

特征信号检测法

宋柳平 孙仲康

(电子技术系)

摘要 本文以信号极点的不变性为基础,构造了一种用于可自设计的主动式系统在强噪声背景下的极微弱信号检测的检测器——特征信号检测器。文章在分析经典检测方法对极弱信号检测存在的问题的基础上,提出了特征信号检测的思想。讨论了该方法的基本原理及仿真实验结果。Monte carlo 实验表明,这种特征信号检测器的性能对信噪比不敏感,可以在极低信噪比下检测出微弱信号。

关键词 信号处理,特征信号,特征信号检测器,极点,信噪比

分类号 TN911.23

随着空间电子技术、电子对抗和反对抗的不断发展,尤其是隐身技术的发展,对雷达检测系统提出了一个不可避免的问题:在强噪声背景下如何尽早发现远距的或隐身的目标?在反隐身雷达系统中,噪声成为主要的干扰源。噪声背景下的微弱信号检测是一个亟待解决的关键问题。极低 SNR 条件下的信号检测是一个十分困难的问题。传统的检测方法(参量检测、非参量检测、稳健检测、模糊检测)基本上都是建立在统计能量检测的基础之上,也就是说都是在某个“最佳”准则意义下得到的检测器,而这种“最佳”是在统计平均意义下的“最佳”。统计平均必然意味着噪声的影响成为不可忽视的问题。因此,经典检测器所得到的结果都隐含着共同的本质:

$$D(\text{SNR}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \text{TH}(\text{SNR}) \quad (1)$$

$$P(\text{SNR}) = F(\text{SNR}) \quad (2)$$

式中 $D(\cdot)$ 代表检测统计量, $\text{TH}(\cdot)$ 代表判决门限, $P(\cdot)$ 代表性能测度量, $F(\cdot)$ 代表某函数,以上四个量均为 SNR 的函数。

(1), (2) 式表明,检测器的性能取决于信号的能量而与信号的波形无关,经典检测器没有完全利用信号整体波形的特征信息,其性能完全取决于 SNR。这就导致了经典检测器对于极低 SNR 条件下的检测性能很差。作者认为:如果要真正解决极微弱信号的检测问题,就得抛弃统计平均的能量检测的出发点而寻求其它途径。所要设计的检测器应达到以下性能要求:(1) 当 SNR 高时它具有最佳或次最佳的检测性能。(2) 当 SNR 变化小时检测性能也应变化小或不变。(3) 当 SNR 极低时,检测性能也不应变化很多。

考虑到人脑对于图象、语声中特定对象的检测往往是采用特征量进行的,本文提出

了一种以特征信号为基础的极弱信号检测技术，它适合于主动式电子设备。

1 特征信号检测的基本原理

1.1 检测问题的转化

要想实现引言中提出的检测器的三项性能，须寻求信号与噪声的本质区别，找出区别于噪声的信号的固有特征量。这是特征信号检测的关键。

设雷达接收信号模型如下式：

$$H_1: x(t) = y(t) + n(t) \quad (3a)$$

$$H_0: x(t) = n(t) \quad (3b)$$

式中 $y(t)$ 是无噪信号， $n(t)$ 是任意分布的噪声。经典的检测问题是：由 $(0, T)$ 时间内的观测信号 $x(t) (t \in [0, T])$ ，根据统计最佳准则判断假设检验 H_0 或是 H_1 成立。

