

# 轮廓杂波图恒虚警处理中面杂波性能分析

刘俊涛<sup>1</sup>, 侯颖妮<sup>2</sup>, 宋万杰<sup>1</sup>, 吴顺君<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2 西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘 要: 研究了雷达轮廓杂波图的形成原理及其相应的算法, 并对杂波包络服从瑞利分布情况下轮廓杂波图的虚警和检测性能进行了具体的分析; 同时在给定有关系系统参数的情况下, 研究了扫描圈数、叠代因子和在不同的虚警概率下平均杂噪比对检测概率的影响, 从而为低杂噪比建图提供了理论根据。

关键词: 轮廓杂波图; 杂波图; 地物杂波; 幅度杂波图; 瑞利分布

中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 09-1649-04

## Analysis on Performance of Plane Clutter in Profile Clutter Map CFAR

LU Jun-tao<sup>1</sup>, HOU Ying-ni<sup>2</sup>, SONG Wan-jie<sup>1</sup>, WU Shun-jun<sup>1</sup>

(1 National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2 College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** This paper studies the principle and algorithm of profile clutter map and analyzes the false alarm and detection probability of profile clutter map when the clutter is Rayleigh distribution; meanwhile, under some given system parameters, the affection of the number of scans, iterative coefficients and the affection of average clutter-to-noise rate (CNR) to detection probability under different false alarm rate are studied, thereby, it provides some theoretical support for the forming of profile clutter map in low clutter-to-noise ratio.

**Key words** profile clutter map; clutter map; clutter; clutter's amplitude map; Rayleigh distribution

### 1 引言

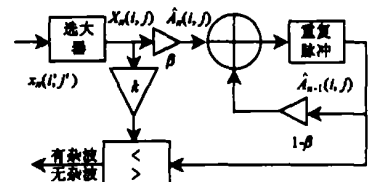
现代雷达信号处理通常采用双支路进行处理, 即 MTD (或 MTI) 相参处理支路和正常处理支路。正常支路可以减少不必要的处理损失, 提高目标尤其是低速小目标的检测能力; 而相参对消支路可以提取杂波内的多普勒信息, 因此为了实现对正常处理和相参处理结果的选择, 必须建立一个能够反映杂波有无的轮廓杂波图 (如图 1(a)), 它可以提供杂波的二分层 (1/0) 概略信息, 数字 '1' 表示有杂波, 用来选择相参支路的输出, 数字 '0' 表示无杂波, 用来选择正常支路的输出。相参处理支路中的超杂波图能够检测切向飞行的零多普勒速度目标 (严格地说是低径向速度目标), 在许多文献中称为杂波图恒虚警即 CM-CFAR<sup>[1,2]</sup>。为了比较这两种递归型滤波器, 现给出 CM-CFAR 的框图 (如图 1(b)) 以区别轮廓杂波图。限于篇幅有关 CM-CFAR 的性能分析见文献 [1~4]。文献 [5] 介绍了轮廓杂波图 (除特别说明外下文简称杂波图) 的基本原理, 并给出了一种基于 FPGA 的轮廓杂波图设计与实现的

方法。本文主要基于轮廓杂波图的模型, 给出了性能分析的依据; 在不同的系统参数下, 并就叠代因子、叠代次数、被检测距离单元数的变化对虚警概率和检测性能的影响做了具体的分析。

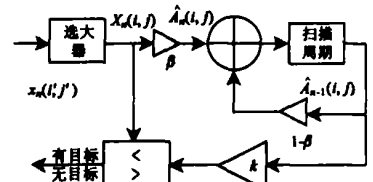
### 2 杂波图原理及基本算法

杂波图是一种时域上的自适应处理方法。

主要用来实时记录雷达阵地周围环境的杂波分布及其强度变化。它是基于对同一空间单元的多次扫描值进行处理来估计出此单元杂波的平均幅度, 从而给出雷达阵地周



(a) 轮廓杂波图信号示意图



(b) CM-CFAR 示意图

图 1 两种递归型滤波器的原理示意图

围环境的二分层信息.

