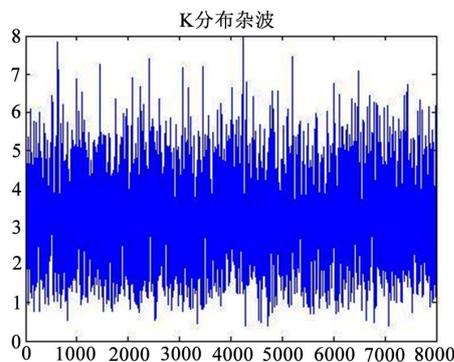


Figure 3. K distribution sea clutter generated by simulation
图 3. 仿真产生的相关 K 分布海杂波

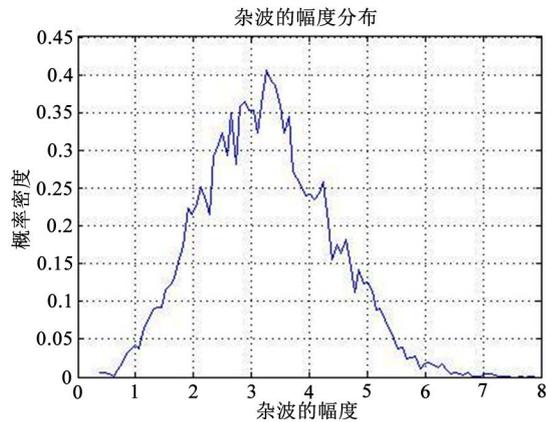


Figure 4. Statistical results of sea clutter amplitude
图 4. 产生海杂波幅度统计结果

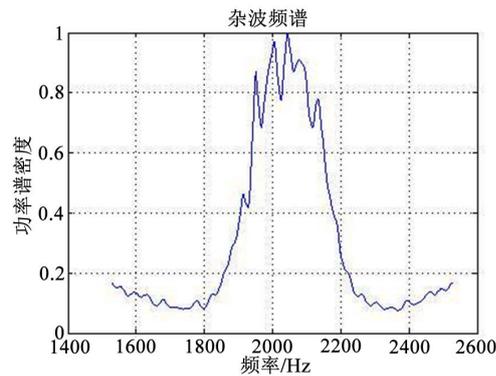


Figure 5. Calculation results of sea clutter power spectrum
图 5. 仿真海杂波功率谱计算结果

5. 结束语

海杂波仿真对雷达系统设计和雷达信号处理都有非常重要的作用。在考虑海杂波平均多普勒频移和平台运动引起的多普勒频移的基础上，通过采用立方功率谱和 K 分布模型，仿真了机载脉冲多普勒雷达的海杂波。结果表明，仿真信号在幅度分布和功率谱特性上符合设定的参数。

参考文献

- [1] 黄斌. 机载海杂波建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [2] 何友, 关键, 彭应宁. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] Conte, E., De Maio, A. and Galdi, C. (2004) Statistical Analysis of Real Clutter at Different Range Resolutions. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **40**, 903-918. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1337463>
- [4] 曹艳霞, 李国君. 基于 K 分布舰载雷达海杂波仿真方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 86-90.
- [5] 丁昊, 李建忠, 安昕, 等. 实测海杂波数据的多普勒谱特性[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4): 400-408.
- [6] 常磊. 雷达杂波模拟与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] 吕世芳. 地、海雷达杂波的模拟技术研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2012.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-6753, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jisp@hanspub.org