

# 高分辨距离像的运动参数估计

张旭东, 付 强, 庄钊文

(国防科技大学电子工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文研究了加性高斯色噪声背景中一维高分辨距离成像中的运动估计. 导弹和目标的相对运动对一维高分辨距离成像有较大影响, 阶跃变频体制回波信号可以表示为多项式相位的形式, 速度和加速度的影响分别体现在二次和三次多项式相位上. 循环平稳处理方法对高斯色噪声不敏感, 对非高斯色噪声也有较强的抑制作用, 而且在低信噪比情况下工作良好. 应用于低信噪比环境中. 为了在复杂的地面环境中得到较好的距离像, 本文采用循环平稳处理方法在较强的噪声背景下对速度进行估计, 经过处理后得到较理想的距离像.

关键词: 高分辨; 循环平稳; 高斯色噪声

中图分类号: TN957. 52 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 03-0386-04

## Movement Parameter Estimation in High Resolution Range Profile

ZHANG Xu-dong, FU Qiang, ZHUANG Zhao-wen

(Department E. E., National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: This paper studies the movement estimation of the high resolution radar signal with additional Gaussian color noise. Movement between the missile and the target has notable influence on the range profile. The stepped frequency echo has polynomial phase, and the influence of velocity and acceleration was expressed as the second the third phase. Cyclostationary method is not sensitive to the Gaussian color noise and can do with non Gaussian color noise as well, which is proved to be effective in low SNR environment. In this paper, the cyclostationary method is used to estimate the movement parameters from the phase in low SNR environment and to get ideal range profile as the result.

Key words: high resolution; cyclostationary; Gaussian color noise

### 1 引言

导弹和目标的相对运动对阶跃变频信号一维高分辨距离成像有较大影响; 在实际的战场环境中, 地面背景十分复杂, 需要采用色噪声来描述, 而且信噪比较低, 这也给距离成像带来了困难. 因此在复杂背景中正确估计运动参数, 对高分辨成像及其他制导信息处理是十分必要的.

阶跃变频体制下运动目标回波模型可以采用具有多项式相位的信号来表征:

$$x(t) = s(t)e^{j\theta(t)} + v(t) = s(t) \exp(j \sum_{l=0}^{p+1} \theta_l t^l) + v(t) \quad (1)$$

具有上述形式的信号在雷达和通信领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>, 对这种信号参数估计已经有许多研究成果. 文献[2]对幅度恒定的多项式相位的 Chirp 信号进行了研究; 文献[3]中利用四阶谱对高斯调制的谐波信号进行参数估计.

这里首先研究了上述的目标回波模型, 在此基础上利用循环平稳信号处理方法研究这个问题. 循环平稳处理方法对高斯色噪声不敏感, 对非高斯色噪声也有较强的抑制作用, 而且在低信噪比情况下工作良好.

### 2 运动目标回波模型和参数估计

假设刚性目标包含  $M$  个强散射中心, 且导弹和目标之间没有相对转动, 只考虑速度和加速度的影响. 阶跃变频体制下一个脉冲串的运动目标回波形式为:

$$x(n) = \sum_{m=1}^M A_m(n) \exp(j 2\pi n \Delta f (-2 \frac{R_{m0} + vnT + \frac{1}{2} a(nT)^2}{c})) \quad (2)$$

其中  $v$  为弹目相对运动速度,  $a$  为加速度. 将速度和加速度项分离, 令

$$s(n) = \sum_{m=1}^M A_m(n) \exp(j 2\pi n \Delta f (-2 \frac{R_{m0}}{c})) \quad (3)$$

则式(2)可以重写如下:

$$x(n) = s(n) \exp[j \sum_{i=0}^3 \theta_i n^i] \quad (4)$$

其中:

$$\theta_0 = 0 \quad (5)$$

$$\theta_1 = 0 \quad (6)$$

$$\theta_2 = -4\pi \Delta f v T / c \quad (7)$$

$$\theta_3 = -2\pi\Delta f aT^2/c \quad (8)$$

显然式(2)属于定义的多项式相位信号。

式(3)中的  $A_m(n)$  代表强散射中心的幅度, 通常被认为是固定不变的. 但是在运动条件下, 这种假设是不成立的. 散射中心是一个等效概念, 它反映了目标局部的反射特性, 而强散射中心通常是许多散射中心合成效应的表现. 当导引头雷达和目标的相对位置发生变化时, 各个强散射中心的反射特性也会相应发生变化, 导致目标回波的起伏. 由于在一定观察时间内, 相对位置的变化并不剧烈, 所以  $A_m(n)$  通常可以表示为具有一定均值的独立分布的平稳随机序列, 服从瑞利分布或韦伯分布, 因此合成后得到的  $s(n)$  也是平稳的.

