宽带机动目标检测

苏军海　　邢孟道　　保　铮
(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：该文提出了一种高机动目标宽带信号检测与运动参数估计方法，即先通过相邻相关对目标回波进行降阶处理，然后将其变换到距离频域，利用广义二阶 keystone 变换去除距离弯曲，接着对一个距离单元信号进行时间调频率变换并估计方位向的调频率，构造相位补偿函数，对广义二阶 keystone 变换后的信号进行补偿，再进行第二次广义二阶 keystone 变换，最后通过距离 IFFT 和方位 FFT 对目标进行检测，通过估计的参数可以获得目标的运动参数。仿真和实测数据验证了该方法的有效性。

关键词：目标检测；宽带检测；广义二阶 keystone 变换；时间调频率分布
中图分类号：TN957.51　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-5896(2009)06-1283-05

Wideband Radar Detection for Maneuvering Target

Su Jun-hai　　Xing Meng-dao　　Bao Zheng
(*Key Laboratory of Radar Signal Processing*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: A new method for detection of maneuvering target in wideband signal and for estimation of its moving parameters is proposed. Firstly the adjacent correlation is employed to decrease the order of the echo signal. Then the signal is transformed into range frequency domain and the general two-order keystone transform is used to eliminate range curve. Thirdly a range frequency cell is selected to estimate the azimuth frequency modulation rate via the time-chirp rate transform. Fourthly a phase compensation function is constructed for phase correction. Finally the general second-order keystone transform is used again and the range IFFT and azimuth FFT are performed so that the target detection is feasible. The moving parameters can be obtained by the estimates. In the end, simulated and raw data results confirm the effectiveness of the proposed method.

Key words: Target detection; Wideband detection; General second-order keystone transform; Time-chirp rate distribution

1　引言

现代战争中，来自空中的威胁无疑是最大的(如飞机和导弹)，在低信噪比下对空中目标进行检测，及早发现空中来袭目标，对于争取战争主动权有着至关重要的作用。高分辨成像技术由于其可识别率高、抗干扰能力强等优点在现代雷达中得到了广泛的应用。因此，对宽带信号进行运动目标检测具有更加积极的作用。

高机动目标不仅速度快，其速度和加速度也会发生较快的变化，从而产生回波信号包络偏移和方位高次相位项，这些都给低信噪比下的目标检测和参数估计带来较大的困难。文献[1]中，通过距离包络对齐和参数估计，并沿方位相干积累提高检测性能，但当参数估计不准并且存在高次相位项时，会使得方位散焦，从而降低检测性能。文献[2]中，对距离压缩后的方位数据，利用 Radon 变换进行运动目标检测，当目标做高机动飞行时，在相干积累时间内目标的回波信号包络会产生弯曲，利用依靠线积分的 Radon 变换检测目标很难对信号能量进行有效的积累。而且该方法是非相干积累，当信噪比较低时检测效果不明显。

针对以上的问题，本文提出一种高机动目标宽带信号检测与参数估计方法。本文安排如下：第 2 节分析目标的回波信号；第 3 节简要叙述广义二阶 keystone 变换和信号的时间调频率分布；第 4 节给出了目标检测和参数估计的方法及其流程图；最后给出了仿真和实测数据的处理结果。

2　目标的回波信号分析

假设雷达发射线性调频信号：

$$s\left(\hat{t},t_m\right)=\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right)\exp\left(j\pi\gamma\hat{t}^2\right)\exp\left(j2\pi f_c t\right) \tag{1}$$

其中 $\mathrm{rect}(u)=\begin{cases}1, & |u|\le 1/2\\ 0, & |u|>1/2\end{cases}$，$T_p$ 是脉宽，γ 是调频率，f_c 是发射信号的载频，$\hat{t}$ 是快时间，t 是全时间，$t=\hat{t}+t_m$。

