

文章编号 :1001 - 2486(2003)04 - 0047 - 06

## 相位编码脉冲压缩雷达杂波建模与仿真\*

张长隆, 楼生强, 周良柱

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 通过对相位编码脉冲调制信号分析入手, 基于常规脉冲雷达杂波模型, 给出了相位编码脉冲压缩体制雷达下的杂波模型, 并用蒙特卡罗方法分析了杂波回波信号的概率分布特性和功率谱特性, 距离波门回波之间的相关性。最后给出了在雷达环境模拟器中, 该类型杂波模拟的系统实现方法。

**关键词** 相位编码脉冲压缩雷达; 杂波; 仿真

**中图分类号** :TN95      **文献标识码** :A

## Modeling and Simulation of the Radar Clutter for the Phase-coded Pulse Compression Radar

ZHANG Chang-long, LOU Sheng-qiang, ZHOU Liang-zhu

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

**Abstract** Firstly, the phase-coded pulse compression signal is analyzed. Then the radar clutter model for phase-coded pulse compression radar is proposed based on the radar clutter model for the general pulse radar. Both the probability density characteristics and the spectral density characteristics of the clutter signal are analyzed by Monte-Carlo method. The correlation characteristics of the clutter signal between the two range gates are also discussed. Finally, for the design of the radar environment simulator, the implementation of the clutter simulation's system is proposed by mixed means of software and hardware.

**Key words** : phase-coded pulse compression radar; clutter; simulation

为了增加信号检测能力, 同时又保持一定的距离分辨能力, 现代雷达的发射波形常采用脉冲压缩波形, 而相位编码信号由于其具有良好的大时宽特性得到广泛应用。文献 [1] 描述了常规脉冲雷达体制的杂波建模问题, 并给出了杂波的地理分布特性, 杂波距离分辨单元沿距离方向的长度由雷达发射信号脉宽  $T$  决定。因此某一时刻的杂波回波信号为与之对应的距离分辨单元的杂波散射信号。文献 [2] 给出了该背景下将该距离分辨单元内杂波视为点目标的模拟方法。然而当发射波形为相位编码信号时, 某一时刻的杂波回波信号应为多个杂波分辨单元信号的空间和时间叠加的结果。文献 [3] 的研究结果是针对于连续波信号情形, 而对于脉冲压缩体制雷达来说, 在同一重复周期内, 各个距离波门的叠加情形也有所不同。

### 1 常规脉冲雷达杂波模型

根据相干视频模拟原理, 脉冲体制雷达下, 距离  $R$  的雷达分辨单元回波视频信号模型为:

$$Y_R = K \cdot e^{j2\pi f_d t + j\varphi(t)} \cdot u_p(t) \cdot u(t) \quad (1)$$

$K$  为与雷达方程有关的幅度系数,  $u_p(t)$  为脉宽为  $T$ 、重复周期为  $T_s$  的矩形脉冲串信号,  $u(t)$  为复调制函数,  $\varphi(t)$  服从  $[0, 2\pi]$  内均匀分布。

当发射信号为常规脉冲串时,  $u(t) = 1 (0 \leq t \leq T)$ , 当发射信号为相位编码信号时,

$$u(t) = \sum_{i=0}^{N_c-1} C_p(i) \text{rect}\left[\frac{t-i\tau}{\tau}\right] \quad (2)$$

\* 收稿日期 2002 - 12 - 18  
作者简介 张长隆(1975—), 男, 博士生。

$\{C_p(i)\}$  为相位编码,  $N_c$  为相位码长度,  $\tau$  为子脉冲宽度脉压波形的时宽,  $T = N_c \cdot \tau$ 。

对于常规脉冲雷达<sup>[1]</sup>来说, 由于雷达脉冲的工作关系, 并不是所有的波束照射区域都可以同时到达, 所以杂波截面实际取决于雷达的分辨单元。而雷达的距离分辨单元为  $T$ , 因此某一时刻(距离波门)的回波信号是距离为  $R$  的杂波单元的反射信号, 完全可以采用点目标的处理方法来模拟该区域的杂波信号。常规脉冲雷达杂波的几何关系见图 1。

