

采用 Radon 模糊变换的宽带雷达多目标检测方法

苏军海, 李亚超, 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, 710071, 西安)

摘要: 针对多目标包络走动率不一致的问题,提出一种采用 Radon 模糊变换的宽带雷达多目标检测方法(RAT-CFAR). 该方法根据距离频域单元信号模糊函数的带状分布性质,对模糊变换后的带状域做 Radon 变换以实现信号能量的非相干积累,然后利用单元平均恒虚警进行检测,通过 Radon 积分的峰值对应的角度获得目标加速度的估计. 与包络对齐相干积累检测目标方法相比,RAT-CFAR 方法在信噪比为 5 dB 以上时可以检测多个目标. 仿真结果表明,RAT-CFAR 方法的加速度的分辨率可以达到 0.5 m/s^2 .

关键词: 宽带检测;带状分布;Radon 模糊变换
中图分类号: TN957. 51 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)04-0085-05

A Wideband Radar Detection Method for Multi-Target Using
Radon Ambiguity Transform

SU Junhai, LI Yachao, XING Mengdao, BAO Zheng
(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: With different envelope walks for multi-target in the wideband environment, a RAT-CFAR method is proposed. The method uses the Radon ambiguity transform to accumulate signal energy incoherently and to detect targets in the range frequency domain. The strip distribution of the ambiguity function for range frequency domain signal is used, and the Radon transformation is applied to the ambiguity function to accumulate signal energy incoherently. Then the targets can be detected by the cell average constant false alarm ration, and the acceleration of the targets can be estimated from the corresponding angle of the peaks in Radon integral. Compared the method that uses envelope alignment to coherently accumulate signal energy to detect targets, the RAT-CFAR can detect multi-targets under the ratio of signal to noise higher than 5 dB. Simulation results show that the radial acceleration resolution of the RAT-CFAR achieves the level of 0.5 m/s^2 .

Keywords: wideband detection; strip distribution; Radon ambiguity transform

逆合成孔径雷达(ISAR)成像技术能对目标进行全天候、全天时和远距离观察,获得目标的高分辨率图像,从而对目标进行识别^[1-2]. 然而,在对目标进行成像、识别之前必须先对目标进行检测. 文献[3]通过距离包络对齐和参数估计,并沿方位相干积累来提高检测性能,但由于不同目标的参数不同,不可能同时实现包络对齐. 文献[4]对距离压缩后的方位数

据进行 Radon 变换,从而实现运动目标的检测,但该方法的运算量较大. 本文提出一种在距离频域采用 Radon 模糊变换对目标能量进行积累,并利用单元平均恒虚警来检测目标的新方法(RAT-CFAR). 该方法通过对目标能量的积累和恒虚警处理,在信噪比较高的情况下可以有效地检测多目标.

1 目标的回波信号分析

通常,我们采用散射点模型对雷达的回波信号进行分析.雷达发射线性调频信号为

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

$$\text{式中: } \text{rect}(t_k/T_p) = \begin{cases} 1 & |t_k/T_p| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |t_k/T_p| > \frac{1}{2} \end{cases}; t_k \text{ 是用来计}$$

量电波传播的时间,称为快时间; t_m 是计量发射脉冲的时刻称为慢时间, $t_m = mT_r$ ($m=0,1,2\cdots$ 为脉冲序号), T_r 为脉冲重复时间; T_p 是脉宽; γ 是调频率; f_c 是发射信号的载频; t 是全时间, $t = t_k + t_m$.

通常飞机之类的目标只需要考虑径向速度和径向加速度,径向加加速度可以不考虑.在远场平面波假设下和较短的时间内,目标的转动角速度可以认为是常数 Ω ,则第 n 个目标的第 q 个散射点与雷达之间的瞬时距离^[5]为

$$R_{n,q}(t_m) \approx R_n + v_n t_m + \frac{1}{2} a_n t_m^2 + y_{n,q} \cos(\Omega t_m) - x_{n,q} \sin(\Omega t_m) \quad (2)$$

