

一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器

戴奉周 刘宏伟 吴顺君

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出一种高斯白噪声中的距离扩展目标检测器。实际目标的宽带雷达回波能量往往集中于若干距离单元中, 基于这一事实, 对检测窗内的回波数据按能量降序进行排列, 然后顺序进行能量积累和检测, 直到做出判决为止。文中详细推导了检测器的虚警概率, 给出了设置检测门限的方法。最后通过 Monte Carlo 实验, 利用两类特殊能量分布方式的距离像和一个实际目标的实测距离像, 对比分析了该文提出的基于顺序统计量的距离扩展目标检测器相对于能量积累检测器的性能。对于回波能量集中于少数距离单元的距离像, 该文提出的检测器比能量检测器具有更好的检测性能。

关键词: 目标检测; 距离扩展目标; 顺序统计量; 恒虚警率

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2488-05

Order-Statistic-Based Detector for Range Spread Target

Dai Feng-zhou Liu Hong-wei Wu Shun-jun

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A detector based on order statistic for range spread target in white Gaussian noise is derived in this paper. With the fact that the power of wideband radar target return is concentrated in several range bins, the data in the detection window is re-arranged in the order of energy decreasing, then the energy accumulation and detection is implemented in order, until the decision is made. The false alarm rate of the detector is derived and the method of threshold setting is proposed. Finally, the performance of proposed detector compared with that of the integration detector is given by Monte Carlo experiment, with two special energy distributing range profiles and a measured range profile of an actual target. For the range profiles that the energy of the return is concentrated in several range bins, the detector proposed in this paper has a better performance than the integration detector.

Key words: Target detection; Range spread target; Order statistic; Constant false alarm rate

1 引言

随着雷达技术的进步, 宽带雷达成为现代雷达发展的一个重要方向。相对于窄带雷达, 宽带雷达的优势体现在以下几个方面: (1)带宽的增加可以使雷达获得更多的目标信息, 实现雷达成像以及可靠的目标分类与识别; (2)可获得更加精确的目标参数测量; (3)具有更好的抗有源和无源干扰的能力; (4)具有更好的低截获性能。除此之外, 宽带雷达还具有更高的检测性能, 这主要基于以下两个方面的原因: (1)宽带雷达目标回波的起伏程度较小; (2)高距离分辨率降低了每个距离单元内的杂波功率^[1]。

近年来已有许多关于宽带雷达检测的论文发表, 这些工作主要集中在两个方面。一是在非高斯杂波环境中利用线性摆放的多个相参接收机接收到的目标回波, 或单个接收机得到的多次相参回波实

现宽带雷达目标检测^[1-3], 这些检测算法都对各距离单元的回波进行了能量积累。另一个方面的工作是针对单个距离像的检测算法, 如文献[4]中比较了能量积累和二进制积累两种检测器对不同目标距离像的检测性能, 并通过仿真得出结论: 如果 2/3 以上的回波能量集中在一个距离单元中, 则二进制积累检测器的性能较好, 否则能量积累检测器可获得较好的性能; 文献[5]在目标散射中心空域密度已知的假设下得到一种宽带雷达检测器, 并通过仿真结果说明它的性能比以上两种检测器更加稳健; 文献[6]中介绍了一种“对数-尺度”检测器, 通过对实测距离像检测的仿真结果表明该检测器的性能优于能量积累检测器; 文献[7]则给出了二进制积累检测器的理论分析; 文献[8]在目标距离像的概率分布已知的假设下推导了基于相邻两次回波互相关的最优检测器。在以上这些检测算法中, 能量积累检测器不需要利用目标距离像的先验知识而易于实现, 但在很多情况下存在较大的性能损失, 而包括二进制积

累检测器在内的其它检测算法虽然在一定程度上比能量积累检测器具有更好的检测性能，但是它们需要利用目标距离像的某些先验知识，而这在实际应用中往往是不可获得的。

本文针对单次回波的距离像检测问题提出了一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器——OS-RSTD(Order Statistic-Range Spread Target Detector)，该检测器与能量积累检测器一样，不需要利用任何目标距离像的其它先验信息，而理论分析和仿真实验都表明它比能量积累检测器具有更好的检测性能。文中还证明了该检测算法具有恒虚警性，并得到了检测门限与虚警概率的关系表达式。

