

班 级 1302019

学 号 13020199016

西安电子科技大学

本科课程设计报告



题 目 海杂波特性仿真

学 院 电子工程学院

专 业 电子信息工程

学生姓名 梁祥

导师姓名 魏峰

西 安 电 子 科 技 大 学

电 子 工 程 学 院

课 程 设 计（报告）任 务 书

学生姓名 梁祥 指导教师 魏峰 职称 副教授

学生学号 13020199016 专业 电子信息工程

题目 海杂波特性仿真

相关专业课程 《雷达原理》，《数字信号处理》，《雷达信号处理和
数据处理技术》等

任务与要求

- 1、利用网络和图书馆查阅海杂波特性的相关知识；（宋体小4）
- 2、学习掌握 matlab 仿真平台；
- 3、掌握海杂波特性的理论知识以及了解海杂波的概率密度，功率谱等相关知识；
- 4、利用 matlab 仿真平台编程实现海杂波不同概率密度以及功率谱的仿真，比较他们的区别；
- 5、通过仿真练习让学生了解海杂波特性的知识并且认真撰写课程设计报告。

开始日期 2016 年 12 月 26 日 完成日期 2017 年 1 月 9 日

课程设计所在单位 电信工程系 2017 年 1 月 9 日

宋体四

海杂波特性仿真

摘要: 海杂波具有很强的空时相关性, 很大的平均功率和很复杂的统计特性。目前, 主要的杂波幅度分布模型有瑞利分布、对数正态分布、韦伯尔分布和相关 K 分布; 主要的功率谱分布模型有 Gaussian 型、立方型、指数型和相干脉冲非对称谱雷达杂波模型。在介绍这些模型的基础上, 对这些模型进行了仿真实验, 并调整模型参数, 对其分布曲线的变化情况进行讨论。

关键词: 海杂波, 幅度分布模型, 功率谱分布模型

Abstract: Sea clutter has strong space-time correlation, large average power and very complex statistical properties. At present, the main clutter amplitude distribution models are Rayleigh distribution, log-normal distribution, Weber distribution and correlation K distribution; the main power spectrum distribution model has Gaussian, cubic, exponential and coherent pulse asymmetric radar clutter model. On the basis of introducing these models, this paper has carried on the simulation experiment to these models, and adjusted the model parameters, discussed the changes of its distribution curve.

Keyword: sea clutter, amplitude distribution model, power spectrum distribution model

1. 引言

杂波被用来描述这样一类物体, 即能够产生干扰雷达正常工作的非期望信号的雷达回波^[1]。这些杂波的来源可能是来自于地面的各种物体、海洋中的浪涌、空中的鸟群、人为施放的金属箔条等。其中, 海杂波是指除了我们感兴趣的目标之外, 来自于海面反射回来的部分雷达回波信号。在实际应用中, 海杂波信号可以扮演不同的角色, 海杂波既可以被认为是目标, 也可以被看作是杂波, 如果我们想研究的是海洋或其动态模型, 我们感兴趣的问题是如何从海洋中获得有价值的海洋信息(例如风速、浪高、海涌方向等), 此时海杂波就是我们感兴趣的目标, 被视为有用的信息; 如果我们想要进行海杂波背景下的雷达目标检测, 那么海杂波就被认为是干扰源, 我们所关心的问题就是如何设计出检测性能比较好的目标检测算法以便在杂波中提取目标^[2]。因此, 对海杂波特性的研究更为重要, 这是之后的建模应用与杂波仿真的基础。

随着我海军战略由近海防御向远海防卫转变, 以及当前国际安全形势的复杂化, 尤其是美国亚太平衡战略的实施, 使得我海军面临的海上威胁与挑战日益增多, 对我海军的对海雷达探测能力提出了更高的要求^[3]。海洋为国家提供着重要的战略资源的同时,

也是国家领土不可分割的一部分。因此，对于海杂波的研究也是雷达信号处理领域的一个重要的课题。由于海杂波具有较强的空时相关性，很大的平均功率和很复杂的统计特性，因此在海杂波背景下进行目标检测并不容易。在通常情况下，杂波的功率比目标回波强，如果不能有效地抑制杂波，很容易使弱的目标淹没在杂波之中，这就严重影响了目标探测性能。因此，在设计有效的信号处理方法之前，需要对海杂波的性质进行深入地研究，从而提高对海雷达的探测性能。

2. 基础原理

杂波是随机的，并具有类似热噪声的特性，因为单个的杂波成分（散射体）具有随机的相位和幅度。在很多情况下，杂波信号强度要比接收机内部噪声强度大得多。因此在强杂波背景下检测目标的能力取决于信杂比，而不是信噪比。