式中: R_n 为雷达到第 n 个目标的起始距离; v_n 和 a_n 分别为第 n 个目标的径向速度和径向加速度; $x_{n,q}$ 和 $y_{n,q}$ 分别为第 n 个目标的第 q 个散射点的坐标位置.考虑小角度下

$$\sin\theta \approx \theta; \cos\theta \approx 1 \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可以得到

$$R_{n,q}(t_m) \approx (R_n + y_{n,q}) + (v_n - x_{n,q}\Omega)t_m + \frac{1}{2} a_n t_m^2 \quad (4)$$

则雷达接收到的回波信号的基带信号为

$$s_r(t_k, t_m) = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{K_n} \sigma_{n,q} \text{rect}([t_k - 2R_{n,q}(t_m)]/c]/T_p) \cdot \exp[j\pi\gamma(t_k - 2R_{n,q}(t_m)/c)^2] \cdot \exp[-j4\pi f_c R_{n,q}(t_m)/c] \quad (5)$$

式中: N 为目标总数; K_n 为第 n 个目标上散射点的总数; $\sigma_{n,q}$ 是第 n 个目标上第 q 个散射点回波的幅度; c 是光速.

对回波进行匹配滤波后有

$$s'_r(t_k, t_m) = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{K_n} \sigma_{n,q} \text{sinc}[B(t_k - 2R_{n,q}(t_m)/c)] \cdot \exp[-j4\pi f_c R_{n,q}(t_m)/c] \quad (6)$$

式中: B 为信号带宽; $\text{sinc}(\cdot)$ 为辛格函数^[2].

由式(6)可以看出,由于目标的速度和加速度的

影响,目标的峰值位置会随着慢时间变化,发生包络徙动.为了消除这种影响,将式(6)变换到距离频域

$$s'_r(f_r, t_m) = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{K_n} \text{rect}(f_r/B) \sigma'_{n,p} \cdot \exp[-j4\pi(f_c + f_r)(R_n + y_{n,q})/c] \cdot \exp[-j4\pi(f_c + f_r)(v_n - x_{n,q}\Omega)t_m/c] \cdot \exp[-j2\pi(f_c + f_r)a_n t_m^2/c] \quad (7)$$

式(7)的指数项有3项:第1项为方位慢时间的常数项,代表散射点在距离上的分布;第2项为目标速度和转动角速度引起的多普勒项;第3项为目标的加速度引起的调频项.可以看出,实际方位慢时间信号为多个线性调频信号的和.

2 距离频域单元信号的模糊函数

一般来说,不同目标的速度和加速度不同,这里仅讨论加速度不同的情况.

信号 $s(t_m)$ 的模糊函数定义为

$$A_s(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t_m + \tau/2) s^*(t_m - \tau/2) \cdot \exp(-j\omega t_m) dt_m \quad (8)$$

式中: $*$ 为共轭运算.

将式(7)中的一个距离频域单元信号记为 $s(t_m; f_r)$,其模糊函数为

$$A_s(\tau, \omega; f_r) = A_{\text{auto}}(\tau, \omega; f_r) + A_{\text{cross1}}(\tau, \omega; f_r) + A_{\text{cross2}}(\tau, \omega; f_r) \quad (9)$$

式中: $A_{\text{auto}}(\tau, \omega; f_r)$ 、 $A_{\text{cross1}}(\tau, \omega; f_r)$ 和 $A_{\text{cross2}}(\tau, \omega; f_r)$ 分别为模糊函数的自身项、第1类交叉项和第2类交叉项

$$A_{\text{auto}}(\tau, \omega; f_r) = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{K_n} (\delta_{n,q})^2 \delta[\omega + 4\pi(f_c + f_r)a_n\tau/c] \exp[-j4\pi(f_c + f_r)(v_n - x_{n,q}\Omega)\tau/c]$$

$$A_{\text{cross1}}(\tau, \omega; f_r) = \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^{K_n} \sum_{l=1, l \neq q}^{K_n} \delta_{n,q} \delta_{n,l} \cdot \exp[-j4\pi(f_c + f_r)(y_{n,q} - y_{n,l})/c] \cdot \delta[\omega + 4\pi(f_c + f_r)(a_n\tau - \Omega(x_{n,q} - x_{n,l}))/c] \cdot \exp[-j2\pi(f_c + f_r)(2v_n - \Omega(x_{n,q} + x_{n,l}))\tau/c]$$

