

雷达模拟器中海杂波模拟的一种新方法

谢永亮, 赵朋亮, 甘怀锦

(海军蚌埠士官学校, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 海杂波的建模方法已趋于成熟, 而如何在光栅显示器上快速逼真地模拟海杂波是当前模拟器面临的一个重要问题。在成熟的海杂波模型基础上, 用 ZMNL 快速模拟杂波序列, 并通过距离和近程增益调制可快速逼真地模拟海杂波。

关键词: 海杂波; ZMNL; 距离调制; 近程增益调制

中图分类号: TN391

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)03-0067-03

A new simulative method of sea clutter for radar simulator

Xie Yongliang, Zhao Pengliang, Gan Huaijin

(Naval College of Petty Officer, Bengbu 233000, China)

Abstract: Sea clutter modeling method becomes consummate. An important problem is how to simulate the sea clutter in the raster display rapidly and lively. Based on mature sea clutter model, ZMNL is adopted to simulate clutter sequence; then the sequence is distance attenuation and STC modulated. Vivid and fluent sea clutter are presented in raster displayer.

Key words: sea clutter; ZMNL; distance attenuation modulated; STC modulated

迅速而准确地模拟雷达杂波的方法对雷达系统模拟及雷达信号处理来说十分重要^[1]。目前海杂波建模主要有三种方式: 散射机理建模、杂波统计建模和杂波非线性建模, 其中杂波统计建模是最常用的方式^[2]。产生具有一定概率分布的随机序列的方法主要有: 球不变随机过程法(SIRP)和零记忆非线性变换法(ZMNL)^[3]。海杂波在模拟中有着非常重要的地位, 如何将建模得到的海杂波快速逼真地反应在模拟器的光栅显示器上显得尤为重要。本文采用经典的海杂波模型, 通过 ZMNL 来产生海杂波序列, 再进行距离和近程增益调制, 可以快速逼真地模拟海杂波。

1 常见的海杂波模型

较为经典的海杂波模型有:

(1) 瑞利分布^[4]:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, x 为海杂波幅度瞬时值, $2\sigma^2$ 为杂波幅度的均方值。假定海杂波由许多相互独立的随机散射体形成, 根据中心极限定理, 其功率服从于正态分布, 其包络的概率密度函数为瑞利分布, 这种分布适合于低分辨率雷

达(天线波束宽度 $> 2^\circ$, 脉冲宽度 $> 1 \mu\text{s}$) 的地杂波、海杂波及气象杂波。

(2) 对数正态分布^[5]:

$$p(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中, x 为海杂波幅度瞬时值, $e^{\mu + \sigma^2/2}$ 为杂波幅度的均方值。在分辨力提高或高海情下, 海杂波的后向散射特性偏离了瑞利分布, 尾部较长, 适合于用对数正态分布模拟。

(3) 韦布尔分布^[6]:

$$p(x) = \left(\frac{p}{q}\right) \left(\frac{x}{q}\right)^{p-1} e^{-\left(\frac{x}{q}\right)^p} \quad x \geq 0 \quad (3)$$

式中, p 为比例参数, 若 $p=2$ 就成为瑞利分布; 若 $p=1$ 就是指数概率密度函数。 q 为形状参数, 根据不同海情, 一般在 1.4~2 之间变化。海杂波幅度起伏较均匀, 在高分辨力和低入射角的情况下 Weibull 分布更为合理, 杂波严重的情况下能更好地拟合海杂波尾部拉长的情况。

(4) K 分布^[7]:

$$k[x; a, \nu] = \frac{2}{a\Gamma(\nu+1)} \left(\frac{x}{2a}\right)^{\nu+1} k_{\nu}\left(\frac{x}{a}\right) \quad x>0, \nu>-1 \quad (4)$$

$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $k_{\nu}(\cdot)$ 为第二类修正 Bessel 函数, ν 为形状参数, a 为标度参数。

对高分辨雷达在低视角工作时获得的杂波回波包络模型的研究表明, 用 K 分布不仅可以在很宽的范围内很好地与观测杂波数据的幅度分布匹配, 而且还可以正确地模拟杂波回波脉冲间的相关特性。

