

文章序号: 1001-2486 (2000) 03-0029-05

低入射余角下雷达海杂波的建模与仿真*

宋海娜, 胡卫东, 郁文贤, 吴建辉

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研究了低入射余角下雷达海杂波的建模、仿真算法及实现问题。根据实际背景, 对实测数据进行深入讨论, 建立起一个较为准确的海杂波幅度分布模型与功率谱模型; 针对非相参和相参两种雷达体制, 分别采用修正的零记忆非线性变换法和球不变随机过程法来实现具有给定相关性的 K 分布随机数序列的产生, 并以 Visual C++ 为平台实现了仿真软件。仿真结果证明了模型和算法的有效性。

关键词: 低入射余角; K 分布海杂波; 相关; 仿真

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Modeling and Simulation of Low Grazing Angle Radar Sea Clutter

SONG Hai-na, HU Wei-dong, YU Wen-xian, WU Jian-hui

(ATR State Key Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The model and simulation of low grazing angle sea clutter is introduced. According to the actual background, some approximate models of sea clutter have been modified. Simulation schemes are presented in detail for incoherent and coherent radar signal processing respectively. Some key problems encountered in the simulation are emphasized, and a software of simulation is realized in Visual C++. The results of simulation show the applicability and effectiveness of the model and the simulation scheme.

Key words: low grazing angle; K-distributed sea clutter; correlation; simulation

岸基和舰载雷达对低空及海面目标进行探测时, 海杂波的幅度分布特性及相关特性对海面及低空目标的检测性能具有重要影响。国内外很多学者对海杂波的建模进行深入的研究。传统的海杂波幅度分布模型是基于低分辨率雷达得到的瑞利分布模型。Jakeman^[1]于 1976 年首次提出了以 K 分布作为一类电磁散射现象的模型, Oliver^[2]及 Ward^[3]等人也得到了相关 K 分布海杂波模型的研究结果。对于低入射余角的雷达海杂波, 通常以 K 分布作为它的幅度分布模型。模型中的参数和时间或空间相关性要由雷达参数及环境参数来确定。作为模拟雷达探测的组成部分, 海杂波的模拟需要采用一种性能稳定的快速算法来产生具有给定概率分布及相关性的随机数。经典的算法有零记忆非线性变换法 (ZMNL)^[4]和球不变随机过程法 (SIRP)^[5]。SIRP 适合于产生相参相关 K 分布海杂波仿真数据, 但 SIRP 涉及到矩阵运算, 在采样点数较大时不易形成快速算法。因此, 对于非相参相关 K 分布海杂波, 我们主要通过修正 ZMNL 来生产模拟海杂波的随机数序列。

1 海杂波建模

海杂波建模包括两个方面: 一是确定海杂波的幅度分布和功率谱类型; 二是根据具体的雷达体制与雷达工作环境, 确定幅度分布和功率谱模型的参数。

1.1 幅度分布模型的确定

对雷达在低入射余角工作时得到的海杂波包络的研究表明, 复合 K 分布对观测数据拟合较好。它不但可以模拟海杂波幅度分布的“长尾”特性, 还能正确地模拟其时间相关性, 这一特性对精确预测回波脉冲积累后的检测性能是很重要的。K 分布还具有很宽的适应范围, 适用于不同类型的雷达海杂波。因此, 我们以复合 K 分布作为海杂波在不同条件下的通用统计模型, 其表达式如下

* 收稿日期: 1999-11-29
基金项目: 国家部委基金资助项目 (64.2.4)
作者简介: 宋海娜 (1977-), 女, 硕士生。

$$f(z) = K[z; a, v] = 2/a\Gamma(\nu)(z/2a)^\nu K_{\nu-1}(z/a) \quad x > 0, \nu > 0, a > 0$$

其中, $K_{\nu-1}(\cdot)$ 为修正的第二类 $\nu - 1$ 阶贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, ν 为形状参数, 它反映了分布的偏倚度; a 为尺度参数, 它影响杂波的平均功率。

