

## 时空相干相关 K 分布海杂波仿真

邓赛强 金林 梁浩

(南京电子技术研究所 南京 210013)

**摘要:** 海杂波通常会制约雷达对目标的检测,它的精确仿真关乎到雷达性能预估的准确性。首先介绍了海杂波的幅度统计模型,然后对它的时间相关性与空间相关性进行讨论。并在此基础上研究了基于球不变随机过程法(SIRP)仿真时空相干相关 K 分布杂波的方法。最后仿真生成海杂波数据,结果表明用该方法获得的杂波数据的概率密度函数与 K 分布模型匹配得很好。同时时间与空间相关性得到了满足,与杂波的复合散射机理也贴合,证实该仿真方法是可行的。

**关键词:** 海杂波; K 分布; 时空相关; 相干; 球不变随机过程

**中图分类号:** TN955    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Simulation of temporal-spatial coherent correlation K-distributed sea clutter

Deng Saiqiang Jin Lin Liang Hao

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** Sea clutter often restricts radar to detect target. The accuracy of the radar performance assessment is related to accurate simulation of sea clutter. The amplitude distribution of sea clutter is introduced first in this paper. Then this paper discusses the features of temporal and spatial correlation. And a simulation method based on spherically invariant random process was proposed. Finally, results show that the clutter data which is obtained by the method is K distribution and spatial-temporal correlation is satisfied. This method is joint with the composite scattering mechanism and is feasible

**Keywords:** sea clutter; K-distribution; temporal-spatial correlated; coherent; SIRP

## 0 引言

借助仿真技术可以使人们能够在无法进行解析处理或信息不是特别全的情况下研究雷达各方面的性能。因此建立海杂波的精确仿真就极为关键。当前,复合 K 分布被广泛用作海杂波的幅度分布模型。该模型能很好地匹配杂波的幅度分布特性,同时又能正确地表征其时间与空间相关性<sup>[1]</sup>。

文献[2-3]给出了 K 分布杂波的仿真,然而这些文献只涉及杂波在时间维度的仿真,没有充分考虑到杂波的空间相关性。文献[4]给出了空间相关杂波的仿真。但在雷达性能评估和其他信号处理过程中,常常要将杂波的时间与空间相关性一起考虑在内。文献[5]提出了一种时空相关 K 分布杂波仿真方法,由于在仿真过程中需对每个距离单元的滤波器进行调整,这给实际仿真操作带来不便性。本文提出的二维相关杂波仿真方法较为简单,既能很好的满足杂波幅度分布特性、时间和空间相关性,又能与杂波的散

射理论相贴合。

## 1 海杂波幅度分布模型

近几十年的研究表明复合 K 分布过程具有广泛的适用性<sup>[6-8]</sup>。复合 K 分布可以用两个独立随机变量( $s$  与  $y$ )的乘积形式来描述<sup>[9]</sup>。其中,分量  $s$  称为散斑分量,用瑞利分布描述。分量  $y$  为功率调制分量,用 Gamma 分布来描述。

于是,复合 K 分布对应的概率密度函数  $P(x)$  为:

$$P(x) = \int P(x | y)P_c(y)dy, 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

其中,散斑分量为:

$$P(x | y) = \frac{x}{y} \exp\left(-\frac{x^2}{2y}\right) \quad (2)$$

功率调制分量为:

$$P_c(y) = \frac{b^v}{\Gamma(v)} y^{v-1} \exp(-by) \quad (3)$$

式中:  $v$  是形状参数,  $b$  代表尺度参数,  $\Gamma(\cdot)$  为 gamma 函

数。因此, K 分布的概率密度函数表示为:

$$P(x) = \int dy P(x|y)P_r(y) = \frac{2\sqrt{2b}}{\Gamma(v)}(x)^v K_{v-1}(\sqrt{2bx}) \quad (4)$$