考虑机动飞行的目标，这时目标的径向速度、径向加速度和径向加加速度都要考虑。目标上第 k 个散射点与雷达之间的瞬时距离可以表示为

2008-04-28 收到，2008-09-29 改回
新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0861)和教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645)资助课题

$$R_k(t_m) \approx R_0 + vt_m + \frac{1}{2}at_m^2 + \frac{1}{6}\kappa t_m^3 + y_k\cos\left(w_{t_m}t_m\right) - x_k\sin\left(w_{t_m}t_m\right) \tag{2}$$

其中 R_0 为雷达到目标的起始距离，v，a 和 κ 分别为目标的径向速度、加速度和加加速度。w_{t_m} 为瞬时角速度，x_k 和 y_k 分别为目标的坐标位置，$t_m = mT_a$ 是方位慢时间，m 为整数，T_a 是脉冲重复时间。

由于目标做高机动飞行，其转动角速度也较为复杂，可以表示为

$$w_{t_m} = w_0 + \alpha t_m + \frac{1}{2}\beta t_m^2 \tag{3}$$

其中 w_0，α 和 β 分别为目标的瞬时角速度的初始值、角加速度值和角加加速度值。并且考虑小角度下：

$$\left.\begin{aligned}\sin\theta &= \theta - \theta^3/3!\\ \cos\theta &= 1 - \theta^2/2!\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

最终由式(2)-式(4)可以得到(忽略三次以上的项)：

$$R_k(t_m) \approx (R_0 + y_k) + (v - xw_0)t_m + \frac{1}{2}\left(a - y_k w_0^2 - 2x_k\alpha\right)t_m^2 + \frac{1}{6}\left(\kappa - 6y_k\alpha w_0 - 3x_k\beta + x_k w_0^3\right)t_m^3 \tag{5}$$

则雷达接收到的回波信号的基带信号为

$$s\left(\hat{t}, t_m\right) = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k \mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_k(t_m)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j\pi\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_k(t_m)}{c}\right)^2\right)\exp\left(-j\frac{4\pi f_c R_k(t_m)}{c}\right) \tag{6}$$

其中 K 为目标上散射点的总数，σ_k 是第 k 个散射点回波的幅度，$R_k(t_m)$ 是第 k 个散射点 t_m 时刻到雷达的距离，c 是光速。

相邻回波之间目标的转角小于 $0.01°$，由此引起的散射点走动很小，其互相关系数一般都较大，用相邻相关可以很好地表现目标信号的运动特性。回波信号的相邻相关可以表示为

$$R(\tau, t_m) = \int s\left(\hat{t}, t_m\right)s^*\left(\hat{t} - \tau, t_{m+1}\right)\mathrm{d}\hat{t} \tag{7}$$

根据时域相关等于频域共轭点乘，然后再作 IFFT 变换的原理可以知道，

$$R(\tau, t_m) = \mathrm{IFFT}\left(s(f_r, t_m)s^*(f_r, t_{m+1})\right) \tag{8}$$

其中 $s(f_r, t_m)$ 是 $s(\hat{t}, t_m)$ 的傅里叶变换，‘$*$’代表共轭。

将 $s(\hat{t}, t_m)$ 变换到距离频域，则有

$$s(f_r, t_m) = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k' \exp\left(-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right)\exp\left(-j\frac{4\pi(f_c + f_r)(R_0 + y_k)}{c}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi(f_c + f_r)(v - x_k w_0)t_m}{c}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi(f_c + f_r)\left(a - y_k w_0^2 - 2x_k\alpha\right)t_m^2}{c}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi(f_c + f_r)\left(\kappa - 6y_k\alpha w_0 - 3x_k\beta + x_k w_0^3\right)t_m^3}{3c}\right) \tag{9}$$

于是可以得到：

$$R(\tau, t_m) = R_{\mathrm{auto}}(\tau, t_m) + R_{\mathrm{cross}}(\tau, t_m) \tag{10}$$

