

基于位置相关的高分辨雷达目标检测方法¹

黄德双 韩月秋*

(中国科学院自动化所 国家模式识别重点实验室 北京 100080)

*(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

摘 要 本文研究了毫米波高分辨雷达杂波背景下目标信号的检测问题,提出了基于高分辨雷达目标一维距离象位置-径向距离相关信息的非参数检测方法。该方法不但计算复杂度低,而且还具有检测沿距离“走廊”上多个扩展目标的能力。通过毫米波高分辨步进频率雷达实测数据证实,这是一种非常有效的扩展目标信号检测方法。

关键词 毫米波, 高分辨雷达, 一维距离象, 位置相关, 非参数检测

中图分类号 TN958

1 引 言

对于毫米波高分辨率雷达 (MW-HRR) 来说, 目标回波为多散射点形成的一维距离象^[1,2], 而雷达杂波的幅度分布明显偏离通常的瑞利分布^[3,4]。特别是象丘陵, 水坑等不规则杂波源, 它们的回波幅度分布更复杂, 如果用双参数模型来拟合, 模型中对应的参数也是变化的^[5]。因此, 在 MW-HRR 下, 就不能用常规的方法来检测目标信号。如何解决这一问题? 有人提出使用最大似然的方法先估计双参数模型的分布参数, 然后, 使用参数检测方法检测有用的目标信号。然而, 这种方法不但不能满足实时处理的要求, 而且, 对于有限数据的情况, 所估计杂波分布参数是有偏的^[5,6]。如果采用选大单元平均 CFAR(GO-CFAR), 选小单元平均 CFAR(SO-CFAR), 加权单元平均 CFAR(WCA-CFAR) 或修正单元平均 CFAR(TM-CFAR) 等方法来解决, 由于树林、丘陵、水坑等回波有杂波边界, 存在“尖峰”式的杂乱脉冲干扰。即使选择的杂波单元数无穷多, 其估计出来的杂波功率也是有偏的, 因而, 将严重影响其检测性能。而且, 在高分辨雷达情况下的扩展目标, 使用 CFAR 往往还需要设置保护单元。如果使用顺序统计量 CFAR 处理, 虽然在杂波边缘和多目标情况下具有较好的性能, 但带来的 CFAR 损失将要加大^[5-7]。

众所周知, 雷达操作员虽然没有象算法赋予机器那样的自适应能力, 但他能利用视觉的冗余性, 判断目标的航迹, 在几个扫频周期内即可检测到真实的目标。人们发现^[8], 人脑检测外界客体的机理与视觉神经系统中存在的 40 ~ 60Hz 的振荡有关, 这种振荡能将感知对象的关联信息利用起来, 实现客体的联合检测与判别(分类)。本文就是借鉴于人脑视觉信息处理的冗余性原理, 提出了基于目标强散射点位置相关的距离段联合检测器。

2 基于第一门限的位置信息录取

在 HRR 下, 目标或杂波相对于雷达, 在某个方向内形成一条距离“走廊”, 如图 1 所示。HRR 的作用就是要在这一条距离“走廊”上发现威胁目标。

¹ 1996-01-08 收到, 1996-09-02 定稿

由于雷达目标检测中, 恒虚警 (CFAR) 处理总存在恒虚警损失, 因此, 在 S/C 较高的情况下, CFAR 处理没有必要存在 [8]。根据毫米波高分辨雷达目标和杂波的特点, 反坦克导弹的作战环境较恶劣, 可能含有角反射器等少数孤立强散射点假目标, 而坦克等人工军事目标 (径向尺寸: $5 \sim 10\text{m}$) 存在一

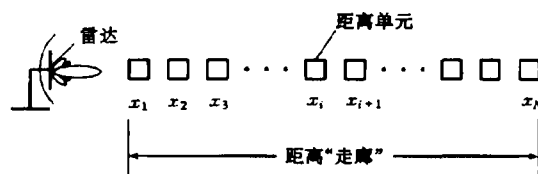


图 1 高分辨雷达下的距离“走廊”

