

基于改进的 ZMNL 和 SIRP 的 K 分布杂波模拟方法

朱洁丽* 汤俊

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要: 零记忆非线性变换(ZMNL)法和球不变随机过程(SIRP)法是模拟 K 分布杂波的两种常用方法。针对传统 ZMNL 方法中形状参数(半)整数化所导致的杂波模拟偏差问题, 该文提出采用增加 Gamma 分布生成支路的方法进行改进, 改进后的方法能够模拟任意形状参数的 K 分布杂波; 针对传统 SIRP 方法运算量较大的问题, 给出了一种改进的调制变量产生方法, 该方法能够避免求解非线性方程, 极大地降低了运算量, 提高了仿真速度。仿真结果验证了改进方法的有效性。

关键词: K 分布; 雷达杂波; 相关; 相干

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)05-0533-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13124

K-distribution Clutter Simulation Methods Based on Improved ZMNL and SIRP

Zhu Jie-li Tang Jun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Zero Memory NonLinearity (ZMNL) and Spherically Invariant Random Process (SIRP) are two commonly used methods in K-distribution clutter simulations. An improved simulation method, which adds a branch of Gamma-distributed variable and extends the shape parameter to arbitrary positive real, is proposed to address the clutter simulation error in the conventional ZMNL method. To reduce the computation required for the conventional SIRP method, an improved method of modulation variable generation is also proposed, what avoids large computations for solving nonlinear equations and improves the simulation speed. The simulation results verify the effectiveness of the improved methods.

Key words: K distribution; Radar clutter; Correlation; Coherent

1 引言

杂波是制约雷达目标检测和跟踪性能的主要因素之一, 因此对于杂波特性的研究及杂波模拟也始终是雷达领域的研究热点。目前常用的杂波幅度分布模型有瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布和 K 分布等。由于 K 分布能较好地描述多种高分辨、低擦地角的地、海杂波, 因此已成为重要的杂波建模与仿真的统计模型^[1,2]。与瑞利分布等简单模型相比, K 分布杂波的建模和仿真较为复杂, 而且根据模拟的杂波信号的正交分量和同相分量是否相关, 需要分别开展相干和非相干杂波的仿真工作。

为了精确模拟 K 分布杂波, 国内外诸多学者针对相干和非相干杂波模型进行了一系列深入的

研究^[3-17]。文献[3]提出了基于球不变随机过程(SIRP)法的相关相干 K 分布杂波的生成方法。该方法可以模拟复杂波数据, 能独立控制杂波的功率谱和幅度分布, 但需要求解非线性方程, 计算量较大。文献[4]提出了基于零记忆非线性变换(ZMNL)法的相关 K 分布杂波的模拟方法。该方法适用于非相干杂波模型, 原理简单, 主要的缺陷是要求形状参数设置为(半)整数, 形状参数(半)整数化会带来杂波模拟偏差, 不能独立控制功率谱和幅度分布, 为满足功率谱特性需求, 相关系数的计算较为复杂。文献[5]证明了 K 分布序列的同相正交分量可由两列相互独立的 Gaussian 矢量加权乘积和构成。基于这一原理, 文献[6]和文献[7]提出了新的相关相干 K 分布杂波建模与仿真方法, 与传统 SIRP 与 ZMNL 方法相比, 新方法可以使生成的杂波具有任意指定的功率谱, 而且运算相对简单, 易于软件和硬件实现, 但对形状参数为非(半)整数的情况仅进行了近似计算处理。文献[10]基于 ZMNL 方法

2013-12-12 收到, 2014-03-20 改回; 2014-05-26 网络优先出版
国家自然科学基金(61171120), 清华大学自主科研基金 (20131089362),
国家部委重点基金(9140A07020212JW0101)资助课题
*通信作者: 朱洁丽 zhu-jl10@mails.tsinghua.edu.cn

和线性变换理论提出了一种时空相关相干 K 分布杂波的建模方法,减少了杂波模拟的运算复杂度。为了更好地估计杂波背景下雷达恒虚警率检测性能,文献[11]对时间相关相干 K 分布杂波进行了建模仿真。

本文针对传统 ZMNL 方法和 SIRP 方法中存在的部分问题提出改进,主要贡献包括:

(1) 针对传统的非相干模型 ZMNL 方法中形状参数(半)整数化导致的杂波模拟偏差问题,提出一种增加形状参数非(半)整数部分对应的 Gamma 分布变量生成支路的改进方法,该方法利用了 Gamma 分布的第 2 参数可加性,将杂波的形状参数从(半)整数推广到一般实数,改善了杂波幅度特性模拟性能;

(2) 针对传统的相干模型 SIRP 方法中杂波模拟运算量大的问题,给出一种直接产生服从杂波特征分布的调制变量的方法,该方法不需要求解非线性方程,因此极大地提高了杂波模拟效率。

最后,仿真结果验证了本文方法的有效性。

2 传统 K 分布杂波模拟方法

2.1 K 分布杂波模型

K 分布的概率密度函数(PDF)为^[4]:

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

其中, a 是尺度参数, v 是形状参数, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数, $K_v(\cdot)$ 是第 2 类修正 Bessel 函数。

杂波平均功率 δ^2 , v 和 a 之间的关系可表示为^[18]:

$$a^2 = \delta^2 / (2v) \quad (2)$$

杂波的功率谱特性可以用其功率谱密度或自相关函数来表示。常见杂波如地、云雨和箔条杂波的

功率谱一般认为服从 Gaussian 分布,其归一化功率谱表达式为^[18]:

$$W(f) = \exp\left[-\left(a \frac{f - f_d}{f_{3dB}}\right)^2\right] \quad (3)$$

其中, f_d 是多普勒频率, f_{3dB} 是两个半功率点间的带宽。为满足限制条件 $W(f_{3dB}/2) = 0.5$, a 取值为 1.665。

2.2 ZMNL 方法

令随机变量 $x_s \sim G(x_s; 2; 1)$, $y \sim G(y; 2a^2; v)$, 二者相互独立,则 $z = \sqrt{yx_s} \sim K(z; a; v)$ ^[4,19], 其中 x_s 被称为散斑分量, y 被称为纹理分量, $G(\cdot)$ 代表 Gamma 分布概率密度函数:

$$G(x; \alpha; \beta) = \frac{\alpha^{-\beta}}{\Gamma(\beta)} x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}, \quad x > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \quad (4)$$

$G(x_s; 2; 1)$ 即为指数分布。

根据前述的通过纹理分量 y 乘以散斑分量 x_s 获得 K 分布变量 z 的思想,传统的基于 ZMNL 的相关 K 分布杂波的产生流程如图 1 所示^[4]。框图 1 中包含两条支路,其中一路利用 $2v$ 个独立 Gaussian 变量的平方和来生成 Gamma 分布变量,另外一路利用两个独立 Gaussian 变量的平方和来产生指数分布变量,两条支路输出的随机变量相乘取平方根得到 K 分布杂波变量。其中,输出序列 $\{z_i\}$ ($i = 1, 2, \dots$) 为所需 K 分布杂波序列,中间变量 $\{w_{1,i}\}, \dots, \{w_{2v+2,i}\}$ ($i = 1, 2, \dots$) 均为相关 Gaussian 随机序列,但是两两之间相互独立。

为了使模拟的杂波不仅在幅度上满足 K 分布,在功率谱上也满足所需的 Gaussian 谱特性,通过调整滤波器 H_1 和 H_2 来控制 and 改变非线性变换后 K 分布杂波序列的相关系数 S_{ij} ^[4]:

$$S_{ij} = \frac{\Lambda^2 \left[{}_2F_1(-1/2, -1/2; v+1; r_{ij}^2) {}_2F_1(-1/2, -1/2; 1; q_{ij}^2) - 1 \right]}{v+1 - \Lambda^2} \quad (5)$$

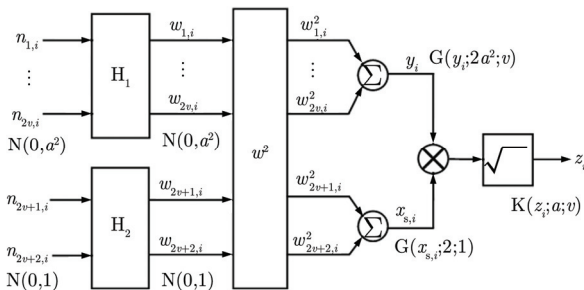


图 1 传统相关 K 分布杂波产生框图

Fig. 1 Block diagram for conventional generation of correlated K distributed clutter

其中 ${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; \eta)$ 为 Gaussian 超几何分布函数,且 $\Lambda = \Gamma(v+3/2)\Gamma(3/2)/\Gamma(v+1)$ 。 r_{ij} 是 w_k ($k = 1, 2, \dots, 2v$) 的相关系数, q_{ij} 是 w_k ($k = 2v+1, 2v+2$) 的相关系数。该公式具有无限种组合解。实际仿真过程中,可采用傅里叶级数展开法推导出相关系数 S_{ij} ,再将 r_{ij} 和 q_{ij} 的组合代入式(5)中求解 r_{ij} 和 q_{ij} ,从而计算得到滤波器 H_1 和 H_2 的系数^[4,20]。

该方法适用于产生形状参数 v 为(半)整数的 K 分布杂波。若 v 为非(半)整数,一般可通过向下或向上取(半)整数的方法得到(半)整数 v' ,此时模拟的杂波满足分布 $K(z; a; v')$,它与实际所需分布 $K(z;$