白噪声通常在所有雷达距离单元内产生等强度的噪声功率，而杂波功率可能在一个距离单元内发生变化。杂波与雷达目标回波相似，与雷达利用目标的散射截面积来描述目标回波功率类似，杂波功率也可以利用杂波散射截面积 σ_c 来描述。杂波的散射截面积定义为由杂波区（面积为 A_c ）反射造成的等效散射截面积。杂波的平均 RCS 由下式给出：

$$\sigma_c = \sigma_0 A_c \quad (1)$$

其中， $\sigma_0(m^2/m^2)$ 为杂波散射系数，为一个无量纲的标量，通常以 dB 表示。

2.1 杂波散射特性

散射系数 σ_0 与雷达系统参数（波长、极化、照射区域和照射方向）有关，对于海杂波还与风速、风向和海面蒸发等参数有关。一般来说，波长越短，杂波散射系数 σ_0 越大。 σ_0 与擦地角有关，图 2-1 描述了 σ_0 与擦地角的关系示意图。根据擦地角的大小分为三个区域：低擦地角区域、平坦区和高擦地角区。低擦地角区又称为干涉区，在这个区域一般情况下散射系数随着擦地角的增加而迅速增加。在平坦区，杂波变化基本是缓慢的，以非相干散射为主，散射系数随擦地角的变化较小。高擦地角区，也称为准镜面散射区。该区域以相干的镜面散射为主，散射系数随擦地角增大而快速增大，并且与表面的粗糙程度等特性相关^[4]。

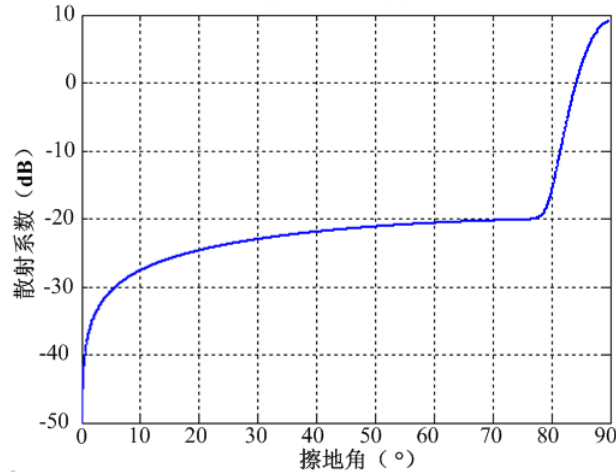


图1 杂波散射系数与擦地角的关系示意图

海杂波同地面杂波有两个不同：时间变化的幅度比地面大，而空间变化则要小一些。除了 90° 的俯角之外，如果没有因风力掀起的海浪和表面张力波的作用，海面的反射将基本上不会存在。平静的海面会对全部入射能量做前向反射，所以便不会有能量向雷达反射回来。然而，在任何给定的时刻，出现平静海面的可能性却很小。因此，通常会收到海面的后向散射的幅度同海浪高度或幅度有关。

人们曾用几种参数来描述海浪高度，包括海面状态、平均浪高、主效浪高和峰值浪高^[5]。

海面状态：一个用来描述海面特征的单一数值。海面状态跟浪高之间的关系没有明确的定义，虽然常常用跟平均浪高之间的关系来描述。

平均浪高：是一大群海浪的峰到谷高度的平均值。它是一个最难于用肉眼加以估计的参量，但却是最容易用浪规仪来计算的参量。

主效浪高：三分之一最高浪高的峰到谷高度的平均值。换言之，它是那些最显著的浪高。

峰值浪高：是最高浪高的十分之一峰到谷的高度，其数值大约是平均浪高的两倍。

2.2 幅度时间特性

因为分布杂波是由大量的离散散射体所组成的，而且这些散射体之间的视在距离又可能会因为散射体的实际移动或是由于雷达平台及天线的移动而改变。所以经常观测到的杂波中有随时间而起伏变化的幅度。起伏可用幅度统计值和起伏率或频谱来表示。幅度的统计特性可给出反射回波具有一定范围数值的时间百分数的信息，而频谱则给出这些数值改变快慢的信息。

人们已经对杂波幅度的统计特性做过多年的研究，对于大量大小差不多且相位又均

匀分布的散射体，已发现其杂波的幅度值为瑞利分布。如果其中有一个散射体其主要作用，即比其他的散射体大很多，则分布便是莱斯分布。对于低的俯角和小尺寸的分辨单元，还曾经观测到对数正态分布或韦伯尔分布。这些分布还留了一个高值的“尾巴”，这有可能是一些大的散射体在大部分时间内被挡住了，只是间或被雷达看到的缘故。