定长度的强散射点, 我们可利用人工目标和杂波等假目标在尺寸和强散射点数目上的不同将它们分离。因此, 我们采用基于位置信息的距离段联合检测方法。

2.1 第一门限的建立

基于第一门限检测的基本思想, 与二进制积累检测器不同的是, 这里的检测是在一个扫频周期内进行的, 而且, 为便于后面基于第二门限的位置相关检测器的使用, 这里也将超过门限的散射点的位置信息记录下来。第一门限的选择方法很多, 如果根据样本的均值来选择, 则由于毫米波杂波的不均匀性, 所得的门限可能忽高忽低。因此, 我们直接利用样本序列的相对幅度 (归一化) 值来选择。假设在中频输出端得到的一个扫频周期内 N 个距离单元的回波幅度序列分别为 $x_1, x_2, \dots, x_N$, 我们从中选择最大值 [5]:

$$x_{\max} = \max_{i=1}^N \{x_i\}, \quad (1)$$

那么, 第一门限可选择为

$$T_{h1} = \eta x_{\max}, \quad (2)$$

其中 η 为确信系数, 可根据 S/C 值大小 (或虚警率的大小) 来定, 一般可选择 $0.3 \sim 0.7$ 左右。小的 η 值会增加虚警的机会; 大的 η 值将引起检测概率的下降。不过, 初步检测还是尽量减少漏警, 所以, η 应取较小的值。

2.2 位置信息的录取

将回波幅度序列 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 与门限 T_{h1} 进行比较, 并记录超过门限的样本位置序号:

$$I_i = \arg\{x_i \geq T_{h1}\}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

其中 $\arg\{\cdot\}$ 表示取变元运算。因而, I_i 代表 x_i 的位置信息。

显然

$$I_i = \begin{cases} i, & x_i \geq T_{h1}; \\ 0, & x_i < T_{h1}; \end{cases} \quad (4)$$

则经过第一门限检测的输出为超过门限的位置信息。如果将 $I_i = 0$ 的位置序号去除, 则剩下的集合 [5]:

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_K\} \subset \{1, 2, \dots, N\}, \quad (5)$$

即有 K 个可能“点目标”超过第一门限, 而且, 它们分别分布在第 $i_1, i_2, \dots, i_K$ 个距离单元上。

3 基于位置信息的相关检测器

假设雷达分辨率为 ΔR , 待检测目标所占的最大距离单元数为 L , 则在带宽 $B=0.87\text{GHz}$, $L=32$ 情况下, 目标所占的最大径向距离为 $LR = \Delta R \cdot L = 5.52\text{m}$ 。一般待检测的目标在参考窗 LR

内至少有 5 个强散射点。现在我们以 LR 为参考窗, 检验 K 个可能的“点目标”在 LR 中所占的强散射点个数 IU , 然后, 根据 IU 值来判别 LR 内的“点目标”群是杂波², 还是待检测的目标。

3.1 位置关联矩阵的形成

以 K 个可能的“点目标”中的第一个散射点为基准, 第二, 第三, $\dots$, 第 K 个散射点依次与前一个散射点进行不重复的比较, 得到距离信息, 则散射点位置信息集合 I 可转换成距离信息集合^[5]

$$\left. \begin{aligned} IR_1 &= \{r(1, 2), r(1, 3), \dots, r(1, K)\}, \\ IR_2 &= \{r(2, 3), r(2, 4), \dots, r(2, K)\}, \\ &\dots, \\ IR_{K-1} &= \{r(K-1, K)\}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中

$$r(j, k) = (i_k - i_j) \cdot \Delta R; \quad k > j; \quad j = 1, 2, \dots, K-1; \quad k = j+1, j+2, \dots, K; \quad (7)$$

其中 $r(j, k)$ 的几何解释如图 2 所示。

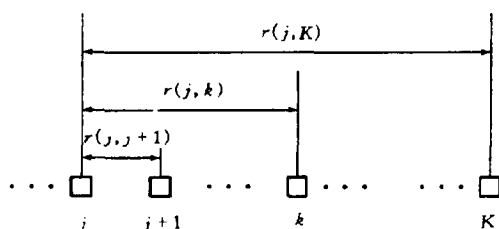


图 2 $r(j, k)$ 的几何解释

如果认为 $r(j, k) = 0, k \leq j$, 则由 (6) 式, 可得 K 个可能的“点目标”形成的位置(距离)关联矩阵^[5]

$$\begin{bmatrix} 0 & r(1, 2) & r(1, 3) & \dots & r(1, K) \\ 0 & 0 & r(2, 3) & \dots & r(2, K) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & r(K-1, K) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3.2 基于第二门限的目标强散射点位置相关检测算法