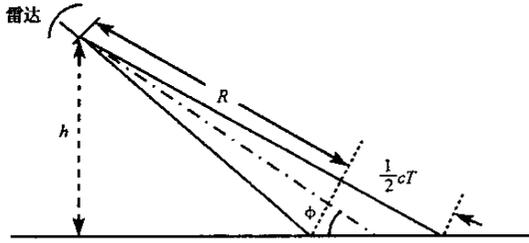


图 1 常规脉冲雷达杂波的几何关系

Fig. 1 Clutter scatter's geometry relation for general pulse radar

根据文献[2] 地海杂波属于面杂波, 云雨杂波属于体杂波。无论对于面杂波还是体杂波仿真来说, 都是将杂波区域划分成雷达分辨单元的网格, 将每个单元的杂波看成点目标来仿真。根据方程(1), 对于常规脉冲体制雷达而言, 每个距离波门的杂波回波信号为:

$$Y_n(t) = K_n(t)u(t)e^{j2\pi f_d t + j\phi(t)} \quad 0 \leq t < T \quad (3)$$

$n$  表示杂波单元的地理位置。

$$K_n(t) = \sqrt{\left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R_n^4} \right]^0 S_n \cdot G(\theta_n) \text{Random}_n(t)} \quad (4)$$

$\sigma^0$  为单位雷达截面积密度,  $S_n$  为点杂波单元面积,  $\text{Random}_n(t)$  为杂波起伏调制随机数,  $G(\theta_n)$  是天线方向图函数。根据公式(4), 可以采用蒙特卡罗方法产生出具有某种频谱、满足一定参数的概率密度函数的随机数  $\text{Random}_n(t)$  来模拟常规脉冲雷达杂波的统计模型。

## 2 相位编码脉冲压缩雷达杂波模型

相位编码脉冲调制信号可以看成由  $N_c$  个宽度为  $\tau$  的子脉冲组成。相位编码信号的发射波形照射地面时, 地面上各反射点的回波都要持续脉冲宽度  $T$  的时间。根据雷达分辨理论, 雷达的距离分辨率等于  $\tau$ , 因此如果距离波门的宽度等于子脉冲宽度  $\tau$ , 那么实际接收的每个距离波门内的信号幅度应是多个码元回波空间和时间叠加的结果。雷达杂波的几何关系见图 2。整个波束分成了  $N_c$  个子波束, 每个子波束对应于地面距离间隔为  $\tau$  的杂波单元。所以相位编码脉冲压缩雷达杂波模型可以看成是常规脉冲雷达杂波模型在空间和时间矢量叠加的结果。

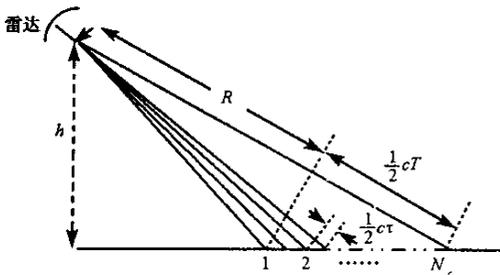


图 2 相位编码脉冲压缩雷达的杂波几何关系

Fig. 2 Clutter scatter's geometry relation for phase-coded pulse compression radar

从图 2 分析可知,在一个脉冲重复周期内,雷达发射的第  $i$  个码元子脉冲照射第  $k+1-i$  距离单元散射体的回波 ( $i \in \{1 \dots nN_c\}$ ) 都将在第  $k$  ( $k \in \{1 \dots nN_c\}, i \leq k$ ) 个距离波门形成杂波分量。设在一个脉冲重复周期内第  $k$  个距离波门的回波信号为  $S^k(t)$  ( $k = 1 \dots nN_c$ ),第  $i$  个子脉冲编码信号照射第  $R + nct/2$  个杂波单元的回波信号为  $Y_n^i(t)$  ( $n = 1 \dots nN_c$ )。根据前面的分析,由常规脉冲雷达的杂波模型(3), $Y_n^i(t)$  可以写成:

$$Y_n^i(t) = K_n(t) C_p(i) \text{rect}\left(\frac{t - i\tau}{\tau}\right) e^{j2\pi f_d t + j\phi(t)} \quad 0 \leq t \leq T \quad (5)$$

所以对于相位编码脉冲体制雷达而言,在一个脉冲重复周期内,第  $k$  个距离波门的回波信号为:

$$S^k(t) = \sum_{j=1}^k Y_j^{k+1-j}(t) \quad k = 1, 2, \dots, nN_c \quad (6)$$

一个脉冲重复周期内回波信号为:

$$S(t) = \sum_{k=1}^{nN_c} S^k[t - (k-1)\tau] \quad 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