多年来，还将杂乱反射回波的频谱当成幅度统计值而进行了广泛的研究。像杂波这样的随机起伏信号，其频谱就可用功率谱密度或自相关函数来表示，这两项为傅里叶变换对。即：

$$P(f) = \int_{-\infty}^0 R(\tau) e^{j2\pi f \tau} d\tau \quad (2)$$

其中： $p(f)$ 是频率为 f 时的功率谱密度函数， $R(\tau)$ 是在时间为 τ 时的自相关值。

频谱和自相关函数都可以用来描述杂波的起伏，不过频谱往往使用得更经常一些。巴洛早在 1949 年便使用高斯模型来描述杂波的频谱，如下式：

$$W(f) = W_0 e^{-a(f/f_0)^2} \quad (3)$$

其中， W_0 是功率密度的平均值， f_0 是雷达工作频率， a 是一个与杂波类型有关的常数。

六七十年代对杂波进行的测试结果表明，杂波的频谱响应能够更好地用以下形式的幂函数来描述：

$$p(f) = \frac{A}{1 + (f/f_c)^n} \quad (4)$$

其中， A 为功率密度的平均值； f_c 为杂波频谱的半功率点频率； f 为频率； n 为正实数，一般为 3-5。

海杂波频谱与地面杂波有一个根本的差别：因为海浪能对雷达作接近或远离的实际运动，接收信号频谱可能会在零频之外具有最大值。出现最大值的频率由多普勒方程给出：

$$f_D = 2V / \lambda \cos \theta \quad (5)$$

其中， θ 为波束与风向的夹角。

2.3 杂波的统计特性模型

雷达杂波是来自雷达分辨单元内的许多散射体的回波的矢量和。由于雷达分辨单元内一般包括许多随机分布的散射体，它们的介电常数和几何特性等都是随机变量，同时，

散射体或雷达的运动也将引起回波振幅和相位的变化,这些导致复散射截面积 σ_0 具有起伏的性质,此随机起伏性可以用其通过雷达接收机的包络检波器后的幅度概率密度函数来描述。常用的概率密度函数有瑞利分布、对数正态分布、韦伯尔分布和 K 分布等。

非瑞利分布与瑞利分布的区别主要在于概率密度函数的拖尾上。对于同一区域而言,杂波幅度分布与瑞利分布的偏离,一般由下列原因造成:

- (1) 分辨力的影响;
- (2) 雷达平台的运动;
- (3) 擦地角的变化。

在现代高分辨力雷达或机载雷达(特别是低擦地角时)条件下,因为小的距离分辨单元使得杂波幅度概率密度函数有较高的尾部,或者,小的散射体在大部分时间内被大的、起支配作用的散射体所遮挡,分布常常偏离瑞利特性。同时,因为平台的运动,回波信号幅度也受到时间和空间的耦合效应的影响。当观察时间较短时(50ms 的数量级),回波就可以认为纯粹代表了时域特性,当观察时间增大时(1s 的数量级),回波就反映了时间和空间的组合效应。

2.4 杂波的概率分布模型

(1) 瑞利分布

对于低分辨率雷达(天线波束宽度大于 2° ,脉冲宽度大于 $1\mu s$),当散射体的数目很多时,根据散射体反射信号振幅和相位的随机特性,它们合成的回波包络振幅是服从瑞利分布的。其概率分布函数为:

$$P(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (6)$$

其中, x 为杂波幅度, σ 为杂波的标准差。

瑞利分布与每个散射体的振幅分布无关,只要求散射体的数目足够多,并且所有散射体中没有一个是起主导作用。对于低分辨率雷达,在高仰角和平稳环境时,瑞利分布的杂波模型可以得到较为精确的结果。但是,随着对雷达杂波分布特性分析的逐步深入,人们发现,对于海浪杂波和地物杂波,瑞利分布模型并不能给出令人满意的结果。特别是随着距离分辨率的提高,杂波分布出现了比瑞利分布更长的拖尾,即出现高振幅的概率相当大。因而,如果继续采用瑞利分布模型,将出现较高的虚警概率。海浪杂波的分布不仅是脉冲宽度的函数,而且也与雷达极化方式、工作频率、天线仰角以及海情、风

向和风速等因素有关，地物杂波也受类似因素的影响。对于高分辨率雷达，在低仰角或恶劣海情下，海浪杂波已不服从瑞利分布，而通常使用韦伯尔分布来描述。类似的，地物杂波通常使用对数正态分布来描述^[6]。