下面给出式(4)表示的信号的一般形式:

$$x(n) = s(n)e^{j\phi(n)} + v(n) = s(n) \exp(j \sum_{l=0}^{P+1} \theta_l n^l) + v(n) \quad (9)$$

针对上述形式的信号, 文献[5]给出了如下定理

假设 1  $P > 0$ , 且  $P+1$  已知;

假设 2  $s(n)$  是非高斯平稳随机过程, 具有有限且非零偶阶累积量, 且各阶累积量有限;

假设 3  $v(n)$  是与  $s(n)$  独立的零均值噪声, 平稳且累积量有限;

定义  $x(n)$  的  $2^k$  阶矩如下:

$$c_{2^k} K_x(n; \tau, \dots, k\tau) = E \left\{ \prod_{l=0}^k [x^*(n + (k-l)\tau)] \binom{k}{l} \right\} + L. O. M. T. \quad (10)$$

其中符号含义如下:

$$\binom{P}{P-1} = \frac{P!}{[P-1]! l!} \quad (11)$$

$$x^{*l}(n) = \begin{cases} x(n), & l \text{ 为偶数} \\ x^*(n), & l \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (12)$$

$L. O. M. T$  表示低于  $2^k$  阶的矩.

在上述假设下, 有:

定理 1 若  $x(t)$  定义如式(1)形式, 且  $\phi(t)$  为  $P+1$  阶多项式,  $\theta_0 = 0$ , 当假设 1, 2, 3 成立时, 有

$$C_{2^p}^{\alpha}(\tau, \dots, P\tau) = c_{2^p}^{\alpha}(\tau, \dots, P\tau) e^{j\phi(\tau)} \times \delta(\alpha - (P+1)! \tau^p \theta_{p+1}) + c_{2^p}^{\alpha}(\tau, \dots, P\tau) \delta(\alpha) \quad (13)$$

且因为  $2^{P+1}$  阶累积量是时不变的,

$$c_{2^{P+1}}^{\alpha}(\tau, \dots, (P+1)\tau) = c_{2^{P+1}}^{\alpha}(\tau, \dots, (P+1)\tau) e^{j\phi_{P+1}(\tau)} + c_{2^{P+1}}^{\alpha}(\tau, \dots, (P+1)\tau) \quad (14)$$

所以,  $2^{P+1}$  阶循环累积量为零 ( $\alpha=0$ ) 除外.

其中:

$$\phi_p(\tau) = P! \tau^p \theta_{p+1} + \frac{1}{2}(P+1)! P\tau^{P+1} \theta_{p+1} \quad (15)$$

$$\phi_{p+1}(\tau) = (P+1)! \tau^{P+1} \theta_{p+1} \quad (16)$$

从上述定理可以知道, 若  $c_{2^p}^{\alpha}(\tau, \dots, P\tau) \neq 0$ , 有

$$\theta_{p+1} = \frac{1}{(P+1)! \tau^p} \arg \max_{\alpha} |C_{2^p}^{\alpha}(\tau, \dots, P\tau)| \quad (17)$$

且必须满足: 
$$\theta_{p+1} < \frac{\pi}{(P+1)! \tau^p} \quad (18)$$

现在考虑公式(3)的情况.

定义  $x(n)$  的 4 阶时变矩:

$$c_{4x}(n; \tau, \tau, 2\tau) = \text{cum}\{x(n), x^*(n+\tau), x^*(n+\tau), x(n+2\tau)\} = c_{4s}(\tau, \tau, 2\tau) e^{j(6\theta_3 \tau^2 n + \phi_2(\tau))} + c_{4v}(\tau, \tau, 2\tau) \quad (19)$$

$$\text{式} \left( \frac{2}{2-k} \right) = \frac{2!}{(2-k)! k!}.$$

若  $c_{4s}(\tau, \tau, 2\tau) \neq 0$  (对某个  $\tau \neq 0$ ), 则由循环矩在  $\alpha$  平面的峰值可得到相位多项式中的最高阶系数的估计为

$$\theta_3 = \frac{1}{3! \tau^2} \arg \max_{\alpha} [C_{4x}^{\alpha}(\tau, \tau, 2\tau)] \quad (20)$$

这样可以降阶, 然后估计出  $\theta_2$ .

利用估计得到的  $\theta_2, \theta_3$ , 消除信号中的速度和加速度的影响, 得到  $x(n)$  的估计值. 然后可以利用高阶谱估计的方法, 得到目标的距离像.