2 用 ZMNL 产生相应的海杂波序列

ZMNL 法和 SIRP 法从两种不同的途径实现同时满足一定幅度分布和一定相关条件的随机数的产生, 它们各有优缺点^[8]。ZMNL 法优点是计算量小, 易形成快速算法。但是需要进行非线性变换, 而且该方法推导非线性变换前后相关之间的关系比较困难。SIRP 法的优点是易于实现 PDF 相关特性可以独立控制、容易推广, 实现相干建模也比较容易。SIRP 甚至能由低阶的 PDF 导出高阶 PDF, 这一点对于精度建模尤其重要。但其缺点也很明显, 受所求序列的阶数及自相关函数的限制, 计算量大、不易形成快速算法。

对于产生具有一定概率分布的随机序列的方法, 采用零记忆非线性变换法(ZMNL), 主要原因是此方法相比 SIRP 法其优点是计算量小、易形成快速算法。对于模拟器来说, 其实时性要求比较高, 要实时产生海杂波客观上需要快速计算的方法。ZMNL 主要方法是从独立的高斯过程出发, 得到相关高斯过程后经过非线性变化再得到所需的非高斯过程。其步骤如下^[6]:

(1) 产生高斯白噪声序列 n_i ;

(2) 将高斯白噪声序列 n_i 通过一个线性滤波器 $H(Z)$, 得到高斯色噪声序列 x_i , 即使 x_i 各个时间点上的随机变量具有某种相关性;

(3) 对相关高斯色噪声序列 x_i 进行线性变换, 得到具有某种概率分布的相关序列 z_i 。以韦布尔分布为例, 韦布尔分布随机变量 x 可以用两个正态分布的随机变量 w_1 和 w_2 表示, 即:

$$x = (w_1^2 + w_2^2)^{1/p} \quad (5)$$

这是一个非线性变换, 其中 w_1, w_2 具有相同正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 且相互独立的随机变量, 并且有 $q = (2\sigma^2)^{1/p}$, 由此可以得出韦布尔分布杂波的模拟框图, 如图 1 所示。进而得到模拟的海杂波序列。

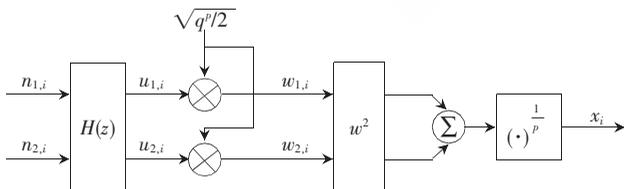


图1 韦布尔分布杂波模拟框图

3 海杂波的调制及模拟流程

对于模拟的海杂波, 要能逼真地反应在模拟器的光

栅显示器上, 必须进行距离衰减和近程增益控制的调制。

(1) 海杂波的距离衰减

任何雷达都有一定的作用距离, 雷达方程则是描述距离衰减的最简单有效的方式之一^[9]。假设为理想无耗、自由空间传播时单基雷达方程:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (6)$$

式中, P_r 为雷达接收的回波功率, P_t 为雷达发射功率, G_t, G_r 分别为发射天线和接收天线的增益, σ 为目标截面积, λ 为波长, R 为雷达到目标的距离。雷达接收的回波功率与距离 R 的四次方成反比, 即与 R^{-4} 成正比, 随着 R 的增大, 回波功率衰减得很快。因此要逼真地模拟海杂波, 必须对模拟出的海杂波进行距离上的衰减, 由上式可知, 距离衰减模型可以选择如上的指数模型, 即在模拟的杂波序列上按距离乘以一个指数衰减的因子。

(2) 海杂波的近程增益控制

近程增益控制(STC)基本是每部雷达里都采用的处理措施, 也称为“时间增益控制”或是“灵敏度时间控制”。它主要用来防止近程杂波干扰使中频放大器发生过载, 对近区海域调低增益, 对远区海域则调高增益^[10]。

