

二维相关的 G^0 分布雷达杂波仿真*

高彦钊, 占荣辉, 刘盛启, 万建伟

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: G^0 分布模型可实现对不同均匀度雷达杂波的较好拟合, 二维相关 G^0 分布雷达杂波的精确仿真对雷达系统设计和性能评估具有重要意义。在利用分段多项式拟合的方法近似表示非线性变换的基础上, 将二维相关的高斯随机过程作为输入, 提出了基于无记忆非线性变换的二维相关 G^0 分布雷达杂波仿真方法。更进一步, 为了实现对杂波幅度与相关性的独立控制, 并仿真具有同相和正交分量的相参雷达杂波, 推导了单视条件下 G^0 分布模型的球不变随机过程特征函数表达式, 提出了基于球不变随机过程的仿真方法。仿真结果表明, 这两种方法均能够仿真产生满足幅度和相关性要求的二维相关 G^0 分布雷达杂波。

关键词: 雷达杂波; 二维相关; 无记忆非线性变换; 球不变随机过程; G^0 分布; 仿真

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)05-105-06

Simulation of bi-dimensional correlated G^0 distributed radar clutter

GAO Yanzhao, ZHAN Ronghui, LIU Shengqi, WAN Jianwei

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The G^0 distribution is capable of fitting radar clutter with different degrees of heterogeneity, so the accurate simulation of bi-dimensional correlated G^0 distributed radar clutter is a vital step in the radar system design and evaluation. In the base of the nonlinear transformation which was expressed approximately by the method of piecewise polynomial fitting, the simulation method of bi-dimensional correlated G^0 distributed radar clutter based on memoryless nonlinear transformation was proposed by taking the bi-dimensional correlated Gaussian process as input. Furthermore, in order to control the amplitude and correlation of radar clutter independently and simulate coherent radar clutter with in-phase and quadrature component, the characteristic function of the haplopla G^0 distribution was derived and the simulation methods based on spherically invariant random process were proposed. Simulation results show that both two methods can generate bi-dimensional correlated G^0 distribution radar clutter which meets the requirements of amplitude and correlation.

Key words: radar clutter; bi-dimensional correlation; memoryless nonlinear transformation; spherically invariant random process; G^0 distribution; simulation

雷达杂波是雷达照射区域中多个散射体后向散射回波的矢量和, 是影响雷达性能的重要因素。因此准确而有效地模拟海杂波信号, 是雷达系统性能评估与最优化设计的前提, 具有十分重要的意义。

雷达杂波通常用幅度的概率分布模型和相关特性来描述^[1]。一些常用的杂波模型, 如瑞利分布、对数正态分布和韦布尔分布等结构简单, 多应用于雷达分辨率较低、不需要考虑杂波脉间相关性条件下单脉冲检测的情况^[2]。复合 K 分布是目前应用较为广泛的杂波模型, 实际的应用表明, 虽然它能够很好地拟合杂波的幅度和脉间相关性^[3], 但只适用于描述高分辨雷达的均匀杂波和一般非均匀杂波, 对于城区等极不均匀区域杂波的建模能力

不足^[4]。文献[5]提出的 G^0 分布认为雷达杂波的纹理分量服从逆方根 Gamma 分布, 具有“向下兼容性”, 是目前基于乘性噪声模型发展的统计分布中的一种通用分布, 不仅能对一般不均匀区域和均匀区域精确建模, 而且对极不均匀区域杂波有非常强的拟合能力, 已经受到了广泛关注^[4-8]。

具有一定概率分布的相关序列可以描述成维纳模型和球不变随机过程 (Spherically Invariant Random Process, SIRP) 模型, 相应的模拟方法为无记忆非线性变换 (Memoryless Nonlinear Transformation, MNLT) 法与 SIRP 法^[1], 两种方法各有优劣^[9]。目前, 大部分相关杂波模拟的研究仅考虑其时间相关特性或空间相关特性^[10-13]。

* 收稿日期: 2013-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61002022)

作者简介: 高彦钊 (1984—), 男, 河北平山县人, E-mail: buaagaoyz@sina.com;