现在将在加性高斯色噪声下的情况参数估计步骤写在下面:

(1) 由观测数据  $x(n)$  的 4 阶循环累积量  $C_{4x}^{\alpha}(\tau, 2\tau)$  在  $\alpha$  平面 ( $\alpha \neq 0$ ) 上的峰值, 可以获得相位多项式中的最高阶系数的估计为

$$\theta_3 = \frac{1}{6\tau^2} \arg \max_{\alpha \neq 0} |C_{4x}^{\alpha}(\tau, 2\tau)| \quad (21)$$

(2) 将得到的  $\theta_3$  带入, 得到  $x_1(n)$ , 公式如下:

$$x_1(n) = x(n) * \exp(-j\theta^3 n^3) \quad (22)$$

利用公式

$$\theta_2 = \frac{1}{2\tau} \arg \max_{\alpha \neq 0} |C_{2x_1}^{\alpha}(\tau)| \quad (23)$$

得到  $\theta_2$ .

(3) 现在利用求出的  $\theta_2, \theta_3$  解调, 得到:

$$x_2(n) = x(n) \exp\left[-j \sum_{i=2}^3 \theta_i n^i\right] = s(n) + v(n) \exp\left[-j \sum_{i=2}^3 \theta_i n^i\right] \quad (24)$$

(4) 如果  $s(n)$  为非高斯, 则可以采用高阶谐波估计的方法形成距离像, 这里采用基于四阶累积量的 MUSIC 算法<sup>[8]</sup>.

下面讨论信号循环矩和循环累积量的估计方法.

$k$  阶循环矩的估计:

$$M_{kx}^{\alpha}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T x(n) x(n+\tau_1) \dots x(n+\tau_{k-1}) e^{-j\alpha} \quad (25)$$

而

$$M_{2^p x}^{\alpha}(\tau_1, 2\tau, \dots, P\tau) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T \left[ \prod_{l=0}^p (x^*(n + (P-l)\tau)) \binom{p}{l} \right] \cdot e^{-j\alpha} \quad (26)$$

其中  $T$  为估计时的时间窗.

值得注意的是式(25)实际是  $x(n) x(n+\tau_1) \dots x(n+\tau_{k-1})$  的傅立叶变换. 简单起见可以采用 FFT 来实现, 得到离散点上的值.

循环累积量的计算:

文献[1]给出了循环矩——循环累积量转换公式:

$$C_{kx}^{\alpha}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \sum_{\nu_{p=1}^q = \alpha} [(-1)^q (q-1)! \cdot \sum_{\alpha_1 + \dots + \alpha_p = \beta_{p=1}} \prod_{l=1}^p M_{k_x}^{\alpha_l}(M_{l_p})] \quad (27)$$

其中:

$\sum_{p=1}^q I_p = I$  表示在指数符集  $I = \{0, 2, \dots, k-1\}$  的所有无交连的非空集合分割 ( $1 \leq q \leq k$ ) 内的求和, 而  $n_p = |I_p|$  表示分割  $I_p$  中的元素个数.

同时文献[1]还给出了时变矩——时变累积量转换公式:

$$c_{kx}(n; \tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \sum_{p=1}^q \left[ (-1)^q (q-1) \prod_{j=1}^q m_{n_j x}(n; \tau_j) \right] \quad (28)$$

其中:

$c_{kx}(n; \tau_1, \dots, \tau_{k-1})$  表示信号  $x(n)$  的  $k$  阶时变矩,  $m_{n_j x}(n; \tau_j) = E \{ \prod_{i \in I_p} x(t + \tau_i) \}$  表示  $x(n)$  的时变累积量,  $\tau_j$  为滞后向量, 其元素是  $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_{k-1})$  中具有分割  $I_p$  内各指数符的那些滞后.

式(31)就是利用公式(28)导出的, 它是从循环累积量的定义出发的, 文献[5]认为这种表示方法更为直接.

