

基于区域融合的分布式 CFAR 信号检测¹

崔宁周 谢维信 余雄南

(西安电子科技大学电子工程系 西安 710071)

摘要 本文提出了多传感器检测区域的划分,以及先分区融合再系统融合的方法,并且在不同的检测区域,传感器采用不同的门限。给出了该方法的虚警概率和检测概率表达式,并介绍了它在分布式 CFAR 检测系统中的应用。结果表明,通过设置不同的门限,可以提高系统的检测概率。

关键词 多传感器, 信号检测, 数据融合

中图分类号 TN911.7

1 引言

在先进的探测和控制系统中,越来越多地采用多种传感器来获取更全面的信息,随之产生了一项新技术——多传感器数据融合。多传感器检测有两种方式,即集中式和分布式。集中式是指每个传感器将各自的观测值全部传输到中心处理器集中处理,以获得最优判决,但信息传输容量和中心处理器的计算量非常大;分布式是指每个传感器首先根据自身的观测值进行局部判决,并将结果传输到融合中心,融合中心按某一融合规则获得全局判决。分布式检测克服了集中式检测的缺点,在性能下降不大的前提下有效地减少了计算量,因而受到广泛重视。

近年来,分布式检测的研究已有很多报道^[1-4],人们提出了融合局部估计的“与”(AND)、“或”(OR)和“ K/N ”(当 N 个局部判决中至少有 K 个判为“有目标”时,全局判决才判为“有目标”)融合规则。这些规则都假定所有传感器探测同一区域,但实际上,考虑到各检测器的几何位置不同,将会产生不同的重叠检测区域。这时采用局部判决的AND或“ K/N ”作融合规则显然是不合理的。为此,本文提出了多传感器检测区域的划分,以及先分区融合后系统融合的方法:在不同的检测区域传感器采用不同的检测门限。本文先分析这种方法的性能,然后介绍它的分布式恒虚警率(CFAR)检测系统中的应用。

2 检测区域和融合规则

图1示出了由四个不同位置的检测器组成的分布式检测系统,它把检测空间分成了若干不同的检测区域,例如集合 $\{A\}$ 表示检测器 A 的检测区域,集合 $\{AB\}$ 表示两个检测器 A 和 B 共同检测目标的区域,集合 $\{ABD\}$ 表示三个检测器 A 、 B 和 D 共同检测目标的区域等等。对所有的重叠区域,不能简单地用AND或“ K/N ”规则,而应首先考虑每个区域的融合,然后将其组合起来形成系统的融合规则。

¹ 1994-11-01 收到, 1995-06-14 定稿
国防预研基金资助项目

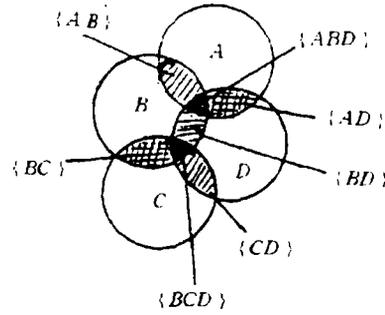


图 1 多传感器检测空间的划分

图 1 中重叠的检测区域有 7 个, 其中两个检测器的重叠区域有 5 个, 三个检测器的重叠区域有两个。假定每个检测器设置两个检测门限, 即低门限和高门限, 并用“1”和“2”来表示。在两个检测器的重叠区域, 采用两者在高门限时判决的 AND 作融合规则, 例如对区域 {AB}, 用 A_2B_2 作融合规则, 这里 A_2 表示检测器 A 在高门限时判决。在三个检测器的重叠区域, 采用三个检测器在低门限时判决的 AND 作融合规则, 如对区域 {ABD}, 用 $A_1B_1D_1$ 作融合规则, 其中 A_1 表示检测器 A 采用低门限时判决。则多传感器检测系统的融合规则为 $A_1B_1D_1 + B_1C_1D_1 + A_2B_2 + A_2D_2 + B_2D_2 + B_2C_2 + C_2D_2$ 。

检测器门限的设置取决于检测器的数目和性能^[4]。对三个检测器的重叠区域, 其虚警概率为三个检测器虚警概率之积, 所以采用低门限判决; 对于只有两个检测器的重叠区域, 检测门限应相应提高, 以保证虚警概率的要求。

