

雷达信号的恒虚警率检测

张鹏洲 龙 腾 毛二可

(北京理工大学, 北京 100081)

摘 要 雷达信号的恒虚警率检测是雷达信号处理的重要组成部分, 本文首先论述了雷达信号恒虚警率检测的设计原理, 分析了评价其性能的准则, 在此基础上介绍了恒虚警率技术在雷达信号处理中的发展和应用, 最后概述了恒虚警率技术的研究动态。

关键词 雷达; 信号处理; 自动检测; 干扰

0 引 言

雷达信号的恒虚警率检测是雷达信号处理领域中的重要研究课题, 一直受到人们的极大关注。由于操作人员观察显示器确认目标的能力和处理信息的速率有限, 现代雷达系统中通常采用自动检测技术。它主要指雷达系统在无人操作的情况下, 能够从雷达回波中自动判决和记录有无目标的存在。通常是设置一个与信杂比(信噪比)、检测概率、虚警概率、目标和背景统计特性等有关的一个门限。当信号超过这个门限时, 就判决目标的存在; 当有目标时, 判断为有目标的概率称为检测概率; 而当无目标时判断为有目标的概率就称为虚警概率^[1~3]。

雷达信号恒虚警率检测就是要求虚警概率保持恒定, 这主要是因为雷达信号检测中, 信号的最佳检测通常采用奈曼-皮尔逊准则, 即在保持恒定的虚警概率的条件下, 使正确检测的概率达到最大值。在雷达信号的检测过程中, 如果虚警目标太多, 使计算机的处理能力达到饱和, 势必影响正常目标的检测, 保持雷达信号的恒虚警率检测可以有效地解决这个问题, 所以恒虚警率检测具有很大的实际意义。但遗憾的是: 在雷达信号检测中, 由于各种干扰强度是随机的, 如果采用固定门限, 将难以保证信号的恒虚警率检测。因此, 如何在各种起伏干扰背景下, 使雷达信号检测的虚警概率保持恒定值, 即恒定警率(Constant False Alarm Rate 简称 CFAR)技术, 一直就是人们所关注的热点。

1 雷达信号恒虚警率检测器的设计原理

一般说来, 检测提取的雷达信息都是我们所感兴趣的信息, 如距离、多普勒、俯仰、方位等。为了提高检测的性能, 这些回波通常要先经过滤波以后, 才交给恒虚警率检测器处

理. 滤波过程包括多普勒滤波、自适应时空二维谱估计、白化、通道均衡等等. 本文在不引起混淆的情况下, 把雷达环境中的实际回波称为雷达回波, 而把经过滤波的雷达回波称为杂波. 雷达回波的特性和滤波过程决定了杂波的特性.

根据恒虚警率检测器对杂波的敏感程度可将恒虚警率检测器分为非参量型恒虚警率检测器和参量型恒虚警率检测器. 其中非参量检测器对杂波类型没有严格要求, 参量型恒虚警率检测器则需要预知杂波的类型^[2,4]. 目前实际应用较多的、典型的参量型恒虚警率检测器如图1所示^[3]. 它首先假定雷达杂波的类型, 然后通过对检测单元附近的参考单元的数据采用某种算法, 对检测单元中杂波的参数进行估计, 再对检测单元中的杂波进行归一化, 形成一个与杂波参数无关的量, 将这个量与一个跟虚警概率和参考单元数有关的门限进行比较, 判断有无目标的存在. 由于经过归一化后检测单元中的值与杂波参数无关, 所以能够起到恒虚警率检测的作用.

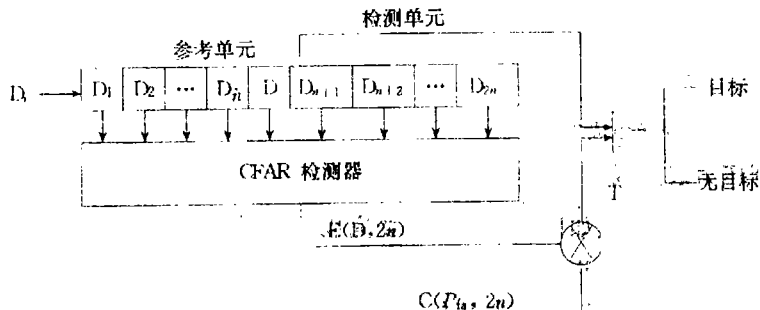


图1 典型的参量型恒虚警率检测器工作原理图

雷达目标所处的杂波环境是非常复杂的, 要设计参量型恒虚警率检测器, 使得雷达信号检测的虚警概率保持恒定, 就必须考虑多种环境因素. 一般说来主要应考虑以下3个因素^[3].