这里,  $K_v(\cdot)$  为  $v$  阶第 2 类修正贝塞尔函数。

## 2 海杂波的相关性

由于大多数雷达检测算法涉及到信号在时间或空间上的处理,如脉冲积累,CFAR 等,只要所做处理超出单个脉冲固定门限这一模式,相关性就变得重要。复合 K 分布的一个重要优点就是该模型提供了一个定量描述相关性的基础。

### 2.1 时间相关性

通常,从某一距离单元观察到的杂波信号于脉冲间并不是独立的,而是具有一定时间相关性。对杂波的时间相关性分析可分别从其散斑与调制分量去考虑。其中,散斑分量去相关时间很短,一般为毫秒级,通过脉间频率捷变可实现去相关处理<sup>[10]</sup>。调制分量具有长时间相关性,去相关时间大致为秒级,且雷达频率捷变对它没有影响<sup>[6]</sup>。

在杂波分辨单元中,假如调制分量的平均去相关时间远大于杂波的观测时间。那么可以认为在这段时间内调制分量几乎没变,其时间相关系数近似为 1,杂波的总体相关性体现为散斑分量的相关性,每个分辨单元内的杂波信号符合瑞利分布。大多数实际使用的雷达与这种情况相符,例如频率固定的扫描雷达,在其波束驻留时间内即如此。

由于杂波功率谱的傅里叶反变换即等于时间自相关函数,故常用杂波功率谱来表征其时间相关性。高斯谱是用得较多的杂波功率谱,为:

$$S(f) = S_0 \exp\left(-1.665\left(\frac{f-f_d}{f_{3dB}}\right)^2\right) \quad (5)$$

式中:  $S_0$  为杂波谱密度的平均值;  $f_d$  为多普勒频移;  $f_{3dB}$  为杂波功率谱的半功率点宽度。

高斯谱还有另一种表示方法,为:

$$S(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (6)$$

式中:  $\sigma_d = 2\sigma_v/\lambda$  为杂波谱标准差,  $\sigma_v$  为杂波速度起伏展宽值;  $\lambda$  为雷达波长。对式(6)作傅里叶反变换,归一化后得时间自相关函数如下:

$$R(t) = \exp(-\alpha t^2 + j2\pi f_d t) \quad (7)$$

式中:  $\alpha = 2\pi^2\sigma_d^2$ 。由式(7)可得协方差矩阵为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & R_{12} & \cdots & R_{1m} \\ R_{21} & 1 & & \\ \vdots & & 1 & \vdots \\ R_{m1} & \cdots & & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

矩阵元素  $R_{ij}$  为:

$$R_{ij} = \exp(-\alpha T(i-j)^2 + j2\pi f_d T(i-j)) \quad (9)$$

式中:  $T$  为时间采样间隔。

### 2.2 空间相关性

与描述时间相关性类似,也可以通过散斑与调制分量来分析杂波的空间相关性。散斑分量在空间上相隔超过雷达分辨率的样本是独立的。调制分量携带了所有与浪的结构有关的相关性,因此可以在超过几十米的距离保持相关。杂波的空间相关性可以完全由调制分量表征<sup>[11]</sup>。常用的杂波空间相关函数为指数衰减型,可表示成:

$$R(m) = \exp\left(-\frac{\Delta R m}{\rho}\right) \quad (10)$$

其中,  $\Delta R$  表示雷达距离分辨率,  $m$  是距离单元数,  $\rho$  代表相关距离长度,可表示为:

$$\rho = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varphi^2}{g} (3\cos^2\theta + 1)^{1/2} \quad (11)$$

式中:  $\varphi$  代表风速,  $\theta$  是雷达相对于风向的视角,  $g$  是重力加速度。

## 3 时空相干相关 K 分布杂波仿真

模拟海杂波的方法主要有 ZMNL<sup>[12-13]</sup>法和 SIRP<sup>[14-16]</sup>法。ZMNL 法要求杂波的相关系数是实的,这与实际情况不符。而 SIRP 法可产生复相关的 I、Q 两路杂波信号,此外 SIRP 法更符合杂波的散射机理<sup>[16]</sup>。

