

一种米波相控阵雷达四代机目标检测算法

战立晓* 汤子跃 朱振波

(空军预警学院空天预警装备系 武汉 430019)

摘要: 四代机目标具有隐身、高速、高机动等特点,传统雷达对其检测失效。该文以米波相控阵雷达为背景,利用米波段反隐身特性和相控阵天线波束控制灵活的优势,提出了一种四代机目标长时间相参积累检测算法。首先利用修正的 Keystone 变换校正距离徙动,然后把各个距离单元数据变换到时频平面内,利用 Sandglass 变换解除慢时间域信号双线性变换中的时延和慢时间的耦合,最后通过 2 维快速傅里叶变换进行长时间相参积累和目标检测,仿真实验验证了所提算法的有效性。同时,该算法不需要进行搜索,且可通过快速变换算法实现,因此具有运算效率高,便于工程实现的优点。

关键词: 米波相控阵雷达; 目标检测; 四代机; 相参积累时间; 参数估计

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1163-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01249

The Fourth Generation Fighters Detection Algorithm for Metric-band Phased Array Radar

Zhan Li-xiao Tang Zi-yue Zhu Zhen-bo

(Department of Air/Space Early Warning Equipment, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The fourth generation fighters have the feature of stealth, supersonic and maneuvering, and detection performance of the fighters with traditional radar is bad. Considering the metric-band phased array radar, and using its feature of anti-stealth and agile beam forming ability, a novel long term coherent integration detection algorithm of the fourth generation fighters is proposed. First the modified Keystone transform is used to correct the range cell migration, and then each range cell data is transformed to the time-frequency plane, and Sandglass transform is used to solve the coupling effect between the delay and slow time of the bilinear transformation. Finally, the two dimensional FFT is performed to complete the long term coherent integration and target detection, and the effectiveness of the algorithm is verified by Monte Carlo simulation. At the same time, the algorithm does not need to search, and can be realized by high efficient operation.

Key words: Metric-band phased array radar; Target detection; The fourth generation fighter; Coherent integration time; Parameter estimation

1 引言

随着隐身技术和高性能武器装备的发展,以 F22 和 F35 为代表的第 4 代战斗机对传统雷达构成了严重的威胁。第 4 代战斗机具有隐身、超声速、高机动等特点,使得传统雷达难以对其进行有效探测和持续稳定跟踪。

飞机隐身的主要特征是被电磁波照射时其后向散射强度明显下降,一般使飞机的雷达散射截面(RCS)下降 10~20 dB,对应的作用距离下降到原来的 1/2 或 1/3。但是隐身的外形和材料只能在一定的频率范围内才能显示出效果,一般是在 1~20 GHz 频段范围内隐身效果最好。隐身飞机的有效反

射截面随探测信号频率降低有增加的趋势。在 1985 年国际雷达会议上,美国休斯敦公司的 Moraitis 等人分析了信号频率对外形隐身技术的影响,结果表明:米波段比 S 波段的 RCS 要高 15~30 dB。因此,利用米波雷达反隐身效果显著。同时由于反辐射导弹(ARM)天线尺寸的限制,米波雷达还具有抗 ARM 的天然优势^[1]。相控阵天线具有无惯性扫描、多波束形成等特点,米波相控阵雷达有效结合了米波雷达和相控阵天线的优势,为探测第 4 代战斗机提供了新的技术途径。

除了利用米波段增加目标的 RCS 外,还可以采用长时间积累技术^[2-5],米波相控阵雷达利用数字波束形成(DBF)技术可以增长目标的波束驻留时间,为长时间积累提供了可能。长时间积累技术包