万建伟 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: kermitwjw@139.com

当同时处理多个脉冲的回波数据时,就必须同时考虑时间和空间的相关特性。本文基于这两种仿真方法,研究了二维相关 G^0 分布雷达杂波的仿真方法,并通过仿真验证了其有效性。

1 G^0 分布

G^0 分布是一种典型的乘积杂波模型,它认为雷达杂波由快变化的散斑分量 X 和相关时间较长,反映地物 RCS 特性的纹理分量 Y 相乘得到。其中,纹理分量 Y 服从逆方根 Gamma 分布,即

$$p_Y(y) \sim \Gamma^{-1/2}(\alpha, \gamma) = \frac{2}{\gamma^\alpha \Gamma(-\alpha)} y^{2\alpha-1} \exp(-\gamma/y^2), \quad -\alpha, \gamma, y > 0 \quad (1)$$

式中, α 是形状参数, γ 是尺度参数。而在多视条件下,散斑分量服从方根 Gamma 分布,即

$$p_{X|Y}(x|y) = \frac{2n^n x^{2n-1}}{\Gamma(n)y^{2n}} \exp(-\frac{nx^2}{y^2}), \quad x, n, y > 0 \quad (2)$$

其中, n 表示视数, y^2 表示纹理分量的平均功率。从而可以得到 G^0 分布的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 为

$$p_X(x) = \int_0^\infty p_{X|Y}(x|y)p_Y(y)dy = \frac{2n^n \Gamma(n-\alpha)x^{2n-1}(nx^2+\gamma)^{\alpha-n}}{\Gamma(n)\Gamma(-\alpha)\gamma^\alpha}, \quad -\alpha, \gamma, x, n > 0 \quad (3)$$

2 基于 MNLT 的仿真方法

MNLT 是一种经典的相关杂波生成方法,它利用非线性变换将服从某个特定分布的随机过程直接映射成服从目标分布的随机过程。因此,问题的关键是求解输入与输出序列幅度间以及相关函数间的非线性对应关系。幅度间的非线性对应关系可由定理 1 给出^[10]。

定理 1: 假设 X_1 与 X_2 表示 2 个随机变量,其累计密度函数 (Cumulative Density Function, CDF) 分别为 P_1 与 P_2 , 则随机变量 $P_2^{-1}(P_1(X_1))$ 与 X_2 同分布。

理论上,定理 1 可以实现 2 个服从任意概率分布的随机变量之间的映射。为简单起见,通常取均值为 0, 方差为 1 的高斯随机变量 $N(0, 1)$ 作为 MNLT 的输入。假设其 CDF 为 P_G , 定义函数 $\eta(x) = P_{G^0}^{-1}(P_G(x))$, 如果 x 是高斯分布随机变量的样本, 根据定理 1, $\eta(x)$ 是服从 G^0 分布的随机变量的样本。所以, MNLT 输入与输出序列幅

度间的非线性变换关系可通过图 1 所示流程实现。

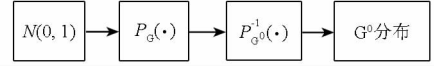


图 1 高斯与 G^0 分布随机过程之间的非线性变换
Fig. 1 The nonlinear transformation from a Gaussian process to a G^0 distributed process

在具体实现中,考虑到 G^0 分布模型的 CDF 很难解析表示,其逆函数 $P_{G^0}^{-1}$ 只能通过数值计算得到。文献[10]中采用 3 次样条插值的方法对 KK 分布 CDF P_{KK} 的逆函数进行拟合,但其采样值仅仅集中在 $P_{KK} = 0.5$ 附近,而忽略了两端的值。为了进一步提高拟合的精度,本文中将 P_{G^0} 分段表示,使得每个分段中 P_{G^0} 近似为直线,然后通过多项式拟合的方法获取较为精确的逆函数 $P_{G^0}^{-1}$ 。假设 G^0 分布模型参数取值分别为 $\alpha = -2, \gamma = 1, n = 2$, 得到的 CDF 及其逆函数如图 2 所示。其中曲线 1 表示 G^0 分布 CDF P_{G^0} , 而曲线 2 是分段拟合得到的 $P_{G^0}^{-1}$ 。为了直观衡量拟合的精度,图 2 中将 $P_{G^0}^{-1}$ 的横纵坐标轴互换后画出曲线 2。