### 3.1 仿真方法

通常,雷达对单个距离单元的观测时间远低于调制过程的平均去相关时间<sup>[11]</sup>,鉴于上文对杂波相关性的讨论,本文给出如图 1 所示的杂波仿真原理。

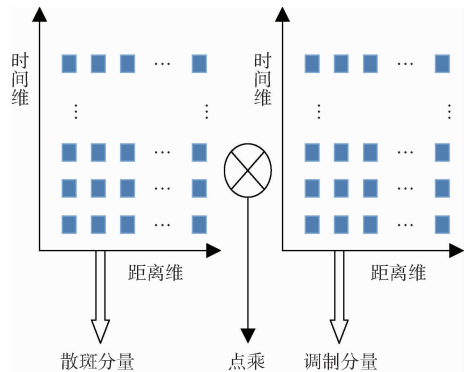


图 1 杂波仿真原理

其仿真原理:首先根据散斑分量的相关性生成时空相关的二维复高斯矩阵,该矩阵在距离维是相互独立的,时间维的相关函数由式(7)给出。然后根据调制分量的相关性生成时空相关的二维实矩阵,该矩阵在时间维的相关函数为 1,即在时间维上各元素相等,距离维的相关函数式(10)得到,且距离维数据满足 gamma 分布。最后将调制分量矩阵各元素取算数平方根后,与散斑分量矩阵各元素对应相乘,即得时空相关的海杂波数据。图 2 展现了基于 SIRP 法时空相干相关杂波仿真的具体框图。

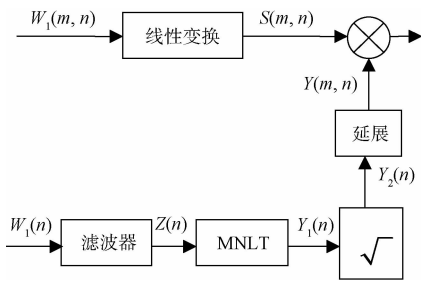


图2 杂波仿真框图

仿真步骤如下:

- 1) 随机生成复高斯白噪声矩阵  $W_1(m, n)$ , 并对  $W_1(m, n)$  作线性变换引入杂波散斑分量的时间相关性, 得  $S(m, n)$ ;
- 2) 随机产生高斯白噪声序列  $W_2(n)$ , 并通过滤波器进行相关性处理得到相关的高斯序列  $Z(n)$ ;
- 3) 对序列  $Z(n)$  进行无记忆非线性变换(MNLT)得到相关的 gamma 分布序列  $Y_1(n)$ ;
- 4) 将序列  $Y_1(n)$  取算数平方根得 chi 分布序列  $Y_2(n)$ , 并将  $Y_2(n)$  纵向按行扩展得矩阵  $Y(m, n)$ , 即元素  $Y(1, i), Y(2, i), \dots, Y(2, i)$  相等;
- 5) 最后将  $S(m, n)$  和  $Y(m, n)$  对应元素相乘得二维海杂波数据  $X(m, n)$ 。

图2展现的仿真框图重点在于如何作线性变化引入散斑分量的相关性, 如何对  $W_2(n)$  滤波得到相关的  $Z(n)$  序列和如何由  $Z(n)$  变换到相关的 gamma 分布序列  $Y_1(n)$ 。

### 3.2 线性变换

1) 根据杂波时间相关函数确定协方差矩阵  $M$ , 对  $M$  进行特征分解, 得到特征值  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N)$  和对应的标准化特征向量  $(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n)$ , 令  $D$  为由  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N)$  构成的对角阵,  $E$  为由  $(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n)$  排列构成的方阵, 令  $A = ED^{1/2}$ , 在 MATLAB 中用 eig 函数可得到  $E$  和  $D$ ;