### 3 模型仿真分析

根据文献[3]提供的杂波建模参数,我们采用蒙特卡罗方法模拟出单位杂波单元的雷达截面密度的起伏函数  $Random_n(t)$  对相位编码脉冲压缩雷达杂波模型的统计性作分析。 $Random_n(t)$  服从双参数  $a, b$  的 Weibull 分布,概率密度函数为:

$$f(x | a, b) = abx^{b-1} e^{-ax^b} \quad (8)$$

地形为草地,杂波统计性建模参数和雷达参数见表 1。采样率为 500Hz,也即随机数的采样率为 2ms,这样一个脉冲重复周期内杂波信号起伏一次。杂波起伏函数采用 Weibull 分布,杂波仿真区域为 10 ~ 25.6km 的地杂波区域。距离波门为  $8\mu\text{s}$ ,杂波距离分辨单元为 1.2km。相位编码采用 13 巴克编码。

表 1 杂波仿真参数表

Tab. 1 Parameter setting for clutter simulation

统计分布	杂波功率谱	3dB 带宽	频谱采样率	参数 $a$	参数 $b$	雷达子脉宽	脉冲重复周期
Weibull 分布	高斯	100Hz	$5f_{3dB}$	1	2.8	$8\mu\text{s}$	2ms

#### 3.1 模型分布特性分析

根据上面提供的仿真环境,首先根据公式(3)产生 13 个独立的常规脉冲雷达杂波数据,作为被模拟地杂波区域的 13 个杂波单元的回波信号,然后根据公式(6)和公式(7),分别求出 100 个脉冲重复周期内各个距离波门的杂波回波信号,再对各个距离波门的杂波数据幅度做分布特性分析。给定参数的理论 Weibull 分布曲线如图 3(a),从图 3(b)(c)(d)中可以看出每个距离波门的杂波数据仍然服从 Weibull 分布。随着叠加次数  $k$  增加,概率密度分布曲线展开程度也增加,这说明出现了较大幅值的概率也增加。

对 13 个距离波门的杂波数据分别进行 Weibull 分布拟合,采用点估计方法<sup>[4]</sup>估计出 Weibull 参数。见表 2。从表 2 可以看出 Weibull 分布的形状参数  $b$  值总体趋小,由于杂波回波的叠加效应趋于瑞利分布,从图 3 的回波信号幅度起伏概率曲线也可以看出。尺度参数  $a$  由杂波平均功率决定, $a$  越小,平均功率越大,表 2 的数据也符合较大幅值出现概率增大的现象。

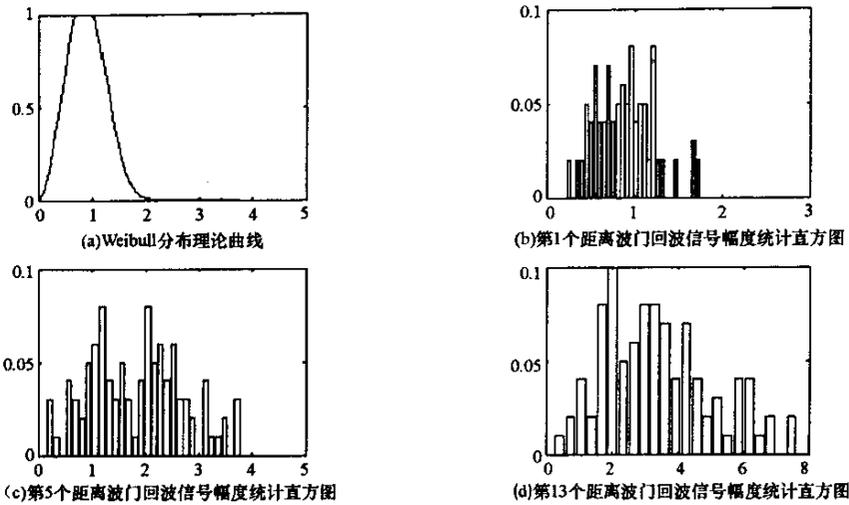


图 3 13 巴克编码脉冲压缩雷达杂波幅度统计直方图

Fig. 3 The statistical histogram of clutter's amplitude for 13 Baker phase-coded pulse compression radar

表 2 Weibull 分布参数估计表

Tab. 2 Parameter estimate of Weibull distribution

距离波门	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
参数	1.274	0.546	0.360	0.212	0.251	0.216	0.206	0.110	0.097	0.095	0.043	0.080	0.091
$a = 1$													
参数	2.677	2.117	2.177	2.357	2.113	1.890	1.789	2.035	2.153	2.175	2.576	2.128	1.946
$b = 2.8$													

### 3.2 功率谱分析

由于风速、雷达平台的运动及扫描天线的转动的影响,雷达杂波的频谱也具有一定的分布。雷达杂波的频谱分布模型一般用复合高斯分布模型以及立方谱分布模型来表示。因此对于常规脉冲雷达杂波统计性模型来说,  $Random_n(t)$  不但服从某种概率分布而且满足一定形式的功率谱。

