第15卷 第4期　　电子科学学刊　　Vol. 15, No. 4
1993年7月　　JOURNAL OF ELECTRONICS　　July, 1993

核爆炸信号参数化方法及其应用

冯地清　缪　常　赵　明
(防化指挥工程学院第七教研室，北京 102205)
王　锋
(防化研究院二所，北京 102205)

摘要　本文提出了一种经过改进的瞬态信号参数化方法并讨论了这种方法在核爆炸探测领域内的应用．重点阐述了信号建模及参数提取的计算方法，最后给出了本方法在核爆炸识别中的典型实例及计算机仿真结果．

关键词　核爆炸信号；参数化；建模；识别

一、引　言

核爆炸信号是一种特殊的瞬态信号，可供远距离探测．其主要信号有电磁脉冲、光脉冲、大气声波和地震波等．这些核爆信号与一般信号的差别在于：其波形前沿更加陡峭、后沿更加平坦，频谱由零延伸到接近无穷，是一种陡前沿、宽时域的广谱信号。在用计算机分析核爆信号时，难于兼顾采样间隔和时间窗宽的矛盾，且对计算速度及内存都有较高的要求．同时，由采样间隔引起的高频混淆及时窗引起的频率泄漏，将使信号严重失真，甚至丢失信号中的原有信息．这些问题虽在处理一般信号时也往往存在，但在处理像核爆炸信号这样的瞬态信号时尤为突出[1]．将信号参数化是信息压缩的一个有效途径，它可以大大克服采样产生的混淆误差和加窗引起的频谱分辨率下降[2,3]．近年来提出的许多谱估计参数模型方法大都适用于平稳随机信号，对核爆炸信号这样的非平稳瞬态性质的信号有一定局限性．经过分析，我们认为其中的 ARMA 模型及 Kumaresan-Prony 模型对核爆炸信号有较好的适应能力[3-6]．两种模型都可等效于将信号展开成复指数函数和的形式．本文对这种模型的计算方法进行了改进，建立了两组模型参数的互换关系，并给出了有关核爆炸识别的两个应用实例．

二、基本算法

1. 改进的 ARMA 模型

1992.03.21 收到，1992.07.06 定稿．
冯地清　男，1938 年生，副教授，现从事信号处理、模式识别和神经网络应用等研究工作．
缪　常　男，1937 年生，副教授，从事应用数学、矩阵与函数逼近理论的研究．
赵　明　男，1963 年生，讲师，从事核监测的研究．
王　锋　男，1963 年生，工程师，从事核监测的研究．

将观测值 $x(n)$ 分解为确定性及随机性两部分，即

$$x(n) = h(n) + e(n),\ 0 \leqslant n \leqslant N-1 \tag{1}$$

式中 $h(n)$ 为系统的单位脉冲响应，

$$h(n) = -\sum_{i=1}^{p} a_i h(n-i) + \sum_{i=0}^{q} b_i \delta(n-i) \tag{2}$$

将(2)式代入(1)式，

$$x(n) = -\sum_{i=1}^{p} a_i h(n-i) + \sum_{i=0}^{q} b_i \delta(n-i) + e(n) \tag{3}$$

利用(1)式置换(3)式中的 $h(n-i)$，并设 $a_0 = 1$，得

$$x(n) = -\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i) + \sum_{i=0}^{q} b_i \delta(n-i) + \sum_{i=0}^{p} a_i e(n-i) \tag{4}$$

设

$$u(n) = \sum_{i=0}^{p} a_i e(n-i) \tag{5}$$

$$x_0(n) = -\sum_{i=1}^{p} a_i x(n-i) + \sum_{i=0}^{q} b_i \delta(n-i) \tag{6}$$

其中 $u(n)$ 为动平均误差，$x_0(n)$ 为 $x(n)$ 的估计值．当 $n > q$ 时，令 $\sum |u(n)|^2$ 最小，可得参数 (a_i) 的最小二乘估计

$$A = -\Phi^{-1}\Phi_1 \tag{7}$$

式中

$$A = (a_1, a_2, \cdots a_p)^T,\ \Phi = (\varphi_{ij})_{p\times p},\ \Phi_1 = (\varphi_{10}\varphi_{20}\cdots\varphi_{p0})^T$$