$a;v$)存在一定的偏差。为改善相关 K 分布杂波幅度特性模拟性能, 需要寻求更精确的模拟方法。

2.3 SIRP 方法

对于相关相干 K 分布杂波, 无法找到非线性变换前后杂波相关系数之间的非线性关系, 因此通常寻求基于 SIRP 模型的杂波模拟方法^[16]。SIRP 方法采用非线性变换产生实非负调制变量序列调制复 Gaussian 变量序列以获得 K 分布杂波序列, 具体流程如图 2 所示。框图 2 中包含两条支路, 其中一路利用独立实 Gaussian 变量序列 $\{w_{1,i}\}$ 和 $\{w_{2,i}\}$ 通过滤波器 H_1 产生具有杂波功率谱的复 Gaussian 变量序列 $\{y_i\}$, 其实部 $\{y_{1,i}\}$ 和虚部 $\{y_{2,i}\}$ 相互独立, 且满足 $y_{1,i} \sim N(0, 2va^2), y_{2,i} \sim N(0, 2va^2)$; 另外一路利用实 Gaussian 变量序列 $\{w_{3,i}\}$ 通过带通很窄的低通滤波器 H_2 , 然后再经过非线性变换得到具有杂波特征 PDF 的调制变量序列 $\{s_i\}$, 即广义 χ^2 分布随机变量序列, 满足

$$f_S(s_i) = \frac{2v^v s_i^{2v-1}}{\Gamma(v)} \exp(-vs_i^2), \quad s_i \geq 0, i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

调制变量序列 $\{s_i\}$ 的平均功率为 1, 其平方服从 Gamma 分布, 即 $s_i^2 \sim G(s_i^2; 1/v; v)$ 。最后用 $\{s_i\}$ 调制复 Gaussian 变量 $\{y_i\}$ 即得到相关相干 K 分布杂波序列 $\{z_i\}$ ^[3,15]。

图 2 中, 低通滤波器 H_1 的作用是使 $\{y_i\}$ 具有 $\{z_i\}$ 的功率谱形状。低通滤波器 H_2 的作用是使非线性变换后的随机序列的功率谱足够窄, 可以采用多阶 Butterworth 滤波器实现^[20]。非线性变换 $|h_0(\cdot)|$ 使得 $\{x_i\}$ 和 $\{s_i\}$ 满足关系^[3]:

$$\frac{\gamma(v, vs_i^2)}{\Gamma(v)} = 1 - Q(x_i), \quad i = 1, 2, \dots \quad (7)$$

其中 $\gamma(a,b)$ 为低阶不完全 Gamma 函数, $Q(\cdot)$ 为标准 Gaussian 随机变量的尾部面积。化简式(7)到非线性方程:

$$\frac{\gamma(v, vs_i^2)}{\Gamma(v)} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x_i}{\sqrt{2}}\right), \quad i = 1, 2, \dots \quad (8)$$

其中 $\operatorname{erf}(\cdot)$ 是误差函数。通过数值方法计算即可根据输入变量序列 $\{x_i\}$ 得到输出变量序列 $\{s_i\}$ 。

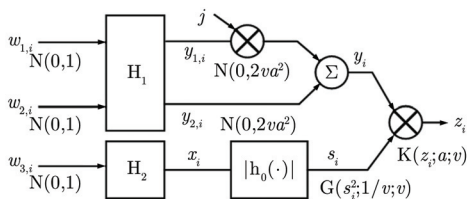


图 2 传统相关相干 K 分布杂波产生框图

Fig. 2 Block diagram for conventional generation of correlated coherent K distributed clutter

SIRP 方法用符合所要求的单点概率密度函数的随机序列调制相关 Gaussian 随机过程, 能独立控制杂波的功率谱和幅度分布, 能够较好地实现对相关相干 K 分布杂波的模拟。但该法易受序列阶数和自相关函数的限制, 而且需要求解非线性方程, 计算量较大^[17]。

3 改进的 K 分布杂波模拟方法

3.1 改进的 ZMNL 方法

图 1 所示的传统 ZMNL 方法要求形状参数为(半)整数, 无法较好地模拟形状参数为非(半)整数的 K 分布杂波。由于模拟杂波的形状参数由中间 Gamma 分布变量的第 2 参数决定, 因此为了将模拟的 K 分布杂波的形状参数从(半)整数扩展到一般实数, 需要改进图 1 中 Gamma 分布变量的生成方法。

对于任意的形状参数 $v > 0$, 将其分解为(半)整数部分 v_1 和非(半)整数部分 $v_2 (0 \leq v_2 < 0.5)$, 即 $v = v_1 + v_2$ 。若 $y_1 \sim G(y_1; 2a^2; v_1), y_2 \sim G(y_2; 2a^2; v_2)$, 则 $y = y_1 + y_2 \sim G(y; 2a^2; v)$, 即 Gamma 分布具有第 2 参数可加性。对于第 2 参数为非(半)整数的 Gamma 分布变量 y_2 , 随机产生两个变量 η 和 β , 分别满足 $\eta \sim \exp(\eta, 1)$ 和 $\beta \sim \text{Be}(\beta, v_2, 1 - v_2)$, 其中

$$\exp(x, \lambda) = \frac{1}{\lambda} e^{-x/\lambda}, \quad x \geq 0, \lambda > 0 \quad (9)$$

$$\text{Be}(x, \alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, \quad \alpha > 0, \beta > 0, 0 \leq x \leq 1 \quad (10)$$