(2) 对数正态分布

在高分辨率雷达中，可以把一个个的海浪结构分开，海杂波便呈现尖峰状，而且在波浪后面的某个区域，入射角很小，它便会被屏蔽。在这种情况下，往往观察到的是对数正态分布型的振幅分布，其概率密度函数为：

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c x} \exp\left[-\ln^2\left(\frac{x}{\mu_c}\right)/2\sigma_c^2\right] \quad x > 0, \sigma_c > 0, \mu_c > 0 \quad (7)$$

其中， μ_c 是尺度参数，表示分布的中位数； σ_c 是形状参数，表示分布的偏斜度^[7]。对于海杂波， σ_c 从高视角（47°）和低海况条件下的 0.6dB 变化到低视角（5°）和高海况条件下的大约 5.75dB。在地杂波中，作为雷达视角的函数大约从 3dB 到 4dB 范围内变化^[8]。

对数正态分布的严重缺点是在最影响虚警和灵敏度的区域里吻合程度反而较差。对数正态分布和瑞利分布之间的主要差别在于前者的拖尾较长，也就是说，大幅度的概率要比后者大一些。

(3) 韦伯尔分布

一般来说，对于大多数试验和理论所确定的杂波幅度分布，瑞利分布模型和对数正态分布模型仅适用于它们中的有限分布。瑞利分布模型一般倾向于低估实际杂波分布的动态范围，而对数正态分布倾向于高估实际杂波分布的动态范围。韦伯尔分布模型比瑞利分布模型、对数正态分布模型常常能在更广的环境内精确地表示实际的杂波分布。适当地调整韦伯尔分布的参数，能够使它成为瑞利分布或接近于对数正态分布。通常，在使用高分辨力雷达，低入射角的情况下，海浪杂波能够用韦伯尔分布模型精确地描述，地物杂波也能够用韦伯尔分布模型来描述。其概率密度函数为：

$$p(x) = \left(\frac{p}{q}\right) \left(\frac{x}{q}\right)^{p-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{q}\right)^p\right] \quad x \geq 0 \quad (8)$$

其中， $q > 0$ 是尺度参数，表示分布的中位数， $p > 0$ 为形状参数，表明分布的偏斜度。若 $p = 2$ ，就成为瑞利分布，若 $p = 1$ ，就是指数概率密度函数。

从信号检测的观点上看，对数正态分布代表着最恶劣的杂波环境，瑞利分布代表着

最简单的杂波环境，韦伯尔分布是中间模型。在许多情况下，它是一种比较合适的杂波模型。因此，它比瑞利分布能适应更宽的杂波范围。

(4) 相关 K 分布

上述各种杂波模型都是基于单一点统计量，仅仅适合单个脉冲检测的情况，缺乏模拟杂波的时间和空间相关性。考虑到脉冲间的相关性，近年来提出了 K 分布模型。K 分布模型之所以被广泛用于海杂波建模中，一个重要的原因就是因为这个模型可以很好地描述海杂波幅度在统计遇上的“拖尾”现象。即上高分辨率雷达以低擦地角照射粗糙海面时，其雷达回波强度会明显增强，相应的杂波幅度概率密度函数曲线表现出较长的“拖尾”，这种效应被称为海尖峰效应。对于雷达回波来说，海尖峰则表现为随机分布在不同角度、不同距离上的零星运动或者静止目标。但与一般目标有所不同，它们具有较为强烈的回波起伏特性。海尖峰现象的存在，直接影响到雷达的检测性能，导致虚警概率的增加^[9]。

在这种模型中，海杂波回波的幅度被描述成两个因子的乘积，第一部分是斑点分量（即快变化分量）它是由大量散射体的反射进行相干叠加而成的，符合瑞利分布。第二部分是基本幅度调制分量（即慢变化分量），它反映了与海面大面积结构有关的散射束在空间变化的平均电平，具有长相关时间，服从 χ^2 分布。K 分布的概率密度函数为：

$$p(z) = \frac{2}{\alpha \Gamma(\nu)} \left(\frac{z}{2\alpha}\right)^\nu K_{\nu-1}\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad z > 0, \nu > 0, \alpha > 0 \quad (9)$$

其中， ν 是形状参数，它规定了与平均值有关的较大的矩，并通过混合模型规定了在该平均值中的不均匀量； α 是标量参数，仅与杂波的平均值有关； $\Gamma(\bullet)$ 是 Gamma 函数； $K_\nu(\bullet)$ 是修正的 ν 阶贝塞尔函数。对于大多数雷达杂波来说，形状参数 ν 的取值范围是 $0.1 < \nu < \infty$ 。对于较小的取值（即 $\nu \rightarrow 0.1$ ），杂波有长拖尾，说明有尖峰杂波；而当 $\nu \rightarrow \infty$ 时，杂波的分布就会接近于瑞利分布。实验证明对于高分辨率低擦地角的海杂波 ν 的取值在 0.1 到 3 之间。K 分布杂波的各阶矩介于瑞利分布和对数正态分布杂波的各阶矩之间。