近程增益控制的基本原理是每次发射脉冲后, 产生一个负极性随时间渐趋于零的控制电压, 供给被控的中放级, 使接收机的增益按此规定电压的形状发生变化, 如图 2 所示。它实际上是一个接收机灵敏度随时间变化的调整电路。由于海浪反射的功率与 R 呈指数的衰减形式, 因此接收机的灵敏度同样按这个形式变化, 如图 3 所示。



图2 STC 电路示意图

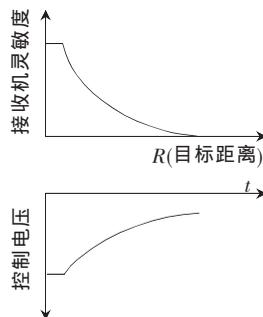


图3 灵敏度时间控制电路中控制电压与灵敏度曲线

由上述可知, 经过灵敏度时间控制电路后, 调节了不同距离的海杂波在 P 显上的亮度, 因此 STC 的模拟也可以采用合适的指数模型, 即在模拟得到的杂波序列上按距离乘以一个指数型的 STC 控制因子。

(3) 海杂波的模拟流程

对海杂波的模拟, 首先要产生一个相关的杂波序列。根据 ZMNL 原理, 以韦布尔分布序列为例, 当选择 $p=2.5, q=2$

技术与方法 Technique and Method

时可得到韦布尔杂波序列仿真结果如图 4 所示。

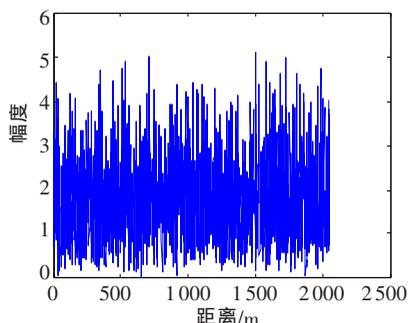


图 4 服从韦布尔分布的序列

假设模拟器 P 显距离上采用 512 个像素单元,以某一方位为例,阐述如下模拟逼真的海杂波回波:

①模拟某一方位 512 个像素单元的韦布尔序列,如图 5 所示。

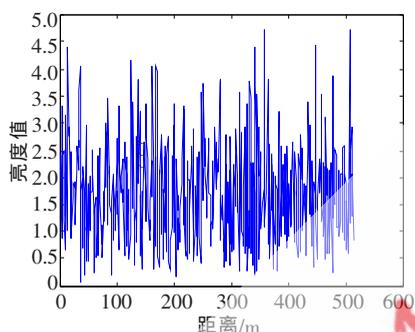


图 5 服从韦布尔分布的某一方位杂波序列

②对于该随机序列,要在 P 显上反应出海杂波特性,应将其幅度调制到光栅显示器所用的色彩值范围。一般采用 RGB 制式,故应将其幅度进行亮度调制,调制到 0~255 的范围内。此时,得到海杂波的亮度初始数据如图 6 所示。