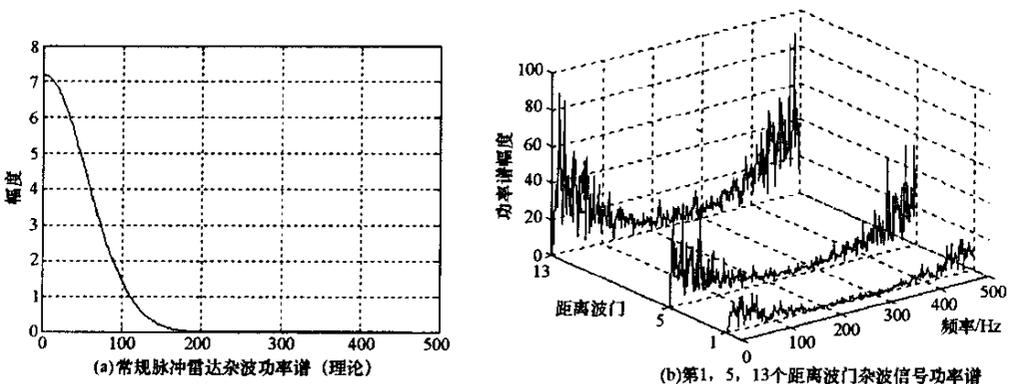


图 4 巴克编码脉冲压缩雷达杂波功率谱曲线

Fig. 4 The clutter's power spectrum for 13 Baker Phase-coded pulse compression radar

单脉冲杂波频谱采用高斯频谱,如图 4(a)。我们仿真第 1, 5, 13 个距离波门的杂波的功率谱,如图 4(b),可以看出回波叠加效应对杂波频谱影响不大,每个距离波门的杂波信号仍然可以按常规脉冲杂波

理论频谱来仿真。

### 3.3 相关性分析

根据 13 巴克编码信号的相关特性,无叠加效应的 13 个码元子脉冲回波的相关函数具有 13 巴克编码信号的自相关函数特征(图 5(a))。从图 5(a)(b)(c)可以看出,考虑叠加效应后,13 个子脉冲回波信号的相关性增强。因此,每个杂波分辨单元的起伏调制随机数具有空间相关性,而不再像常规脉冲雷达杂波是相互独立的。

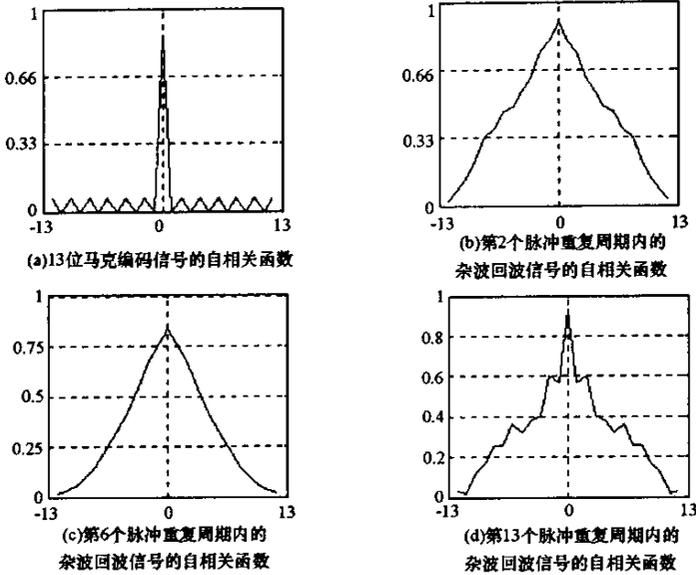


图 5 一个脉冲重复周期内 13 个距离波门信号的相关曲线

Fig. 5 Clutter signal correlation according a repetition pulse

## 4 系统实现

在雷达环境模拟器研制中,杂波仿真是十分关键和重要的。相比常规脉冲雷达的杂波模拟而言,当雷达发射信号为相位编码信号时,每个距离波门的杂波模型应该充分考虑杂波的叠加效应。如果在实时模拟中按式(6)计算,运算量大而且实时性也难以满足要求。因此可以将式(6)修正成类似常规脉冲雷达杂波模型(3)(4)的表达式。对于 13 巴克编码发射信号,一个脉冲重复周期内,第  $k$  个距离波门的回波信号为:

$$S^k(t) = K_k \text{Random}_k(t) u(t) e^{j2\pi f_d t + j\varphi(t)} \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad 1 \leq k \leq 13 \quad (9)$$