对于高精度雷达来说，K 分布比较符合杂波数据的统计结果。实际上，可以把 K 分布看作是瑞利分布和 χ^2 分布的组合：快速起伏的杂波，服从瑞利分布；慢速起伏的杂波，服从 χ^2 分布。

前面几种分布形式的杂波模型都是基于单一点统计量，所以它们只适合单脉冲检测

情况。其主要缺点在于缺乏模拟杂波的时间和空间相关性。而 K 分布模型具有两个分量（快、慢分量）与海杂波特性和更加吻合，不仅很好的满足所观察的幅值测量特性，而且包括了脉间的相关性。 K 分布的出现及其在杂波模型中的应用，为相关特性的完全定量处理提供了依据，并且对提高雷达系统性能起重要作用。

2.5 杂波的功率谱分布模型

雷达杂波幅度的概率密度分布模型描述了杂波信号在时域的一维表示，通常要更好地描述杂波的分布特性，还要描述杂波频域的二维分布特性，这就是杂波的功率谱分布模型。雷达杂波的功率谱常用以下几种模型表示：

（1）高斯型：杂波的功率谱特性和杂波的性质、环境等因素有关，大量的观测结果表明，大多数雷达杂波的功率谱可以采用高斯谱来近似表示：

$$S(f) = \frac{1}{(2\pi\sigma_c^2)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(f-f_c)^2}{2\sigma_c^2}\right] \quad (10)$$

其中 f_c 为杂波中心频率，代表杂波的平均多普勒频移，或者说是杂波的平均速度； σ_c 是杂波功率的标准差，代表功率谱展宽的程度。

（2）立方型：对于以前低精度雷达的观测结果表明，杂波功率谱近似为高斯谱。经过对观测数据的长期研究，人们发现，现代的高精度雷达由于发射的波束比较窄，擦地角比较低，功率谱分布不能用高斯谱来近似，而是近似于立方谱，可以表示为：

$$S(f) = \frac{S_0}{1+[(f-f_d)/f_c]^3} \quad (11)$$

其中 S_0 是零频处的功率谱强度， f_c 为归一化特征频率。实际上，越来越多的观测结果表明，采用立方谱更具代表性，分母中的指数项取值为 $2 < n < 3$ 。这种杂波的功率谱比高斯谱有更长的拖尾，高频段比高斯谱的幅度大得多。

（3）指数型：这种分布的功率谱表达式为：

$$S(f) = S_0 \exp[-(f-f_d)/f_c] \quad (12)$$

其中， f_c 为归一化特征频率。

（4）相干脉冲非对称谱雷达杂波模型：该模型归一化自相关函数：

$$r(k) = \frac{2}{3} \left[1 + \frac{1}{2} \cos(4\pi k V_{0r}) \exp(-8\pi^2 k^2 \sigma_d^2) \right] \exp\left(-j2\pi k V_{0d} - 2\pi^2 k^2 \sigma_d^2 - \frac{k^2}{2T_0^2}\right) \quad (13)$$

它是由 Hawkes 和 Haykin 提出的^[10]。除了一个乘积因子 $2/3$ 以外, 这种归一化的自相关函数主要由其他三个因素决定: (1) 偶极子旋转频率 ν_r ; (2) 所有散射体平均径向速度的多普勒频移 ν_d ; (3) 天线方向图。其中, k 为时移差; ν_{od} 和 σ_d 分别是均值和方差。

均匀性质地形, 如沙漠和同种类型耕地的统计变化, 可由高斯概率密度函数给出, 此时, 雷达接收机输出的包络可由瑞利分布概率密度函数给出。某些城市区域, 有建筑、井山脉地形的农村地区, 近似为对数正态分布函数。通常不论是瑞利分布概率密度函数还是对数正态分布概率密度函数, 均难以精确描述实际的杂波统计特性。韦伯尔分布概率密度函数处于瑞利分布和对数正态分布之间, 常用于地杂波概率密度函数的描述。