$$A_{\text{cross2}}(\tau, \omega; f_r) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1, j \neq n}^N \sum_{q=1}^{K_n} \sum_{l=1}^{K_j} \sigma_{n,q} \sigma_{j,l} \beta_{n,q,j,l} \cdot \exp[-j4\pi(f_c + f_r)(R_n - R_j + y_{n,q} - y_{j,l})/c] \cdot \exp[-j2\pi(f_c + f_r)(v_n + v_j - \Omega(x_{n,q} + x_{j,l}))\tau/c] \cdot \exp[-j\pi(f_c + f_r)(a_n - a_j)\tau^2/(2c)] \cdot \exp[jc(\omega + 4\pi(f_c + f_r)((a_n + a_j)\tau/2 + v_n - v_j - \Omega(x_{n,q} + x_{j,l}))/c)^2/(8\pi(f_c + f_r)(a_n - a_j))]$$

其中 δ 为冲击函数, $\beta_{n,q,j,l}$ 为与第 n 个目标第 q 个散射点和第 j 个目标第 l 个散射点相关的积分常数.

由式(9)中自身项和第 1 类交叉项的峰值位置可以看出,不同目标的自身项沿着与各自目标的加速度相关的斜率方向线性变化,不同目标的第 1 类交叉项的斜率与各自目标的自身项相同,但在 ω 轴上的截距则与各自目标的散射点的横距差有关.由对称性可知,不同目标的第 1 类交叉项在自身项两

侧对称分布,因此不同目标的第 1 类交叉项和自身项共同形成一个带状区域,这在后面的仿真中将会更加直观地看到.第 2 类交叉项与不同目标的加速度、速度和散射点的横距差都有关,因此其分布也更加没有规律,能量也更为分散.图 1 为单点和多点目标的模糊函数及 Radon 变换的实验结果.从图中可以看出,自身项和交叉项形成一个明显的带状区域,整个能量分布在自身项两侧逐渐降低.

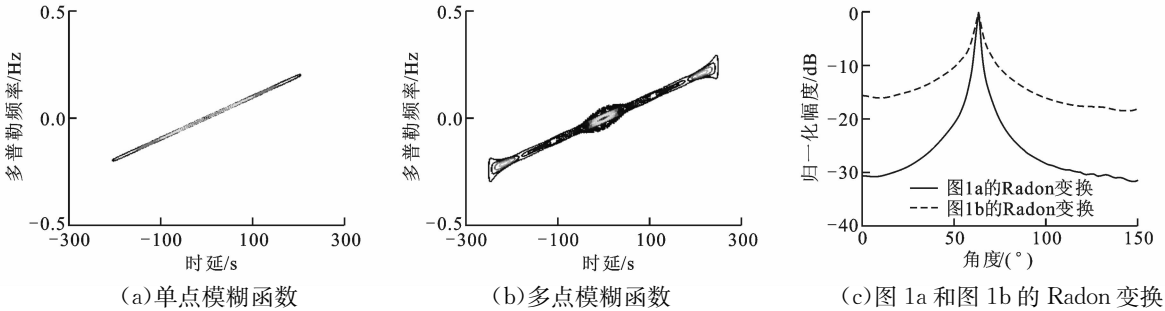


图 1 单点和多点目标的模糊函数及其 Radon 变换

3 Radon 模糊变换^[6-8]

由于所有调频信号的模糊函数的自身项都通过原点,因此这里只需对通过原点的直线进行角度搜索即可得到各个调频信号的调频率,即只需要在模糊平面进行一维搜索,而不需要在时频面上进行二维搜索,因此搜索调频率的运算量大为减小.模糊函数的 Radon 变换为

$$R(\mu) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |A_s(\tau, \mu\tau)| d\tau \tag{10}$$

式中: μ 为斜率; T 为积累时间.

从图 1c 中也可以看出,目标的峰值位置还是比较稳定的,因此可以按照估计的角度获得调频信号的调频率.