### 2.1 杂波图的基本原理

杂波图将雷达的探测范围划分成若干个距离/方位/仰角区单元,每一单元称为一个杂波检测单元.表征杂波检测单元的轮廓杂波示意图如图2所示,其中 $\Delta\theta$ 表示方位宽度, $\Delta\varphi$ 表示仰角宽度, $\Delta\rho$ 表示径向大小.这样空间就被划分成若干个空间单元( $\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta\rho$ ),并用 $\Delta V$ 表示杂波图最根本的是对每个扇区 $\Delta V$ 内的杂波功率进行估算,然后给出表征 $\Delta V$ 的二分层信息.对于面分布杂波而言,一般认为,扇区 $\Delta V$ 内杂波分布是均匀的,杂波起伏不大,估算方法采用脉内距离单元选大,脉间相关积累.假定杂波单元 $\Delta V$ 内分辨距离单元数为 $M$ ,脉冲数为 $\tau$ 任一杂波分辨单元幅度估计值为 $A(i, j)$ , $t$ 是脉冲宽度, $\Delta\alpha$ 是一个脉冲重复周期 $T$ 时间内方位扫描的角度, $(i, j)$ 是杂波检测单元坐标,这样每个检测单元有 $M$ 个正常信号输入序列 $x_n(i', j')$ ,那么

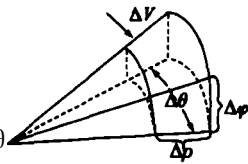


图2 轮廓杂波图示意图

$$\Delta\rho = M \Delta\theta = r \Delta\alpha \quad (1)$$

$$\text{脉内: } X_n(i, j) = \max\{x_n(i', j')\}, i' = 1 \dots M \quad (2)$$

$$\text{脉间: } A_n(i, j) = \beta X_n(i, j) + (1 - \beta)A_{n-1}(i, j) \quad (3)$$

$\beta$ 为叠代因子(遗传因子).当天线扫过一个水平波束宽度,按式(2)分别计算出各杂波单元对应的幅度值,取出天线扫描上一个周期存入杂波图的幅度估计值 $A_{n-1}(i, j)$ ,按式(3)作相关积累运算,得到天线当前扫描周期的杂波估计值 $A_n(i, j)$ ,然后存入同一杂波单元 $\Delta V$ ,这样就完成了对天线上一个扫描周期杂波图进行更新的任务.当天线下一个扫描周期回波到来时,又重复同样的计算,从而使杂波图存储的内容不断地得到动态更新.

假定递归前序列 $X_n(i, j)$ 的均值为 $\mu$ ,方差为 $\delta^2$ ,按式(3)进行递归,就有:

$$\hat{\mu}(n) = \beta\mu + (1 - \beta)\hat{\mu}(n-1) \quad (4)$$

$$\hat{\delta}^2(n) = \beta^2\delta^2 + (1 - \beta)^2\hat{\delta}^2(n-1) \quad (5)$$

式中, $\hat{\mu}(n-1), \hat{\delta}^2(n-1)$ 分别为 $\hat{A}_{n-1}(i, j)$ 的均值和方差, $\hat{\mu}(n), \hat{\delta}^2(n)$ 分别为 $\hat{A}_n(i, j)$ 的均值和方差,从上式看出,若叠代起始时第一幅轮廓杂波图的叠代值 $\hat{A}_1(i, j)$ (此时 $n=2$ )取为单元值 $X_1(i, j)$ ,在假定杂波是独立同分布并且与噪声不相关时,随叠代次数 $l$ 的增加均值与方差变为:

$$\hat{\mu} = \mu \quad (6)$$

$$\hat{\delta}^2 = \frac{\beta + 2(1 - \beta)}{2 - \beta} \delta^2 \quad (7)$$

因此,从式(6)和(7)得到:随着叠代次数的增加,均值保持不变,方差不断减少.从图3中也可以看出叠代因子越大,达到平稳所需要叠代的次数越少,但随叠代次数的增加,最后的方差变为一恒定的值 $\beta\delta^2 / (2 - \beta)$ ( $l$ 一般为5~15).

杂波图叠代结果可以从实验得到(如图4所示),若叠代前噪声服从瑞利分布,杂波服从广义瑞利分布,则经叠代处理后,有无杂波两种情况下的回波分布均接近正态分布<sup>[16]</sup>.这样就为叠代后检测性能分析提供了根据.