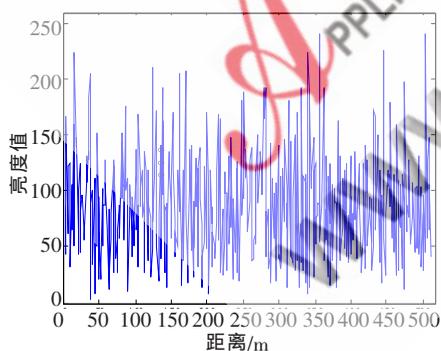


图 6 亮度变换后的海杂波

③由于雷达回波功率随距离呈指数型衰减,故将亮度调制得到的海杂波初始数据进行距离衰减,得到的距离调制后的亮度值如图 7 所示。

与亮度变换后的海杂波图比较,距离衰减后的杂波整体上比杂波的初始数据要小,且衰减规律呈指数型衰减,达到了距离衰减调制的效果。

④在雷达灵敏度时间控制电路调节下,海杂波在 P 显上的亮度受到 STC 调制,故将亮度调制得到的海杂波

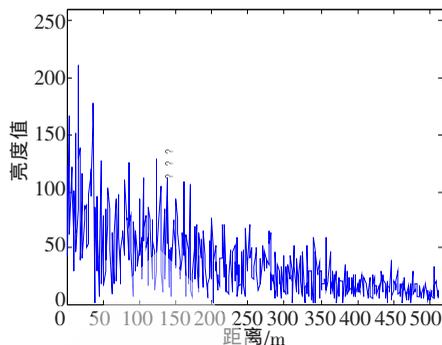


图 7 距离衰减调制后的杂波效果

初始数据进行 STC 调制,得到 STC 调制后的亮度值如图 8 所示。

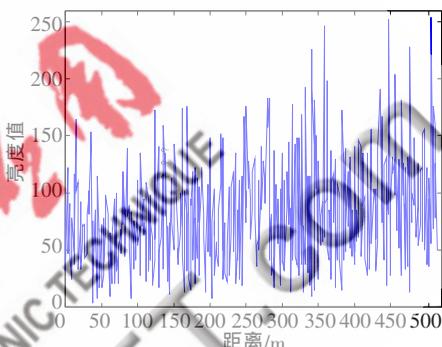


图 8 STC 调制后的杂波效果

与亮度变换后的海杂波图比较,STC 调制对近区的海杂波具有一定的抑制作用,对远区的杂波则具有一定的增强作用,调制按接收机的增益指数规律变化。

⑤真实的回波是经过距离衰减和 STC 调制后得到的,亮度调制得到的海杂波初始数据经过距离和 STC 调制后,即为模拟的海杂波,如图 9 所示。

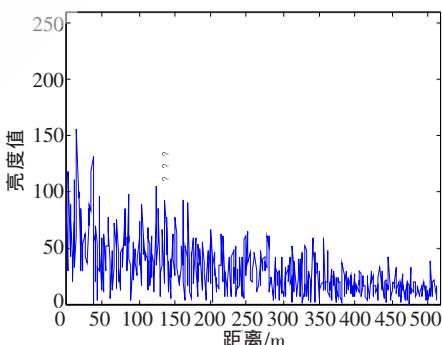


图 9 距离衰减和 STC 调制后的效果

比较图 6、图 7,杂波在距离单元上有明显的衰减;比较图 6、图 8,近区的杂波得到了进一步的抑制,而远区的杂波,则得到了一定程度的加强;在距离衰减和 STC 共同调制后模拟出了比较逼真的海杂波。

对于服从韦布尔分布的杂波来说,只需将比列参数 p 取 2 就可直接退化为瑞利分布;如果 p 取 1 就可得到指数分布的杂波。对于不同海况的模拟,可以调节形状

技术与方法 Technique and Method

参数 q , 在 1.4~2 之间变化, 即可以通过调节形状参数 q 的取值来模拟海况。

参考文献

- [1] 高远, 张扬. 海杂波的 K-分布建模与仿真[J]. 电子科技, 2007, 26(9): 52-55.
- [2] 卢剑奇, 刘杰, 严道明. 雷达杂波建模与仿真方法研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(10): 309-310.
- [3] ISABELLE M. Study and simulation of sea clutter [J]. IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics, 1993, 10(4): 178-181.
- [4] MITCHELL R L. 雷达系统模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 33-45.
- [5] 姜斌, 和湘, 王宏强, 等. 改进的 Log-Normal 分布杂波仿真方法[J]. 电光与控制, 2006, 37(1): 25-28.
- [6] 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, 27(3): 24-28.
- [7] 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]. 中国电子科学研究学报, 2008, 3 (5): 515-519.
- [8] 蔡宗平, 刘山林. SIRP 法学生 t 分布雷达杂波建模与仿真[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(3): 174-176.
- [9] BARTON D K. 雷达系统分析与建模[M]. 南京电子技术研究所, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 120-123.
- [10] 西北电讯工程学院《雷达系统》编写组. 雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 453-461.

(收稿日期: 2010-07-06)

作者简介:

谢永亮, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 雷达信号处理及技术保障。

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaAET.com