1.1.1 形状参数 ν 的估计分式^[6]如下

$$\log \nu = \frac{2}{3} \log \Psi + \frac{5}{8} \log l + \sigma - K_1, \quad \rho = 4.2m \quad (0.1^\circ < \Psi < 10^\circ, 100 < l < 800)$$

其中, Ψ 为入射余角, l 为角分辨率对应的横距, 垂直极化时 $K_1 = 0$, 水平极化时 $K_1 = 1.7$, 顺风或逆风时 $\sigma = 1/3$, 侧风时 $\sigma = -1/3$, 无风时 $\sigma = 0$, 此公式仅限于 4.2m 距离分辨率。对给定的距离分辨率 $\rho (> 4.2m)$, 形状参数可由 4.2 米分辨率的 ν 值按如下方法求得:

令 $N = \rho/4.2, X_1, X_2, \dots, X_N$ 代表分辨率 ρ 所包含的 4.2m 的分辨单元, ν_1 是 4.2m 分辨率下的形状参数值, ν_N 是分辨力 ρ 下的形状参数, X_1, X_2, \dots, X_N 之间的空间相关系数为 r_1, r_2, \dots, r_{N-1} , 则

$$\nu_1/\nu_N = (N + 2(N-1)r_1 + 2(N-2)r_2 + \dots + 2r_{N-1})/N^{2.7}$$

海杂波的空间相关性与脉宽相对应, X_1, X_2, \dots, X_N 之间的相关系数由 $\Delta r = 4.2m$ 对海杂波的空间相关函数^[8] 采样得到。上述方法的条件是距离分辨率不小于 4.2m, 因此对一般的舰载雷达是实用的。

1.1.2 尺度参数 a 的估计公式如下:

$a = \sqrt{\sigma_0 A / (2\sqrt{\nu})}$, 其中 σ^0 为海杂波的散射系数, A 是雷达照射面积, 在小入射余角情况下, $A = R\theta_B(c\tau/2)\sec \Psi$ 。

1.1.3 散射系数 σ^0 的确定

据研究, σ^0 与雷达波长、入射余角、海况、极化等因素均有关系^[9], 有经验公式:

$$\sigma_{(dB)}^0 = -64 + 6K_B + 10\log \sin \Psi - 10\log \lambda - (40\log(\Psi_c/\Psi))$$

其中, Ψ 为入射余角, Ψ_c 为临界角(与海况有关^{[9][10]}), K_B 为蒲氏海况级数, 最后一项在 $\Psi \leq \Psi_c$ 时加入。上述经验公式与实测数据有较大出入, 而且不包括极化和风向的影响。因此, 我们根据 X、C、S、L 波段脉宽为 0.5~10μs 的单站雷达在海况 1、3、5 时 HH 极化与 VV 极化的实测数据^[11], 对上述公式进行修正来估计小于 10° 的入射余角下 X、C、S、L 波段、1~7 级海况的水平极化和垂直极化的 σ^0 , 修正公式为:

$$\sigma^0 = -64 + 6K_B + 10\log \sin \Psi - 10\log \lambda - 10\log(\Psi_c/\Psi) \quad \Psi < \Psi_c$$

$$\sigma^0 = -64 + 6K_B + 10\log \sin \Psi - 10\log \lambda \quad \Psi > \Psi_c$$