### 2.2 杂波图性能分析

假定 $v(t)$ 是单脉冲检测中在某一辨识单元中得到的一个观测, $D(v)$ 是由 $v(t)$ 形成的检测统计量.对于平方律检测, $D(v)$ 具有如下的形式<sup>[17]</sup>:

$$D(v) = I^2(v) + Q^2(v) \quad (8)$$

其中, $I(v)$ 和 $Q(v)$ 分别是匹配滤波器输出的同相分量和正交分量.假定杂波包络和噪声包络服从瑞利分布,并且它们相互独立,其中回波中噪声的方差为 $\delta_0^2$ ,杂波的方差为 $\delta_s^2$ .若经式(3)叠代后回波幅度变为服从均值为 $m_p$ ,方差为 $\delta^2$ 的正态分布,根据N-P准则得虚警概率和检测概率分别为:

$$P_f = \int_T \frac{1}{\sqrt{2p\delta_0^2}} \exp\left\{-\frac{(x - \sqrt{p/(4-p)}\delta_0)^2}{2\delta_0^2}\right\} dx \quad (9)$$

$$P_d = \int_T \frac{1}{\sqrt{2p\delta_0^2}} \exp\left\{-\frac{(x - m_r)^2}{2\delta^2}\right\} dx \quad (10)$$

$T$ 为检测门限,其与系统噪声大小以及门限因子 $k$ 有关,由于噪声主要来源于接收通道,常常只考虑接收通道中的热噪声,所以,门限 $T$ 在一段时间可以假定为常数.

在假定杂波和噪声包络服从瑞利分布的情况下,上述给出了虚警和检测概率的计算方法,下面主要分析一下选择器输出的概率密度函数,如果杂波单元 $\Delta V$ 内分辨距离单元数为 $M$ 足够小,且 $M$ 个采样点是独立同分布的,则最大选择器输出 $D_{max}$ 的概率密度函数(PDF)可以表示为:

$$p_{D_{max}}(x) = \frac{dF_D^M(x)}{dx} = MF_D^{M-1}(x)p_D(x) \quad (11)$$

这里 $F_D(\cdot)$ 和 $p_D(\cdot)$ 分别是只有噪声情况下距离采样点的分布函数和概率密度函数.如果假定在 $M$ 个采样点中都有杂波进入被检测单元中(可以认为是面杂波),由于假定杂波和噪声是独立的,并且它们的包络服从瑞利分布,我们就可以得到面杂波进入检测单元时最大选择器输出 $D_{max}$ 的

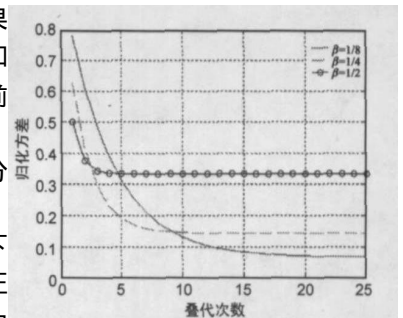


图3 方差随叠代次数变化

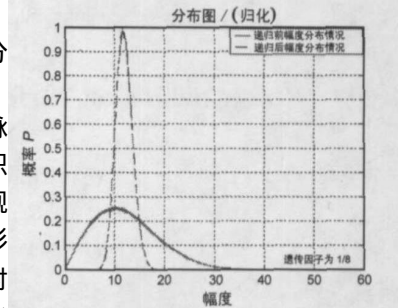


图4 多次叠代后回波分布图

概率密度函数:

$$p_{D_{c_{max}}}(x) = \frac{dF_{D_c}^M(x)}{dx} = MF_{D_c}^{M-1}(x)p_{D_c}(x) \quad (12)$$

这里  $F_{D_c}(\cdot)$  和  $p_{D_c}(\cdot)$  分别是面杂波情况下距离采样点的分布函数和概率密度函数. 依据附录不难求出  $D_{m_{max}}$  和  $D_{c_{max}}$  的均值和方差, 然后经叠代处理, 从而按式 (9) 和 (10) 可以计算出虚警概率和检测概率.

