

基于高斯序列乘积和的相干非高斯分布杂波模拟新方法*

杨俊岭, 黄晓斌, 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:提出了一种全新的相干 K 分布杂波模拟方法。相比经典的零记忆非线性变换(ZMNL)和球不变随机过程(SIRP)法,该方法的优点是能产生自相关函数(ACF)为任意复数的杂波序列,且不需要进行矩阵求逆和非线性变换,运算速度得到显著改善。仿真结果证明了这种方法的有效性。

关键词:杂波建模; K 分布; 相干; 非高斯

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

A New Method for Simulation of Coherent Non-Gaussian Distributed Clutter Based on Sum-products of Gaussian Variables

YANG Jun-ling, HUANG Xiao-bin, WAN Jian-wei

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

Abstract: A new method for modeling and simulation of coherent k-distributed clutter is presented. Compared with ZMNL and SIRP, this method can generate coherent clutter with arbitrary complex ACF, and it doesn't need resolving non-linear equation and matrix inverse. As a result the speed of simulation is improved markedly. The results from simulation prove the validity of this scheme.

Key words: clutter modeling; k-distributed; coherent; non-Gaussian

如何高速有效地生成具有指定相关性和幅度分布特性的杂波序列,是杂波建模与仿真的重要任务。K 分布作为一种新构造的非高斯混合模型^[1-4],适于描述多种高分辨低擦地角的地、海杂波,是目前公认能精确反映雷达杂波的较佳统计模型。L James 在文献[5]中给出了较为完整的相关 K 分布 ZMNL 仿真方法,该方法的不足之处在于,生成的杂波序列的 ACF 只能是实的非负值,且同相正交分量不相关,这与很多实际的雷达应用不相符。E. Conte 等在文献[6]中给出了相关相干 K 分布 SIRP 仿真方法,它在一定程度上弥补了 ZMNL 的不足,但仍需要进行非线性方程求解和矩阵求逆运算,给仿真带来很大运算量。W. J. Szajnowski 在文献[7]中证明 K 分布序列的同相正交分量均可由两列相互独立的高斯矢量加权乘积和构成,本文在这个原理的基础上,提出一种新的相干 K 分布杂波建模仿真方法。

1 K 分布杂波的同相正交分量

1.1 K 分布杂波

K 分布杂波概率密度函数(PDF)以及各阶矩表达式如下^[14-15]:

$$f(z) = \frac{2c}{\Gamma(v)} \left(\frac{cz}{2}\right)^v K_{v-1}(cz), \quad E(z^m) = \frac{2^m \Gamma(0.5m+1) \Gamma(0.5m+v)}{\Gamma(v) c^m} \quad (1)$$

其中, v 为形状参数, c 为尺度参数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数, $K_v(\cdot)$ 为 v 阶修正的第二类贝塞尔函数。若设 $u(t)$ 、 $u_{\perp}(t)$ 分别为相关 K 分布杂波 $z(t)$ 的同相和正交分量, $z(t)$ 可以由以下混合复高斯过程表示^[6,8-9]

$$z(t) \equiv u(t) + ju_{\perp}(t) = \xi(t) [g(t) + jg_{\perp}(t)] \quad (2)$$

* 收稿日期: 2006-03-28

基金项目: 国家部委基金资助项目(41321090202)

作者简介: 杨俊岭(1975-),男,博士生。

这里 $g(t)$ 、 $g_{\perp}(t)$ 为相互独立的标准高斯过程, $\xi(t)$ 为调制分量, 其 PDF 为^[6,8]

$$p(\xi) = \frac{2a^v \xi^{2v-1}}{\Gamma(v)} \exp(-a\xi^2), \quad \xi > 0, a > 0 \quad (3)$$

这里 $a = c^2/\pi$ ^[14] 为尺度参数。

1.2 K 分布杂波同相正交分量特征函数(cf)^[7]

设 $\Phi_u(s)$ 为同相分量 u (或者正交分量 u_{\perp}) 的 cf, 则有^[10]

$$\Phi_u(s) = \int_0^{\infty} \Phi_g(s\xi) p(\xi) d\xi \quad (4)$$

这里 $p(\xi)$ 由(3)式确定, $\Phi_g(s) = \exp(-s^2/2)$ 是标准高斯随机变量的 cf。不失一般性, 设 $a = 1/2$, 可得^[7]

$$\Phi_u(s) = \frac{1}{2^{v-1} \Gamma(v)} \int_0^{\infty} \xi^{2v-1} \exp[-\xi^2(1+s^2)/2] d\xi = \left(\frac{1}{1+s^2}\right)^v \quad (5)$$