再根据不同海况、极化和波段对以上公式进行修正。图 1 为海况 3 下 HH 极化的 X、C、S、L 波段的 σ^0 随入射余角变化的曲线。

1.2 功率谱模型和相关系数的确定

海杂波的功率谱一般用高斯型来描述, 表达式如下:

$$S(f) = S_0 \exp(- (af/f_{3db})^2)$$

其中, 常数 $a = 1.665, S_0$ 表示零频时的功率谱密度, f_{3db} 为半功率点带宽, f_{3db} 由海浪平均速度及雷达波长确定, $f_{3db} = \sqrt{2} \cdot a\sigma_c$, 其中 $\sigma_c = 2v/\lambda, v$ 为海浪的平均速度, λ 为雷达波长。除极高分辨率雷达外, σ_c 只与海况有关^[8]。海杂波的归一化相关函数 $R(\tau) = \exp(-2\sigma_c^2(\pi\tau)^2)$, 功率谱 $S(f) = a \cdot Var \cdot \exp(-af/f_{3db})^2 / (f_{3db} \sqrt{\pi})$, 其中 Var 是分布杂波的方差。

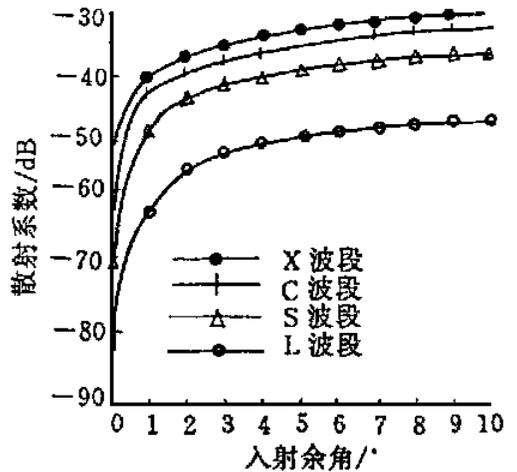


图 1 σ^0 与入射余角的关系曲线
Fig. 1 Typical σ^0 against grazing angle

2 仿真实现

确定了海杂波的幅度分布及功率谱模型, 仿真的关键就是要产生一组具有给定相关性的 K 分布随机数序列。产生相关 K 分布随机数序列的方法主要有零记忆非线性变换^[4] (ZMNL) 及球不变随机过程法^[5] (SIRP)。在非相参信号处理问题中, 我们以 ZMNL 的思想为基础, 对算法进行适当的改进来实现随机数的产生。对于相参相关 K 分布海杂波, 则利用 SIRP 来产生。我们着重讨论非相参海杂