2 基于顺序统计量的宽带雷达目标检测方法

宽带高分辨雷达的距离分辨率小于目标尺寸，因此目标回波将分布在多个距离单元内形成一维距离像，此时目标称为距离扩展目标。若要对目标的可靠检测，需要利用目标回波的全部能量，根据检测理论可知，如果已知目标的距离像，那么对目标距离像进行匹配滤波可以获得最大输出信噪比从而实现最优检测；但实际上目标的距离像往往是不可预知的，并且随着目标姿态和雷达视角的不断变化，它的距离像也在剧烈变化，因此需要用次优的方法将目标回波中各距离单元的能量积累起来。能量积累和二进制积累就是两种常用的方法。如果目标回波的能量均匀分布在各距离单元内，那么能量积累相对于匹配滤波处理的信噪比损失是无法得到改善的；但根据目标的散射中心模型，在准光学区，目标模型可以被近似看作是有限多个局部散射点构成的，因而，实际的目标距离像通常只有少数距离单元具有较强的回波能量^[1]。这时如果使用能量积累，低信噪比距离单元引入的噪声能量可能要大于目标回波，因此只将目标回波较强的距离单元中的回波能量积累反而可以获得更好的检测性能，二进制积累就是这样一种方法，但是在设定二进制积累检测的第二门限时，必须已知目标距离像有几个距离单元具有较强的回波能量，否则二进制积累检测器的检测性能将会严重下降。为解决以上问题，本文设计了一种基于顺序统计量的距离扩展目标检测器 OS-RSTD。

设目标回波在连续的 L 个径向距离单元内，经过正交采样和数字脉冲压缩后得到的复距离像为 $\tilde{s}_l, l = 1, \dots, L$ 。假设各距离单元内的噪声独立同分布，是 0 均值复高斯随机变量，记为 $\tilde{n}_l, l = 1, \dots, L$ 。设 x_l 为第 l 个距离单元的输入值，则检测问题为

$$\left. \begin{aligned} H_1 : \tilde{x}_l &= \tilde{s}_l + \tilde{n}_l, \quad l = 1, \dots, L \\ H_0 : \tilde{x}_l &= \tilde{n}_l, \quad l = 1, \dots, L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对各距离单元的输入量分别做平方检波得到 $y_l = |\tilde{x}_l|^2, l = 1, \dots, L$ ，将 y_l 按照从大到小的顺序重新排列，得到一组新的序列： $y_{(1)} \geq y_{(2)} \geq \dots \geq y_{(L)}$ ，即 $y_{(i)}$ 是 y_1, \dots, y_L 中第 i 大的值。将 $y_{(1)}, \dots, y_{(L)}$ 重新记为 z_1, \dots, z_L 。

假设除了以上的 L 个检测单元外，还可得到不含目标回波的 L_s 个参考单元的数据，参考单元与检测单元具有相同的噪声功率。参考单元用于估计噪声能量，设估计量为 $a = \sum_{l=L+1}^{L+L_s} |\tilde{x}_l|^2$ 。

令 $t_1 = z_1$ ， Th_1 是根据指定的虚警概率设定的检测门限，根据似然比检验准则，如果 $t_1/a \geq Th_1$ ，则判 H_1 成立；否则令 $t_2 = z_1 + z_2$ ，并将 t_2/a 与 Th_2 比较；随着判决过程的继续，依次将检测单元中能量最强的 i 个距离单元的回波进行能量积累，得到 $t_i = \sum_{l=1}^i z_l$ ，并形成检验统计量 t_i/a ，与相应的判决门限 Th_i 比较，直到做出 H_1 成立的判决为止；如果直到 $i = L$ ， t_i/a 仍然未超过相应的检测门限 Th_L ，则最后做出 H_0 成立的判决。检测过程如图 1 所示。