其中

$$\varphi_{ij} = \sum_{n=p}^{N-1} [x(n-i)x(n-j)]$$

为 $x(n)$ 的自相关．因 $\varphi_{ij} = \varphi_{ji}$，故自相关矩阵 Φ 为对称阵，但对角线元素不相同，不是平稳随机信号构成的 Toeplitz 矩阵．

参数 (a_i) 求得以后，利用(4)式，可求得 (b_i) 的最小二乘解

$$b_j = \sum_{i=0}^{p} a_i x(j-i),\ 0 \leqslant j \leqslant q \tag{8}$$

(7),(8)式为非平稳瞬态信号 ARMA 模型参数估计值．若令 $a_i = 0$,$(1 \leqslant i \leqslant p)$，则 ARMA 模型退化为 MA 模型；令 $b_i = 0$，$(1 \leqslant i \leqslant q)$，则为 AR 模型．Wold 分解定理表明，三种模型可以替换．但对核爆炸信号这类拖尾的瞬态信号，一般用 AR 或 ARMA 模型近似，用 ARMA 模型能在阶次较低的条件下获得精度较好的参数估计．

2. 改进的 Prony 模型

(1) 式中，若将 $h(n)$ 分解为复指数函数和的形式，

$$h(n) = \sum_{i=1}^{p} r_i \exp(s_i n T) \tag{9}$$

式中 r_i 为留数，s_i 为 S 域极点，T 为抽样间隔，令

$$Z_i = \exp(s_i T) \tag{10}$$

式中 Z_i 为 z 域极点，则

$$h(n) = \sum_{i=1}^{p} r_i Z_i^n \tag{11}$$

欲求 r_i, s_i, Z_i 是一个复杂的非线性最小二乘问题，可以用有关方法（如高斯-牛顿法、麦夸脱法）求解。要将 Prony 模型化为线性最小二乘问题，关键一步是假定(11)式为差分方程(2)式的解。已知系统参数 (a_i) 后，可以求解 (Z_i)。为此，将(11)式代入(2)式，当 $n > q$ 时，有

$$\sum_{i=0}^{p}\left[a_i\left(\sum_{j=1}^{p} r_j Z_j^{n-i}\right)\right] = 0$$

交换求和顺序后得

$$\sum_{j=1}^{p}\left[r_j Z_j^n\left(\sum_{i=0}^{p} a_i Z_j^{-i}\right)\right] = 0$$

因此，为使(11)式满足(2)式，(Z_i) 必为多项式

$$\Psi(Z) = \sum_{i=0}^{p} a_i Z^{-i} \tag{12}$$

的根。Prony 模型求 $(Z_i),(s_i),(r_i)$ 的步骤可归为：第一步，按 ARMA 模型方法求系统参数 (a_i)；第二步，求多项式 $\Psi(z)$ 的根 (Z_i)，并由(10)式解出 s_i，

$$s_i = \frac{1}{T}\,[\ln|Z_i| + j\arg Z_i],\quad 1 \leqslant i \leqslant p \tag{13}$$

第三步，将(11)式代入(1)式，令 $\sum|e(n)|^2$ 最小，求出留数 (r_i) 的最小二乘解

$$R = [Z^H Z]^{-1} Z^H X \tag{14}$$

$$R = (r_1 r_2 \cdots r_p)^T,\quad Z = (Z_{ij})_{N\times P},\quad X = (x(0)x(1)\cdots x(N-1))^T$$

式中 $Z_{ij} = Z_j^{i-1}$；

由(13)式可知，S 域谐振频率为 $\Omega_i = \arg Z_i/T\,(1 \leqslant i \leqslant p)$ 得

$$\Omega_s \geqslant 2\max(\Omega_i),\quad 1 \leqslant i \leqslant p \tag{15}$$

由此得到一个重要结论：只要抽样频率 Ω_s 不小于两倍最高谐振频率 $(2\max\{\Omega_i\})$，Prony 模型就不会使信号产生混淆失真。这一条件比起 ARMA 模型按抽样定理的要求 $\Omega_s \geqslant 2\Omega_{\max}$($\Omega_{\max}$ 为信号最高频率)来，要宽得多。