对(5)式进行傅里叶变换可得 u 的 PDF 表达式^[11]

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{|u|}{2}\right)^{v-1/2} \frac{K_{v-1/2}(|u|)}{\Gamma(v)} \quad (6)$$

当形状参数 v 为整型或半整型时, 具有单位方差的 K 分布杂波的同相分量 $u(t)$ 可以由以下表达式给出^[7]:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{2v}} \sum_{i=1}^{2v} w_i(t) x_i(t), \quad 2v = 1, 2, \dots \quad (7)$$

这里 $w_i(t)$, $x_i(t)$ 为相互独立的实际标准高斯过程, 当 v 较大时, $u(t)$ 趋向于高斯分布。若 $2v \geq 1$ 且不为整数, (5)式可以采用下式进行近似:

$$\bar{\Phi}_u(s) = \prod_{i=1}^L \left(\frac{1}{1+\sigma_i^2 s^2}\right)^{1/2} \quad (8)$$

这里 L 是 $(2v+1)$ 的整数部分, σ_i 为近似系数, 由此(7)式可近似为

$$u(t) \approx \frac{1}{\sigma_0} \sum_{i=1}^L \sigma_i w_i(t) x_i(t) \quad (9)$$

这里 $\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^L \sigma_i^2$, 系数 σ_i 可以按照将近似误差 $\varepsilon = |\Phi_u(s) - \bar{\Phi}_u(s)|$ 最小化来选择, 这个工作可以事先进行, 针对不同 v 值存为表格, 在仿真时查表即可。

同理对于 K 分布杂波的正交分量 $u_{\perp}(t)$, 将过程 $x_i(t)$ 换为同分布的 $y_i(t)$ 即可, 得到

$$u_{\perp}(t) = \frac{1}{\sqrt{2v}} \sum_{i=1}^{2v} w_i(t) x_i(t) \quad (10)$$

或者

$$u_{\perp}(t) \approx \frac{1}{\sqrt{\sigma_0}} \sum_{i=1}^L \sigma_i w_i(t) y_i(t) \quad (11)$$

由(7)、(9)~(11)式看到, K 分布杂波序列的实、虚部均可由一组标准高斯序列来构成。也就是说, 实标准高斯过程 $w_i(t)$, $x_i(t)$, $y_i(t)$ 的相关性可以确定杂波序列的实、虚部的相关特性, 也即杂波的 ACF, 反之亦然。

2 K 分布杂波同相正交分量的相关性

要建立 K 分布杂波 ACF 与 $w_i(t)$, $x_i(t)$, $y_i(t)$ 相关性之间的关系, 首先要建立杂波 ACF 与杂波同相、正交分量相关性之间的关系。对于相干模型, 输入输出序列的 ACF 均为复序列, 不妨设给定的杂波 ACF 为

$$R_{\mathbf{z}}(\tau) = r(\tau) + jr_{\perp}(\tau) \quad (12)$$

其中 r, r_{\perp} 分别为杂波 ACF 的实部和虚部。另一方面,由(2)式可得

$$\begin{aligned} R_z(\tau) &= E\{[u(t) + ju_{\perp}(t)][u(t+\tau) - ju_{\perp}(t+\tau)]\} \\ &= R_w(\tau) + R_{u_{\perp}u_{\perp}}(\tau) + j[R_{u_{\perp}u}(\tau) - R_{w_{\perp}u}(\tau)] \end{aligned} \quad (13)$$

这里 $R_w(\tau) = E[u(t)u(t+\tau)], R_{u_{\perp}u_{\perp}}(\tau) = E[u_{\perp}(t)u_{\perp}(t+\tau)]$, 都是实序列。若 z 为一个广义稳态窄带过程(对实际杂波这往往是满足的),就能够得到以下有用特性^[12]:

$$R_w(\tau) = R_{u_{\perp}u_{\perp}}(\tau), \quad R_{w_{\perp}u_{\perp}}(\tau) = -R_{u_{\perp}u}(\tau) \quad (14)$$