2012-09-25 收到, 2013-02-01 改回

*通信作者: 战立晓 zhanlixiao123@163.com

括长时间相参积累和长时间非相参积累。相比长时间非相参积累,长时间相参积累考虑了接收回波相位信息,故其信噪比(SNR)积累增益远高于长时间非相参积累。但长时间相参积累面临两个严重问题:(1)四代机超声速飞行导致其在相参积累时间(CIT)内跨过单个距离分辨单元,即发生距离徙动问题;(2)四代机加速度高达几倍甚至十几倍的重力加速度 g ,使得回波多普勒谱严重展宽。在一个CIT内,若多普勒变化量超过一个多普勒分辨单元,则会发生多普勒徙动问题。因此利用长时间相参积累技术探测四代机目标时,必须选择合适的信号处理方法解决以上两个问题。

为了解决距离徙动问题,文献[6]提出一种回波包络插值移位补偿方法,通过精确搜索获得的速度进行插值和移位处理,最终实现距离徙动校正。文献[7]提出了基于Keystone变换的弱目标检测方法。Keystone变换可以校正距离徙动问题,而不需要目标速度信息,且Keystone变换后利用FFT可以获得较好的SNR积累增益。但现有雷达尤其是警戒雷达,通常采用低重频工作模式以探测远距离目标,因此大多数空中目标是多普勒模糊的。如果不对Keystone变换进行修正,其性能严重下降。为了解决多普勒徙动问题,文献[8]提出了一种基于离散多项式相位变换和分数阶傅里叶变换的加速目标检测算法,文献[9]提出了一种Dechirping变换加Clean的方法,但以上方法均为基于搜索的方法,实现时算法运算量较大。

本文针对米波相控阵雷达四代机目标检测问题开展研究,提出了一种无需搜索的长时间相参积累检测算法。本文结构如下:第2节给出了米波相控阵雷达目标回波信号模型,并对距离徙动和多普勒徙动问题进行了分析;在此基础上,第3节提出了四代机目标检测的长时间相参积累算法,并分析了算法运算量;第4节对所提算法进行了仿真验证,并与其它算法进行了比较,证明了所提算法的有效性;最后,对本文所提算法进行了总结。

2 米波相控阵雷达四代机回波信号模型及徙动问题分析

图1给出了米波相控阵雷达-目标空间几何模型。在图1中,米波相控阵雷达位于坐标原点 O ,其坐标为 $(0,0,0)$; T_g 为目标,其初始坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ; v 为目标运动的速度矢量; R_0 为目标至雷达的初始距离。假设目标的径向运动速度大小为 v ,径向加速度大小为 a ,则目标在时刻 t 距雷达的距离为

$$R(t) \approx R_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \quad (1)$$

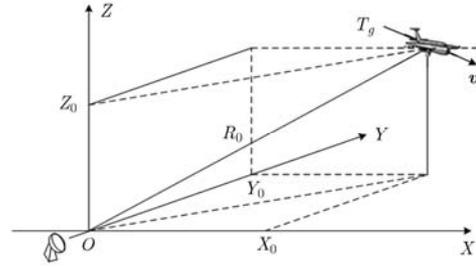


图1 米波相控阵雷达-目标空间几何模型

假设米波相控阵雷达发射Chirp脉冲信号,其数学表达式为

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi\gamma t^2) \quad (2)$$

其中 $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$, T_p 为脉冲时宽, B 为脉冲带宽,线性调频率 $\gamma = B/T_p$,脉冲压缩比 $D = T_p B$ 。

根据式(2),雷达发射的一组Chirp脉冲串信号可以表示为

$$v(t - mT_r) = p(t - mT_r) \exp[-j2\pi f_c(t - mT_r)] \quad (3)$$

其中 m 为发射脉冲个数, f_c 为载频, T_r 为脉冲重复周期, $f_r = 1/T_r$ 为脉冲重复频率。

假设距离雷达 $R(t)$ 处有一目标,且该目标的雷达回波数据记录在2维函数 $s(\tau, t_m)$ 中,其中 $\tau = t - mT_r$ 为“快时间”; $t_m = mT_r$ 为“慢时间”,令 $T = MT_r$,则 $t_m \in [-T/2, T/2]$; $\tau - t_m$ 为“距离时域-方位时域”,因此下变频后雷达的基带回波信号为

$$s(\tau, t_m) = A \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R(t_m)/c}{T_p}\right] \cdot \exp\left[j\pi\gamma\left(\tau - \frac{2R(t_m)}{c}\right)^2\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{t_m}{T}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi f_c R(t_m)}{c}\right] \quad (4)$$