3. 两种模型参数之间的关系

同一信号的两种模型参数 $(a_i),(b_i)$ 与 $(r_i),(s_i),(Z_i)$ 之间有一定的内在联系。由(2)式及(11)式的 z 变换 $H(z)$ 相等可以建立这种关系，即

$$\sum_{i=0}^{q} b_i Z^{-i} \Big/ \sum_{i=0}^{p} a_i Z^{-i} = \sum_{i=1}^{p} \frac{r_i}{1 - Z_i Z^{-1}} \tag{16}$$

式中阶次 $p > q$。当已知 $(a_i),(b_i)$ 可以求得 (Z_i)，(s_i) 和 (r_i) 如下：(Z_i) 为多项式 $\Psi(z)$ 的根，(s_i) 由(13)式求出，r_i 按(17)式得出：

$$r_i = \sum_{j=0}^{p} b_j Z_i^{-j} \Big/ \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{p} (1 - Z_j Z_i^{-1}),\ 1 \leqslant i \leqslant p \tag{17}$$

反之若已知 $(r_i),(s_i),(Z_i)$，可由下式求得 $(a_i),(b_i)$：

$$a_i = (-1)^i \sum_{\substack{j,k,\cdots l=1 \\ j<k<\cdots<l}}^{p} \underbrace{Z_j Z_k \cdots Z_l}_{i\text{ 项}},\ 1 \leqslant i \leqslant p \tag{18}$$

$$b_i = (-1)^i \sum_{j=1}^{p} r_j \sum_{\substack{k,l,\cdots,m=1 \\ k<l<\cdots<m \\ k,l,\cdots,m \neq j}}^{p} \overbrace{Z_k Z_l \cdots Z_m}^{i\text{ 项}},\ 0 \leqslant i \leqslant q \tag{19}$$

三、应 用 实 例

1. 利用核爆炸第二光脉冲波形识别空/地爆

（1）特征参数的提取　设第二光脉冲波形拟合函数为

$$E(t) = r_1 \exp(s_1 t) + r_2 \exp(s_2 t) \tag{20}$$

利用改进的 Prony 法，可求出四个波形特征参数。

（2）判别函数的建立　利用最短距离法，建立判别函数为

$$\begin{aligned} g(r_1,s_1,r_2,s_2) = & 2(r_{11} - r_{10})r_1 + 2(s_{11} - s_{10})s_1 + 2(r_{21} - r_{20})r_2 \\ & + 2(s_{21} - s_{20})s_2 + r_{10}^2 - r_{11}^2 + s_{10}^2 - s_{11}^2 \\ & + r_{20}^2 - r_{21}^2 + s_{20}^2 - s_{21}^2 \end{aligned} \tag{21}$$

式中 r_1,r_2,s_1,s_2 为未知样本特征量，$r_{10},r_{20},s_{10},s_{20}$ 为地爆样本平均特征量，$r_{11},r_{21},s_{11},s_{21}$ 为空爆样本平均特征量。判别准则为

$$g(r_1,s_1,r_2,s_2)\begin{cases} >0, & \text{空爆} \\ <0, & \text{地爆} \end{cases}$$

（3）有效性检验　对空爆 25 个样本，正确识别 22 个，错判 3 个。对地爆 25 个样本，正确识别 23 个，错判 2 个。全部 50 个测试样本，正确识别率为 90%。本结果所用的训练集是任选的另外 10 个样本(空爆 5 个，地爆 5 个)。增加训练集样本数，可以减小错判概率。

2. 利用核电磁脉冲识别核爆/雷电、原子弹/氢弹

（1）特性参数的提取　对核爆/雷电识别，我们选归一谱起伏量 (S_1)，归一谱起伏次数 (S_2) 及第一半周上升沿宽 (S_3) 等三个参数。对原子弹/氢弹识别，选主频率 (S_1) 及频宽 (S_2) 等两个参数。