基于位置相关的第二门限检测方法的基本原理是, 不断地将集合 $\{IR_1, IR_2, \dots, IR_{K-1}\}$ 中的元素与目标的最大径向距离 LR 进行比较, 并设置计数器 IU_c (c 为可能的多个目标批次) 计数在 LR 的长度内属于第 c 个目标的可能散射点数。为了避免错检或漏检, 假设在 LR 距离内, 有一个散射点 i_k 与前 i_{k-1} , 后 i_{k+1} 两个散射点的距离都在 LR 内, 但 i_{k-1} 与 i_{k+1} 不在 LR 内, 这时, 我们判断 i_k 属于下列目标组:

$$\left. \begin{aligned} r(k-1, k) < r(k, k+1), & \text{ 则 } i_k \text{ 与 } i_{k-1} \text{ 属于同一目标组;} \\ r(k-1, k) > r(k, k+1), & \text{ 则 } i_k \text{ 与 } i_{k+1} \text{ 属于同一目标组.} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(9) 式的几何解释如图 3 所示。

² 角散射器、毁坏的人工目标(如坦克、装甲车等)金属碎片、山坡、水坑、树林等孤立强散射点引起的回波。通常, 杂波在 LR 内对应的强散射点个数明显少于目标对应的强散射点个数。

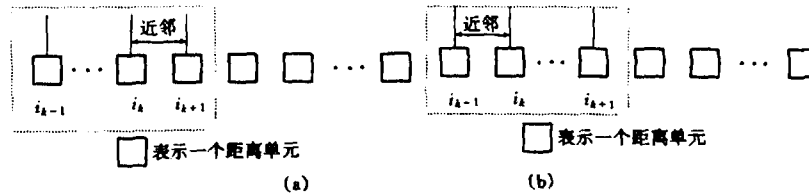


图3 相邻三个散射点的几何属性关系图

(a) i_k 与 i_{k+1} 同类 (b) i_k 与 i_{k-1} 同类

根据上面的原理, 一直比较、判断、计数到第 K 个散射点, 即得到 c 个可能的目标组, 然后, 设置第二门限 T_{h2} 为目标沿径向分布的散射点数, 一般在 $5 \sim 8$ 个左右。做如下判断: 若

$$IU_i \geq T_{h2}, \quad \text{则判别第 } i \text{ 批目标存在, } i = 1, 2, \dots, c \quad (10)$$

由此, 可得基于位置信息的距离段联合检测算法如表 1 所示^[5]。

表1 基于位置信息的距离段联合检测算法

基于第一门限的检测

- (a) 按 (1) 式, 从距离象幅度序列 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 中选择最大值 $x_{\max}$ 。
- (b) 选择确信系数 η , 按照 (2) 式建立第一门限 T_{h1} 。
- (c) 按 (3), (4) 式检测超过第一门限的散射点数 K , 并记录其对应的位置信息。

基于位置相关的第二门限检测

- (d) $j=1, k=2, c=1, IU_c = 1$, 根据目标的实际尺寸估计出第二门限 T_{h2} 。比较开始。
- (e) 若 $k < K$, 转 (f); 否则, 转 (g)。
- (f) 若 $r(j, k) < LR$, 则 $IU_c = IU_c + 1, k = k + 1$, 转回 (e); 否则, 转 (g)。
- (g) 若 $k > j + 1$, 转 (h); 否则, 转 (i)。
- (h) 若 $r(j, k-1) - r(j+1, k) < 0$, 则转 (i); 否则, $IU_c = IU_c - 1$, 转 (i)。
- (i) $j = \sum_{i=1}^c IU_i + 1, k = j + 1, c = c + 1$, 转回 (e)。
- (j) 若 $IU_c \geq T_{h2}$, 第 c 个目标出现; 否则, 目标没有出现。
- (k) 结束。

假设已经判断只有一个目标存在, 对应的判别规则为

$$c_m = \arg\{\max_c \{IU_c\}\}, \quad (11)$$

经过取变元运算后, c_m 代表所检测到的目标。同时, 目标在距离象上对应的位置信息也自然被检测出来。对于多目标的情况, 所检测到的目标批数 N_c 为

$$N_c = \arg\{IU_i > T_{h2}; i = 1, 2, \dots, c\}. \quad (12)$$

上面提出的基于位置信息的联合检测方法, 考虑了高分辨雷达多散射点 (类似于多目标) 之间的关联信息, 因而是一种有效的多目标检测方法。值得一提的是, 利用相关信息的自动检测是目标检测的一个新方向, 它试图模仿雷达操作员的视觉冗余性, 建立目标前后之间的相关联系来检测目标。目前, 引人注目的航迹相关技术, 就是一种利用目标多次扫描回波之间的相关信息来检测多目标的一种方法。随着高技术的进一步发展, 将来有可能将检测技术提高到雷达操作