4 目标检测及参数估计

本文采用基于 Radon 变换的单元平均恒虚警 (CA-CFAR)^[9] 进行检测,检测门限可以按照虚警率的大小和实际的噪声水平进行设置,可以按照式 (11)、式(12)进行计算

$$T(n) = \frac{K \sum_{l=-L}^L x(n+l)w(n,l)}{2L_d} \tag{11}$$

$$w(n,l) = \begin{cases} 1 & l \in [n-L \quad n-L_p-1] \cup [n+L_p+1 \quad n+L] \\ 0 & l \in [n-L_p \quad n+L_p] \end{cases} \tag{12}$$

式中: K 为与虚警率有关的量; x 为输入检测序列; $w(n,l)$ 为窗函数; $2L_d$ 为检测窗的长度; $2L_p+1$ 为保护窗的长度; $L=L_d+L_p$.

随着噪声水平的变化,检测门限可自适应地进行调整.门限值的设置肯定会对性能产生影响,如果门限设置得太低,就会产生虚假目标,导致较高的虚警率,而如果门限设置得太高,就会漏掉目标,从而导致较高的漏警率.

由于不同目标的自身项只与各自目标的加速度有关,因此通过 Radon 变换,只可以获得其加速度值.当 2 个目标的加速度很接近时,通过 Radon 变换就无法区分不同的目标.通过仿真实验,在信噪比为 5 dB 以上时,2 个目标的加速度相差小于 0.5 m/s²,它们在 Radon 变换之后将无法区分.这时可以在时频面上对目标能量进行非相干积累以区分不同的目标.由于 2 个目标的速度、起始距离不同,在时频面上将为不同的带状分布区域,这时再利用 Radon 变换将有利于目标能量的积累.

由于噪声的影响,目标个数的检测会产生一定的错误概率,定义如下的检测概率

$$P_d = \frac{N_d}{N_a} \tag{13}$$

式中: N_d 为一定信噪比下正确检测目标的次数; N_a 为一定信噪比下进行的实验总次数.在一定信噪比下,当实验次数趋近于无穷大时,目标的检测概率就收敛于其真实值.对于不同信噪比下的检测概率进

行仿真实验,结果如图2所示.从图2中可以看出,随着信噪比的提高,目标的检测概率也越来越大.这是由于信噪比越高,利用本文的方法对能量积累的过程中信号所占的比重就越大,而噪声得到了一定程度的抑制,因此检测概率也越高.

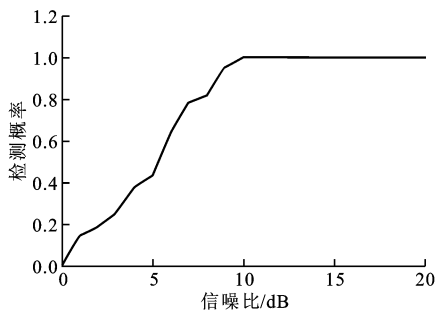


图2 不同信噪比的检测概率

假设峰值对应的角度为 θ_n , 那么 θ_n 对应的归一化调频率可以表示为

$$\mu_n = -\tan\left[\frac{\pi(\theta_n - 90^\circ)}{180^\circ}\right]/(2M) \quad (14)$$

式中: M 为脉冲数.

理论归一化调频率为

$$\mu_n = \frac{-2a_n(f_c + f_r)T_r^2}{c} \quad (15)$$

于是可以得到估计的加速度为

$$\hat{a}_n = c \tan\left[\frac{\pi(\hat{\theta} - 90^\circ)}{180^\circ}\right]/[4M(f_c + f_r)T_r^2] \quad (16)$$

由式(16)可以看出,加速度与估计的角度和脉冲数有关.在脉冲数一定时,对不同信噪比下单个目标(多点)的加速度估计的均方误差进行了计算,其实验结果如图3所示.从图中可以看出,在信噪比较高的情况下,加速度估计的精度很高.