### 3 性能分析

如图 5 所示, 噪声虚警概率  $P_f$  随叠代次数  $l$  的增加、距离单元数  $M$  的减小而减小. 也就是说, 在假定噪声为独立同分布的情况下, 距离单元数  $M$  越大, 虚警概率越大. 如图 6 所示, 给出了检测概率  $P_d$  与杂噪比  $CNR = \xi^2 / \xi_0^2$  的关系, 从图 6(a) 可以看出: 杂噪比越大检测概率就越大. 在相同的虚警概率  $P_f = 10^{-6}$  下, 距离单元数  $M$  越大, 检测概率  $P_d$  越大. 图 6(b) 给出了在相同门限  $T$  下, 平均杂噪比  $CNR$  与检测概率  $P_d$  的关系 (在实际中我们常常关心的就是相同门限下, 系统参数与检测概率  $P_d$  的关系), 可以发现, 在相同的门限  $T$  下, 距离单元数  $M$  越大, 越有利于杂波的检测. 从图 7 给出了叠代因子与虚警概率和检测概率的关系, 可以看出在相同的门限  $T$  下, 叠代因子  $\beta$  一般选择在 0.125 比较合适, 这样虚警概率较小, 检测概率较大.

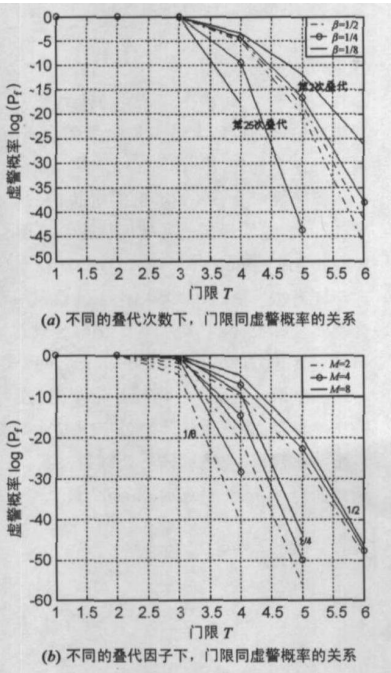


图 5 门限与虚警概率的关系

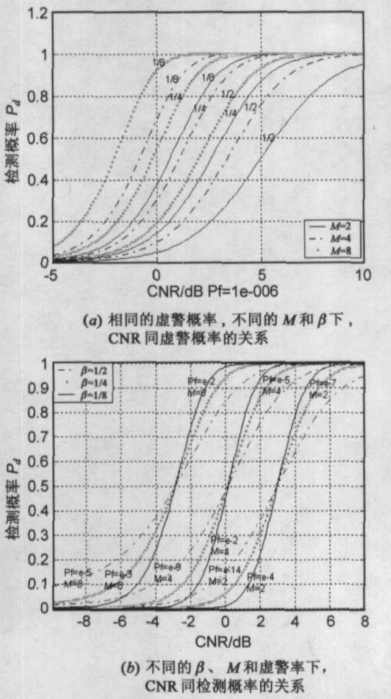


图 6 杂噪比与检测概率的关系

### 4 结论

轮廓杂波图是雷达威力范围内存储在存储器中的杂波强度分布图. 雷达回波中一般包括噪声、杂波以及目标, 杂波图要求是对杂波建立标志, 在杂外的目标尽量不要建立起标志位, 否则会影响后续信号处理的性能. 本文没有分析目标对整个轮廓杂波图性能的影响. 假定杂波包络服从瑞利分布, 距离单元采用选大的情况下, 通过分析叠代次数、叠代因子、杂噪比和门限对虚警概率和检测概率的影响, 发现在比较小的杂噪比 (大概 10dB) 下, 检测概率就可以达到 99%; 同时, 叠代因子  $\beta$  选择在 0.125 比较合适, 这样虚警概率较小, 检测概率较大. 以上结论为轮廓杂波图的工程实现提供了一定的理论依据.