那么 $y_2 = 2a^2\eta\beta \sim G(y_2; 2a^2; v_2)$ ^[21]。

基于 Gamma 分布的第 2 参数可加性, 通过在传统产生框图 1 中添加形状参数的非(半)整数部分对应的 Gamma 分布变量生成支路, 得到改进的相关 K 分布杂波产生流程如图 3 所示, 其中添加的支路由虚线框出。先将形状参数 v 分解为(半)整数部分 v_1 和非(半)整数部分 v_2 。若 $v_2 = 0$, 则按照传统 ZMNL 方法生成 K 分布杂波; 若 $v_2 > 0$, 则在利用 $2v_1$ 个独立 Gaussian 变量经滤波后求平方和得到 Gamma 分布变量 y_1 的同时, 利用指数分布变量 η 和 Beta 分布变量 β 生成非(半)整数部分对应的 Gamma 分布变量 y_2 , 从而得到服从分布 $G(y; 2a^2; v)$ 的变量 y 。另一支路利用两个独立 Gaussian 变量经滤波后的平方和生成服从指数分布的变量 x_s 。两路输出的随机变量序列 $\{y_i\}$ 和 $\{x_{s,i}\}$ 相乘后开平方即得到 K 分布杂波序列 $\{z_i\}$ 。为使得 $\{y_{2,i}\}$ 对输出序列功率谱的影响尽量可以忽略, 仍采用式(5)计算推导中间相关系数, 本文采用常用组合之一: $q_{ij} = r_{ij}$,

即令 Gamma 分布变量序列 $\{y_{1,i}\}$ 和指数分布变量序列 $\{x_{s,i}\}$ 的相关系数的权重相等。实际仿真过程中, 根据杂波的 Gaussian 谱形状推导出相关系数 S_{ij} , 再将 $q_{ij} = r_{ij}$ 代入式(5)中求解 q_{ij} 和 r_{ij} , 从而计算得到图 3 中滤波器 H_1 和 H_2 的系数^[4,20]。具体实现方法可以采用递推查询法和二分法等, 相对而言, 二分法算法复杂度较低。

3.2 改进的 SIRP 方法

对于传统 SIRP 方法, 若能不通过数值方法求解非线性方程而直接产生具有杂波特征 PDF 的实非负调制变量 s , 仿真速度将大大提高。本文在 3.1 节提出了 β 为任意正实数时分布 $G(x; \alpha; \beta)$ 的生成方法, 其运算效率高, 而传统 SIRP 模型中调制变量 s 的平方服从 Gamma 分布, 所以可以采用图 3 中生成 Gamma 分布变量的方法替代传统 SIRP 方法中求解非线性方程的方法来获得调制变量 s , 得到改进的相关相干 K 分布杂波产生流程如图 4 所示, 其中改进的支路由虚线框出。

图 4 中, 标准 Gaussian 变量序列 $\{w_{1,i}\}$ 和 $\{w_{2,i}\}$ 所在支路是为了产生复 Gaussian 变量序列 $\{y_i\}$, 其

中低通滤波器 H_1 的作用是使 $\{y_i\}$ 具有 $\{x_i\}$ 的功率谱形状。另一支路是为了产生具有杂波特征 PDF 的调制变量序列 $\{s_i\}$, 先利用 Gamma 分布的第 2 参数可加性产生服从 Gamma 分布的变量序列 $\{p_i\}$, 具体实现过程与图 3 类似, 然后开平方得到实非负调制变量序列 $\{s_i\}$ 。特别需要注意的是, 图 4 中低通滤波器 H_2 的作用与图 3 中 H_1 的作用不同, 这里是使调制变量序列 $\{s_i\}$ 的功率谱足够窄, 以实现功率谱和幅度分布的独立控制, 可以采用多阶 Butterworth 滤波器实现^[20]。

该方法与传统 SIRP 方法相比, 产生复 Gaussian 变量序列的支路相同, 而产生调制变量序列的支路不同, 该支路不需要通过求解非线性方程来产生具有杂波特征 PDF 的实非负调制变量序列 $\{s_i\}$, 只需要简单的加法、乘法和开平方运算。假设需要产生的 K 分布序列长度为 L , 图 2 和图 4 中低通滤波器 H_2 的点数均为 M 。对于传统 SIRP 方法, 产生调制变量序列的支路首先需要进行低通滤波, 运算量为 $O(ML)$, 然后还要求解 L 次非线性方程。若采用二分法求解非线性方程, 设定查询区间