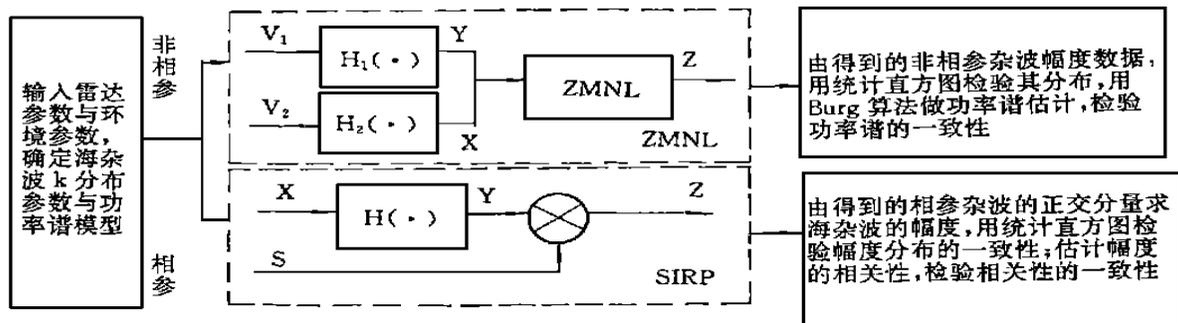


图 2 仿真流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation

波的仿真。仿真流程如图 2 所示。

2.1 修正 ZMNL 产生 N 点相关 $K [x; v, a]$ 分布随机序列的仿真步骤及结果

根据相关系数 $\{S_n\}$, $n = 1, 2, \dots, N/2$; 通过线性插值求解下述隐函数方程^[4] 得到非线性输入端快变化分量的相关系数 r_n 及慢变化分量的相关系数 q_n , $n = 1, 2, \dots, N/2$, 将其扩展成 0 到 2π 上的对称形式, $s_n = \frac{\Delta^2 [{}_2F_1(-1/2, -1/2; v+1; r_n^2) {}_2F_1(-1/2, -1/2; 1; q_n^2) - 1]}{v+1-\Delta^2}$, $q_n = r_n^{10}$, ${}_2F_1(\cdot)$ 为高斯超几何函数。对 $\{r_n\}$ 和 $\{q_n\}$ 分别进行归一化后做 FFT, 得 $R(\omega)$ 和 $Q(\omega)$, 令

$$|H_1(\omega)| = a \cdot \sqrt{R(\omega)}, |H_2(\omega)| = \sqrt{Q(\omega)}$$

这里主要研究海杂波的幅度特性, 因此不妨取模。

将 v 转换成 (半) 整数, 分别产生两组 i.i.d 的零均值, 单位方差的高斯随机数序列 $\{V_m\} (m = 1, 2, \dots, n)$ 和 $\{V_{n+1}, V_{n+2}\}$, 其中 $n = 2v$ 。将两组高斯白噪声序列分别通过两个线性滤波器, 分别求平方和后经过乘法器, 开平方后输出的序列即为所需的相关 K 分布杂波数据。

仿真软件根据输入的雷达参数及环境参数, 确定仿真模型, 产生模拟的经线性包络检波器检波后的海杂波数据。图 3 为用 ZMNL 实现的仿真结果, 雷达参数与环境参数为: 波长 12cm, 脉宽 0.1 μ s, 脉冲重频 1000Hz, 海况 3, HH 极化, 顺风, 探测距离 10km, 天线高度 30m。仿真模型为: $\sigma^0 = -63.4$ dB, $v = 0.61$, $a = 0.02$ 的 K 分布, $f_{3dB} = 35.3$ Hz 的高斯型谱。结果主要包括以下部分:

(a) 海杂波随时间变化的波形。由波形图可观察到海杂波的时间起伏与尖锐程度, 低入射余角或高分辨率雷达海杂波呈现较多的尖峰, 类似目标信号。

(b) 仿真海杂波数据的幅度分布特性与理论分布模型比较。当采样点数足够多时, 产生的随机数与理论的 K 分布模型拟合得很好。

(c) 仿真数据的功率谱特性与海杂波采样数的功率谱模型比较。结果表明, 仿真数据的功率谱与模型基本相符, 但拟合的性能不如分布拟合的性能稳定, 因此对给定的条件, 由检验结果来确定进行一次或几次仿真, 以获取最佳的模拟的海杂波数据。

仿真中需要注意的问题有:

(a) 在仿真过程中, 涉及较多 FFT 运算, 由于 FFT 代表的是数字信号, 所以要把 FFT 处理后的结果乘上相应的比例因子, 转换成模拟信号。在求线性滤波器的过程中, 由于 FFT 的截断效应, 滤波器