2) 作  $S = AW_1$ , 即得到具有所需时间相关性矩阵  $S(m, n)$ 。

### 3.3 滤波器的设计

对高斯过程进行线性运算得到的仍然是高斯过程, 线性运算对输出过程相关特性的影响非常明显, 而其单点统计特性不变。本文用如下方法来模拟相关高斯过程。

$$Z(n) = \eta Z(n-1) + \beta W_2(n) \quad (12)$$

式中:  $\beta = \sqrt{1 - \eta^2}$ ,  $\eta$  的取值小于 1 以保证这个过程 的方差有限。假使初始状态为  $n = 0$ , 则可以把结果写成:

$$Z(n) = \eta^n Z(0) + \beta \sum_{r=0}^{n-1} \eta^r W_2(n-r) \quad (13)$$

除了暂态项, 这可以看作是一个依次对不同的  $W_2$  进行滤波的滤波器输出。其均值为:

$$\langle Z(n) \rangle = \eta^n Z(0) \quad (14)$$

均方差为:

$$\langle [Z(n)]^2 \rangle = \eta^{2n} (Z(0))^2 + 1 - \eta^{2n} \quad (15)$$

相关性可以用下式直接计算:

$$\langle Z(n)Z(n+m) \rangle = \eta^m \langle [Z(n)]^2 \rangle \quad (16)$$

当暂态项逐渐衰减为 0 时, 经过这样处理的输出就是一个 0 均值、单位方差且具有指数衰减相关性的高斯过程。

### 3.4 MNLT

仿真相关 gamma 过程的方法以零均值、单位方差的相关高斯过程  $Z(n)$  作为出发点, 随后通过解下面方程得到的无记忆非线性变换将其映射到一个伽马过程  $Y_1(n)$ :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{z'^2}{2}\right) dz' = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_{y_1}^{\infty} y_1'^{\nu-1} \exp(-y_1') dy_1' \quad (17)$$

对式(17)进一步处理得:

$$\Gamma(\nu, y_1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \quad (18)$$

式中:  $\Gamma(\nu, y_1)$  为不完全伽马函数,  $\operatorname{erf}()$  为误差函数。

用该方法可以产生具有伽马单点统计特性的相关序列。得到的伽马序列对应参数为  $(\nu, 1)$ , 将该序列每个元素除以  $b$ , 即可获得参数为  $(\nu, b)$  的伽马序列。

## 4 仿真结果

仿真参设置如表 1 所示, 形状参数  $\nu = 1.71, b = 3.52$ 。散斑分量的时间相关函数采用式(7), 调制分量的空间相关函数采用式(10)。

表 1 仿真参数

参数	值
PRF	1 kHz
雷达波长	0.03 m
距离分辨率	1.5 m
雷达相对风向视角	0°
多普勒频率	40 Hz
杂波速度起伏展宽值	1 m/s
风速	10 m/s