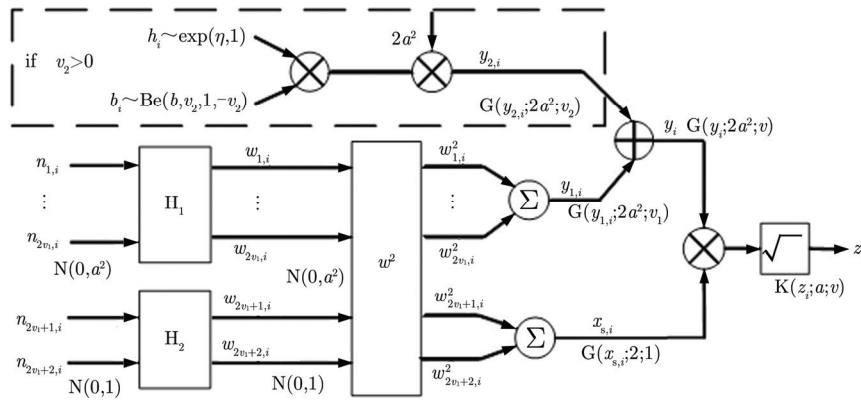


图 3 改进的相关 K 分布杂波产生框图

Fig. 3 Block diagram for improved generation of correlated K distributed clutter

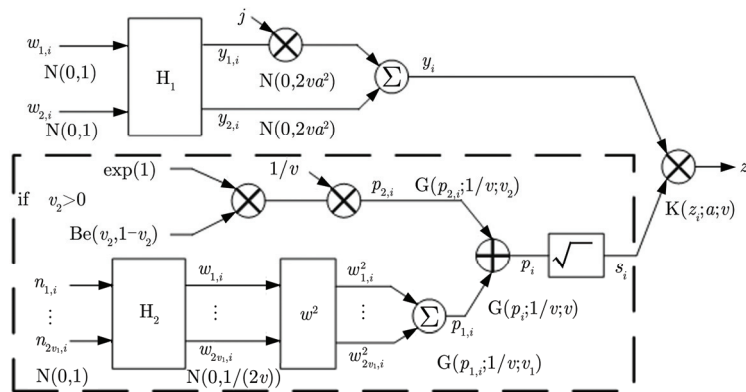


图 4 改进的相关相干 K 分布杂波产生框图

Fig. 4 Block diagram for improved generation of correlated coherent K distributed clutter

为 $[s_l, s_h]$ ，误差精度为 ϵ ，则每次求解方程需要进行 $\log_2((s_h - s_l)/\epsilon)$ 次积分计算。对于图 4 所示的改进方法，产生调制变量序列的支路不需要进行积分计算，运算量为 $O(v_1 ML)$ 。文献[22]指出，形状参数 v 在实际中的取值上限为 20，而积分计算的运算量要远大于加法或乘法的运算量，因此当仿真序列长度 L 较大时，与传统 SIRP 方法相比，改进的 SIRP 方法能够极大地提升运算速度，提高杂波模拟效率。

4 仿真结果

本文基于 McMaster 大学的 IPIX 型雷达于 1993 年在 Dartmouth 采集的一组典型的高海况下的海杂波数据^[23]，利用 2 阶/4 阶矩估计法对数据进行 K 分布拟合^[24,25]，计算得到形状参数 $v = 2.74$ ，尺度参数 $a = 0.4$ ，根据此组形状参数和尺度参数开展 K 分布杂波仿真。设定采样频率为 $F_s = 1000$ Hz，

取采样点数为 $N = 5 \times 10^4$ ，K 分布杂波功率谱采用 Gaussian 谱，两个半功率点间的带宽为 $f_{3dB} = 100$ Hz，仿真次数为 $M = 500$ 。

根据图 1-图 4 所示框图进行仿真，图 1 中形状参数向下取(半)整数即 $v'=2.5$ ，图 2 中采用二分法求解非线性方程，设定 $s_l = 0, s_h = 8, \epsilon = 10^{-4}$ ，采用 Burg 法估计杂波功率谱密度，得到的某次典型仿真结果如图 5-图 8 所示。图 5(a)-图 8(a)中横坐标为杂波幅度，纵坐标为幅度概率密度，虚线表示 K 分布杂波的理论幅度概率密度曲线，实线表示仿真得到的杂波序列的幅度概率密度曲线。图 5(b)-图 8(b)中横坐标为采样频率，纵坐标为功率谱密度，虚线表示 K 分布杂波的理论功率谱密度曲线，实线表示仿真得到的杂波序列的功率谱密度曲线。表 1 给出了 4 种方法幅度分布的平均检验统计量和相对