1.1 杂波类型

这里所说的杂波类型主要是指杂波的幅度分布. 通常雷达杂波幅度的统计特性可由瑞利、韦伯、对数正态以及K分布来模拟. 它们的表达式分别如下

$$\text{瑞利杂波} \quad p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad x \geq 0 \quad (1)$$

$$\text{对数正态杂波} \quad p(x) = (\sqrt{2\pi}\sigma x)^{-1} \exp\left[-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2\right] \quad x \geq 0 \quad (2)$$

$$\text{韦伯杂波} \quad p(x) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \quad x \geq 0 \quad (3)$$

$$\text{K杂波} \quad p(x, \alpha, \nu) = \frac{2}{\alpha \Gamma(\nu + 1)} \left(\frac{x}{2\alpha}\right)^{\nu+1} K_{\nu}\left(\frac{x}{\alpha}\right) \quad x \geq 0 \quad (4)$$

根据上述杂波类型, 这可以将参量型检测器分为瑞利杂波(单参数)恒虚警率检测器和非瑞利杂波(双参数)恒虚警率检测器(包括韦伯杂波恒虚警率检测器、对数正态恒虚警率检测器和K分布杂波恒虚警率检测器等).

1.2 杂波的均匀性

杂波是否均匀也是设计恒虚警率检测器时需要重点考虑的因素之一. 实际的杂波严格来说都是不均匀的, 尤其在杂波边缘, 幅度的变化最为剧烈. 如果恒虚警率检测器设计的有欠缺, 参考单元估计出的杂波参数与检测单元的参数不相符合, 极有可能引起杂波掩盖目标, 或虚警概率太大, 超过设备容量的情况. 所以在设计恒虚警率检测器时, 必须考虑波的均匀性, 尤其是杂波边缘的情况.

1.3 多目标干扰

在单目标的情况下, 参考单元中的信号可近似地认为是杂波, 可以用来估计杂波参数. 但在多目标情况下, 很容易出现参考单元中含有目标信息的情况, 此时目标信号的幅度可能大于杂波的幅度, 这样估计出的门限偏高, 导致检测概率降低, 很有可能出现两个目标互相“掩盖”的情况, 所以在设计恒虚警率检测器时, 还应尽可能考虑多目标因素.

以上三种因素中, 杂波的类型是最主要的因素, 实际杂波类型与恒虚警率检测器不匹配, 将引起较大的恒虚警率损失. 一般恒虚警率检测器首先都要根据杂波的类型来设计, 在此基础上再考虑杂波的均匀性和多目标因素.

2 恒虚警率检测器的性能

评价一个恒虚警率检测器设计的好坏, 主要是它的实用性和恒虚警率损失两个方面. 实用性主要指它使用起来的可靠性、复杂性、处理时间的长短以及由此而引起的硬件设备量、软件编程量的大小等等. 恒虚警率损失主要是指使用恒虚警率检测器后对信号检测的影响程度, 对于参量型恒虚警率检测器来说, 假设杂波是独立同分布的, 如果参考单元数无限大时, 杂波参数的估值为真实值, 这时恒虚警率检测能够达到理论上的最佳检测; 如果参考单元数有限, 杂波参数的估值将产生起伏, 参考单元数越少, 起伏越大. 经过归一化后, 杂波参数估值的起伏将引起输出起伏的加大. 检测门限一定时, 这种起伏加大将引起虚警概率的增加. 如果要保持原来虚警概率和检测概率, 就必须提高门限和输入的信杂比, 这个所提高的信杂比就称为恒虚警率损失^[1]. 设参考单元有限时, 达到某虚警概率需要的门限为 $k_1(N)$, 达到某检测概率所需要的信杂比为 R_1 ; 当参考单元为无限时, 达到同样的虚警概率需要的门限为 $k_2(+\infty)$, 达到同样的检测概率所需要的信杂比为 R_u , 则虚警概率 P_{fa} 和检测概率 P_d 可表达为

$$P_{fa} = \int_{k_1(N)}^{+\infty} f_n dx = \int_{k_2(+\infty)}^{+\infty} f_n dx \quad (5)$$

$$P_d = \int_{k_1(N)}^{+\infty} f_{n+s}(R_1) dx = \int_{k_2(+\infty)}^{+\infty} f_{n+s}(R_u) dx \quad (6)$$