由于具有有理函数的拉氏变换的信号能包容极广泛的一类信号，工程上的信号基本上能满足此条件，不失一般性，设观测信号能展开成以下拉氏变形式。这也是对背景噪声特性的唯一先验要求。

$$X(s) = K \prod_{m=0}^M (S - z_m) / \prod_{l=0}^L (S - P_l) \quad (4)$$

式中 z_m 表示信号的零点， P_l 表示信号极点。

若接收信号 $x(t)$ 由信号分量加噪声分量组成，由拉氏变换的线性迭加性知，其极点必然包含有信号的极点。因此可以写成：

$$X(s) = CF(s) / \prod_{l=0}^L (s - P_l) \quad (5)$$

式中 $F(s)$ 取决于信号 $y(t)$ 的零点及噪声 $n(t)$ 的零、极点。

拉氏变换具有以下优良的性质：

(1) 时延特性

$$L(x(t - t_0)) = e^{-s_0} X(s) \quad (6)$$

(2) 卷积特性

$$L(x(t) * y(t)) = X(s) \cdot Y(s) \quad (7)$$

这就保证了对于诸如雷达等主动式系统，假如发射信号的极点与所通过的线性系统的零点不相对消，则经过空间传播的衰减、时延以及经过线性系统后仍能保存原始发射信号的极点。这也是本文以下讨论的基本假设。至于发射信号的极点与所通过的线性系统的零点相对消的情况，可以根据实际的系统函数通过发射信号的设计而消除。此外，雷达信号的极点还不依赖于雷达的取向和极化。因此，我们可以利用发射信号的极点作为检测的特征，而发射信号的极点又可以预先人为设计（可自设计系统），这就使得特征检测方法更具灵活性。

这样信号检测问题就可以转化为：对 $(0, T)$ 时间内接收的信号 $x(t)$ 提取极点并与预设的发射信号极点相比较，由此决定是否接受假设检验 H_1 。

从理论上讲，只要噪声的极点没有完全污染信号极点，且能根据接收信号提取出信号的极点，就有 100% 的检测概率，而检测器的性能与 SNR 之间无必然的显式关系。通

常噪声的影响只是导致接收信号极点在原始信号极点周围摆动形成一个中心分布的极点集。SNR 的高低只决定了接收信号拉氏变换的零点和极点的留数，即影响对纯信号的恢复或对信号谱估计的精度。

1.2 提取极点的改进型 Prony 算法

经典的 Prony 算法是一种无噪模型的拟合问题。以下采用一种改进的 Prony 方法提取含噪信号的极点。

设在 $(0, T)$ 时间内接收信号 $x(t)$ 的点数为 N 的采样序列 $\{x(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ ，其对应的估计序列为 $\{\hat{x}(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 。如果该序列具有 P 个极点则可以表示成如下形式：

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^P b_m z_m^n \quad (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (8)$$

其中
$$b_m = A_m \exp(j\theta_m), \quad z_m = \exp(\alpha_m + j\omega_m) \quad (9)$$

显然，要想由 $\{x(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 求出 b_m, z_m ，必须满足条件： $P \leq \frac{N}{2}$ 。这实质上是用衰减正弦振荡之和来逼近接收信号。以下以最小均方误差为准则求 b_m 和 z_m ($m=1, 2, \dots, P$)。即变化 b_m 和 z_m 使其满足：

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

(10)式是一个非线性最小均方问题。其求解非常复杂，为此利用以下变化来解决这一问题。

定义多项式

$$\psi(z) = \prod_{k=1}^P (z - z_k) = \prod_{i=0}^P a_i z^{P-i} \quad (11)$$

(11)式以 $z_k (k=1, 2, \dots, P)$ 为其根，展开式系数为 $a_i (i=1, 2, \dots, P)$ ，且假设系数已规整（即 $a_0=1$ ）由(8)式知

$$\hat{x}(n-m) = \prod_{i=1}^P b_i z_i^{n-m} \quad (0 \leq n-m \leq N-1) \quad (12)$$

对上式两边乘以 a_m 并对 m 在 0 到 P 范围内求和知

$$\sum_{m=0}^P a_m \hat{x}(n-m) = \sum_{i=1}^P b_i \left\{ \sum_{n=0}^P a_m z_i^{n-m} \right\} \quad (P \leq n \leq N-1) \quad (13)$$