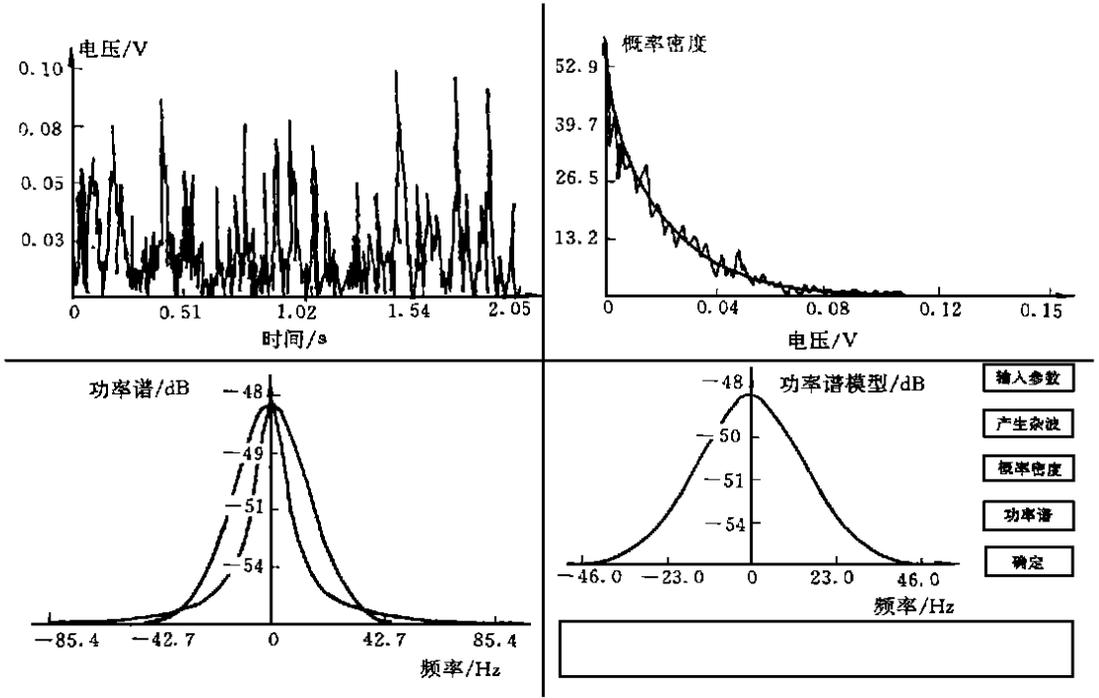


图3 非相参K分布海杂波仿真结果

Fig. 3 Simulation of incoherent correlated K-distributed sea clutter

出现负值，故作了适当的调整。

(b) 由于海杂波可看作非零均值的平稳过程，做功率谱估计时，应做去均值（直流分量）处理；Burg算法在阶数高时易出现谱线分裂的现象，在本算法中取阶数为3比较合适。