总之, 对于地杂波可采用幅度为瑞利分布、对数正态分布、韦伯尔分布、功率谱为高斯型、立方型、指数型的杂波模型。

海杂波可采用幅度为对数正态分布、韦伯尔分布、**K** 分布的高斯杂波模型。

气象杂波和箔条干扰可采用瑞利分布的高斯型杂波模型。

具体对应某种杂波, 采用何种幅度分布和功率谱模型由实际情况决定。

3. 方案设计

针对上一部分提到的杂波幅度分布模型与功率谱模型, 使用 **MATLAB** 进行仿真实验。通过调整各个模型中的参数, 观察其分布的变化情况。

4. 结果与总结

4.1 仿真结果

瑞利分布如图 2 所示, 当调整杂波的标准差 σ 增大时, 相对应的概率密度函数分布曲线变得更加平缓, 并且峰值向右移动。

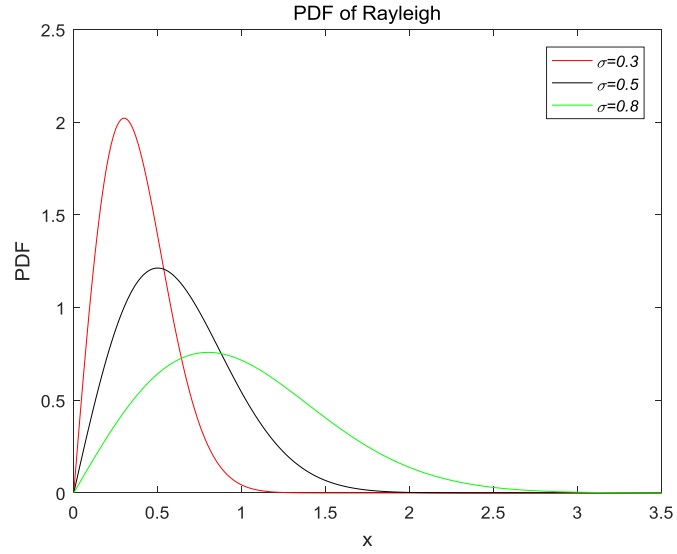


图 2 瑞利分布

对数正态分布如图 3 所示，当调整形状参数 σ_c 增大时，相对应的概率密度函数分布曲线变得更加平缓，并且峰值向左移动；当调整尺度参数 μ_c 增大时，相对应的曲线变得更加平缓，并且峰值向右移动。

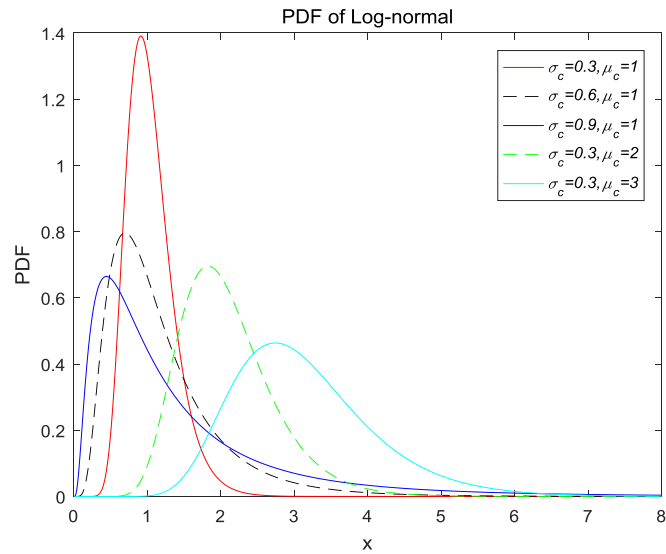


图 3 对数正态分布

韦伯尔正态分布如 4 图所示，当调整形状参数 p 增大时，相对应的概率密度函数分布曲线变得更加陡峭，并且峰值向右移动；当调整尺度参数 q 增大时，相对应的曲线变得更加平缓，并且峰值向右移动。

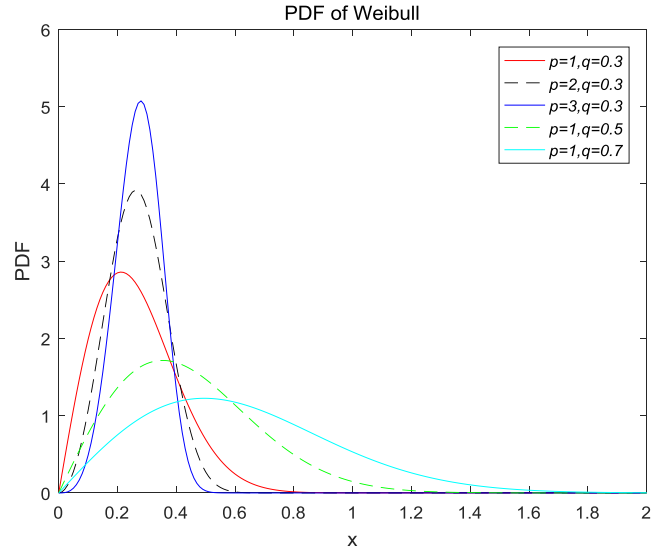


图4 韦伯尔分布

相关 **K** 分布如图 5 所示，当调整形状参数 ν 增大时，相对应的概率密度函数分布曲线变得更加平缓，并且峰值向右移动；当调整标量参数 α 增大时，相对应的曲线变得更加平缓，并且峰值向右移动。