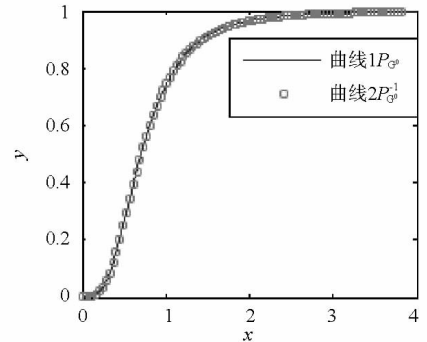


图 2 G^0 分布 CDF 及其逆函数

Fig. 2 The CDF and its inverse of G^0 distribution

从图 2 中可以看出,互换横纵坐标轴后画出的 $P_{G^0}^{-1}$ 与 P_{G^0} 几乎完全重合,这说明分段拟合得到的 $P_{G^0}^{-1}$ 具有很高的精度。

根据上述非线性变换, G^0 分布随机过程的相关函数可以表示为:

$$E[\eta(0)\eta(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(x_1)\eta(x_2)p_G[x_1, x_2, R_G(t)]dx_1 dx_2 \quad (4)$$

其中, $p_G(x_1, x_2, R_G(t))$ 表示相关高斯分布的 PDF, $R_G(t)$ 表示相关系数, 且有 $|R_G(t)| \leq 1$ 。式 (4) 中 G^0 分布的相关函数可以通过高斯分布的相关函数与 Hermite 多项式表示^[10]。根据式(5),

$$p_C(x_1, x_2, R_C(t)) = \frac{\exp[-(x_1^2 + x_2^2)/2]}{2\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{H_m(x_1/\sqrt{2})H_m(x_2/\sqrt{2})}{2^m m!} R_C(t) \quad (5)$$

则式(4)中的相关函数可以表示为

$$E[\eta(0)\eta(t)] = \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{R_C(t)}{2^m m!} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2) H_m(x) \eta(\sqrt{2}x) dx \right]^2 \quad (6)$$

其中, H_m 为 Hermite 多项式, 即

$$H_m(x) = (-1)^m \exp(x^2) \frac{d^m}{dx^m} \exp(-x^2) \quad (7)$$

文献[14]指出, 式(6)中的序列是快速收敛的, 即只需取前若干项求和, 就可以以较小的误差获取输入与输出序列相关函数之间的关系式。

综上所述, 利用 MNLT 法产生二维相关 G⁰ 分布雷达杂波的步骤概括如下:

1) 利用给定的 G⁰ 分布二维相关函数 $E[\eta(0)\eta(t)]$ 通过式(6)计算输入二维高斯随机过程的相关系数 $R_C(t)$;

2) 产生均值为 0, 方差为 1 的二维白高斯随机过程 w ;

3) 将 w 通过根据 $R_C(t)$ 设计的线性滤波器 $F(f)$, 使输出的高斯随机过程具有相关系数 $R_C(t)$;

4) 通过分段多项式拟合得到 $P_{G^0}^{-1}$;

5) 输入相关高斯分布, 通过图 1 中的非线性变换得到满足幅度与相关性条件的二维 G⁰ 分布雷达杂波 X 。

仿真算法的流程图如图 3 所示。

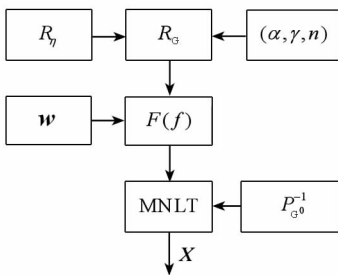


图3 MNLT 法产生二维相关 G⁰ 分布雷达杂波流程图

Fig. 3 Simulation of bi-dimensional correlated G⁰ distributed radar clutter based on MNLT