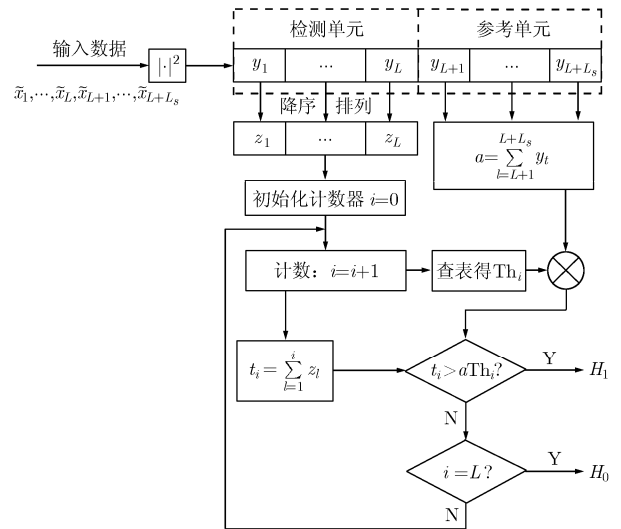


图 1 OS-RSTD 的实现流程

3 虚警概率的计算与检测门限设定

根据以上对本文提出的检测器的算法分析，OS-RSTD 的虚警概率可以表示为

$$P_{fa} = P[t_1 \geq aTh_1 | H_0] + P[(t_1 < aTh_1) \cap (t_2 \geq aTh_2) | H_0] + \dots + P[(t_1 < aTh_1) \cap (t_2 < aTh_2) \cap \dots \cap (t_{L-1} < aTh_{L-1}) \cap (t_L \geq aTh_L) | H_0] \quad (2)$$

为了方便接下来的计算，将式(2)重写为

$$\begin{aligned}
 P_{fa} &= P[t_1 \geq aTh_1 | H_0] + \{P[t_1 < aTh_1 | H_0] \\
 &\quad - P[(t_1 < aTh_1) \cap (t_2 < aTh_2) | H_0]\} + \dots \\
 &\quad + \{P[(t_1 < aTh_1) \cap (t_2 < aTh_2) \cap \dots \cap (t_{L-1} \\
 &\quad < aTh_{L-1}) | H_0] - P[(t_1 < aTh_1) \cap (t_2 < aTh_2) \\
 &\quad \cap \dots \cap (t_L < aTh_L) | H_0]\} = 1 - P[(t_1 < aTh_1) \\
 &\quad \cap (t_2 < aTh_2) \cap \dots \cap (t_L < aTh_L) | H_0] \quad (3)
 \end{aligned}$$

从式(3)可知, 检测器的虚警概率是由 $Th_i, i = 1, \dots, L$ 确定的。由于待检测的目标距离像是未知的, 所以一种直接的选择 Th_i 的方法是使得检测过程顺序进行时每一次单独检测的虚警概率都相等。记第 i 次单独检测的虚警概率为 $P_{sfa,i}$, 它可以表示为

$$P_{sfa,i} = P[t_i \geq aTh_i | H_0] \quad (4)$$

设各距离单元的噪声是方差为 σ^2 的 0 均值复高斯噪声, 则在 H_0 假设下 $y_l, l = 1, \dots, L$ 的概率密度函数为

$$f_{Y_l}(y_l) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2} e^{-(y_l/\sigma^2)}, & y_l \geq 0 \\ 0, & y_l < 0 \end{cases} \quad (5)$$

即 y_l 服从参数为 $\mu = \sigma^2$ 的指数分布。因此参考单元数据的功率和 a 是 L_s 个统计独立的参数为 μ 的指数分布随机变量之和, 其概率密度函数为

$$f_A(a) = \frac{1}{\mu^{L_s} (L_s - 1)!} a^{L_s-1} e^{-a/\mu} \quad (6)$$

检测单元的排序过程使得 t_i 在 H_0 假设下的分布变得较为复杂。为了得到更为一般化的结论, 我们讨论 $L \geq 3$ 时的情况。 t_i 的概率密度函数为

$$f_{T_i}(t_i) = \begin{cases} (L/\mu)(1 - e^{-(t_i/\mu)})^{L-1} e^{-(t_i/\mu)}, & i = 1 \\ (1/\mu)^i \binom{L}{i} \frac{e^{-(t_i/\mu)}}{(i-2)!} \int_0^{t_i} (1 - e^{-(t_i/\mu)})^{L-i} \\ \cdot (t_i - x)^{i-2} dx, & 2 \leq i \leq L-1 \\ (1/\mu)^L \frac{e^{-(t_i/\mu)}}{(L-1)!} t_i^{L-1}, & i = L \end{cases} \quad (7)$$

$P_{sfa,i}$ 是由 $f_A(a)$ 和 $f_{T_i}(t_i)$ 决定的, 计算式如下:

$$P_{sfa,i} = \int_0^{+\infty} f_A(a) \int_{aTh_i}^{+\infty} f_{T_i}(t_i) dt_i da \quad (8)$$