其中

$$R_{\mathrm{auto}}(\tau, t_m) = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k'' \mathrm{sinc}\left[B\left(\tau + \frac{2}{c}\left(I_{k0} + I_{k1}t_m + I_{k2}t_m^2\right)\right)\right] \cdot \exp\left(j\frac{4\pi I_{k0}}{\lambda}\right)\exp\left(j\frac{4\pi I_{k1}}{\lambda}t_m\right)\exp\left(j\frac{4\pi I_{k2}}{\lambda}t_m^2\right)$$

$$I_{k0} = T_a(v - x_k w_0) + \frac{T_a^2}{2}\left(a - y_k w_0^2 - 2x_k\alpha\right) + \frac{T_a^3}{6}\left(\kappa - 6y_k\alpha w_0 - 3x_k\beta + x_k w_0^3\right)$$

$$I_{k1} = T_a(a - y_k w_0^2 - 2x_k\alpha) + \frac{T_a^2}{2}(\kappa - 6y_k\alpha w_0 - 3x_k\beta + x_k w_0^3)$$

$$I_{k2} = \frac{T_a^2}{2}\left(\kappa - 6y_k\alpha w_0 - 3x_k\beta + x_k w_0^3\right)$$

$$R_{\mathrm{cross}}(\tau, t_m) = \sum_{p,q=1\&p\neq q}^{K}\sigma_{pq}\,\mathrm{sinc}\left[B\left(\tau + \frac{2}{c}\left(J_{pq0} + J_{pq1}t_m + J_{pq2}t_m^2 + J_{pq3}t_m^3\right)\right)\right]\exp\left(j\frac{4\pi J_{pq0}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(j\frac{4\pi J_{pq1}}{\lambda}t_m\right)\exp\left(j\frac{4\pi J_{pq2}}{\lambda}t_m^2\right) \cdot \exp\left(j\frac{4\pi J_{pq3}}{\lambda}t_m^3\right)$$

$$J_{pq0} = \left(y_q - y_p\right) + I_{q0}$$

$$J_{pq1} = -w_0\left(x_q - x_p\right) + I_{q1}$$

$$J_{pq2} = -\frac{1}{2}\left(w_0^2\left(y_q - y_p\right) + 2\alpha\left(x_q - x_p\right)\right) + I_{q2}$$

$$J_{pq3} = \frac{1}{6}\left(w_0^3\left(x_q - x_p\right) - 3\beta\left(x_q - x_p\right) - 6\alpha w_0\left(y_q - y_p\right)\right)$$

运动参数对相邻相关结果的影响

(1)运动参数对自相关项的影响　由式(10)可以看出，自相关项的峰值位置随着方位慢时间呈二次曲线变化，将导致相关峰值的走动和相关峰值的弯曲，这对于信号能量的积累不利，后面将介绍如何实现信号能量的相干积累。对于方位相位来说，原来的三次相位项变为二次相位项，相邻相关对于原始信号具有降阶的作用，这一特性有利于目标的快速检测。

事实上，由于相邻相关函数只是在一个脉冲重复时间内进行，一般而言，其峰值走动不会超过半个采样单元。由上式也可以看出，I_{k0} 为常数项，与方位时间无关，只与散射点的位置坐标有关。对相同散射点来说，在不同方位时刻，由 I_{k0} 所产生的包络偏移是一样的；对不同散射点来说，I_{k0} 由于位置不同，将导致峰值包络略有差异，但是由于目标的转动角速度的初始值、角加速度值、角加加速度值和脉冲重复时间一般是百分之几或者千分之几的量级，它们所产生的包络偏移远远小于半个采样单元，所以可以忽略由于转动引起的包络偏移，认为由 I_{k0} 所产生的包络偏移对于所有散射点都是一样的。同理，也可以忽略 I_{k1} 和 I_{k2} 中由于转动引起的包络偏移，认为包络偏移主要是由于目标相对于雷达的径向运动引起的。记包络偏移量为 R_{biased}，并假设方位向的脉