二维杂波幅度图像如图 3 所示; 某时刻距离维杂波幅度和概率分布如图 4 所示; 某距离单元时间维的杂波幅度和

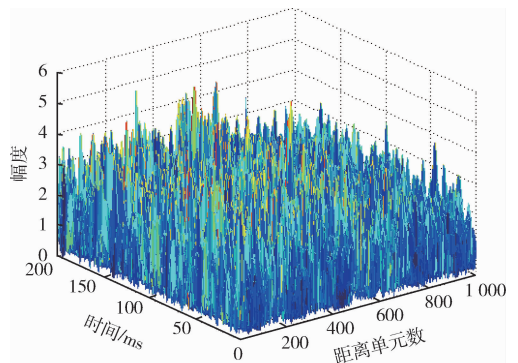


图3 二维杂波幅度波形

和概率分布如图 5 所示,结果显示在每个时刻距离维的杂波与 K 分布拟合得很好,在每个距离单元时间维的杂波符合瑞利分布,这与杂波的复合散射机理相吻合。

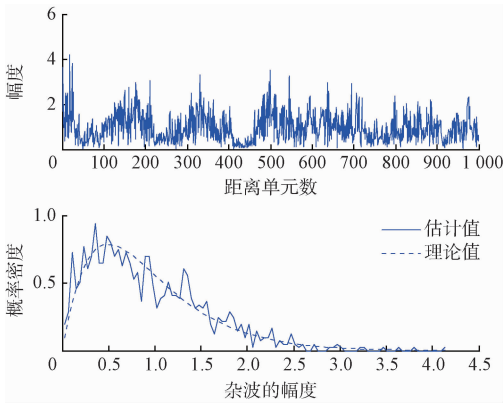


图 4 某时刻距离维杂波幅度和概率密度分布

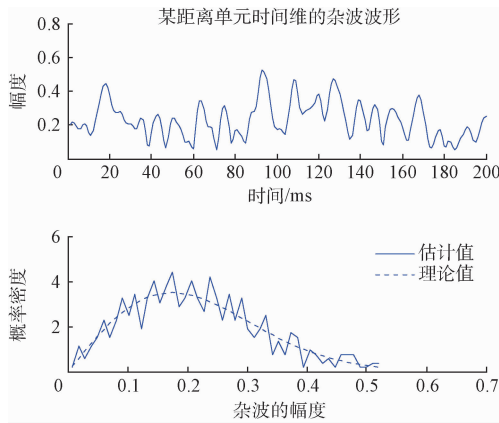


图 5 某距离单元时间维幅度和概率密度分布

生成杂波的时间相关函数的实部和虚部与理论值的比较如图 6 所示,结果表明得到的杂波时间相关函数与理论值几乎相等。杂波空间相关函数和理论值的比较如图 7 所示,仿真结果与理论值匹配。另外图 8 给出了某时刻距离