将(14)式代入(13)式可得:

$$R_z(\tau) = 2[R_w(\tau) - jR_{w_{\perp}u}(\tau)] \quad (15)$$

比较(12)、(15)式得到 r, r_{\perp} 与 $R_w, R_{w_{\perp}u}$ 的关系:

$$r(\tau) = 2R_w(\tau), \quad r_{\perp}(\tau) = -2R_{w_{\perp}u}(\tau) \quad (16)$$

这个公式就是要得到的 K 分布杂波实、虚部的相关特性与杂波的 ACF 之间的关系。

不妨设 $w_i(t)$ 具有相同的 ACF 为 $R_{w_{ii}}(\tau) = E[w_i(t+\tau)w_i(\tau)] (i=1, 2, \dots, 2v)$, $x_i(t)$ 与 $y_i(t)$ 有相同的 ACF, 即 $R_{x_{ii}}(\tau) = R_{y_{ii}}(\tau)$, 再设 $x_i(t)$ 与 $y_i(t)$ 的互相关函数为 $R_{xy}(\tau) = E[x_i(t+\tau)y_i(\tau)]$, 而 $R_{w_{ij}}(\tau) = R_{y_{ij}}(\tau) = 0$ 。再根据(7)、(9)~(11)式可得:

$$R_w(\tau) = \frac{1}{2v} E\left[\sum_{i=1}^{2v} w_i(t+\tau)x_i(t+\tau) \cdot \sum_{i=1}^{2v} w_i(\tau)x_i(\tau)\right] = R_{w_{ii}}(\tau)R_{x_{ii}}(\tau) \quad (17)$$

$$R_{w_{\perp}u}(\tau) = \frac{1}{2v} E\left[\sum_{i=1}^{2v} w_i(t+\tau)x_i(t+\tau) \cdot \sum_{i=1}^{2v} w_i(\tau)y_i(\tau)\right] = R_{w_{ii}}(\tau)R_{y_{ii}}(\tau) \quad (18)$$

将(17)、(18)式分别代入(16)式可得

$$r(\tau) = 2R_{w_{ii}}(\tau)R_{x_{ii}}(\tau), \quad r_{\perp}(\tau) = -2R_{w_{ii}}(\tau)R_{y_{ii}}(\tau) \quad (19)$$

最终,由(19)式就给出了 K 分布杂波的 ACF 与 $w_i(t), x_i(t), y_i(t)$ 相关性之间的关系。

3 相干 K 分布杂波仿真设计

通过以上分析,得到了 K 分布杂波的实、虚部的表达式以及相关特性,根据这些推导,就可以对相干 K 分布杂波进行仿真。对于给定 r, r_{\perp} , 形状参数为 v 的相关相干 K 分布杂波序列可以由图 1 所示的方法产生。图中细线为实过程,粗线为复过程。 $s_i (i=1, 2, \dots, 2v)$ 为相互独立白的实高斯序列, $p_i (i=1, 2, \dots, 2v)$ 为相互独立的白复高斯序列。滤波器 $H_1(Z), H_2(Z)$ 的输出 $w_i, q_i = x_i + jy_i$ 的相关特性由(19)式给定。虽然由(19)式, w_i 的 ACF 在理论上

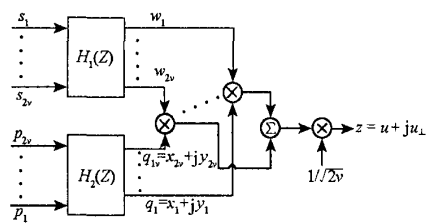


图 1 相干 K 杂波产生框图

Fig.1 Coherent K-clutter generation scheme

可以任意选择,但在本仿真中 $H_1(Z)$ 被设计成一个带宽很窄的低通滤波器,它能使输出 w_i 具有很高的自相关性,即 $R_{w_{ii}}(\tau) \approx 1$ 。这种设计的一个优点是让(19)式计算方便,同时能有效避免因 $R_{w_{ii}}(\tau) = 0$ 导致 $R_{x_{ii}}(\tau), R_{y_{ii}}(\tau)$ 无解的情况的发生。在确定了 $R_{w_{ii}}(\tau)$ 之后,就可以由(19)式计算出 $R_{x_{ii}}(\tau)$ 和 $R_{y_{ii}}(\tau)$, 它们将用来设计滤波器 $H_2(Z)$ 。 $H_2(Z)$ 的输出 $q_i = x_i + jy_i$ 为具有指定 ACF 的复高斯序列,不难证明其 ACF 由下式确定:

$$R_{q_{ii}}(\tau) = 2[R_{x_{ii}}(\tau) - jR_{y_{ii}}(\tau)] \quad (20)$$

众所周知,AR 模型可以用于产生任意谱的随机过程。因而,根据(19)、(20)式就可以使用 AR 模型来设计滤波器 $H_2(Z)$ 。图中的乘积因子 $1/\sqrt{2v}$ 为方差修正因子, v 为形状参数,这个因子影响着输出序列的方差。对其适当调整可以使输出序列的方差趋近于理想值。理想 K 分布方差可由(1)式确定。按照图 1 所示,两个滤波器的输出 w_i, q_i 进行相乘相加处理,最后乘以方差因子,就得到具有指定功率谱的相

关相干 K 分布杂波序列 $z = u + ju_{\perp}$ 。

4 仿真结果

考虑一个相干脉冲非对称谱雷达杂波模型,它由 Hawkes 等在文献[16]中给出,这种杂波模型的归一化 ACF 由下式给出:

$$r(k) = \frac{2}{3} \left[1 + \frac{1}{2} \cos(4\pi k V_{\sigma}) \exp(-8\pi^2 k^2 \sigma_d^2) \right] \times \exp(-j2\pi V_{\omega} - 2\pi^2 k^2 \sigma_r^2 - \frac{k^2}{2T_0^2}) \quad (21)$$

这里 $\sigma_d, \sigma_r, V_{\omega}, V_{\sigma}, T_0$ 为模型参数,根据文献[16],选择其取值分别为 0.025, 0.020, -0.050, 0.030, 24。选择 K 分布形状参数 $\nu = 2.5$, 尺度参数 $c = 2$, 采样点数 $N = 512$, 选择 10 阶 AR 模型设计 $H_2(Z)$ 滤波器,进行 100 次试验。图 3(a)为理想与仿真功率谱比较,(b)为理想与仿真 K 分布曲线比较,(c)为杂波理想 ACF 实部与仿真 ACF 实部比较,(d)为杂波理想 ACF 虚部与仿真 ACF 虚部比较。由图 3 知,使用本文介绍的仿真方法,得到的相关相干 K 分布杂波,其功率谱特性和概率分布特性都与理想值有很好的吻合。