根据系统的融合规则可以推导出系统检测概率和虚警概率的表达式。为简便起见, 考虑图 2 由三个传感器组成的系统, 其融合规则为 $A_1B_1C_1 + A_2B_2 + B_2C_2 + C_2A_2$, 相应的检测概率为

$$P_{d_0} = P_d\{A_1B_1C_1 + A_2B_2 + B_2C_2 + C_2A_2\}. \quad (1)$$

利用布尔代数式

$$P\{X + Y\} = P\{X\} + P\{Y\} - P\{XY\} \quad (2)$$

和检测器判决不相交的假设^[4]

$$P_d\{A_1 \cup A_2\} = P_d\{A_1\} + P_d\{A_2\} \text{ 和 } P_d\{A_1 \cap A_2\} = 0, \quad (3)$$

(1) 式可简化为

$$P_{d_0} = P_d\{A_1B_1C_1\} + P_d\{A_2B_2\} + P_d\{B_2C_2\} + P_d\{C_2A_2\} - 2P_d\{A_2B_2C_2\}. \quad (4)$$

注意到各检测器几何位置不同, 可假定其判决相互独立^[1,3], 则 (4) 式可写成

$$P_{d_0} = P_d\{A_1\}P_d\{B_1\}P_d\{C_1\} + P_d\{A_2\}P_d\{B_2\} + P_d\{B_2\}P_d\{C_2\} + P_d\{C_2\}P_d\{A_2\} - 2P_d\{A_2\}P_d\{B_2\}P_d\{C_2\}. \quad (5)$$

(5) 式中, 用各检测器的虚警概率代替其检测概率便可得系统的虚警概率表达式。

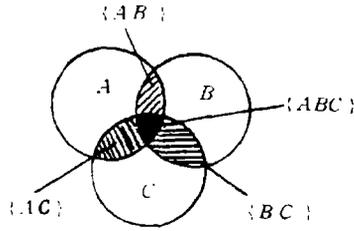


图 2 三个传感器检测区域划分

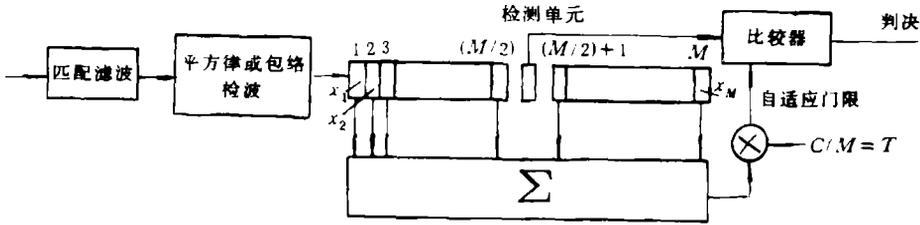


图 3 CA-CFAR 检测器

3 采用 CA-CFAR 检测器时的系统性能计算

3.1 Rayleigh 目标和干扰下的性能

CFAR 处理是雷达信号处理的重要组成部分，最简单也是使用最广和研究最多的是邻近单元平均恒虚警率 (CA-CFAR) 和各种修正电路。图 3 示出了 CA-CFAR 原理图，它利用抽头延迟线同时得到检测单元和邻近单元的输出。这些邻近单元是为了取得杂波平均值的参考单元，参考单元输出和的平均作为杂波平均值的估算，把它与检测单元的输出作比较以判决目标的存在与否。

考虑图 2 的检测系统采用 CA-CFAR 检测器的情况，这时对检测器 A，其检测概率和虚警概率是检测门限、参考单元数和信噪比的函数。在 Rayleigh 目标和干扰条件下，这两个函数分别为^[5]

$$P_d\{A_i\} = \left(\frac{1 + S_a}{1 + S_a + T_{ai}} \right)^{M_a}, \tag{6}$$

$$P_f\{A_i\} = \frac{1}{(1 + T_{ai})^{M_a}}. \tag{7}$$

$$T_{ai} = C_{ai}/M_a, \quad i = 1, 2, \tag{8}$$

式中 S_a 为检测器 A 的信噪比； M_a 为其参考单元数； C_{a1}, C_{a2} 为 A 的低门限和高门限； T_{a1}, T_{a2} 为相应的门限系数，且 $T_{a2} = \alpha_a T_{a1} \triangleq \alpha_a T_a, \alpha_a > 1$ 。检测器 B 和 C 有类似的检测概率和虚警概率。