式中 A 为目标回波幅度,其值与目标的RCS大小有关,波长 $\lambda = c/f_c$, c 为光速。

在式(4)中,对快时间 τ 做傅里叶变换,可得

$$S(f, t_m) = \frac{A}{\sqrt{\gamma}} \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{t_m}{T}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi(f + f_c)R(t_m)}{c}\right] \quad (5)$$

其中 f 为距离频率值。

又Chirp脉冲的频域匹配滤波函数 $H(f)$ 为

$$H(f) = \exp\left[j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right] \quad (6)$$

式(5)与式(6)相乘,直接在距离频域进行匹配滤波并对 f 求 IFFT 变回快时间域 τ 得

$$s(\tau, t_m) = A\sqrt{D}\text{sinc}\left[B\left(\tau - \frac{2R(t_m)}{c}\right)\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{t_m}{T}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi R(t_m)}{\lambda}\right] \quad (7)$$

分析式(7)可以得出:(1)脉冲压缩使信号功率提高 D 倍;(2)距离包络的峰值位置随着 $R(t_m)$ 的变化而变化,且在积累时间 T 内,距离变化量 R_M 为

$$R_M = \max(R(t_m)) - \min(R(t_m)) \quad (8)$$

式(7)中回波信号的相位 $\Phi(t_m)$ 为

$$\Phi(t_m) = -\frac{4\pi R(t_m)}{\lambda} \quad (9)$$

对式(9)中的慢时间 t_m 求微分,得到目标运动引起的多普勒频率 f_d 为

$$f_d(t_m) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi(t_m)}{dt_m} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR(t_m)}{dt_m} = -\frac{2}{\lambda} \cdot (v + at_m) \quad (10)$$

由式(10)可知,目标运动引起的多普勒频率是时变的,且在积累时间 T 内,多普勒变化量 f_{dM} 可表示为

$$f_{dM} = \max(f_d(t_m)) - \min(f_d(t_m)) \quad (11)$$

为了说明米波相控阵雷达的距离徙动和多普勒徙动问题,首先给出距离分辨单元和多普勒分辨单元的定义如下:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (12)$$

$$\rho_{f_d} = \frac{1}{T} = \frac{1}{MT_r} = \frac{f_r}{M} \quad (13)$$

在积累时间 T 内,若距离变化量 R_M 大于 ρ_r ,则会发生距离徙动问题;若多普勒变化量 f_{dM} 大于 ρ_{f_d} ,则会发生多普勒徙动问题。假设米波相控阵雷达和目标参数如表 1 所示。图 2 给出了距离变化量与积累脉冲数关系,其中 $\rho_r = 30$ m,由图 2 可知,

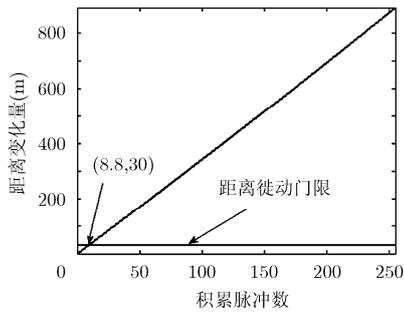


图 2 距离变化量与积累脉冲数关系

表 1 米波相控阵雷达和目标参数

载频	150 MHz	采样率	10 MHz
脉冲时宽	10 μ s	目标初始距离	100 km
带宽	5 MHz	初始径向速度	680 m/s
脉冲重复频率	200 Hz	径向加速度	3 g
CIT 脉冲数	256	回波幅度 A	1