员的水平^[5-7]。假设雷达作用距离量程内有 N 个距离单元, 目标沿径向对应的最大单元数为 L , 则目标沿径向可能出现的最大次数为

$$N_a = \text{int}[N/L - 0.5]. \tag{13}$$

式中, $\text{int}[\cdot]$ 表示对变量取整运算。在检测到目标信号后, 按照目标所分布的中心位置 (或强散射中心) 分别设置距离门 (宽度稍大于目标的最大径向距离), 来套住目标信号对应的距离象回波, 以用于后续分类和识别器。当然, 有可能的话, 还需要进行相干积累或视频积累以提高 S/N 比。

4 实验结果

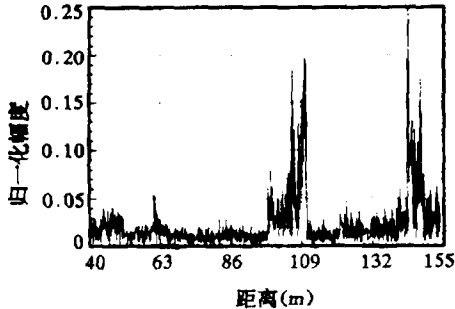


图 4 实测的回波距离象分布

根据上面所提出的新的 HRR 目标检测算法, 下面给出基于实测数据的实验结果。图 4 给出了实测的高分辨步进频率雷达对坦克目标所得回波距离象分布。由实测数据可得 $x_{\max} = 0.248$, 假设确信系数 $\eta = 0.5$, 则第一门限为 $T_{h1} = 0.124$ 。表 2 给出了经第一门限检测得到的 14 个可能的“点目标”, 及其对应的位置信息。

经第一门限检测到的散射点, 可转换为距离相关矩阵为

0.	1.99	2.99	3.16	3.65	4.15	4.32	37.2	37.4	37.4	38.5	38.9	41.4	41.5
0.	0.	0.997	1.16	1.66	2.16	2.33	35.2	35.4	35.5	36.5	36.9	39.4	39.5
0.	0.	0.	0.166	0.664	1.16	1.33	34.2	34.4	34.6	35.5	35.9	38.4	38.5
0.	0.	0.	0.	0.498	0.997	1.16	34.1	34.2	34.4	35.4	35.7	38.2	38.4
0.	0.	0.	0.	0.	0.498	0.664	33.6	33.7	33.9	34.9	35.2	37.7	37.9
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.166	33.1	33.0	33.4	34.4	34.7	37.2	37.4
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	32.9	33.1	33.2	34.2	34.6	37.0	37.
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.166	0.332	1.32	1.66	4.15	4.32
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.166	1.16	1.49	3.99	4.15
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.997	1.33	3.82	3.99
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.332	2.82	2.99
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.49	2.66
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.166
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.

(14)

表 2 图 5 中“目标”经第一门限 (η 取 0.5) 的检测结果

指标	序号													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
散射点序号 (距离单元)	414	426	432	433	436	439	440	638	639	640	646	648	663	664
散射点位置 (距离: m)	105.9	107.9	108.9	109.1	109.6	110.1	110.2	143.2	143.4	143.5	144.5	144.9	147.3	147.5
散射点幅度 (量化值)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

由此位置相关矩阵, 同样假设 $LR = 5.52m$, 使用表 1 所给的算法, 可将 14 个散射点分成两组, 即 $\{1,2,3,4,5,6,7\}$ 和 $\{8,9,10,11,12,13,14\}$ 。按照第二门限检测原理, 所得到的两组散射点皆为 7, 表示检测到两个目标。其中检测得到的状态分布如表 3 所示。