3 基于 SIRP 的仿真方法

球不变随机矢量(Spherically Invariant Random Vector, SIRV)的 PDF 是一个非负定二次型函数, 可以由均值矢量、协方差矩阵和特征 PDF 唯一确

定。而 SIRP 表示每一组采样矢量都是 SIRV 的随机过程。文献[15]中详细介绍了 SIRV 的基本特性。如果随机矢量 $\mathbf{X} = [x(1), x(2), \dots, x(N)]^T$ 可以表示为 $\mathbf{X} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}$, 其中, $\mathbf{Z} = [z(1), z(2), \dots, z(N)]^T$ 表示均值为 0, 协方差矩阵为 \mathbf{M} 的高斯随机矢量, 而 \mathbf{Y} 表示一个 PDF 为 $p_Y(y)$ 的非负随机变量, 则称随机矢量 \mathbf{X} 是 SIRV。而随机矢量 \mathbf{X} 的条件概率密度为

$$p_{X|Y}(x|y) = (2\pi)^{-N/2} |\mathbf{M}|^{-N/2} y^{-N} \exp\left(-\frac{s}{2y^2}\right) \quad (8)$$

其中 $s = \mathbf{x}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{x}$, $|\cdot|$ 表示取行列式。定义 SIRV 的特征函数为

$$h_N(t) = \int_0^{\infty} y^{-N} \exp\left[-\frac{t}{2y^2}\right] \cdot p_Y(y) dy \quad (9)$$

则 \mathbf{X} 的概率密度可以表示为

$$p_X(x) = (2\pi)^{-N/2} |\mathbf{M}|^{-N/2} h_N(s) \quad (10)$$

根据 SIRV 的定义, 从式(2)可以看出, 只有当视数 $n = 1$, 即单视条件下时, G⁰ 分布的散斑分量幅度服从瑞利分布, 可以通过复高斯随机过程分布模拟。当非负随机变量 Y 的 PDF 如式(1)所示时, 根据式(9)可以推出, 单视 G⁰ 分布的特征函数为

$$h_N(s) = \frac{\Gamma\left(\frac{N}{2} - \alpha\right)}{\Gamma(-\alpha)\gamma^\alpha} \left(\frac{s + 2\gamma}{2}\right)^{\frac{2\alpha - N + 1}{2}} \quad (11)$$

由此可知, 服从单视 G⁰ 分布的雷达杂波可以用 SIRV 理论描述。基于 SIRP 理论生成二维相关的单视 G⁰ 分布杂波时, 可以通过分别产生满足一定相关性的二维复高斯分量(散斑分量)和逆方根 Gamma 分量(纹理分量)来实现对杂波幅度与相关特性的控制。由式(10)可知, 当散斑分量为零均值单位方差的高斯随机过程时, G⁰ 分布的雷达杂波幅度完全由纹理分量的 PDF $p_Y(y)$ 决定。而当散斑分量与纹理分量相互独立时, G⁰ 分布雷达杂波 X 的相关函数 r_X 可以表示为

$$r_X = r_Y \cdot r_Z \quad (12)$$

其中, r_Y 与 r_Z 分别为散斑分量和纹理分量的相关函数。考虑到雷达信号的处理时间通常远小于纹理分量的去相关时间^[2], 所以可以假设纹理分量的相关函数 $r_Y \approx 1$ 。从而, G⁰ 分布杂波的相关性在很大程度上由散斑分量决定。另外, 雷达杂波的同相分量与正交分量通常独立得到, 分别单独控制同相与正交分量的相关特性更符合实际工程应用情况。

综上所述,利用 SIRP 法生成二维相关单视 G^0 分布雷达杂波的步骤概括如下:

- 1) 生成零均值单位方差的二维白高斯随机过程 w_I 与 w_Q , 作为散斑分量的同相与正交分量;
- 2) 根据同相与正交分量的相关特性设计滤波器 $F_I(f)$ 与 $F_Q(f)$, 并将 w_I 与 w_Q 分别作为其输入得到满足相关性要求的散斑分量 Z ;
- 3) 生成白色实高斯随机矩阵 w , 并通过一个截止频率尽可能低的低通滤波器 $F(f)$, 使其输出 w' 高度相关, 即 $r_{w'} \approx 1$;
- 4) 根据逆方根 Gamma 的 CDF 设计 MNLT, 并将 w' 作为其输入, 得到满足相关性要求的散斑分量 Y ;
- 5) 令 $X = Z \cdot Y$, 得到二维相关的单视 G^0 分布雷达杂波。

仿真算法的流程图如图 4、图 3 所示。

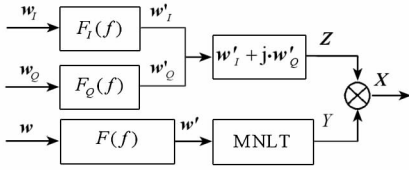


图 4 SIRP 法产生二维相关单视 G^0 分布雷达杂波流程图

Fig. 4 Simulation of bi-dimensional correlated haplopia G^0 distributed radar clutter based on MNLT

4 仿真结果

利用 MNLT 法进行杂波仿真时,假设 G^0 分布模型的参数取值分别为 $\alpha = -2, \gamma = 1, n = 2$, 其相关系数为

$$E[\eta(0,0)\eta(x,y)] = \exp\left(-\frac{x+y}{10}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{8}\right) \tag{13}$$

而当利用 SIRP 法仿真时,参数取值为 $\alpha = -2, \gamma = 1, n = 1$, 杂波同相与正交分量的相关系数均由式(13)确定,如图 5 所示。基于 MNLT 法的杂波仿真结果如图 6 ~ 图 10 所示。

图 6 首先给出了根据式(6)由 G^0 分布相关系数映射得到的高斯分布相关系数 R_G 。设定误差限 $\varepsilon = 10^{-6}$, 随着式(6)中的阶数 m 的增加,当序列和的增量小于误差限 ε 时,迭代求和终止。根据 R_G 生成的二维相关高斯随机过程如图 7 所示。将此二维相关高斯随机过程作为 MNLT 的输入,可以生成满足幅度和相关性要求的 G^0 分布雷达杂波,如图 8 所示。图 9 与图 10 分别给出了生成

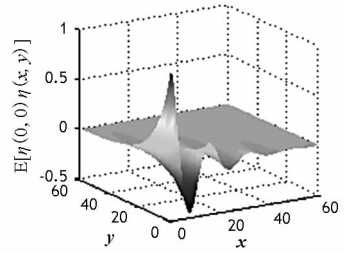


图 5 SIRP 法的相关系数 ($\alpha = -2, \gamma = 1, n = 1$)
Fig. 5 The correlation coefficient determined by SIRP

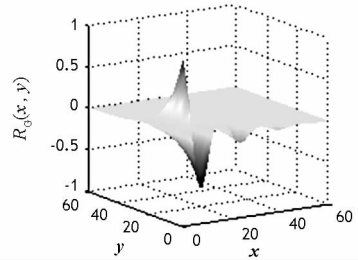


图 6 高斯随机过程相关系数 R_G
Fig. 6 The correlation coefficient R_G of the Gaussian process

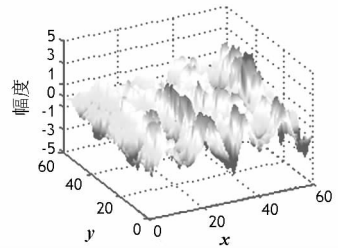


图 7 二维相关高斯随机过程 (MNLT 的输入)
Fig. 7 The bi-dimensional correlated Gaussian process (the input of the MNLT)

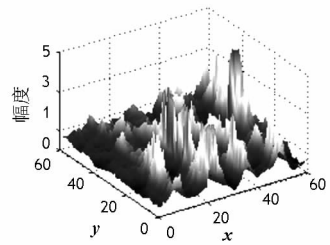


图 8 基于 MNLT 法生成的二维相关 G^0 分布雷达杂波
Fig. 8 The bi-dimensional correlated G^0 distributed radar clutter based on the MNLT