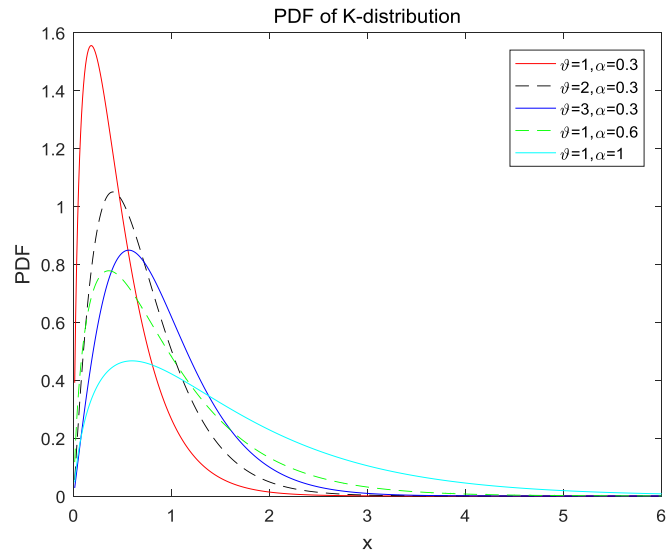


图5 相关 **K** 分布

高斯型功率谱如图 6 所示，当调整杂波中心频率 f_c 增大时，相对应的概率密度函数分布曲线向右移动，且峰值大小没有变化；当调整杂波功率谱的标准差 σ_c 增大时，相对应的曲线变得更加平缓，并且峰值所在的频率位置不变。