冲数为 M ，则

$$R_{\text{biased}} \approx \left(aT_a + \frac{\kappa T_a^2}{2}\right)t_m + \frac{\kappa T_a}{2}t_m^2 \tag{11}$$

当其最大值小于采样分辨率的一半时，可以认为回波信号相关峰值在相同的距离单元内，这样就可能沿着方位时间做 FFT 相干积累来检测目标，其应满足的条件为

$$a + \frac{MT_a}{2}\kappa < \frac{c}{4F_s(M-1)T_a^2} \tag{12}$$

其中 F_s 为采样率。

(2)运动参数对互相关项的影响　由式(10)可以看出，互相关项的峰值位置随着方位慢时间呈三次曲线变化，将导致相关峰值的走动和相关峰值的弯曲(三阶)。对于方位相位来说，原来的三次相位项仍然为三次相位项，也就是说，相邻相关对于原始信号没有降阶的作用。

相对于第 q 个散射点的峰值位置，第 p 个散射点和第 q 个散射点互相关的峰值位置与其相差：

$$\begin{aligned} R_{pq} &= \left(y_q - y_p\right) - w_0\left(x_q - x_p\right)t_m \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(w_0^2\left(y_q - y_p\right) + 2\alpha\left(x_q - x_p\right)\right)t_m^2 + J_{pq3}t_m^3 \end{aligned} \tag{13}$$

同样忽略转动引起的包络偏移，那么 R_{pq} 就只与两个散射点的纵坐标有关。一般而言，不同散射点在纵向的位置差都会超过半个采样单元的长度，于是其互相关的峰值将分布在不同于自相关峰值的位置。当两个散射点纵坐标相同时，只是横向位置不同，假设两个散射点的幅度相等并设为 1，并记散射点 q 的自相关的相位项为 θ_q ，散射点互相关峰值的相位项为 θ_{pq} ，于是就有

$$\theta_{pq} = \theta_q - \frac{4\pi w_0\left(x_q - x_p\right)}{\lambda}t_m \tag{14}$$

同理有 $\theta_{qp} = \theta_p - \dfrac{4\pi w_0\left(x_p - x_q\right)}{\lambda}t_m$ 。

于是整个峰值单元由互相关产生的信号为

$$\begin{aligned} s_{\text{peak-cross}}\left(t_m\right) &= \exp\left(j\theta_{pq}\right) + \exp\left(j\theta_{qp}\right) \\ &= 2\cos\left(\frac{2\theta_{pqx} + \theta_p - \theta_q}{2}\right)\exp\left(j\frac{\theta_p + \theta_q}{2}\right) \end{aligned} \tag{15}$$

其中 $\theta_{pqx} = \dfrac{4\pi w_0\left(x_q - x_p\right)}{\lambda}t_m$ 。

而整个峰值单元由自相关产生的信号为

$$\begin{aligned} s_{\text{peak_auto}}\left(t_m\right) &= \exp\left(j\theta_p\right) + \exp\left(j\theta_q\right) \\ &= 2\cos\left(\frac{\theta_p - \theta_q}{2}\right)\exp\left(j\frac{\theta_p + \theta_q}{2}\right) \end{aligned} \tag{16}$$

假设 θ_q 与 θ_p 近似相等，于是就有

$$s_{\text{peak_cross}} \le s_{\text{peak_auto}} \tag{17}$$

令 $\exp(j\theta_p)$ 的傅里叶变换为 $S(f)$ ，则 $s_{\text{peak_auto}}$ 的傅里叶变换为 $2S(f)$ ，而 $s_{\text{peak_cross}}$ 的傅里叶变换为 $S(f - f_{pqx}) + S(f + f_{pqx})$ ，这里 $f_{pqx} = \dfrac{2w_0\left(x_q - x_p\right)}{\lambda}$ 。在有两个散射点的情况下，其方位谱分布于自相关谱的两侧，其能量分布也会以自相关谱为中心，在两边分散开来；在有多个散射点的情况下，由于其频率偏移并不完全相同，于是也会呈现与两个散射点类似的情形。