(c) 采样频率（PRF）越高，海杂波的相关性越强。在统计仿真数据的概率分布时，若PRF较高，则尽量将杂波点数取大，即可观察到很好的拟合效果。

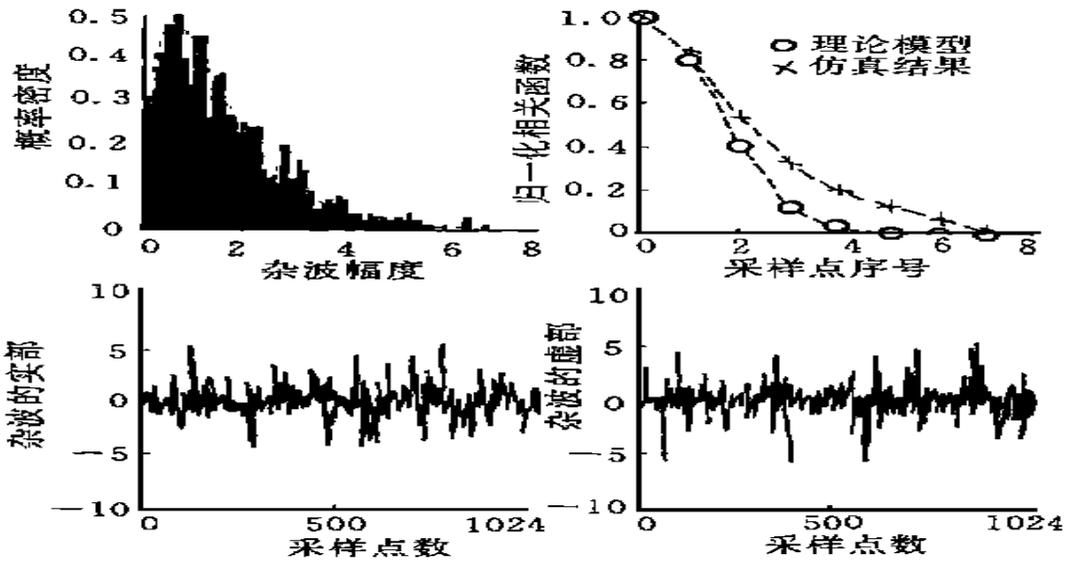


图4 相参相关K分布海杂波仿真结果

Fig. 4 Simulation of coherent correlated K-distributed sea

2.2 SIRP 产生 N 点相关 $K [x; v, a]$ 分布复随机序列的仿真步骤及结果

(1) 产生 $N(0, a^2)$ 分布的随机数 $X_k = \{X_{c1}, X_{c2}, \dots, X_{cM}, X_{s1}, X_{s2}, \dots, X_{sM}\}$, $k = 1, 2, \dots, K$, 代表复高斯过程的 M 点采样, 其中 $K = M/M$, 可以取 $M = 8$;

(2) 产生 $G(x, v, v)$ 分布的随机变量 Y , 令 $S = \sqrt{Y} = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$, 在 M 点的数据窗内, S 为常值, 另 $Y_k = X_k \cdot S_k$;

(3) 令 $Z_k = A \cdot Y_k$, $A_{2m \times 2m}$ 为 K 分布复序列的相关矩阵, K 分布包络的 N 点相关复随机序列即为 $Z = \{Z_{c1}, Z_{c2}, \dots, Z_{cN}, Z_{s1}, \dots, Z_{sN}\}$ 。

用 SIRP 产生相参相关 1024 点 $K [x, l, l]$ 分布复海杂波序列的结果如图 4。

2.3 ZMNL 和 SIRP 的比较

ZMNL 产生相关 K 分布模拟海杂波数据的优点是运算效率高、性能稳定, 但相关性的确定与分布形式有关, 而且实现的是功能模拟。SIRP 则可以产生相参相关 K 分布幅度分布的模拟复海杂波数据, 优点是相关性与分布可以独立控制, 缺点是运算速度相对较慢, 而且实际上, 相关性较强时仿真数据的幅度分布与分布模型有偏差。

3 结论

本文对低入射余角下雷达海杂波的建模与仿真技术做了较为深入的讨论。根据实际背景, 给出一个实用的海杂波模型及杂波数据的具体仿真步骤。并用 Visual C++ 实现了仿真。结果表明, 模型与实际情况吻合较好, 仿真算法是有效可行的。本文的结果可为雷达信号处理真实的海杂波环境。

参考文献:

- [1] Jakeman E, Pusey P N. A model for non-Rayley sea clutter. IEEE Trans. on A. P, 1976: 806-814.
- [2] Oliver C J. Correlated K distributed clutter Models [J]. Optica Acta, 1985, 32 (12): 1515-1547.
- [3] Ward K D. Compound representation of high resolution sea clutter [J]. Electronics Letters, 1981: 564-563.
- [4] James L, Marier. Correlated K -Distributed Clutter Generation for Radar Detection and Track [J]. IEEE Trans. on A. E. S, 1995, 31 (2).
- [5] Rangaswamy M, Weiner D. Computer generation of correlated non_gaussian radar clutter [J]. IEEE Trans. on E. S, 1995, 31: 106-115.
- [6] Ward K D, Watts S. Radar sea clutter [J]. Microwave Journal, 1985: 109-118.
- [7] Watts S, Ward K D. Spatial correlation in K -distributed sea clutter. IEE Proe-F, 1987, 134 (6): 526-532.
- [8] 茅于海. 频率捷变雷达. 北京: 国防工业出版社, 1981: 135-146
- [9] [美] 朗 M W. 陆地和海面的雷达波散射特性 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [10] [美] 斯科尔尼克 M L. 雷达手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1978
- [11] [美] 伊利·布鲁克纳. 雷达技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984