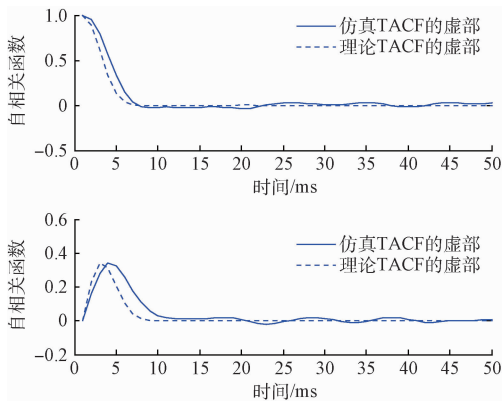


图 6 仿真杂波时间相关函数与理论值

维的实部和虚部,图 9 给出了某距离单元时间维的实部和虚部。

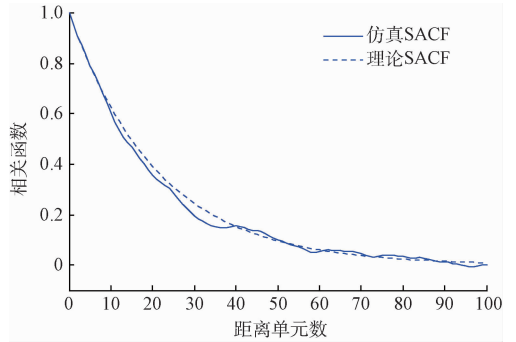


图 7 仿真杂波空间相关函数与理论值

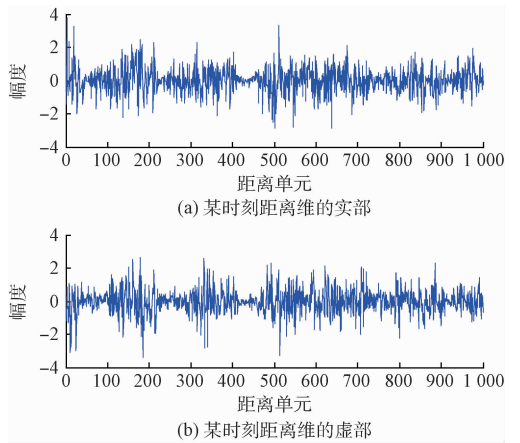


图 8 某时刻距离维杂波实部和虚部

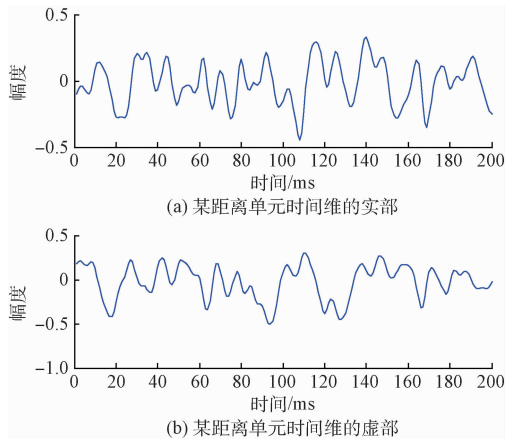


图 9 某距离单元时间维杂波实部和虚部

### 5 结 论

本文以复合 K 分布模型为出发点,根据其散射机理,分别讨论 K 分布杂波散斑和调制分量的时间与空间相关性,据此提出时空相干相关 K 分布海杂波仿真方法。实验

结果证实本文提出的方法一方面既能很好的与K分布模型匹配,同时满足杂波的时间与空间相关性;另一方面还能贴合杂波的散射机理,表明该方法是可行有效的。产生的杂波数据可用来预估雷达在海杂波环境下的性能。

## 参考文献

- [1] 赵海云,张瑞永,武楠,等. 基于实测数据的海杂波特性分析[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(3): 214-218.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] DONG Y H, ROSENBERG L, WEINBERG G V. Generating correlated gamma sequences for sea-clutter simulation [C]. International Conference on Radar, 2013.
- [5] 周万幸. 基于SIRP的时空相关K-分布海杂波仿真研究[J]. 电子学报, 2009, 37(12):2672-2676.
- [6] WARD K, TOUGH R, WATTS S. Sea Clutter; Scattering, the K-distribution and Radar Performance[M]. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [7] 丁昊,董云龙,刘宁波,等. 海杂波特性认知研究进展与展望[J]. 雷达学报, 2016, 5(5):499-516.
- [8] 张维,于盛林,张弓. Anderson-Darling检验在杂波分布辨别中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3):631-635.
- [9] BOCQUET S. Calculation of radar probability of detection in K-distributed sea clutter and noise[R]. 2011.
- [10] 王勇. 频率捷变雷达抗海杂波性能分析[J]. 战术导弹技术, 2016(4):98-103.
- [11] 刘强,王炜,张宁. 航海雷达模拟中的海杂波建模及仿真[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(8):126-129.
- [12] LI, Y L, XU C, ZHAO H Z, et al. Modeling and simulation of correlated K-distributed sea clutter based on ZMNL [C]. International Conference on Signal Processing Systems, 2011.
- [13] ZHOU J, CHEN D, SUN D. K distribution sea clutter modeling and simulation based on ZMNL[C]. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2015:506-509.
- [14] 凌祥,王夷,赵雷鸣,等. 二维距离-多普勒海杂波信号模拟与实现方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5):108-111.
- [15] 谭龙,陈秋菊,吴惟诚,等. 远程预警雷达海杂波信号仿真[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(4):79-82.
- [16] 周敏,蔡红维,阮航,等. 海南发射场测控雷达海杂波建模与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2): 31-35.

## 作者简介

邓赛强,1992年出生,硕士研究生,主要研究方向为雷达系统设计等。

E-mail:1025606689@qq.com