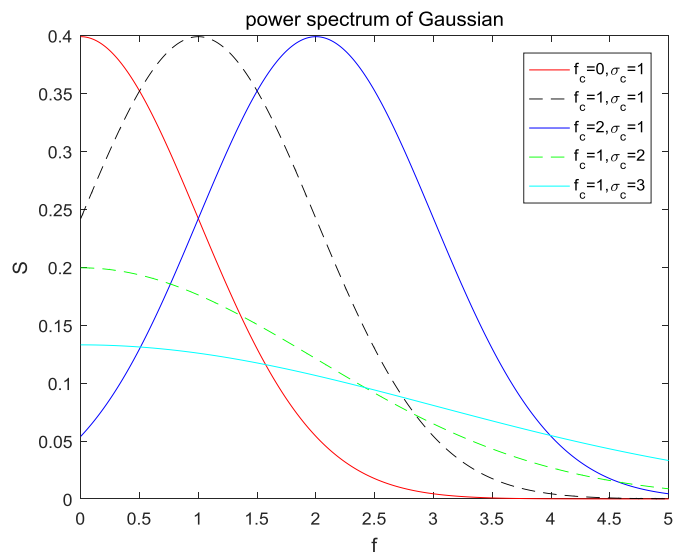


图 6 高斯型

立方型功率谱如图 7 所示，当调整杂波归一化特征频率 f_c 增大时，相对应的概率密度函数分布曲线变得更加平缓，且峰值大小没有变化。

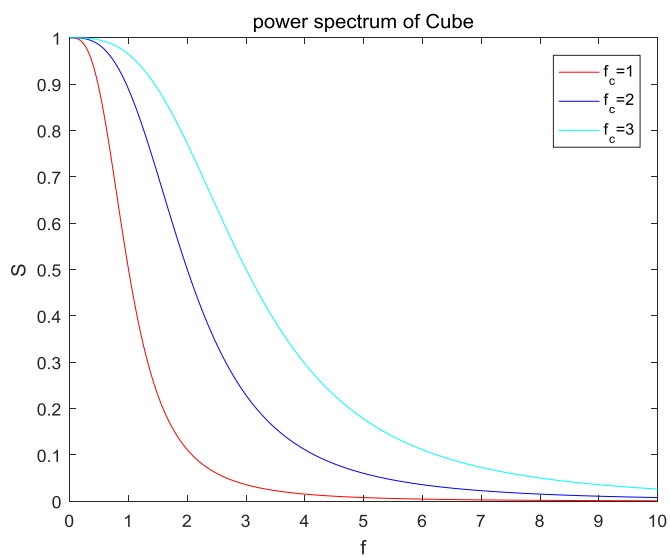


图 7 立方型

指数型功率谱如 8 所示，当调整杂波归一化特征频率 f_c 增大时，相对应的概率密度函数分布曲线变得更加平缓，且峰值大小没有变化。

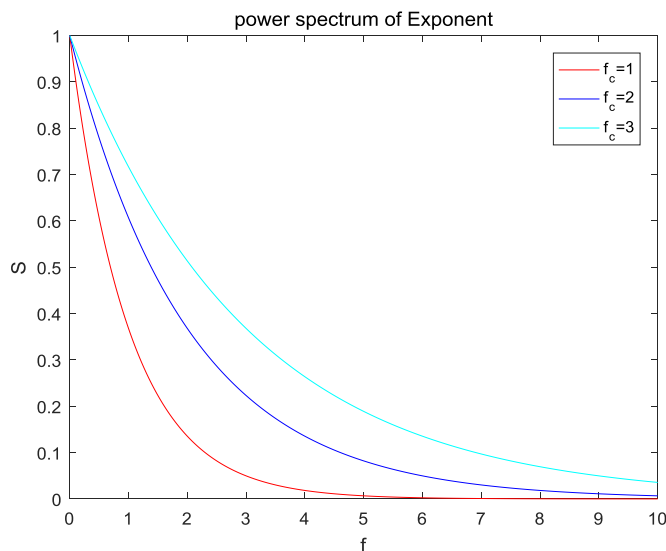


图 8 指数型

相干脉冲非对称谱雷达杂波模型如图 9 所示，当所有散射体径向速度的多普勒频移方差 σ_d 增大时，分布曲线变得陡峭，且最大值减小，实部的振荡程度减小。

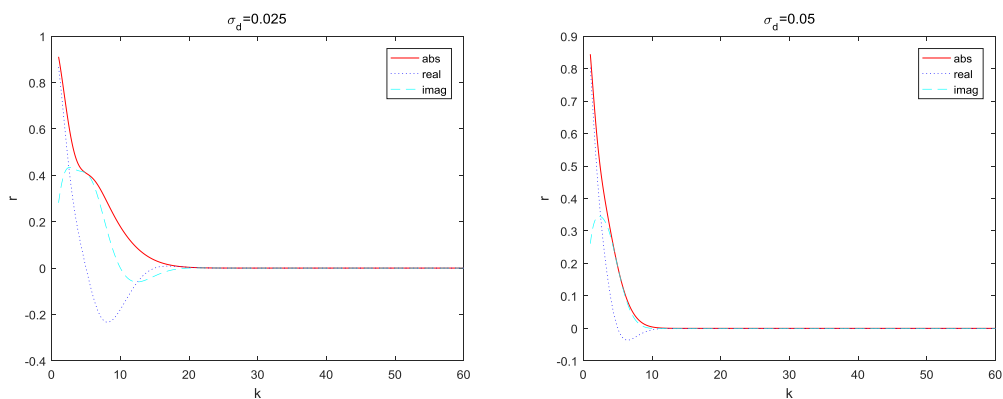


图 9 相干脉冲非对称谱雷达杂波模型

4.2 总结

根据仿真实验结果，可以看出在对各个分布模型的参数进行调整时，模型的分布曲线会发生较大的变化。因此，在建模过程中，需要根据海情的实际分布情况，选择相应的分布模型，并对分布模型的参数进行调整，才能获得最接近实际情况的仿真结果。

5. 参考文献

- [1] 陈伯孝. 《现代雷达系统分析与设计》[M]. 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [2] 张琳. 海杂波多普勒谱分析与建模方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2014.
- [3] 何友, 黄勇, 关键等. 海杂波中的雷达目标检测技术综述[J]. 现代雷达, 2014, 36(12):1-9.

- [4] 韩雁飞. 强杂波背景下的低空风切变检测技术研究[D]. 中国民航大学, 2013.
- [5] 王岩松. 海杂波建模与仿真技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2003.
- [6] 张宝宝. 雷达杂波的建模仿真技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.
- [7] 罗艳红. 雷达海杂波统计特性分析与仿真[D]. 华中科技大学, 2007.
- [8] 何友. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 清华大学出版社, 1999.
- [9] 杨海文. 海杂波建模与实测数据分析[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [10] Hawkes C D, Haykin S S. Modeling of clutter for coherent pulsed radar [J]. Information Theory IEEE Transactions on, 1975, 21(6):703-707.