恒虚警率损失可表达为^[1]

$$L_{CFAR} = 10 \log_{10} \frac{R_1}{R_u} \quad (7)$$

实际上, 由于杂波都不是均匀分布的, 参考单元数取的过多势必增加杂波的不均匀性, 所以实际的恒虚警率检测器所用的参考单元数必然是有限的, 这样就必然会带来恒虚

警率损失。恒虚警率检测器不同,其恒虚警率损失一般也不相同,实用性亦不相同,所以评价和选择恒虚警率检测器需要综合考虑才能得出结论。

3 恒虚警率技术在雷达信号检测中的发展和应用

从60年代开始至今,人们对恒虚警率技术进行了大量的研究,也取得了许多成果。开始由于对杂波的特性没有足够的了解,通常假设杂波是瑞利型的,主要采用瑞利型恒虚警率检测器以及对杂波类型要求不高的非参量型恒虚警率检测器,其鲁棒性也比较差。随着对杂波特性了解的日益深入,人们发现采用双参数杂波模型模拟雷达杂波更为合适,因而针对双参数杂波的恒虚警率检测器也逐渐得到了发展。近十几年来,人们在提高恒虚警率检测器的性能、鲁棒性等方面,做了大量的工作,得到了许多性能良好的恒虚警率检测器。表1中列出了目前应用较广、实用性较强的几种恒虚警率检测器。由于K分布杂波背景下的信号检测目前尚处于理论阶段,因此这里没有列出,读者可参见文献[12~14]中的有关内容。

表1 常用恒虚警率检测一览表

	类型	优点	缺点	参考文献
二进制积累	非参量型恒虚警率检测器	对杂波适应性强,易于实现	恒虚警率损失较大	[1]等
秩值检测器	非参量型恒虚警率检测器	对杂波适应性强,易于实现	恒虚警率损失较大	[5]等
单元平均恒虚警 CA-CFAR	瑞利型恒虚警率检测器	易于实现,在平稳杂波下性能良好	对边缘和多目标环境缺乏鲁棒性	[6]等
单元平均选大 GO-CFAR	瑞利型恒虚警率检测器	易于实现,在杂波边缘能够控制恒虚警率	在杂波边缘和多目标环境恒虚警率损失增加	[7]等
单元平均选小 SO-CFAR	瑞利型恒虚警率检测器	在多目标环境中性能较好	在杂波边缘恒虚警率增加	[8]等
顺序统计 OS	瑞利型恒虚警率检测器	在均匀环境中与单元平均性能相当,在其他环境中性能要好	排序时间较长	[9]等
修边的单元平均恒虚警 TM	瑞利型恒虚警率检测器	具有 OS 和 CA 的优点	排序时间较长	[10]等
Log-T	韦伯型和对数正态型恒虚警率检测器	在平稳环境下性能良好	处理过程复杂,对杂波边缘和多目标环境缺乏鲁棒性	[1]等
WH	韦伯型和对数正态型恒虚警率检测器	在杂波边缘和多目标环境性能较好	计算复杂,对多目标环境仍缺乏自适应能力	[3]等
BLUE-CFAR	韦伯型和对数正态型恒虚警率检测器	和 WH 相当,计算较 WH 简单	对多目标环境仍缺乏自适应能力	[11]等

4 雷达信号恒虚警率检测的研究动态

从雷达信号恒虚警率检测的发展来看,目前主要有以下几个方面的研究热点:

(1) 寻求具有更大鲁棒性的恒虚警率检测器

从恒虚警率检测器的发展可以看出,尽管许多检测器具有很好的恒虚警率性能,但还没有在各种分布条件下和在均匀、非均匀的不同背景(包括杂波边缘)中及多目标互相“遮挡”的情况下都具有很好的检测性能。在不影响处理时间的情况下,设计性能良好、鲁棒性强的恒虚警率检测器,一直就是雷达工作者的研究重点。