使用析项法知

$$\sum_{m=0}^P a_m \hat{x}(n-m) = \left(\sum_{i=1}^P b_i z_i^{n-P} \right) \left(\sum_{m=0}^P a_m z_i^{P-m} \right) \quad (14)$$

利用(11)式知，上式右端为零，故

$$\sum_{m=0}^P a_m \hat{x}(n-m) = 0$$

即

$$\hat{x}(n) = - \sum_{m=1}^P a_m \hat{x}(n-m) \quad (P \leq n \leq N-1) \quad (15)$$

定义 序列 $\{x(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 由其估计序列 $\{\hat{x}(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 加上误差序列 $\{e(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 组成:

$$x(n) = \hat{x}(n) + e(n) \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (16)$$

将(16)式代入(15)式得:

$$\begin{aligned} x(n) &= -\sum_{m=1}^P a_m \hat{x}(n-m) + e(n) \\ &= \sum_{m=0}^P a_m x(n-m) + \sum_{m=0}^P a_m e(n-m) \quad (P \leq n \leq N-1) \end{aligned} \quad (17)$$

定义
$$\epsilon(n) = \sum_{m=0}^P a_m e(n-m) \quad P \leq n \leq N-1 \quad (18)$$

则
$$x(n) = -\sum_{m=1}^P a_m x(n-m) + \epsilon(n) \quad (19)$$

由(19)式解出 $a_m (m=1, 2, \dots, P)$ 实质上是一个 AR 过程求系数和定阶的问题, 可用 burg 算法或其它通常的求解 AR 模型系数和定阶的方法解决。另外, (19)式还隐含着更深刻的意义: 对于白噪声序列, 显然由以上过程求出的应是一个零阶的 AR 过程, 理论上提取的结果, 应是没有极点。也就是说改进型 Prony 算法抛弃了由于随机噪声引起的极点而只提取了与信号有关的极点。对于色噪声可能会得到一些噪声极点, 但只要这些极点与信号极点不重叠, 其对检测器的性能无影响。实验表明, 对纯噪声用改进型的 prony 法提出的是一个无规律的较低阶的 AR 模型。而对于信号加噪声组成的复合信号提取极点的结果是一个极点分布于真实信号极点周围的一个较高阶的 AR 模型。因此, 从特征检测这个意义上讲, 改进的 Prony 算法具有抗噪能力。

由(19)式求系数 $a_m (m=1, 2, \dots, P)$ 以后代入到(11)式, 解高阶方程即可求出序列 $\{\hat{x}(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 的 P 个极点: z_1, z_2, \dots, z_P 。

1.3 特征信号检测算法的基本步骤

由以上分析可以构造出检测算法:

(1) 对已知信号序列 $\{y(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 利用改进型 Prony 方法提取极点。设结果为 z_1, z_2, \dots, z_P 。

(2) 对接收信号序列 $\{x(n) | n=0, 1, \dots, N-1\}$ 利用改进型 Prony 方法提取极点。设结果为 z'_1, z'_2, \dots, z'_P 。

(3) 对两种信号的极点进行比较, 求出它们之间的汉明距离作为匹配的度量量。即对于发射信号的所有极点 $z_i (i=1, 2, \dots, P)$ 选取接收信号的极点 z'_1, z'_2, \dots, z'_P 中与之最近者进行匹配, 且在 z'_1, z'_2, \dots, z'_P 中已参加过匹配的点不再参加以后的匹配。若 $P' < P$ 则发射信号中未匹配的 $P-P'$ 个极点 $z_{P'}, z_{P'+1}, \dots, z_P$ 均与复平面的 0 点相匹配。

(4) 设置门限, 由求出的距离进行门限判决。

2 统计仿真实验及结果的讨论

实验 1 仿真信号: $x(n) = y(n) + \Delta(n)$ (20)

式中 $\Delta(n)$ 为 0 均值, 高斯分布的噪声信号的采样值。无噪声信号为

$$y(n) = \exp\{-2\Delta T n\} \sin(4\pi\Delta T n) \quad (21)$$

无噪声信号的极点:

$$\begin{cases} S_1 = -2.0 + j4\pi \\ S_2 = S_1^* = -2.0 - j4\pi \end{cases}$$

取样点数: $N=40$;

取样率: $f_s=40\text{Hz}$; $\Delta T=1/f_s$.