### 附录

假定回波中杂波和噪声是独立的, 并且它们的包络服从瑞利分布, 我们就可以得到最大选择器输出的分布函数<sup>[9]</sup>:

$$F_{D_c}(x) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{2\xi_0^2}\right) \right] u(x) \quad (13)$$

$$F_{D_c} = \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{x^2}{2(\xi_n^2 + \xi_0^2)}\right] \right\} u(x) \quad (14)$$

其中  $u(x)$  为阶跃函数. 所以, 面杂波进入被检测单元时最大选择器输出的一阶距和二阶距分别为:

$$E[D_{c_{-}}] = M \left( \frac{D}{2} \right)^{1/2} \sum_{h=0}^{M-1} \binom{M-1}{h} (-1)^h \cdot \frac{1}{(h+1)^{3/2} (\xi_n^2 + \xi_0^2)^{1/2}} \quad (15)$$

$$E[D_{c_{-}}^2] = 2M \sum_{h=0}^{M-1} \binom{M-1}{h} (-1)^h \frac{1}{(h+1)^2 (\xi_n^2 + \xi_0^2)} \quad (16)$$

当  $\xi_n^2 \rightarrow 0$  时, 由式 (15) 和 (16) 就可以得到  $M$  个单元只有噪声时的一阶距和二阶距, 并且很容易得到方差.

### 参考文献:

[1] D Lopš M Orsini Scan-by-scan averaging CFAR [J]. IEE Proceedings, 1989, 136(6): 249-254

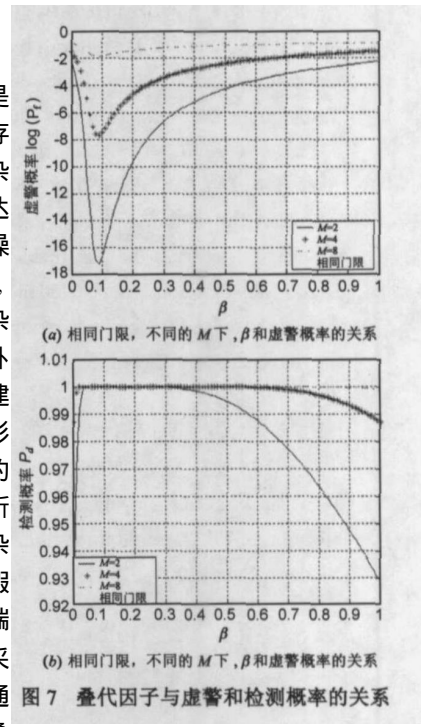


图 7 叠代因子与虚警和检测概率的关系

- [2] Ernesto Conte, Maurizio Di Bisceglie, Marco Lops. Clutter map CFAR detection for range spread targets in non-Gaussian clutter Part II: Performance assessment [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(2): 444-455.
- [3] Shan Tao, Tao Ran, Wang Yue, Zhou Siyong. Novel clutter map CFAR algorithm with amplitude limiter [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2004, 15(3): 262-265.
- [4] Darko Musicki, Bob Evans. Clutter map information for data association and track initialization [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 387-398.
- [5] 刘俊涛, 宋万杰, 吴顺君. 基于 FPGA 三维杂波图的设计与实现 [J]. 现代雷达, 2005, 27(12): 17-20.  
JUN Tao-liu, WAN Jie-song, SHUN Jun-wu. Design and realization of FPGA-based three-dimensional clutter map [J]. Modern Radar, 2005, 27(12): 17-20 (in Chinese).
- [6] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 91-94.
- [7] 何友, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 32-38.

#### 作者简介:

刘俊涛 男, 1979年出生于山西省平鲁县, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号与信息处理. E-mail: ljtxiat@sina.com.cn

侯颖妮 女, 1982年出生于陕西, 现为西北工业大学硕士研究生, 研究方向为现代信号处理理论及应用.

E-mail: houyingni@163.com

宋万杰 男, 1960年出生于陕西铜川市, 现为西安电子科技大学高级工程师, 目前主要从事雷达系统设计、雷达信号处理、数字集成电路设计等方向的研究. E-mail: songwj@xidian.edu.cn

吴顺君 男, 1942年出生于上海, 现为西安电子科技大学教授, 博士生导师, 现任雷达信号处理国家重点实验室主任, 主要从事雷达系统分析建模与仿真, 信号处理与检测, 高速实时数字信号处理等方面的研究. E-mail: sjwu@xidian.edu.cn