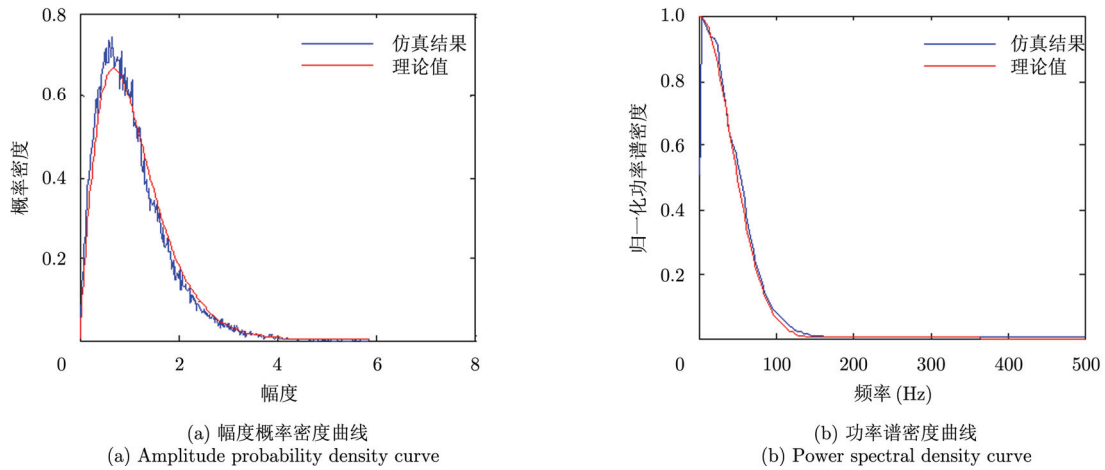


图 5 传统 ZMNL 方法

Fig. 5 Conventional ZMNL method

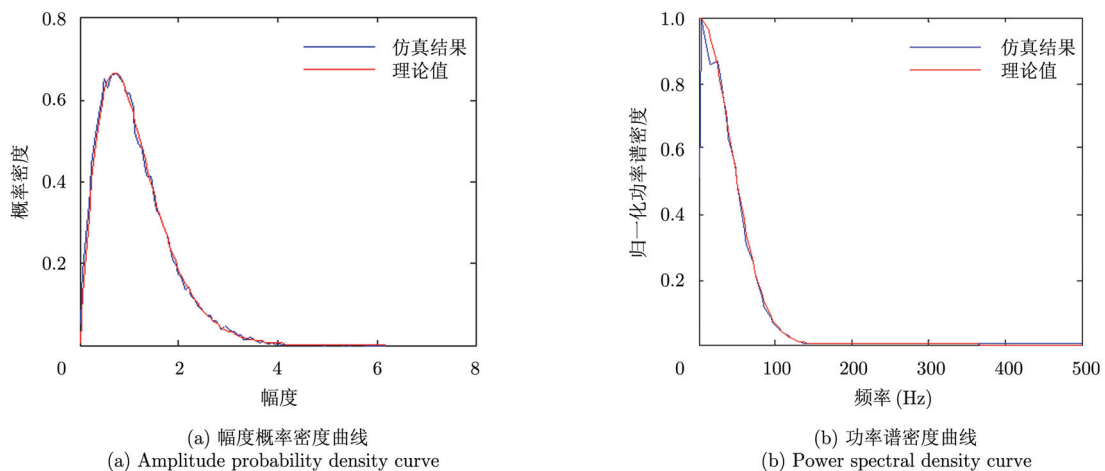


图 6 传统 SIRP 方法

Fig. 6 Conventional SIRP method

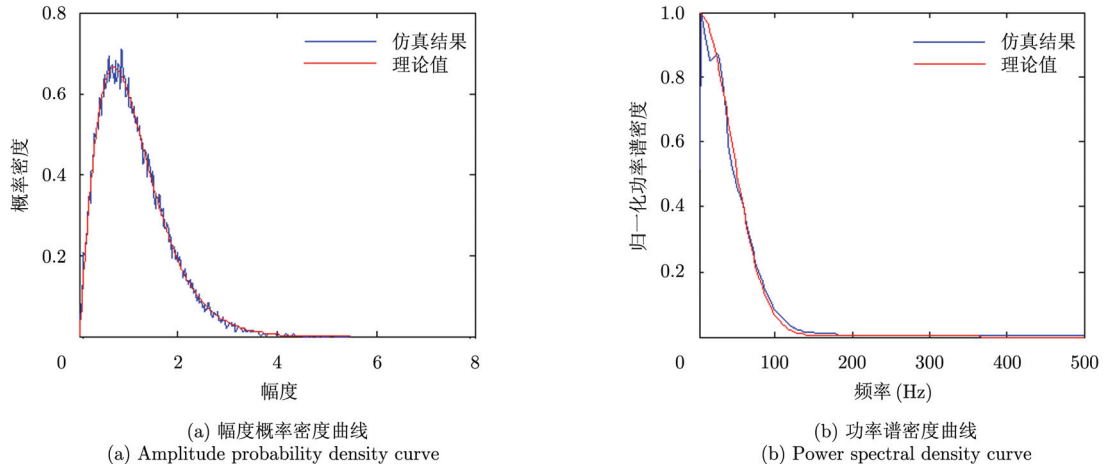


图7 改进的 ZMNL 方法

Fig. 7 Improved ZMNL method

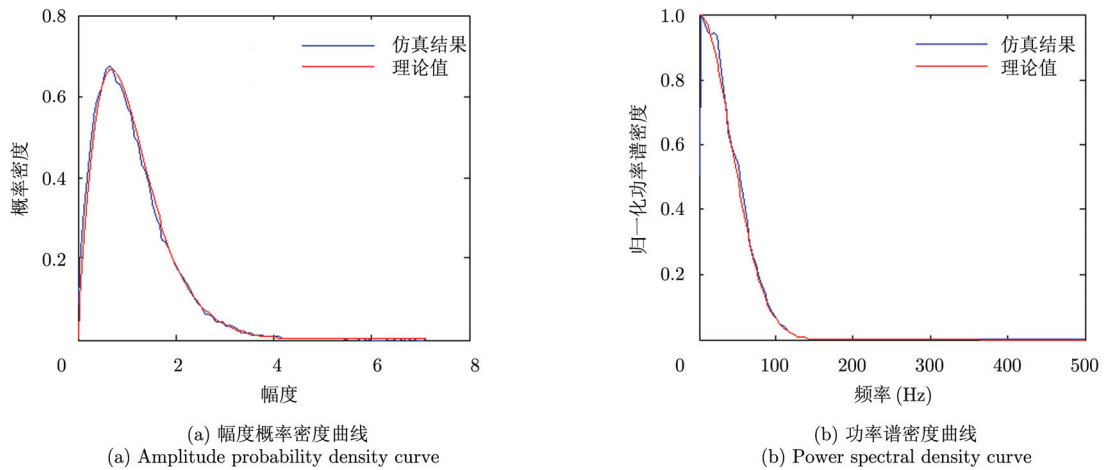


图8 改进的 SIRP 方法

Fig. 8 Improved SIRP method

表1 检验统计量和相对运算时间

Tab. 1 Test statistics and relative operation time

仿真方法	检验统计量		相对运算时间
	KS 检验统计量	χ^2 检验统计量($\times 10^3$)	
传统 ZMNL 方法	0.1450	5.86	25
改进 ZMNL 方法	0.1128	3.51	26
传统 SIRP 方法	0.1128	3.53	112
改进 SIRP 方法	0.1130	3.59	1

运算时间,通过 KS 检验和 χ^2 检验来定量比较各种方法的杂波幅度特性模拟性能^[26],通过计算相对运算时间来定量比较各种方法的仿真效率。

观察图 5(a)和图 7(a),传统 ZMNL 方法模拟的杂波的幅度概率密度曲线与理论值有一定的偏差,相比而言,改进的 ZMNL 方法对相关 K 分布杂波