(2) 高距离分辨率雷达信号的恒虚警率检测

提高距离分辨率,从而提高信杂比是当前解决从强杂波背景中检测目标信号的重要手段。但在高距离分辨雷达体制下,雷达杂波已不再是瑞利分布,雷达的分辨单元远小于目标尺寸,目标将做为扩展(分布)式目标看待,这时,传统的针对点目标的恒虚警率检测器将不再适用。在此情况下,如何实现雷达信号的恒虚警率检测也是人们所关注的问题之一。

(3) 恒虚警率检测器的智能应用^[11]

从上述各种恒虚警率检测器的性能来看,尽管还没有找到在各种情况下都具有良好性能的恒虚警率检测器,但在某些具体条件下,有些恒虚警率检测器却具有很好的性能,CA在平稳瑞利杂波下的性能非常好。如果能实时判断杂波的类型、均匀性以及多目标等情况,在每种情况下分别采用最适合的恒虚警率检测器,则无疑能更好的实现恒虚警率的作用。雷达的工作环境千变万化,信号处理的过程也不尽相同。因此,实时判断恒虚警率检测器处理的杂波情况,根据一定的规范,智能地使用恒虚警率检测器,也是目前恒虚警率技术发展的方向之一。

(4) 在分布检测系统中实现恒虚警率检测^[15,16]

目前,为了在电子战中提高雷达的抗干扰能力,多传感器、多目标的分布式信号检测技术已经受到了极大的关注,如何在分布式检测系统的数据融合技术中实现恒虚警率检测,也是恒虚警率技术研究的热点之一。

参 考 文 献

- 1 西北电讯工程学院雷达系统编写组编. 雷达系统. 北京: 国防工业出版社, 1980
- 2 丁鹭飞主编. 雷达原理. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1984
- 3 Antonik P, Bowles B, et al. Intelligent use of CFAR algorithms. AD-A267755, RL-TR-93-75 Interim Report. 1993
- 4 Eaves J L, Reedv E K. Principle of modern radar. New York: Van Nostrld Reinhold Company, 1987
- 5 [美]莫里斯 G V 等著, 季节, 许伟武等译. 机载脉冲多普勒雷达. 北京: 航空工业出版社, 1990
- 6 Fian H M, Johnson S P. Adaptive detection with threshold control as a function of spatially clutter-level

- estimates. RCA Review, 1968, 29. 414~464
- 7 Hansen V G. Constant false alarm rate processing in search radars. London: International Radar Conference, 1973. 325~332
 - 8 Weiss M. Analysis of some modified cell-average CFAR processors in multiple target situations. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 1982, 18. 102~113
 - 9 Rohling H. Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19. 608~621
 - 10 El Mashade M B. Monopulse detection analysis of the trimmed mean CFAR processor in nonhomogeneous situations. IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143. 87~94
 - 11 Guida M, Longo M, Lops M. Biparametric linear estimation for CFAR against weibull clutter. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 28. 138~157
 - 12 Conte E, Longo M. Radar detection of signals with unknown parameters in K-distributed clutter. IEEE Proce., Part F, 1991, 138(2)
 - 13 Raghavan S. A method for estimating parameters of K-distributed clutter. IEEE Trans. on AES., 1991, 27(2)
 - 14 Armstrong B C, Griffiths H D. CFAR detection of fluctuating targets in spatially correlated K-distributed clutter. IEEE Proceedings, 1991, 138. 139~152
 - 15 Blum R S, Jimfen Qiao. Threshold optimization for distributed order-statistic CFAR signal detection. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32. 368
 - 16 Uner M K, Varshney P K. Distributed CFAR detection in homogeneous and nonhomogeneous backgrounds. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32. 84~97

THE CONSTANT FALSE ALARM RATE OF RADAR SIGNAL

Zhang Pengzhou Long Teng Mao Erke

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract The Constant False Alarm Rate (CFAR) detection is a significant part of Radar signal processing. At first the design principle and the performance criterion of the Radar signal CFAR detector are analyzed. Then the development and the employment of the CFAR techniques in Radar signal processing are introduced. At last the research trends of the CFAR techniques are discussed.

Key words radar; signal processing; automatic detection; interference