当积累脉冲数 $M \geq 9$ 时会发生距离徙动。图 3 给出了多普勒变化量与积累脉冲数关系,其中 $\rho_{f_d} = 0.78$ Hz,当 $M \geq 6$ 时会发生多普勒徙动。综上可得,长的相参积累时间必然导致距离徙动和多普勒徙动问题。

3 米波相控阵雷达四代机目标检测算法

3.1 基于 Keystone 变换的距离徙动校正算法

把式(1)代入式(5),可得

$$S(f, t_m) = \frac{A}{\sqrt{\gamma}} \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) \exp\left[-j\pi\frac{f^2}{\gamma}\right] \text{rect}\left(\frac{t_m}{T}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(f+f_c)R_0}{c}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(f+f_c)vt_m}{c}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi(f+f_c)at_m^2}{c}\right] \quad (14)$$

根据 Keystone 变换,有 $(f+f_c)t_m = f_c\tau_m$,代入式(14)并与式(6)相乘可得

$$S(f, \tau_m) \approx \frac{A}{\sqrt{\gamma}} \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau_m}{T}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(f+f_c)R_0}{c}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_c v \tau_m}{c}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi f_c^2 a \tau_m^2}{c(f+f_c)}\right] \quad (15)$$

由于载频 f_c 远高于距离频率值 f ,故 $f_c/(f+f_c) \approx 1$,则式(15)可以简化为

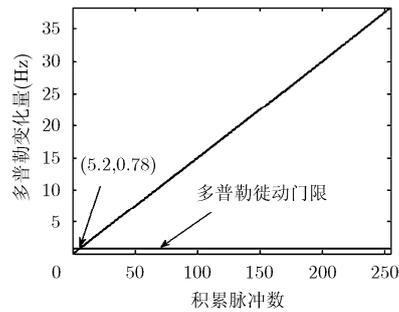


图 3 多普勒变化量与积累脉冲数关系

$$S(f, \tau_m) \approx \frac{A}{\sqrt{\gamma}} \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau_m}{T}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi(f+f_c)R_0}{c}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi v\tau_m}{\lambda}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi a\tau_m^2}{\lambda}\right] \quad (16)$$

对式(16)中的距离维做 IFFT, 可得距离时域-方位时域表达式 $s(\tau, \tau_m)$ 为

$$s(\tau, \tau_m) = A\sqrt{D} \exp\left[-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right] \text{sinc}\left[B\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \cdot \text{rect}\left(\frac{\tau_m}{T}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi v\tau_m}{\lambda}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi a\tau_m^2}{\lambda}\right] \quad (17)$$

分析式(17)可知, 经过 Keystone 变换后, 不同脉冲回波的时延均校正至 $2R_0/c$, 距离徙动问题已解决。在式(17)中, 令增益因子 G 为

$$G = A\sqrt{D} \exp\left[-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}\right] \text{sinc}\left[B\left(\tau - \frac{2R_0}{c}\right)\right]$$

由于 G 只与快时间 τ 有关, 而与慢时间 τ_m 无关, 所以在方位维可看作是常量, 令多普勒频率 $f_d = -2v/\lambda$, 线性调频率 $\gamma_a = -2a/\lambda$, 则式(17)可简化为

$$s(\tau_m) = G \text{rect}\left(\frac{\tau_m}{T}\right) \exp(j2\pi f_d \tau_m) \exp(j\pi \gamma_a \tau_m^2) \quad (18)$$

3.2 慢时间域欠采样时的修正算法

四代机目标超声速运动, 且米波相控阵雷达的脉冲重复频率 f_r 一般较低, 因此常常导致雷达回波信号在慢时间域欠采样, 即通常所说的多普勒模糊问题。此时, 为保证 Keystone 变换后的距离徙动校正效果, 我们需要对 Keystone 变换进行修正。因为只涉及多普勒频率 f_d , 故把式(18)中的多普勒指数项 $\exp(j2\pi f_d \tau_m)$ 单独进行分析。