定义
$$\text{SNR} = 10\log\left\{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)}{\sum_{n=0}^{N-1} \Delta^2(n)}\right\} \quad (22)$$

每种 SNR 下的实验次数: $M=100$.

实验 2 由于实际系统中目标特性不同, 对应的系统函数亦不同。本实验是为了验证在假设接收信号保持了原始发射信号极点的条件下特征信号检测器的有效性, 因此任意假定了一个零点不与发射信号极点对消的系统函数。

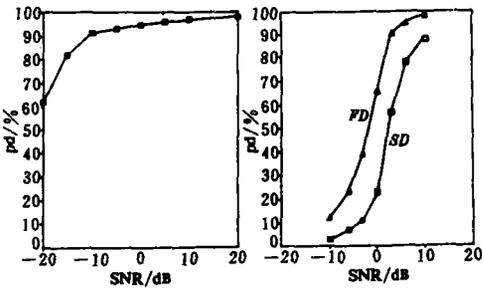


图 1

图 2

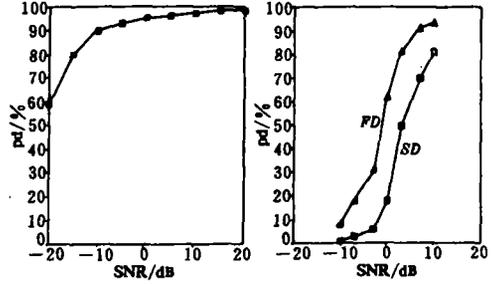


图 3

图 4

仿真信号: $x(n) = z(n) + \Delta(n)$ (23)

无噪接收信号: $z(n) = y(n) * h(n)$ (24)

式中 $\Delta(n)$ 为 0 均值, 高斯分布的噪声的采样值, $x(n)$ 是接收信号采样值, $h(n)$ 为系统函数采样值。无噪信号为

$$y(n) = \exp\{-2\Delta T n\} \sin(4\pi\Delta T n) \quad (25)$$

无噪信号的极点:

$$s_1 = -2.0 + j4\pi; s_2 = s_1^* = -2.0 - j4\pi$$

无噪接收信号: $z(n) = [\exp\{-2\Delta T n\} \sin(4\pi\Delta T n)] * [\exp\{-4.0\Delta T n\} \sin(2\pi\Delta T n)] \alpha$ (26)

无噪接收信号的极点:

$$\begin{cases} s_1 = -2.0 + j4\pi; s_2 = s_1^* = -2.0 - j4\pi \\ s_3 = -4.0 + j2\pi; s_4 = s_3^* = -4.0 - j2\pi \end{cases}$$

衰减系数: $\alpha=0.96$

取样点数: $N=40$

取样频率: $f_s=40\text{Hz}; \Delta T=1/f_s$.