将以上得到的 a 和 t_i 的概率密度函数分别代入式(7)可得

$$P_{sfa,i} = \begin{cases} 1 - \sum_{k=0}^L (-1)^k \binom{L}{k} (1 + kTh_i)^{-L_s}, & i = 1 \\ P_1 + P_2 + P_3, & 2 \leq i \leq L-1 \\ \sum_{k=0}^{L-1} \binom{L_s + k - 1}{k} (Th_i)^k (Th_i + 1)^{-L_s - k}, & i = L \end{cases} \quad (9)$$

式中

$$P_1 = \binom{L}{i} \sum_{k=0}^{i-1} \binom{L_s + k - 1}{k} (Th_i)^k (1 + Th_i)^{-L_s - k}$$

$$P_2 = \binom{L}{i} \sum_{j=1}^{L-i} \binom{L-i}{j} (-1)^{j+1-i} \frac{i}{i+j} \left(\frac{i}{j}\right)^{i-1} \cdot \left(\frac{i + (j+1)Th_i}{i}\right)^{-L_s}$$

$$P_3 = \binom{L}{i} \sum_{j=1}^{L-i} \binom{L-i}{j} \sum_{m=0}^{i-2} (-1)^{j-i+m} \left(\frac{i}{j}\right)^{i-1-m} \cdot \sum_{p=0}^m \binom{L_s + p - 1}{p} (Th_i)^p (1 + Th_i)^{-L_s - p}$$

从式(9)可以看出, $P_{sfa,i}$ 与噪声功率的真值无关, 因此每次单独检测都是恒虚警的, 而检测器的总虚警概率 P_{fa} 又是由 $Th_i, i = 1, \dots, L$ 确定的, 所以检测器 OS-RSTD 也具有恒虚警的性质。

根据式(3), 计算 OS-RSTD 的虚警概率 P_{fa} 可以转换为计算以下概率:

$$\begin{aligned}
 &P[(t_1 < aTh_1) \cap (t_2 < aTh_2) \cap \dots \cap (t_L < aTh_L) | H_0] \\
 &= \int_0^{+\infty} \frac{a^{L_s-1} e^{-\frac{a}{\mu}}}{\mu^{L_s} (L_s - 1)!} \iint \dots \int_{\Omega} L! \left(\frac{1}{\mu}\right)^L e^{-\sum_{k=1}^L \frac{z_k}{\mu}} \\
 &\quad \cdot dz_L dz_{L-1} \dots dz_2 dz_1 da \quad (10)
 \end{aligned}$$

因为顺序检测时每次单独检测的虚警概率都相等, 所以各次单独检测的门限满足不等式关系: $Th_L > Th_{L-1} > \dots > Th_2 > Th_1$, 由此可以确定式(10)中的积分区间为

$$\begin{aligned}
 \Omega &= \left\{ (0, aTh_1) \cap (0, aTh_2 - t_1) \cap \dots \cap \left(0, aTh_L - \sum_{k=1}^L t_k\right) \right. \\
 &\quad \left. \cdot \cap (z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_L) \right\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

将式(10)的积分结果代入到式(3)中得到 OS-RSTD 的虚警概率为

$$\begin{aligned}
 P_{fa} &= 1 - L! \left[1 - \sum_{k=1}^L \binom{L_s + k - 2}{L_s - 1} (1 + Th_k)^{-L_s - k + 1} \right. \\
 &\quad \left. \cdot g_k(Th_1, \dots, Th_k) \right] \quad (12)
 \end{aligned}$$

式中 $g_k(Th_1, \dots, Th_k)$ 是 Th_1, \dots, Th_k 的 k 次多项式。

通过以上对虚警概率的分析可知, OS-RSTD 的虚警概率是由顺序检测时各次单独检测的门限确定的, 而这些门限又是由各次单独检测的虚警概率求得的, 因此也可以认为 P_{fa} 是由 P_{sfa} 确定的。图 2 给出了参考单元的长度 $L_s = 8L$ 时, 不同检测单元长度对应的 P_{fa} 和 P_{sfa} 的关系曲线。