的雷达杂波的相关函数及幅度统计直方图与理论值的对比。从图中可以看出,无论相关函数还是统计直方图与理论值的误差都非常小,说明利用 MNLT 仿真方法生成的雷达杂波满足幅度与相关性要求。

图 11 ~ 图 14 给出了基于 SIRP 法生成二维相关单视 G^0 分布雷达杂波的结果。考虑到雷达

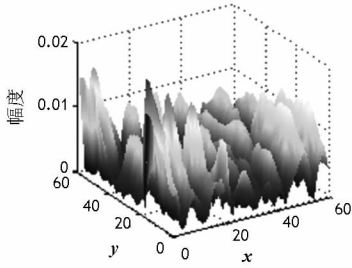


图9 基于 MNLT 法生成杂波相关系数与理论相关系数的误差

Fig. 9 The errors of the correlation coefficient between the generated clutter and the theoretical one based on MNLT

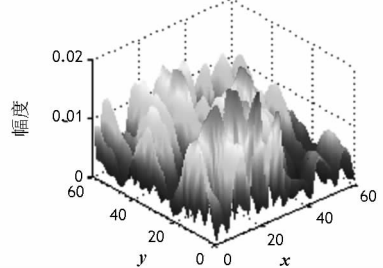


图12 基于 SIRP 法生成杂波的相关系数与理论相关系数的误差

Fig. 12 The errors between the correlation coefficient of the generated clutter based on SIRP and the theoretical one

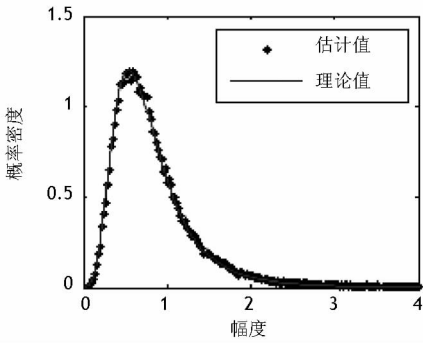


图10 基于 MNLT 法生成杂波统计直方图与对应的 G^0 分布 PDF

Fig. 10 The histogram of the generated G^0 distributed radar clutter based on MNLT and the corresponding G^0 PDF

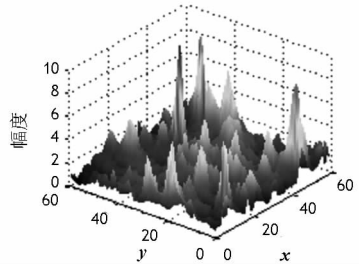


图13 基于 SIRP 生成的二维相关单视 G^0 分布雷达杂波
Fig. 13 The generated bi-dimensional correlated haplopia G^0 distributed radar clutter based on SIRP

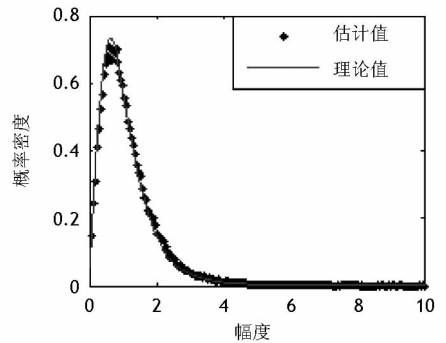


图14 生成杂波统计直方图与对应的 G^0 分布 PDF
Fig. 14 The histogram of the generated radar clutter based on SIRP and the corresponding G^0 PDF

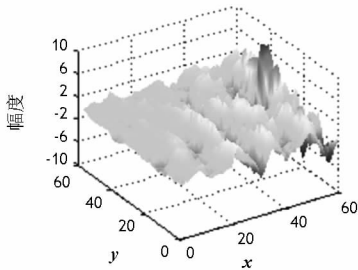


图11 基于 SIRP 生成的二维相关单视 G^0 分布雷达杂波的同相分量

Fig. 11 The inphase part of the generated bi-dimensional correlated haplopia G^0 distributed radar clutter based on SIRP