的模拟效果有明显的改善,这与表 1 中改进的 ZMNL 方法的检验统计量小于传统方法的相符。比较图 5(b)和图 7(b)发现,忽略图 3 中变量序列 $\{y_{2,i}\}$ 对功率谱的影响,对 K 分布杂波的功率谱密度带来的影响可以忽略不计。改进的 ZMNL 方法与传统 ZMNL 方法仿真运算所需的时间比为 25:26,由此

可见，图 3 所示的改进方法在不增加仿真时间的前提下，改善了 K 分布杂波的模拟性能。

比较图 6(a)和图 8(a)，发现改进的 SIRP 方法对相关相干 K 分布杂波的模拟效果与传统 SIRP 方法的效果相当，表 1 给出的这两种方法的检验统计量也近似相等。比较图 6(b)和图 8(b)，可知与传统 SIRP 方法相比，改进的 SIRP 方法也能获得较理想的功率谱。传统 SIRP 方法与改进的 SIRP 方法仿真运算所需的时间比为 112:1。由此可见，图 4 所示的改进方法在不影响杂波幅度特性和功率谱特性的基础上，极大地提高了仿真速度。

5 结论

本文对幅度分布特性为 K 分布、功率谱特性为 Gaussian 谱的雷达杂波模拟方法进行了研究。针对传统相关 K 分布杂波模拟方法中形状参数为(半)整数的问题，通过增加 Gamma 分布生成支路，得到改进的相关 K 分布杂波的生成方法，将 K 分布杂波的形状参数从(半)整数推广到一般正实数。针对传统相关相干 K 分布杂波模拟方法计算量大的问题，本文给出不通过求解非线性方程直接产生调制变量的改进的相关相干 K 分布杂波生成方法，运算量大大减小。仿真结果表明，改进的 ZMNL 方法在不影响仿真时间的基础上，改善了杂波幅度特性模拟的性能；改进的 SIRP 方法在不影响幅度概率密度分布仿真结果的前提下，有效地提高了仿真速度，节约了仿真时间。