将 (6)、(7) 两式代入 (5) 式，得到系统的检测概率和虚警概率为

$$P_{d0} = P_d(T_a, T_b, T_c), \tag{9}$$

$$P_{f0} = P_f(T_a, T_b, T_c). \tag{10}$$

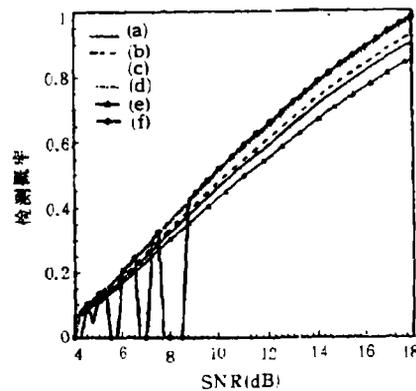


图 4 分布式 CA-CFAR 检测系统的性能

表 1

	α_a	α_b	α_c
(a)	1.2	1.1	1.2
(b)	1.25	1.2	1.3
(c)	1.35	1.5	1.4
(d)	1.38	1.5	1.45
(e)	1	1	1
(f)	1.45	1.5	1.5

固定 P_{f_0} 为某一期望值 (要求值), 优化门限 T_a, T_b 和 T_c 使 P_{d_0} 达到最大, 为此可采用 Lagrange 乘法求解。

3.2 结 果

当 $P_{f_0} = 10^{-7}$, $M_a = 36$, $M_b = 24$, $M_c = 32$ 时, 图 4 示出了检测概率 P_{d_0} 与 SNR 的关系, 为简便起见, 各检测器使用了相同的 SNR。由图 4 和表 1 可以看出, 当每个检测器采用高、低门限时, 系统的检测性能可以得到改善, 并且随着每个检测器高门限的增大, 系统的检测概率随之增加。但是过大的高门限会导致检测性能的严重下降 (如情况 (f)), 这是由于采用高门限检测的区域 $\{AB\}$ 、 $\{BC\}$ 和 $\{CA\}$ 其检测性能下降所致。

这里只考虑了图 2 中重叠区域内的检测融合问题, 若要考虑整个覆盖区域的检测, 还应包括只有单传感器检测的三个区域, 对这三个区域, 应按单传感器检测的方法进行, 即在某一固定的虚警概率条件下, 设置检测门限进行判决。

4 结 束 语

本文主要讨论了重叠区域的检测融合问题, 提出了先分区融合后系统融合的方法, 并将其用于 CA-CFAR 检测器组成的分布雷达检测系统。结果表明, 通过设置不同的检测门限, 可以提高系统的检测性能。

参 考 文 献

- [1] Srinivasan R. IEEE Proc.-F, 1986, 133(1): 55-60.
- [2] Barkat M, Varshney P K. IEEE Trans. on AES, 1989, AES-25(2): 141-149.

- [3] Antonio R, Antoni B, *et al.* IEEE Trans. on AES, 1992, AES-28(2): 276-284.
[4] Lawrence A K. IEEE Trans. on AES, 1993, AES-29(2); 317-327.
[5] Finn H M, Johnson R S. RCA Rev., 1968, 29(3): 414-464.

DISTRIBUTED CFAR SIGNAL DETECTION BASED ON AREA FUSION

Cui Ningzhou Xie Weixin Yu Xiongnan

(Dept. of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract The multisensor detection area partitioning is considered. An approach is presented to the fusion in each detection area where the sensor uses different thresholds and then at system level. The expressions of the detection probability and false alarm probability are given. An application of the method is illustrated to distributed CFAR detection systems. The results show that the system detection probability may be improved by setting different thresholds for a detector.

Key words Multisensor, Signal detection, Data fusion

崔宁周: 男, 1966年生, 博士生, 从事信号处理、神经网络、模糊系统和数据融合等方面的研究.

谢维信: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理、模糊信息处理、信号处理、模式识别和图象处理等方面的研究.

余雄南: 女, 1932年生, 教授, 从事雷达数据处理、综合显示技术和知识工程等方面的研究.