通过上面的分析可以知道，自相关峰值位置具有相对的稳定性，对于所有散射点来说，在相同的方位时刻都在同一个距离单元；而互相关峰值位置随着散射点纵向距离差的不同而不同，同时对于纵坐标相同的散射点，它的互相关谱也分布于自相关谱的两侧。整体来说，自相关项在相邻相关结果中是比较稳定的，因此在后面的讨论中，都将不再考虑互相关项对相邻相关结果的影响。

一般情况下，平稳飞行的飞机类目标或者机动性不大的目标如卫星等，都可以满足式(12)的要求，这时虽然自相关项的包络在一个距离单元内，其方位相位仍然具有二次项，直接采用 FFT 来检测目标的效果不是最好；而对于导弹之类的目标，式(12)很难满足，这时应该首先去除距离弯曲的影响，这可以采用广义二阶 keystone 变换来实现，同时由于目标的机动运动，方位向的高次项将导致目标不能完全聚焦，出现主瓣展宽，不利于目标的检测，因此也需要对方位高次项进行补偿。

3　广义二阶 keystone 变换和信号的时间调频率变换[3]

在文献[4, 5]中对 keystone 变换去走动都有比较详细的分析，故在本文中不再说明而只对广义二阶 keystone 变换去弯曲做分析。将相关函数变换到距离频域，则有

$$R\left(f_r, t_m\right) = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k''\exp\left(j\frac{4\pi}{c}\left(f_c + f_r\right)\left(I_{k0} + I_{k1}t_m + I_{k2}t_m^2\right)\right) \tag{18}$$

采用广义二阶 keystone 变换校正距离弯曲，令

$$t_m = \sqrt{\frac{f_c}{f_c + f_r}}\tau_m \tag{19}$$

则有

$$\begin{aligned} R\left(f_r, \tau_m\right) &= \sum_{k=1}^{K}\sigma_k''\exp\left(j\frac{4\pi I_{k0}\left(f_c + f_r\right)}{c}\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(j\frac{4\pi I_{k1}\sqrt{f_c\left(f_c + f_r\right)}}{c}\tau_m\right)\exp\left(j\frac{4\pi I_{k2}}{\lambda}\tau_m^2\right) \end{aligned} \tag{20}$$

从式(20)可以看出，此时距离向的弯曲已经消除了，而且距离走动的斜率也变为原来的一半。并且，广义二阶 keystone 变换数据重排后所呈现的已不再是一个等腰梯形，而是右腰为 $y = x^{1/2}$ 的曲线，左腰为 $y = (-x)^{1/2}$ 的曲线。

如果进一步对式(20)进行广义二阶 keystone 变换就可以去除距离走动，但是这将引入新的距离弯曲分量，因此，在消除距离走动之前，必须先将方位向的调频项补偿掉。这里采用文献[3]中的时间-调频率分布来获得距离频域单元信号的调频率。

如果忽略 I_{k2} 中由于转动引起的分量，那么其就是常数 I_2 ，这对于所有散射点都是一样的。也就是说，不同散射点的自身项的时间调频率分布将在相同的位置进行叠加，而其

不同散射点之间的交叉项将由于初始频率不一样，将产生分布于自身项的调频率两侧的随着时间变化的调频率，其能量比较小，所以这里忽略掉交叉项的影响。

4 目标检测及其参数估计

选取一个距离频域单元信号，对其进行时间调频率变换，假设估计得到的调频率为 γ_a，其和 I_2 的关系为

$$I_2 = \frac{\lambda\gamma_a}{4} \tag{21}$$

由此构造相位补偿函数：

$$H = \exp\left(-j\frac{4\pi I_2}{\lambda}\tau_m^2\right) \tag{22}$$

与式(20)的信号相乘，则有

$$R_H(f_r,\tau_m) = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k''\exp\left(j\frac{4\pi I_{k0}}{c}(f_c+f_r)\right) \cdot\exp\left(j\frac{4\pi I_{k1}}{c}\sqrt{f_c(f_c+f_r)}\tau_m\right) \tag{23}$$