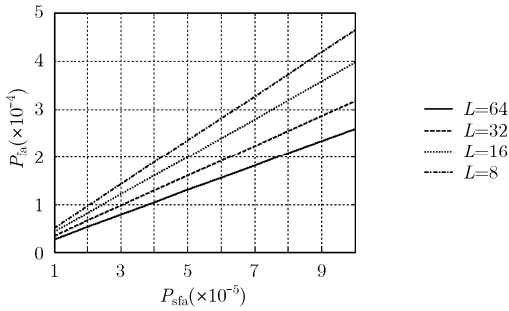


图 2 P_{fa} 与 P_{sfa} 的关系曲线

4 计算机仿真实验

本小节将通过一组 Monte Carlo 实验来比较 OS-RSTD 和能量积累检测器对不同类距离像的检测性能。根据 OS-RSTD 的检测流程来看，当距离像长度一定时，回波能量集中在越少的距离单元中，检测性能就越好，反之检测性能越差。这是因为回波能量越集中，顺序检测的次数就越少，加入的噪声分量也就越低。本文定义两类特殊的距离像：第 1 类为回波能量完全均匀地分布在各个距离单元内；第 2 类为全部回波能量集中于 1 个距离单元内。参考单元的长度 $L_s = 8L$ ，虚警概率设为 $P_{fa} = 10^{-4}$ ，信噪比定义为目标回波能量与噪声功率之比，即 $ENR = \sum_{l=1}^L |s_l|^2 / \sigma^2$ 。在每个信噪比下做 10000 次独立实验。

仿真实验 1 OS-RSTD 和能量积累检测器对第 1 类距离像的检测性能比较

首先根据 P_{fa} 和 P_{sfa} 的关系确定对于不同长度的距离像，在 $P_{fa} = 10^{-4}$ 时的 P_{sfa} ，并根据 P_{sfa} 求得检测门限，如表 1 所示：

表 1 $P_{fa} = 10^{-4}$ 时 P_{sfa} 的取值

| L | 8 | 16 | 32 | 64 |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| P_{sfa} | 3.8415×10^{-5} | 3.0874×10^{-5} | 2.4654×10^{-5} | 2.0890×10^{-5} |

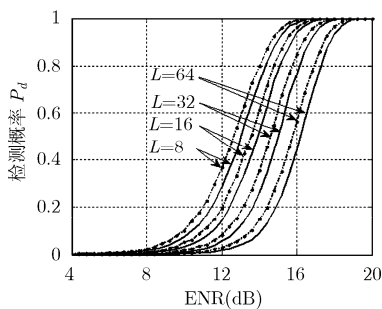


图 3 对第 1 类目标

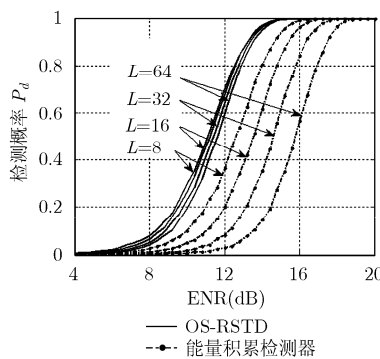


图 4 对第 2 类目标

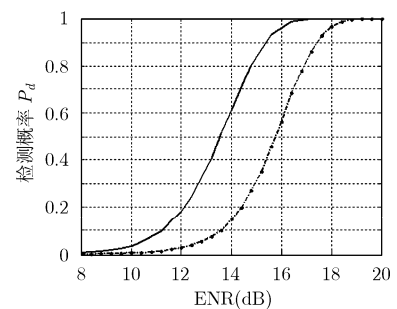


图 5 对“奖状”飞机

图 3 给出了当距离像长度分别为 8, 16, 32 和 64 时，OS-RSTD 和能量积累检测器对第 1 类距离像的检测性能曲线。

从图 3 中可以看出，对于第 1 类距离像，OS-RSTD 的检测性能相对于能量积累检测器略有下降，这是由于 OS-RSTD 在检测时的 L 次顺序检测增加了虚警概率从而提高了检测门限所引起的。对于不同长度的距离像下降程度变化不大，在检测概率为 90% 处约为 0.3 dB。

仿真实验 2 OS-RSTD 和能量积累检测器对第 2 类距离像的检测性能比较

图 4 给出了当距离像长度分别为 8, 16, 32 和 64 时，OS-RSTD 和能量积累检测器对第 2 类距离像的检测性能曲线。

从图 4 中可以看出，对于第 2 类距离像，OS-RSTD 相对于能量积累检测器有较大增益，并且随距离像长度的增加而增加，在检测概率为 90% 处， $L=64$ 时增益为 4 dB， $L=32$ 时增益为 3 dB， $L=16$ 时增益为 2.2 dB， $L=8$ 时为 1.4 dB。