SNR 定义同(22)。在每种 SNR 下的实验次数: $M=100$ 。

图 1、图 3 分别示出了实验 1、2 的特征信号检测器的检测概率随 SNR 的变化曲线, 在所有 SNR 情况下均采用固定门限使所进行的实验中不发生虚警。显见检测性能对 SNR 极不敏感, 基本上达到了引言中提出的对微弱信号检测器的三项要求。实验中所统计出的检测性能是在最保守的情况下得出的, 即在改进型 Prony 算法提取极点的过程中, 在解高阶方程时迭代 1000 次仍不能以 10^{-4} 的误差收敛的情况下, 不进行判决而直接认为是错判。实际上, 在所有实验中将这些中间结果用于判决全部都判对。图 2、图 4 给出了在虚警率为 10^{-4} 条件下的经典统计检测器和模糊检测器对同一组数据的检测性能曲线。由实验 1 及实验 2 的结果比较可以看出经线性系统以后特征信号检测器的性能仅在极低 SNR 时略有下降, 而模糊检测器和统计检测器的性能下降较为明显。更重要的是在极低 SNR 条件下, 特征信号检测器具有明显的优越性。若采用扩阶抗噪技术、自适应门限技术、相关积累技术可望达到更高的性能指标。此外作者还对四极点和八极点的发射信号进行了仿真实验。在以上各种情况下检测性能对于 SNR 都具有稳健性。

3 结束语

本文所提出的特征信号检测器适用于可自设计的主动式设备, 具有以下潜在的应用领域: (1) 对各种隐身飞行器在强噪声干扰背景下的检测; (2) 对远程警戒雷达极早发现目标; (3) 设备的低发射功率的可能性 (尤其对于空间飞行器); (4) 通信中的弱信号检测; (5) 对后续的利用目标极点的识别技术有利。

由于该方法对噪声的统计特性 (概率分布和功率谱密度) 没有严格的要求, 因而它本质上属于非参量方法, 具有稳健性和普遍性。作者认为, 目前雷达发射信号的波形设计理论在利用信号极点特征进行检测和利用目标极点进行识别这个意义上讲并非尽善尽美。应该指出: 本文的工作还只是初步的, 仍然存在一些工作须进一步完成, 如(1) 进一步研究信号波形的选择, 使其极点位置最不易受噪声污染; (2) 寻求更好的抗噪提极点的算法; (3) 算法的快速实现。进一步优化算法及在高速信号处理器或其它硬件设备上实现, 以达到实时处理的要求; (4) 研究在非线性检波条件下的视频信号或直接对中频信号应用特征信号检测的思想, 以期使这种检测器能应用于雷达设备。

在本文的写作和仿真过程中, 得到了梁泰基教授和郭桂蓉教授的指导和帮助, 谨此致谢。

参考文献

- 1 Kay S M and Marple S L. Spectrum Analysis—A modern Perspective. Proc. of IEEE. 1981, 69 (11)
- 2 Ramm A G. Extraction of Resonances from Transient Fields. IEEE Trans. A. P. 1985, 33 (2): 202~210
- 3 Kay S M. Invariant Detection of Transient ARMA Signal. Proc. IC-ASSP84, 1984, 11: 561~564
- 4 Moffatt D L and Mains R K. Detection and Discrimination of Radar Targets. Microwave Journal. Dec. 1984, 85~102
- 5 Heyman E. A Wavefront Interpretation of Singularity Expansion Method. IEEE tran. 1985 AP33 (7): 706~718
- 6 柯有安. 雷达目标识别. 国外电子技术, 1978 22—30
- 7 胡步发. 微弱信号检测初探. 国防科技大学校庆 30 周年论文
- 8 郭桂蓉, 庄钊文. 模糊信息处理. 国防科技大学讲义, 1985
- 9 罗永光, 王海云. 稳健信号处理概论. 国防科技大学出版社, 1987
- 10 Harry L. Van Trees. Detection, Estimation and Modulation Theory. John wiley and sons. Inc, 1971

Signature Detection: Method for the Detection of Weak Signals

Song Liuping Sun Zhongkang
(Department of Electronic Technology)

Abstract

A method for the detection of weak signal in noisy background, called the signature detection, is discussed in this paper. The invariant character of poles is used for our detector. Based on the analysis of the weakness of the traditional schemes of detection, a new idea for the detection of very weak signal is presented. The basic principle of this method and the simulation results are discussed. The experiment results prove that the performance of the method is insensitive to signal-to-noise ratio (SNR).

Key words signal processing, signature, signature detector, poles, signal-to-noise ratio.