这时继续进行广义二阶 keystone 变换，令

$$\tau_m = \sqrt{\frac{f_c}{f_c+f_r}}\tau_m' \tag{24}$$

则有

$$R_H(f_r,\tau_m') = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k''\exp\left(j\frac{4\pi I_{k0}}{c}(f_c+f_r)\right)\exp\left(j\frac{4\pi I_{k1}}{\lambda}\tau_m'\right) \tag{25}$$

由式(25)可以看出，此时距离向与方位向已经解耦合，距离走动消除了，将 $R_H(f_r,\tau_m')$ 变换到距离时域，则有

$$R_H(\tau,\tau_m') = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k'''\operatorname{sinc}\left(B\left(\tau+\frac{2I_{k0}}{c}\right)\right)\exp\left(j\frac{4\pi I_{k0}}{\lambda}\right)\exp\left(j\frac{4\pi I_{k1}}{\lambda}\tau_m'\right) \tag{26}$$

此时进一步做方位 FFT，则有

$$R_H(\tau,f_a) = \sum_{k=1}^{K}\sigma_k''''\exp\left(j\frac{4\pi I_{k0}}{\lambda}\right)\operatorname{sinc}\left(B\left(\tau+\frac{2I_{k0}}{c}\right)\right) \cdot\operatorname{sinc}\left(T_{\text{all}}\left(f_a-\frac{2I_{k1}}{\lambda}\right)\right) \tag{27}$$

其中 T_{all} 为方位成像的相干积累时间。这里也忽略了 I_{k0} 和 I_{k1} 中由于转动引起的分量，利用峰值的位置坐标，就可以得到 I_0 和 I_1 的估计。

通过上面的分析，接下来就可以得到目标的运动参数。假设 I_0，I_1 和 I_2 的估计值为 $\hat{I}_0$，$\hat{I}_1$ 和 $\hat{I}_2$，那么结合式(10)，就可以得到目标的速度、加速度以及加加速度的估计值：

$$\hat{\kappa} = \frac{2\hat{I}_2}{T_a},\quad \hat{a} = \frac{\hat{I}_1-\frac{T_a^2\hat{\kappa}}{2}}{T_a},\quad \hat{v} = \frac{\hat{I}_0-\frac{T_a^2\hat{a}}{2}-\frac{T_a^3\hat{\kappa}}{6}}{T_a} \tag{28}$$

当然这里估计出来的目标的速度、加速度以及加加速度里面都包含转动引起的分量，但由于脉冲重复时间一般为零点零几甚至零点零零几，转动角速度各阶系数为零点零几，使得式(10)中由于转动引起的相邻相关函数方位相位值远小于 $\pi/2$，所以在运动目标的参数估计时可以忽略转动引起的位置变化，认为其积累后的位置是由于运动目标的径向运动参数引起的。目标检测与参数估计的流程如图 1 所示。