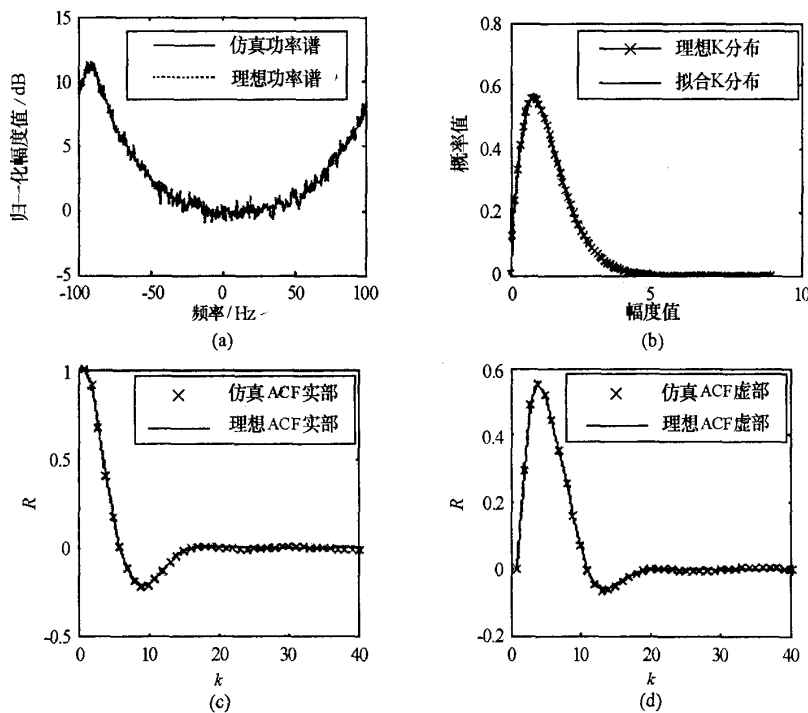


图 2 相干 K 分布杂波仿真结果

Fig.2 Results of K-distributed clutter simulation

5 结论

给出了一种全新的相关相干 K 分布杂波建模与仿真方法,它不但可以使生成的杂波具有任意指定的功率谱(对称与非对称谱),杂波的 ACF 可以为任意复数,而且相比 ZMNL 与 SIRP,它不涉及任何非线性方程求解以及矩阵求逆运算,因而具有很高的仿真速度,给工程实现带来很大方便。

参考文献:

[1] Ward K D. Compound Representation of High Resolution Sea Clutter [J]. Elect. Lett. 1981, 17(16):561 - 563.
 [2] Watts S, Ward K D. Radar Sea Clutter [J]. Microwave, 1985, 22: 109 - 121.

- [3] Watts S, Ward K D. Spatial Correlation in K-distributed Sea Clutter[C]. IEE Proceedings [C], 1987, 134(6):526-532.
- [4] Jao J K. Amplitude Distribution of Composite Terrain Radar Clutter and the K-distribution [J]. IEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, 32(10):1049-1062.
- [5] Jr James M L. Correlated K-distributed Clutter Generation for Radar Detection and Track [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(2).
- [6] Conte E, Longo M, Lops M. Modeling and Simulation of Non-rayleigh Radar Clutter [C]. IEE Proceedings, 1991, 138(2).
- [7] Szajnowski W J. Simulation Model of Correlated K-distributed Sea Clutter and Thermal Noise [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron Syst., 1987, 23: 568-580.
- [8] Watts S. Radar Detection Prediction in K-distributed Sea Clutter and Thermal Noise [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron Syst., 1987, 23:568-580.
- [9] Rangaswamy M, Weiner D D. Computer Generation of Correlated Non-Gaussian Radar Clutter [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1995, 31: 106-116.
- [10] Stuart A, ORD J K. Kendall's Advanced Theory of Statistics: Vol 1, Distribution Theory [M]. Edward Arnold, London, 1994: 396-413.
- [11] Gradshteyn I S, Ryzhk L M. Table of Integrals, Series, and Products [M]. Academic Press, San Diego, 1994: 1191.
- [12] Papoulis A. Probability, Random Variables and Stochastic Processes [M]. McGraw-Hill, New York, 1984.
- [13] Li Gang, Yu Kai-bor. Modeling and Simulation of Coherent Weibull Clutter [C]. IEE Proceedings, 1989:136.
- [14] Irina Antipov. Simulation of Sea Clutter Returns [R]. DSTO-TR-0679, 1998.
- [15] 宁海娜, 胡卫东. 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.
- [16] Hawkes C W, Haykin S S. Modeling of Clutter for Coherent Pulsed Radar [J]. IEEE Trans., 1975, 21: 703-707.

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] Zhang T, Fossorrier M. Shuffled Belief Propagation Decoding[C]. The Proceedings 36th Asilomar Conference on Signal Systems and Computers, Pacific Grove, Grove, USA, 2002:8-15.
- [2] Sharon E, Goldberger J. An Efficient Message-passing Schedule for LDPC Decoding[J]. IEEE Commun. Lett., 2004, 4:223-226.
- [3] Mao Y, Banihashemi A H. A New Schedule for Decoding Low-density Parity-check Codes[J]. IEEE, 2001:1007-1010.
- [4] 贺玉成, 杨莉, 等. 置信传播译码算法的性能测度[J]. 电子学报, 2002, 30(4):576-580.
- [5] Ryan W E. An Introduction to LDPC Codes[R]. NSF CCR-9814472, Aug. 2003.
- [6] Kschischang F R, et al. Factor Graphs and Sum Product Algorithm[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2001, 47(2):498-519.
- [7] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2003.
- [8] 蒋艳凤, 杨学军. 基于搜索编码的简单贝叶斯分类方法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(5).