系数  $K_k$  根据公式(4),由参与叠加的杂波分辨单元的雷达反射方程系数决定。

$$K_k = \sum_{n=1}^k \sqrt{\left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R_n^4} \right]^0 S_n \cdot G(\theta_n)} \quad (10)$$

而  $\text{Random}_k(t)$  是杂波起伏调制随机数。根据前面的分析,其概率分布为 Weibull 分布,分布参数可参考表 2。由于叠加效应对杂波功率谱影响不大,因此随机数功率谱的设计类似常规脉冲雷达杂波功率谱设计,具体方法可参考文献[2]。由于 13 个距离波门信号之间具有很强的相关性,因此随机数均值  $E\{\text{Random}_{k=1, \dots, 13}\}$  的相关函数具有图 5 的形式。根据简化模型,由原来需要产生多组独立的随机数再叠加,简化成只需产生一组的随机数,计算量大大减小。

杂波仿真的硬件实现采用 DDS 芯片 AD9854 来产生杂波中频信号, DSP 芯片 ADSP21161 来产生公式(9)的杂波视频信号调制 DDS 输出的载带中频信号。这种结构具有一定的通用性,不但可以模拟常规脉冲雷达杂波、相位编码雷达杂波,而且还可以模拟其他脉冲压缩信号的杂波。

## 5 结论

对相位编码脉冲压缩雷达杂波进行建模与仿真,是现代雷达杂波模拟的重要课题之一。相比常规脉冲雷达杂波模型,相位编码脉冲压缩雷达杂波进行建模应该充分考虑码元的叠加效应影响。根据对杂波数据进行统计性分析,相位编码脉冲压缩雷达杂波的分布函数和常规脉冲雷达杂波的分布函数相同,而分布参数有所不同。相位编码脉冲压缩雷达杂波的功率谱和常规脉冲雷达杂波的功率谱函数相同。脉冲重复周期内的距离波门回波信号的相关性增强,必须考虑空间相关的杂波统计性模型。上述结论为杂波仿真方法及其系统实现提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 雷达系统编写组. 雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [2] 米切尔 R L. 雷达系统模拟[M]. 陈训达,译. 北京:科学出版社,1982.
- [3] 张志勇,等. X波段伪码调相连续波雷达地杂波分布特性仿真与分析[J]. 电子学报,1999,27(3):70-73.
- [4] 王国玉. 电子系统建模仿真与评估[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
- [5] Marier Jr L J. Correlated K. Distributed Clutter Generation for Radar Detection and Track[J]. IEEE Trans. AES,1995,31(4):568-580.

(上接第41页)

## 参考文献:

- [1] 邢孟道,保铮. 低分辨雷达的一维横向成像及提高分辨率的方法[J]. 西安电子科技大学学报,2000,27(6).
- [2] 张兴敢,朱兆达. 用 ISAR 横向动态一维像分辨编队飞机架数[C]. 863—308 主题十周年汇报——逆合成孔径雷达论文集,1996(3).
- [3] 王盛利,朱力,倪晋麟,张光义. 利用频谱相位信息进行角度超分辨的研究与实验[J]. 电子学报,2000(6).
- [4] 何子述,黄振兴,向敬成. 米波雷达方位角超分辨外场实验研究[J]. 电子科技大学学报,2000,29(2).
- [5] 单荣光,朱力,李士国. 米波雷达分辨飞机架次的试验研究[C]. 863—308 主题十周年汇报——逆合成孔径雷达论文集,1996.
- [6] Yu W X, Guo G R. Target Detection and Recognition Based on Dynamic Processing Techniques[J]. NAECON-92, U. S. A.
- [7] Nebabin V G. Methods and Techniques of Radar Recognition[M]. English Translation Edited by David K. Barton, Artech House, 1995.
- [8] 郁文贤. 舰船雷达目标识别的智能化方法研究[D]. 国防科技大学论文,1992.
- [9] [法]卡尔庞蒂埃,Michel H. 现代雷达基础[M]. 吴明德,胡朝阳,译. 北京:电子工业出版社,1987.
- [10] Wehner D R. High Resolution Radar[M]. 2nd edition. Artech House. Artech House Inc. Norwood, MA 02062. USA. 1995.
- [11] 孙真真,陈曾平,庄钊文. 基于模糊极大—极小神经网络的雷达目标识别方法研究[J]. 现代雷达,1998,20(6).
- [12] Sun Z Z, Chen Z P, Zhuang Z W. Radar Target Identification of Aircraft Using Structural Features by FMM Neural Networks[J]. NAECON '97, Dayton, Ohio, 1997.
- [13] Simpson P. Fuzzy Min-max Neural Networks—Part 1: Classification[J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1992(3).