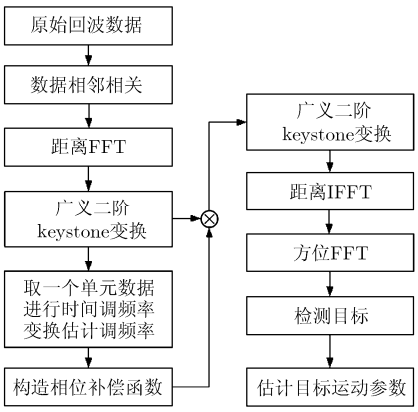


图 1 目标检测及其参数估计流程图

5 仿真和实测数据的处理结果及其分析

仿真如图 2(a)所示的飞机模型。其参数如下：雷达发射信号载频 f_c 为 5.2GHz，信号带宽 B 和采样频率 F_s 均为 120MHz，脉冲重复时间为 0.005s，目标的径向速度 v，径向加速度 a 和径向加加速度 κ 分别为 500 m/s，100 m/s^2 和 50 m/s^3，目标的瞬时角速度初始值 w_0，角加速度 α 和角加加速度 β 分别为 0.05 rad/s，0.05 rad/s^2 和 0.05 rad/s^3。整个回波的信噪比为-10dB。对于所设计的参数，式(12)不成立，所以必须考虑包络弯曲的影响。图 2(b)为回波距离压缩后的结果，图 2(c)为目标相邻相关的结果。由于目标的机动性较强，目标距离压缩之后有明显的距离弯曲，相邻相关对于包络的校正是很明显的。

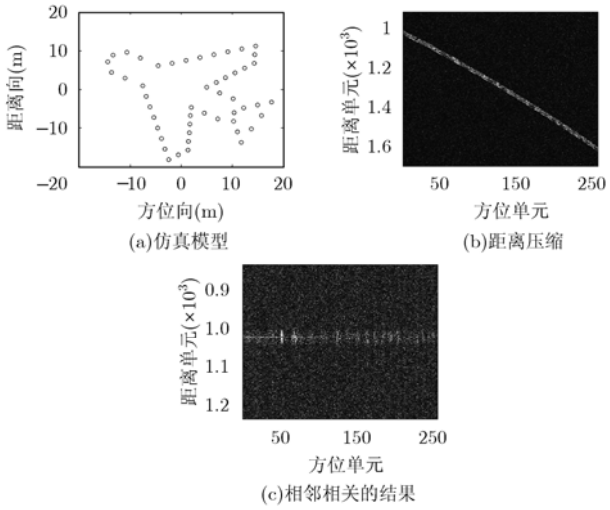
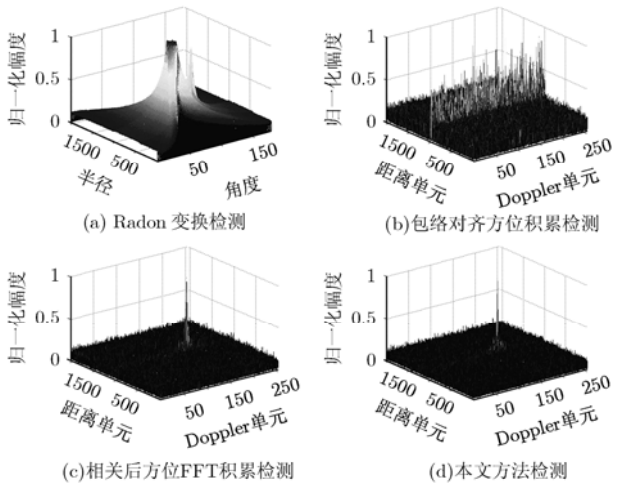


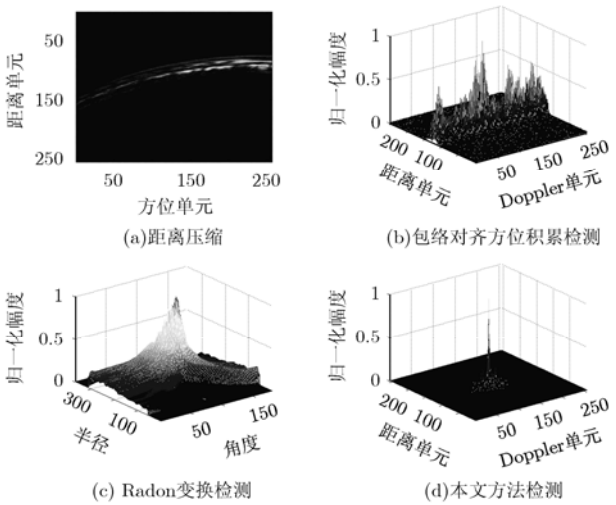
图 2 目标模型与相邻相关的特性分析

图 3(a)为运用 Radon 变换进行检测的结果，图 3(b)为包络对齐后进行方位积累后的检测结果，图 3(c)为相邻相关后直接方位 FFT 进行目标检测的结果，图 3(d)为本文方法检测目标的结果。可以看出，3(a)由于是采用线积分，实际上目标的包络呈现弯曲特征，所以效果不好。3(b)由于目标