参 考 文 献

- [1] Ward K D. Compound representation of high resolution sea clutter[J]. *Electronics Letters*, 1981, 17(16): 561-563.
- [2] Watts S and Ward K D. Spatial correlation in K-distributed sea clutter[J]. *IEE Proceedings F, Communications, Radar and Signal Processing*, 1987, 134(6): 526-532.
- [3] Conte E, Longo M, and Lops M. Modelling and simulation of non-Rayleigh radar clutter[J]. *IEE Proceedings F, Radar and Signal Processing*, 1991, 138(2): 121-130.
- [4] Marier L J, Jr.. Correlated K-distributed clutter generation for radar detection and track[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(2): 568-580.
- [5] Szajnowski W J. Simulation model of correlated K-distributed clutter[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(5): 476-477.
- [6] 杨俊岭, 吕韶昱, 万建伟. 一种新的相干 K 分布模型及其在海杂波仿真中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(2): 250-260.
Yang Jun-ling, Lü Shao-yu, and Wan Jian-wei. A new coherent K-distributed model and its application in sea-clutter simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(2): 250-260.
- [7] Huang Dan, Zeng Da-zhi, and Long Teng. A new method for modeling and simulation of coherent correlated K-distributed clutter[C]. 2009 IET International Radar Conference, Guilin, 2009: 1-5.
- [8] Davidson G. Simulation of coherent sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(2): 168-177.
- [9] Roy L P and Kumar R V R. Accurate K-distributed clutter model for scanning radar application[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(2): 158-167.
- [10] Teng L, Dan H, and Di Y. Model for spatial-correlated clutter and its application to temporal-spatial correlated clutter[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011, 5(3): 298-304.
- [11] Yang Yong, Xiao Shun-ping, Feng De-jun, et al. Modelling and simulation of spatial-temporal correlated K distributed clutter for coherent radarseeker[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(1): 1-8.
- [12] 宋新, 张长隆, 周良柱. ZMNL 方法实现海杂波建模与仿真[J]. *现代雷达*, 2003, 25(3): 24-35.
Song Xin, Zhang Chang-long, and Zhou Liang-zhu. Modeling and simulation of coherent and incoherent correlation radar sea clutter using ZMNL[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(3): 24-35.
- [13] 宋海娜, 胡卫东, 郁文贤, 等. 低入射余角下雷达海杂波的建模与仿真[J]. *国防科技大学学报*, 2000, 22(3): 29-33.
Song Hai-na, Hu Wei-dong, Yu Wen-xian, et al. Modeling and simulation of low grazing angle radar sea clutter[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(3): 29-33.
- [14] 杜勇, 李依林, 杨海粟, 等. 基于 ZMNL 法的相关雷达杂波建模与仿真[J]. *火控雷达技术*, 2012, 41(4): 11-14.
Du Yong, Li Yi-lin, Yang Hai-su, et al. Modeling and simulation of ZMNL-based correlated radar clutter[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2012, 41(4): 11-14.
- [15] 王岩松. 海杂波建模与仿真技术研究[D]. [硕士论文], 国防科学技术大学, 2003.
Wang Yan-song. Modeling and simulation of radar sea clutter[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2003.
- [16] 陈志刚. SIRP 法相干 K 分布雷达海杂波建模与仿真[J]. *中国科技财富*, 2009, (8): 93-95.
Chen Zhi-gang. Modeling and simulation of coherent K-distributed sea clutter using SIRP[J]. *Fortune World*, 2009, (8): 93-95.
- [17] 刘明园, 邓有为, 何建军, 等. SIRP 法相干相关 K 分布雷达杂波仿真[J]. *战术导弹技术*, 2011, (4): 98-101.
Liu Ming-yuan, Deng You-wei, He Jian-jun, et al.

- Simulation of coherent correlation K-distributed radar clutter based on SIRP[J]. *Tactical Missile Technology*, 2011, (4): 98-101.
- [18] 陈金明. 雷达杂波建模与仿真[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2010.
- Chen Jin-ming. Modeling and simulation of radar clutter[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2010.
- [19] Watts S. Radar detection prediction in sea clutter using the compound K-distribution model[J]. *IEE Proceedings F, Communicatoin, Radar and Signal Processing*, 1985, 132(7): 613-620.
- [20] 罗军辉, 罗勇江, 白义臣, 等. MATLAB 7.0 在数字信号处理中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 180-184.
- Luo Jun-hui, Luo Yong-jiang, Bai Yi-chen, *et al.* MATLAB 7.0 in the Application of Digital Signal Processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 180-184.
- [21] Reuven Y. Rubinstein. Simulation and the Monte Carlo Method[M]. Canada: John Wiley & Sons, 1981: 71-80.
- [22] Irina Antipov. Analysis of sea clutter data[R]. 1998.
- [23] McMaster University. IPIX radar database[OL]. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/dartmouth/datasets.html>, 1998.
- [24] Iskander D R and Zoubir A M. Estimation of the parameters of the K-distribution using higher order and fractional moments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1453-1457.
- [25] 杨海文. 海杂波建模与实测数据分析[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2011.
- Yang Hai-wen. Modeling and data analysis of sea clutter [D]. [Master dissertation], Xidian University, 2011.
- [26] Anastassopoulos V and Lampropoulos G A. High resolution radar clutter statistics[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 43-60.

作者简介



朱洁丽(1989-), 女, 安徽安庆人, 清华大学硕士研究生, 研究方向为雷达信号处理。

E-mail: smile_zjl@163.com

汤俊(1973-), 男, 江苏南京人, 清华大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MIMO 雷达、信息论、阵列信号处理、通用高速实时信号处理系统。