表 3 表 2 数据检测结果状态分布

组数	基元状态	变元状态	同组状态数
1	1	7	7
2	8	14	7

经上面的两个门限检测到目标信号后, 设置距离门分别套住目标信号即得两个目标对应的距离象分布, 如图 5 所示。

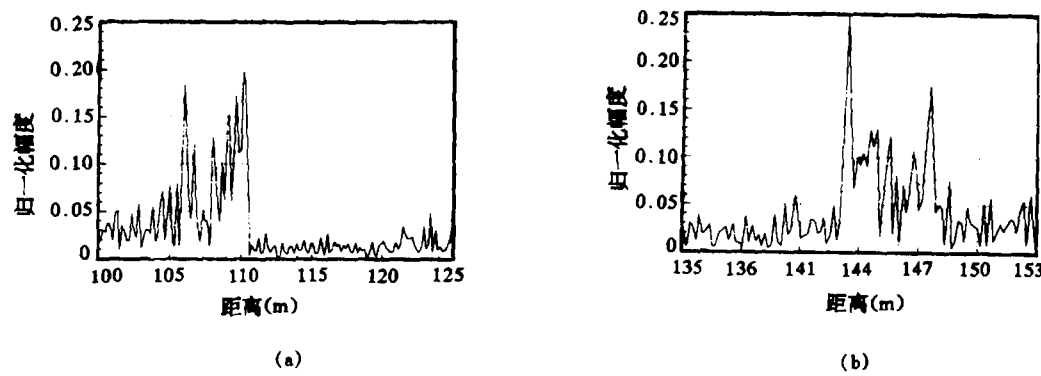


图 5 检测后在强散射点中心距离门内的回波距离象分布

(a) 被检测到的目标 1 回波距离象分布 (b) 被检测到的目标 2 回波距离象分布

由此可见, 该检测方法能够检测沿距离“走廊”上分布不同的扩展目标, 因此, 具有多目标检测的能力。而像丘陵, 水坑等杂乱脉冲干扰形成的假目标, 由于比真实目标的长度短, 因而, 不可能被当作真实目标检测出来。

5 结 论

本文研究了毫米波高分辨雷达目标信号的检测方法, 得出如下结论:

- (1) 毫米波高分辨雷达杂波的统计分布明显偏离瑞利分布, 且地杂波随地形结构的起伏而变化, 所以, 应该使用非参数检测方法, 特别是实时处理要求比较高的场合。
- (2) 对于高分辨雷达下扩展目标的检测问题, 应该使用扩展目标上多散射点前后之间的相关信息, 增强检测能力。

(3) 建立目标多散射点前后间的关联信息, 如航迹相关技术, 是目标检测的一个新的发展方向。

为此, 本文提出了基于位置信息的距离段联合检测器, 该检测器是一个双门限非参数检测器。通过实测数据证实, 该检测方法可以检测多个散射点的扩展目标, 对于存在杂乱脉冲干扰或多个扩展目标存在的情况, 该方法也能辨别假目标, 将距离“走廊”上不同的扩展目标完好地检测出来等优点。

参 考 文 献

- [1] Wehner D R. High Resolution Radar. Artech House, 1987.
- [2] Mensa D L. High Resolution Radar Imaging. Artech House, 1981.
- [3] 杰里 L, 伊伏斯等编, 卓荣邦等译. 现代雷达原理. 北京: 电子工业出版社, 1991.
- [4] Currie N C, Hayes R D, Trebits R N. Millimeter-Wave Radar Clutter. Boston, London: Artech House, 1992.
- [5] 黄德双. 反坦克导弹末制导雷达信号检测与识别技术的研究. 北京: 北京理工大学博士后研究报告, 1995.7
- [6] 黄德双, 毛二可, 韩月秋. 一种新的位置相关高分辨雷达目标检测方法. 《全国博士后科技成果展示及人才学术交流会议论文集》, 学苑出版社, 名誉主编: 蒋冠庄, 主编: 石伟, 北京: 1995.10, 205-209.
- [7] 保 铮, 吴顺君, 张玉洪. 雷达信号处理的新展望. 西安: 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室报告, 1993.
- [8] Brakat M, Himonas S D, Varshney P K. CFAR detection for multiple target situations. IEE Proc-F, 1989, 136(5):193-209.

A DETECTION METHOD OF HIGH RESOLUTION RADAR TARGETS BASED ON POSITION CORRELATION

Huang Deshuang Han Yueqiu*

(National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

*(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract This paper studies the problems which detect targets in the background clutters of millimeter-wave high resolution radar, and proposes a nonparametric detection method, which not only does less computation, but also is able to detect multiple extended targets along distance “corridor”, based on the position (range) correlation information of one-dimensional range images of high resolution radar targets. The experiments, based on real data of millimeter-wave stepped frequency high resolution radar, have certified that the method presented is a very effective detection strategy for multiple extended targets.

Key words Millimeter-wave, High resolution radar, One-dimensional range image, Position correlation, Nonparametric detection

黄德双: 男, 1964 年生, 博士后, 副教授, 主要从事信号处理、模式识别、神经网络方面的研究工作。
韩月秋: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理、图象分析及其应用研究。