现在考虑本文用到的循环累积量的表达式. 当  $x(t)$  为零均值时, 有:

$$C_{2x}^a(\tau) = M_{2x}^a(\tau) \quad (29)$$

$$C_{3x}^a(\tau_1, \tau_2) = M_{4x}^a(\tau_1, \tau_2) \quad (30)$$

$$C_{4x}^a(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{T-1} [m_{4x}(n; \tau_1, \tau_2, \tau_3) - m_{2x}(n; \tau_1) m_{2x}(n + \tau_2, \tau_3 - \tau_2) - m_{2x}(n; \tau_2) m_{2x}(n + \tau_3, \tau_1 - \tau_3) - m_{2x}(n; \tau_3) m_{2x}(n + \tau_1, \tau_2 - \tau_1)] e^{-j\alpha n} \quad (31)$$

且有:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=0}^T m_{2x}(n; \tau_1) m_{2x}(n; \tau_2) e^{-j\alpha n} = \sum_{\alpha_1} \sum_{\alpha_2} M_{2x}^{\alpha_1}(\tau_1) M_{2x}^{\alpha_2}(\tau_2) \times \delta[\alpha - \alpha_1 - \alpha_2] \quad (32)$$

这里的累加是针对所有的  $\alpha$  ( $M_{2x}^a(\tau) \neq 0$ ).

总的来说, 采用循环平稳的方法, 可以在低 SNR 高斯色噪声环境下利用有限数据得到较低方差信号的参数估计.

上面讨论了如何在加性高斯色噪声环境中进行高分辨成像的方法. 其中我们认为导弹和目标之间的相对运动可以用统一的速度和加速度来概括, 实际情况中这种假设是不准确的, 特别是在包含旋转, 横滚的复杂运动中, 各个散射中心的速度, 加速度都是不同的, 这是由于它们的坐标不同造成的.

因此我们可以将问题描述如下:

$$x(t) = \sum_{i=1}^M s_i(t) e^{j\phi_i(t)} \quad (33)$$

其中:  $\phi_i(t) = \sum_{l=1}^{P+1} \theta_l t^l$ .

文献[5]给出了这个问题的解决思路, 文献[1]中也采用基于差分方程的方法对这个问题进行了研究.

### 3 仿真实验

首先建立仿真数据模型. 在实际的环境中, 静止的信号模

型已经不能满足要求, 在运动中散射中心的幅度不能再认为固定不变. 这里将幅度看作是以静止时的幅度为均值的随机过程; 环境噪声假设为高斯色噪声.

信号采用阶跃变频体制, 信号形式为式(4)所示. 参数选择如下: 阶跃频率间隔  $\Delta f$  为 4MHz, 脉冲串长度  $N$  为 128, 散射中心模型由  $M = 12$  个散射中心组成.

图 1 表示在信噪比 6dB 时的距离像, 图 2 表示在速度为 200 米/秒, 信噪比 6dB 时的距离像.

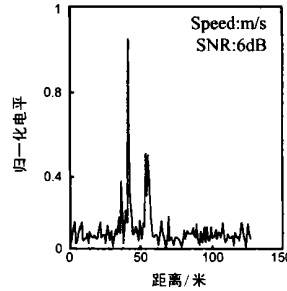


图 1 高斯色噪声下的距离像

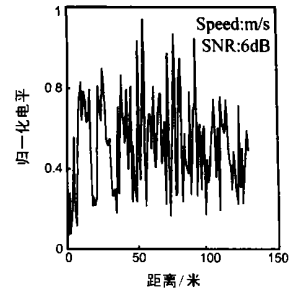


图 2 高斯色噪声下的运动距离像

首先考虑在速度, 加速度同时影响下的运动估计. 这里假设由于速度造成的影响为  $\theta_2 = 0.0335, \theta_3 = 0.023$

在循环统计量的估计中(式(25), (26), (29)~(32)), 时间窗的长度  $T$  取为 128. 循环频率  $\alpha = 2^* \pi^* n / Na$ , 这里取  $Na = 2048$ .

得到的结果为  $\theta_2 = 0.0337, \theta_3 = 0.0230$ . 这样可以看出, 本节描述的方法对在高斯色噪声下的运动估计具有较好的效果.

在消除运动影响后, 采用高阶谱估计的方法, 形成的距离像如图 3.

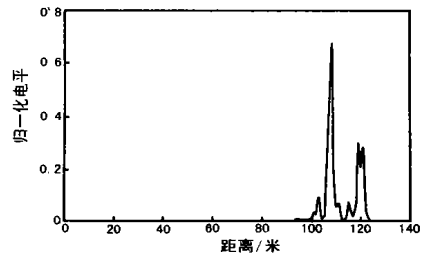


图 3 高阶谱估计得到的距离像

现在考虑实际情况下的处理.

首先考虑在脉冲重复频率较高时, 加速度对于  $\theta_3$

的影响. 因为  $\theta_3 = -2\pi \Delta f \frac{aT^2}{c}$ , 当  $T = 0.001s, a = 10m/s^2$  时  $\theta_3 = 8.37e-7$ , 根据  $\alpha = 2^* \pi^* n / Na$ , 为了得到足够的分辨率, 必须有  $Na = 45000000$ . 而且, 加速度对距离像的影响很小, 可以忽略.