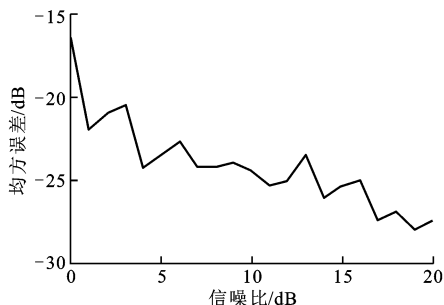


图3 不同信噪比的均方误差

5 仿真数据的处理结果及其分析

对图4a所示的飞机模型进行了仿真实验,结果

见图4.仿真参数如下:雷达发射信号的载频 f_c 为 5.2 GHz, 信号带宽 B 和采样频率 F_s 均为 120 MHz, 脉冲重复时间为 0.002 5 s, 目标1的径向速度和径向加速度分别为 40 m/s 和 10 m/s², 目标2的径向速度和径向加速度分别为 -80 m/s 和 5 m/s². 在仿真的回波中加入了复高斯白噪声,使整个回波的信噪比为 5 dB.

图4c为原始回波进行匹配滤波的结果,可以看出不同目标的包络走动率不同,不利于目标的能量积累.图4d为直接进行方位快速傅里叶变换(FFT)检测的结果,这时各个目标的包络有走动,而且方位信号还有二次项,因此效果不好,看不出有没有目标.图4e为采用文献[3]中的方法进行检测的结果,其效果也很差,因为包络对齐是将整个目标看作一个刚体,而对于不同目标来说,这个条件并不满足.图4f为采用文献[4]中的方法进行检测的结果,虽然可以检测到2个目标,可是它需要在半径-角度二维平面进行搜索,运算量较大.图4g为一个距离频域单元信号模糊函数分布,可以看出,在经过中心的地方,明显的有2个带状的区域,除了这2个区域之外,其余的都是第2类交叉项.图4h为对图4g做Radon变换的结果,可以看出积累的效果很明显.图4i为运用本文方法检测的结果,检测效果明显,而且由于采用本文方法进行能量积累时,只需要进行角度的一维搜索,因此本文方法的运算量较小.

利用峰值对应的角度和式(16)可以得到加速度的估计值.在信噪比为 5 dB 时,进行 100 次 Monte Carlo 实验,取其平均值作为加速度的估计值.仿真的加速度分别为 10 m/s² 和 5 m/s², 实验得到的加速度分别为 10.011 5 m/s² 和 4.996 8 m/s², 其相对误差分别为 0.115% 和 -0.064%, 可见本文参数估计方法的有效性.

6 结 论

本文提出一种新的宽带雷达多目标检测方法.通过理论分析,指出径向加速度不同的目标在模糊函数平面具有不同的带状分布区域,通过Radon模糊变换对目标能量进行积累,并利用单元平均恒虚警对目标进行检测.仿真实验表明,本文 RAT-CFAR 方法在信噪比为 5 dB 以上时可以检测多个目标,而且方法的加速度的分辨率可以达到 0.5 m/s².