（2）隶属函数的建立　以核爆/雷电识别为例，核爆总隶属函数和雷电总隶属函数

$$u_N = \prod_{i=1}^{3} u_{N_i} \tag{22}$$

$$u_L = \prod_{i=1} u_{L_i} \tag{23}$$

式中第 i 个参数的核爆隶属函数和雷电隶属函数分别为

$$u_{N_i}=\begin{cases}\exp[-(S_i-\bar{S}_i^N)^2/\sigma_{N_i}^2]/2, & S_i\geqslant \bar{S}_i^N\\ 1-\exp[-(S_i-\bar{S}_i^N)^2/\sigma_{N_i}^2]/2, & S_i<\bar{S}_i^N\end{cases} \tag{24}$$

$$u_{L_i}=\begin{cases}\exp[-(S_i-\bar{S}_i^L)^2/\sigma_{L_i}^2]/2, & S_i<\bar{S}_i^L\\ 1-\exp[-(S_i-\bar{S}_i^L)/\sigma_{L_i}^2]/2, & S_i\geqslant \bar{S}_i^L\end{cases} \tag{25}$$

判别准则

$$\begin{cases}u_N>u_L, & \text{核爆}\\ u_N<u_L, & \text{雷电}\end{cases}$$

识别原子弹/氢弹的隶属函数的建立方法与上式类似。

(3) **有效性验检** 对 18 个核爆样本及 137 个雷电样本进行分类，核爆符合率为 88.9%，雷电符合率为 100%，正确识别率为 98.7%。

对 13 个原子弹样本及 5 个氢弹样本进行分类，原子弹符合率为 92.3%，氢弹符合率为 100%，正确识别率为 94.2%。

四、结 论

本文讨论了作为瞬态信号的核爆炸信号的参数化方法——改进的 ARMA 模型和 Prony 模型法，同时给出了应用于核爆识别的实例。这两种方法比现有的非参数方法具有较高的频谱分辨力，克服了时窗效应的影响，改进的 Prony 法还能削弱高频混淆效应的影响。参数化方法不仅可用于频谱估计和核爆识别，而且为核爆信息提取、波形仿真、系统模拟提供了有效手段，对其他瞬态信号（如雷达、声纳、生物电、地震、雷电、冲击等）探测也有实用价值[7,8]。

参 考 文 献

[1] 沈浩明，应用科学学报，**5**(1987)2，95—103.
[2] 冯地清，核电子学与探测技术，**10**(1990)2，102—108.
[3] 冯地清等，Prony 方法在核爆探测中的应用，第二届全国信号处理会议论文集，南京，1986 年，第 624—625 页.
[4] S. M. Key et al., *Proc IEEE*, **69**(1981)11, 1380—1419.
[5] R. Kumaresan et al., *IEEE Trans. on ASSP*, **ASSP-30**(1982)6, 833—840.
[6] 唐 谕等，信号处理，**4**(1988)2，75—82.
[7] D. Q. Feng et al., Simulations to Instantaneous Process, Proc. ICSP'90, Beijing, (1990), pp. 153—154.
[8] 冯地清等，瞬态信号模拟与仿真，第五次全国核电子学与核探测器学术会议论文集（上），兰州，1990 年，第 180 页.

A PARAMETERIZATION MEANS OF NUCLEAR EXPLOSION SIGNAL AND ITS APPLICATION

Feng Diqing Miao Chang Zhao Ming
(*College of Chemical Defence, Beijing* 102205)
Wang Feng
(*Institute of Chemical Defence, Beijing* 102205)

Abstract A new improved parameterization means of instantaneous signal is proposed. Its applications in the field of nuclear ex plosion detection are presented. The discussion will centre on the signal modelling and the algorithm of extracting signal parameter. Finally, some typical instances which apply to the field of nuclear explosion recognition and its computer simulations are given.

Key words Nuclear explosion signal; Parameterization; Modelling; Aecognition