仿真实验 3 OS-RSTD 和能量积累检测器对实测目标距离像的检测性能比较

在这个仿真实验中，采用了“奖状”飞机的 400 MHz 带宽雷达实测距离像，在观测期间飞机相对雷达转过了 720° 。由于信噪比很高，因此可以近似认为回波中不含噪声。从所有回波中抽取了 1000 次回波，并设距离像的窗长为 64 个距离单元。将这 1000 次回波分别用 OS-RSTD 和能量积累检测器进行检测，然后将它们的检测概率平均，结果在图 5 中给出。

从图 5 中可以看出，在检测概率为 90% 处，OS-RSTD 较能量积累检测器有大约 2 dB 左右的增益。

5 结论

本文在分析了宽带雷达目标回波特点的基础上，提出了一种基于顺序统计量的距离扩展目标检

测器 OS-RSTD。在以往的研究工作中,通过对大量实际目标的实测回波分析发现,目标的能量只集中于少数几个距离单元中,因此如果使用能量积累检测器会降低检测性能,而其它一些改进的宽带雷达检测器又需要利用目标回波中强散射单元的个数这一先验信息,而这在实际中往往是不可获得的。OS-RSTD 首先对含噪的目标距离像按能量进行降序排列,然后顺序进行能量积累和检测,直到做出判决为止。理论分析和仿真实验表明,对于能量集中于少数距离单元的宽带雷达目标,OS-RSTD 相比于能量积累检测器具有更好的检测性能,而且不需要利用目标距离像的先验信息。

本文只是提出了 OS-RSTD 这样一种宽带雷达目标检测器,并对其做了基本的理论分析和仿真实验,进一步的工作还包括以下 3 个方面。(1)在设计 OS-RSTD 的检测门限和顺序检测长度时,假设目标的距离像的能量分布是完全任意的,因此设每次单独检测的虚警概率都相等,而顺序检测的长度等于目标距离像的长度。但是正如文中分析的,实际目标的回波能量只集中于少数距离单元内,利用这一较宽的先验信息,优化设计 OS-RSTD 的检测门限和顺序检测长度,可以改善其检测性能;(2)在实际的雷达应用中,目标检测往往是在对多次回波进行相参或非相参积累后进行的,而本文只是研究了单次回波的检测问题。进一步的工作需要将 OS-RSTD 推广到多次回波的检测中;(3)相对于窄带雷达,宽带雷达的检测优势主要体现在杂波环境中,而本文只是研究了在最简单的高斯白噪声中的检测问题,因此,将 OS-RSTD 推广到杂波环境中更具实际意义。

参 考 文 献

- [1] Conte E, De Maio A, and Ricci G. GLRT-Based adaptive detection algorithms for range-spread targets[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(7): 1336-1348.
 - [2] Bandiera F, De Miao A, Stefano A, and Ricci G. Adaptive radar detection of distributed targets in homogenous and partially homogeneous noise plus subspace interference[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(4): 1223-1237.
 - [3] Bon N, Khencharf A, and Garelo R. GLRT subspace detection for range and doppler distributed targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2008, 44(2): 678-696.
 - [4] Hughes P K. A high-resolution radar detection strategy[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1983, 19(9): 663-667.
 - [5] Gerlach K and Steiner M J. Adaptive detection of range distributed targets[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(7): 198-200.
 - [6] Orlenko V M and Shirman Y D. Non-coherent integration losses of wideband target detection[C]. First European Radar Conference, Amsterdam, 2004: 225-228.
 - [7] 孟祥伟, 曲东才, 何友. 高斯背景下距离扩展目标的恒虚警率检测[J]. *系统工程与电子技术*, 2005, 27(6): 1012-1015.
 - [8] Ghahramani M, Mohseni R, Sheikhi A, and Saeimanesh F. Optimum two-pulse UWB detector for different target fluctuation models[C]. International Conference on Radar, Adelaide, 2008: 355-359.
- 戴奉周: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为宽带雷达信号处理。
 刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室主任, 研究方向为自适应信号处理、雷达信号处理、雷达目标识别等。
 吴顺君: 男, 1942 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统、雷达信号处理。