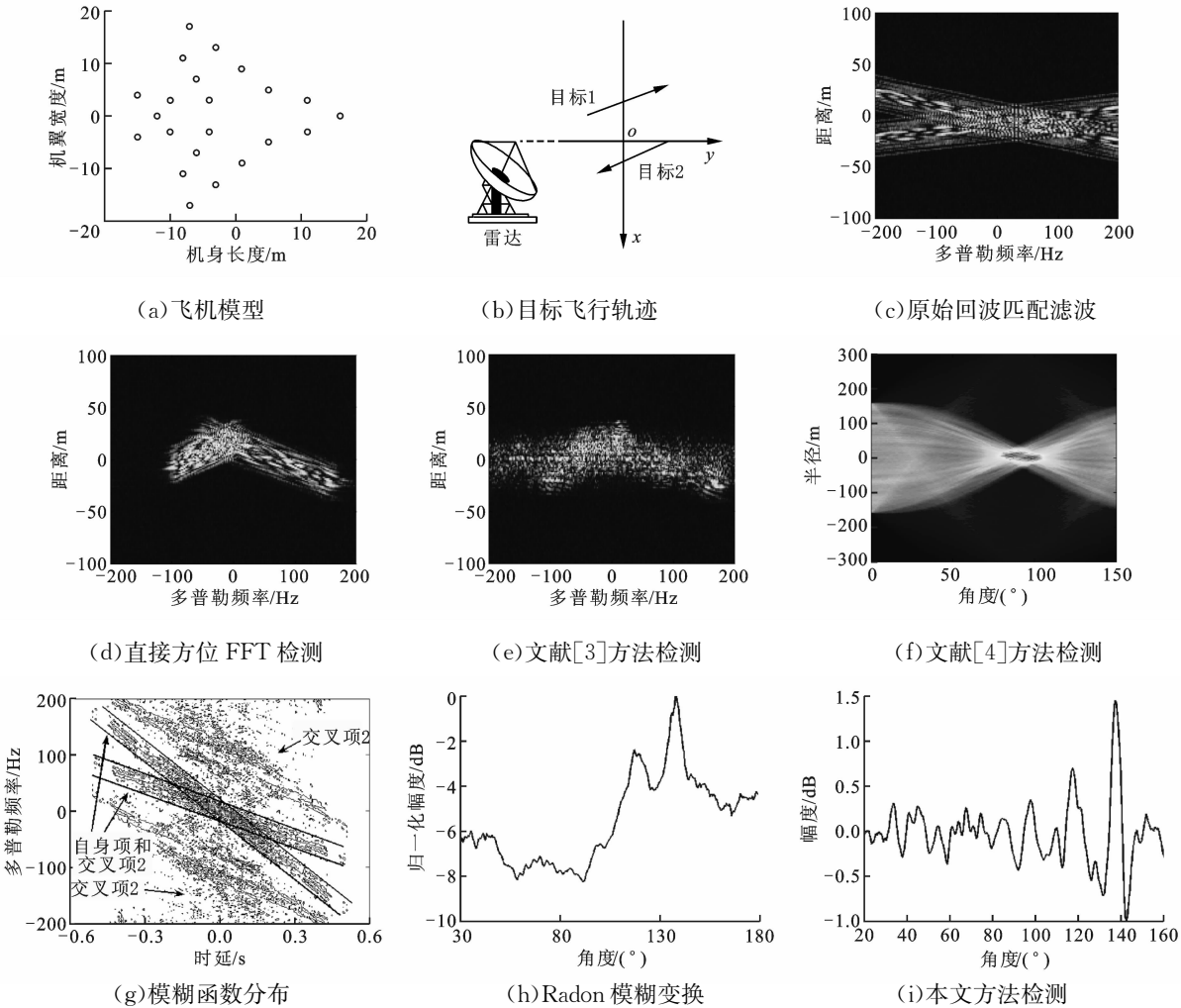


图 4 仿真数据处理及比较

参考文献:

[1] CHEN C C, ANDREWS H C. Target-motion-induced radar imaging [J]. IEEE Trans AES, 1980, 16 (1): 2-14.

[2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[3] 闫冯军. 宽带雷达信号检测方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学计算机与信息学院, 2006.

[4] 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]. 长沙: 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 2003.

[5] 李强, 张守宏, 张焕颖, 等. 基于差波束逆合成孔径雷达成像的角运动参数估计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(12): 1414-1418.

LI Qiang, ZHANG Shouhong, ZHANG Huanying, et al. Angle motion parameters estimation based on inverse synthetic aperture radar imaging for difference beam [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(12): 1414-1418.

[6] JENNISON B K. Detection of polyphase pulse compression waveforms using the Radon-ambiguity transform [J]. IEEE Trans on AES, 2003, 39(1): 335-343.

[7] SHARIF M R, ABEYSEKERA S S. Efficient wide-band signal parameter estimation using a Radon-ambiguity transform slice [J]. IEEE Trans on AES, 2007, 43(2): 673-688.

[8] WANG Minsheng, CHAN A K, CHUI C K. Linear frequency-modulated signal detection using Radon-ambiguity transform [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(3): 571-586.

[9] MAHAFAZA B R. Radar systems analysis and design using Matlab [M]. Boca Rotan, FL, USA: Chapman & Hall/CRC, 2000: 146-149.

(编辑 刘杨)