杂波的同相与正交分量的相关性是单独控制的,图 11 给出了生成杂波的同相分量波形,其相关特性与理论值(式(13))的误差如图 12 所示。从图中可以看出,最大误差小于 0.02,这说明利用 SIRP 法产生的杂波是满足相关性要求的。图 13 给出了生成的杂波波形,其幅度统计直方图与相应的 G^0 分布 PDF 的对比如图 14 所示。从图中可以看出,两者几乎完全重合,这说明利用 SIRP 法产生的杂波满足幅度与相关性要求。

5 结论

本文分别基于 MNLT 与 SIRP 研究了二维相关的 G^0 分布雷达杂波的仿真方法。基于 MNLT 的方法思路直观,通用性好,但必须求解非线性变换输入序列与输出序列的幅度以及相关性的非线性关系,且无法实现对杂波同相与正交分量的单独控制;基于 SIRP 的方法只能应用于单视条件下 G^0 分布的杂波仿真,通过分别产生散斑分量与纹理分量来实现对杂波同相分量与正交分量幅度及相关性的单独控制。仿真结果表明,这两种方法

均可生成满足幅度与相关性要求的二维相关的 G^0 分布雷达杂波。

参考文献 (References)

- [1] Conte E, Longo M, Lops M. Modeling and simulation of non-rayleigh radar clutter [J]. IEE Proceedings - F, 1991, 138(2): 121 - 130.
- [2] 赵海云, 胡学成. 时空二维相关 K 分布雷达海杂波建模与仿真[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(5): 515 - 519.
ZHAO Haiyun, HU Xuecheng. Modeling and simulation of temporal-spatial bi-dimensional correlated K-distributed radar sea clutter[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008, 3(5): 515 - 519. (in Chinese)
- [3] Watts S. Radar detection prediction in K-distributed sea clutter and thermal noise [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(1): 40 - 45.
- [4] 高贵. SAR 图像目标 ROI 自动获取技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
GAO Gui. The research on automatic acquirement of target's ROI from SAR imagery[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [5] Frery A C, Muller H J, Yanasse C C F, et al. A model for extremely heterogeneous clutter [J]. IEEE Transactions on Geoscience on Remote Sensing, 1997, 35(3): 648 - 659.
- [6] 徐湛. 海杂波建模及其背景下目标检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
XU Zhan. Modeling of sea clutter and target detection in sea clutter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] Eltoft T. Modeling the amplitude statistics of ultrasonic images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2006, 25(2): 229 - 240.
- [8] Greco M S, Gini F. Statistical analysis of high-resolution SAR ground clutter data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3): 566 - 575.
- [9] 张宝宝, 胡艳辉, 罗丰, 等. 相关 K 分布海杂波的建模与仿真[J]. 现代雷达, 2007, 29(4): 24 - 27.
ZHANG Baobao, HU Yanhui, LUO Feng, et al. Modeling and simulation of correlated K-distributed radar sea clutter[J]. Modern Radar, 2007, 29(4): 24 - 27. (in Chinese)
- [10] Graham V W, Lachlan G. Simulation of statistical distributions using the memoryless nonlinear transform[R]. Defense Science and Technology Organisation, 2011.
- [11] Ward K D, Tough R J A, Shepherd P W. Modelling sea clutter: correlation, resolution and non-Gaussian statistics[C]. IEE Radar 97, Publication 449, 1997: 95 - 99.
- [12] Hu Y H, Luo F, Zhang B B. Simulation of coherent correlation K-distributed sea clutter based on SIRP [C]. Radar CIE Conference, 2006: 1 - 4.
- [13] Rangaswamy M, Weiner D, Ozturk A. Computer generation of correlated non-Gaussian radar clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(1): 106 - 115.
- [14] Tough R J, Ward K D. The correlation properties of Gamma and other non-Gaussian processes generated by memoryless nonlinear transformation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32: 3075 - 3084.
- [15] 杨万海. 雷达系统建模与仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
YANG Wanhai. Modeling and simulation of radar systems[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2007. (in Chinese)