(a) Radon 变换检测　(b)包络对齐方位积累检测　(c)相关后方位FFT积累检测　(d)本文方法检测

图 3 检测结果的对比



(a)距离压缩　(b)包络对齐方位积累检测　(c) Radon变换检测　(d)本文方法检测

图 4 实测数据的处理结果

的方位出现散焦，能量没有聚集起来。3(d)效果最好，3(c)效果次之，原因在于，一方面相邻相关函数对于目标的包络进行了初校正，由于目标的速度引起的包络走动已经消除了，另一方面对于方位向的高次项也进行了补偿。

通过估计的参数对目标的运动参数也进行了估计。在信噪比为-10dB 的情况下进行了 100 次 Monte Carlo 实验，估计的平均的速度、加速度和加加速度分别为 506.36 m/s，97.17 $\mathrm{m/s^2}$ 和 49.81 $\mathrm{m/s^3}$。可以看出估计的运动参数还是比较精确的。需要说明的是，为了更精确地估计目标的运动参数，在搜寻峰值点位置时做了 4 点的插值处理。

同时对于实测数据也进行了处理，目标为机动飞行的飞机，L 波段雷达发射信号带宽为 200MHz，采样频率为 250MHz，脉冲重复频率为 1000Hz，对于原始回波进行 8 抽 1 的处理。图 4(a)为回波匹配滤波的结果，可以看出明显的包络弯曲，这时直接采用方位 FFT 积累效果很差；图 4(b)为对原始回波进行包络对齐然后沿方位积累的结果，这时即使包络校正平了，其每个距离单元的相位还是二次相位，不能实现目标能量的有效积累；图 4(c)为运用 Radon 变换进行检测的结果；图 4(d)为本文方法得到的检测结果。可以看出本文方法的有效性。

6　结束语

本文提出了一种有效的高机动目标宽带信号检测与运动参数估计方法。先通过相邻相关对回波进行降阶处理，然后利用二阶 keystone 变换去除距离弯曲，接着补偿方位向的调频率，这时再做一次二阶 keystone 变换，最后通过距离 IFFT 和方位 FFT 对目标进行检测，通过估计的参数可以获得目标的运动参数。仿真和实测数据验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

[1] 闫冯军. 宽带雷达信号检测方法研究[D]. [硕士论文], 武汉: 电子科技大学, 2006, 3.

[2] 郭汉伟. 合成孔径雷达地面运动目标检测与成像技术研究[D]. [博士论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2003, 9.

[3] 李亚超, 苏军海, 邢孟道, 等. 利用时间-调频率分布特性的复杂目标 ISAR 成像研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(1): 1–7.
Li Ya-chao, Su Jun-hai, and Xing Meng-dao, *et al.*. Research on ISAR imaging of the complexly moving target based on the time-chirp distribution [J]. *Journal of Xidian University*, 2008, 35(1): 1–7.

[4] Perry R P, DiPietro R C, and Fante R L. SAR imaging of moving targets [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1999, 35(1): 188–200.

[5] 盛蔚, 毛士艺. 基于 Keystone 变换的地面运动目标检测研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11): 1–4.
Sheng Wei and Mao Shi-yi. Ground moving target detection with an SAR system based on Keystone transform [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(11): 1–4.

苏军海：　男，1980 年生，博士生，研究领域为 ISAR 成像及信号检测.

邢孟道：　男，1975 年生，教授，博士生导师，主要研究领域为雷达成像及目标识别.

保　铮：　男，1927 年生，教授，博士生导师，中国科学院院士，中国电子学会会士，主要研究领域为雷达信号处理及现代信号处理.