其次考虑在只有速度影响情况下, 不同信噪比, 不同  $Na$ , 不同速度条件下, 运动估计的效果.

首先考察在速度  $v = 200m/s$  时, 信噪比和  $Na$  的影响. 仿

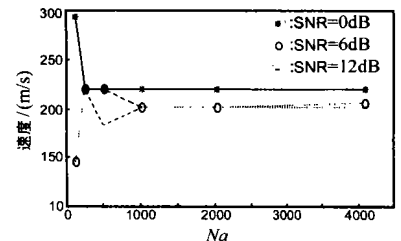


图 4 信噪比, Na 对速度估计的影响曲线( $v = 200m/s$ )

真选取的信噪比为 0dB, 6dB, 12dB, 15dB, 18dB, 20dB, 26dB, 32dB, 34dB, 38dB, 40dB; 选取的  $N_a$  为 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096. 图 4 表示的是在信噪比为 0dB, 6dB, 12dB 情况下, 估计的速度和  $N_a$  的关系. 从图中可以看出, 随着信噪比的增大和  $N_a$  的增大, 估计的精度越来越高, 在一定的信噪比条件下, 达到一定的  $N_a$  后, 估计精度便稳定了.

下面考察在速度  $v = 300\text{m/s}$  情况下的情况. 信噪比和  $N_a$  的变化同上. 从图 5 中可以看出, 在  $v = 300\text{m/s}$  时, 同样条件下速度估计的效果要差于  $v = 200\text{m/s}$  时.

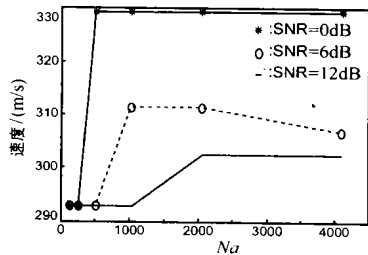


图 5 信噪比,  $N_a$  对速度估计的影响曲线 ( $v = 300\text{m/s}$ )

#### 4 结论

从上述的实验可以看出:

(1) 采用循环平稳的方法对于高斯色噪声环境的运动参数估计具有较好的效果;

(2) 针对不同的信噪比, 可以选用不同的  $N_a$ , 这样可以在满足估计要求的条件下减少计算量;

(3) 不同的速度影响下, 估计要求的  $N_a$  也不同; 值得注意的是:

① 循环平稳信号处理的方法不仅对于高斯(色)噪声, 而且对于非高斯噪声下的运动估计同样具有很好的效果;

② 在较低的信噪比下, 循环平稳方法仍然可以进行稳定的估计;

这里对于非高斯条件下的运动估计没有进行研究, 这将在进一步工作中进行.

#### 参考文献:

[ 1 ] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 324- 425.

- [ 2 ] P M Djuric, S M Kay. Parameter estimation of chirp signals [ J ]. IEEE Trans. , 1990, AES- 38( 12 ): 2118- 2126.
- [ 3 ] S Peleg, B Porat. Estimation and classification of signals with polynomial phase [ J ]. IEEE Trans. , 1991, IT- 37( 3 ): 422- 430.
- [ 4 ] Guotong Zhou, Georgios B Giannakis. On polynomial phase signals with time\_ varying amplitudes [ J ]. IEEE Trans. , 1996, SP\_44( 4 ): 355 - 374.
- [ 5 ] Shamsunder S, Giannakis G B. Estimating random amplitude polynomial phase signals: A cyclostationary approach [ J ]. IEEE Trans. , 1995, SP- 43( 2 ): 492- 505.
- [ 6 ] Shamsunder S, Giannakis G B. Signal selective localization of non- Gaussian cyclostationary sources [ J ]. IEEE Trans. SP- 42( 10 ): 2860- 2864.
- [ 7 ] A V Dandawate, G B Giannakis. Nonparametric cyclic polyspectral analysis of AM signals and processes with missing observations [ J ]. IEEE Trans. , 1993, IT- 38( 11 ): 1864- 1876.
- [ 8 ] 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

#### 作者简介:



张旭东 男. 1972 年出生于江苏徐州, 1995 年毕业于国防科技大学电子技术系. 现在国防科技大学电子技术系攻读通信与电子系统专业博士学位. 研究兴趣为信号处理, 多媒体.



付强 男. 1962 年生于湖南长沙, 国防科技大学工程学院副教授, 总装备部精确制导专家组成员. 主要研究方向为自动目标识别与模糊信息处理.