令 f_{da} 为混叠多普勒频率, 则慢时间域欠采样时的多普勒频率 f_d 可以表示为

$$f_d = f_{da} + Ff_r \quad (19)$$

式中 F 为多普勒频率折叠因子, 可以由式(20)求得

$$F = \frac{\max(f_d(t_m)) - \text{mod}(\max(f_d(t_m)), f_r)}{f_r} \quad (20)$$

把式(19)代入指数项 $\exp(j2\pi f_d \tau_m)$ 得到

$$\exp(j2\pi f_d \tau_m) = \exp(j2\pi Ff_r \tau_m) \exp(j2\pi f_{da} \tau_m) \quad (21)$$

分析式(21)可知, 慢时间域欠采样时的 Keystone 变换修正因子为 $\exp(j2\pi Ff_r \tau_m)$ 。

3.3 基于 Sandglass 变换的长时间相参积累算法

为了解决多普勒徙动问题, 实现多普勒维的长时间相参积累, 我们利用时频分析方法进行处理。式(18)中信号 $s(\tau_m)$ 的双线性变换为

$$R_s(\tau_m, \tau') = s\left(\tau_m + \frac{\tau'}{2}\right) s^*\left(\tau_m - \frac{\tau'}{2}\right) = G^2 \text{rect}\left(\frac{\tau_m}{T}\right) \cdot \exp(j2\pi f_d \tau') \exp(j2\pi \gamma_a \tau_m \tau') \quad (22)$$

则 $s(\tau_m)$ 的 Wigner-Ville 分布为

$$W_s(\tau_m, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_s(\tau_m, \tau') e^{-j2\pi f \tau'} d\tau' = G^2 \int_{-T/2}^{T/2} e^{j2\pi(f_d + \gamma_a \tau_m) \tau'} e^{-j2\pi f \tau'} d\tau' = G^2 T \text{sinc}\{T[f - (f_d + \gamma_a \tau_m)]\} \quad (23)$$

由式(23)可以看出, 线性调频率 γ_a 的存在, 使其在时频平面内的分布为一条斜线, 该斜线在频率轴上的截距为中心频率 f_d , 斜率为 γ_a 。在式(22)第2个指数项中由于 τ_m 和 τ' 存在耦合, 导致了此斜线分布。如果能消除这一耦合项的影响, 使得时频分布为平行于时间轴的直线, 则即可对信号进行相参积累。为实现这一目的, 可做如式(24)的尺度变换

$$\tau_m \tau' = C \tau'_m \Rightarrow \tau'_m = \frac{\tau'}{C} \tau_m \quad (24)$$

式(24)即为 Sandglass 变换^[10], 其中 τ'/C 为尺度变换因子, C 为常数, 其大小会影响尺度变换对信号的检测性能。由于 τ' 是确定的变化量, 只需确定因子 C 的选取, 因而也称 C 为尺度因子。

把式(24)代入式(22)可以得到

$$R_s(\tau'_m, \tau') = G^2 \text{rect}\left(\frac{\tau'}{T}\right) \exp(j2\pi f_d \tau') \cdot \text{rect}\left(\frac{\tau'_m}{T}\right) \exp(j2\pi \gamma_a C \tau'_m) \quad (25)$$

由式(25)可知, 经过变量代换, τ_m 和 τ' 的耦合已经消除, 取而代之的是尺度因子 C 调节的新时间变量 τ'_m 。选取适当的尺度因子 C , 对式(25)进行2维傅里叶变换, 得到

$$R_s(f_c, f) = G^2 T^2 \text{sinc}[T(f - f_d)] \cdot \text{sinc}[T(f_c - C\gamma_a)] \quad (26)$$

由式(26)可知, 信号的2维频域为两个 sinc 函数的乘积, 对 sinc 峰值进行门限检测即可实现对目标有无的判决。

基于以上理论推导, 图4给出了米波相控阵雷达四代机目标检测算法流程图, 具体步骤如下:

步骤1 得到原始回波数据后, 对快时间做傅里叶变换, 把回波数据变换为距离频域-方位时域的 $S(f, t_m)$ 。

步骤2 根据式(15)和式(21), 对步骤1所得数据进行修正的 Keystone 变换, 并与 Chirp 脉冲的频域匹配滤波函数 $H(f)$ 相乘, 得到数据 $S(f, \tau_m)$, 对其距离维做 IFFT, 得到距离时域-方位时域表达式 $s(\tau, \tau_m)$, 完成由一次相位项引起的距离徙动问题的校正。

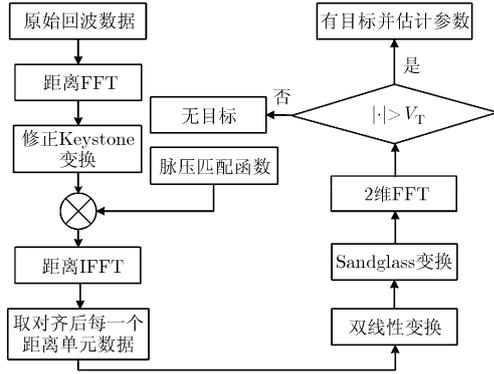


图 4 米波相控阵雷达四代机目标检测算法流程图

步骤 3 在数据 $s(\tau, \tau_m)$ 中，计算每个距离单元对应的慢时间域数据的双线性变换，然后做 Sandglass 变换，如式(25)所示。对变换后的数据做 2 维傅里叶变换，得到 sinc 峰值，该峰值与预设门限 V_T 进行比较，若过门限则判为有目标，否则无目标。

3.4 算法实现及运算量分析

本文算法通过计算机实现时需要将信号离散化，由于 Keystone 变换和 Sandglass 变换均为尺度变换，所不同的只是尺度大小不一样，所以两种变换的计算机实现算法具有相似性。

Keystone 变换的计算机实现有多种方法，如 sinc 内插法，DFT-IFFT 法，Chirp-Z-IFFT 法等。下面分析以上 3 种方法的运算量。设快时间距离频域采样点数为 N ，相参积累脉冲数为 M 。以上 3 种算法的运算量分别为：sinc 内插法的复数乘法次数为 $N \times M^2$ ，DFT-IFFT 法的复数乘法次数为 $N \times M^2 + N \times (M \log_2 M / 2)$ ，Chirp-Z-IFFT 法的复数乘法次数为 $(P+2M + 3P \log_2 P / 2 + M \log_2 M / 2) \times N$ ，其中 P 的取值范围为 $P \geq 2M - 1$ ，且 P 为 2 的整数次幂。由此可知，当 N 和 M 取值较大时，DFT-IFFT 法运算量较大，sinc 内插法次之，Chirp-Z-IFFT 法运算量最小，且其实时处理效率较高，故本文中 Keystone 变换的实现利用 Chirp-Z-IFFT 法。

对于 Sandglass 变换的实现我们采用算法复杂度较低的 Chirp-Z-IFFT 法实现。由于信号 $s(\tau_m)$ 的双线性变换为 $M \times M$ 维，故 Sandglass 变换需要复数乘法次数为 $(P + 2M + 3P \log_2 P / 2 + M \log_2 M / 2) \times M$ 。

4 仿真与分析

仿真参数如表 1 所示，假设噪声为零均值加性复高斯白噪声。

图 5 给出了脉冲压缩前 $\text{SNR} = -15 \text{ dB}$ 时第 171 个距离单元的数据采用不同算法的检测结果比较情况，其中图 5(a)为本文算法结果，图 5(b)为 Radon-Wigner 变换算法^[11]结果，图 5(c)为 Radon-Ambiguity 变换算法^[12]结果。由图 5 可知在 $\text{SNR} = -15 \text{ dB}$ 时不同算法得到的目标峰值均明显高于噪声电平，容易被检测。仿真中 $D = T_p B = 50$ ，所以脉冲压缩的 SNR 增益为 $10 \lg(D) \approx 17 \text{ dB}$ ，又 CIT 内脉冲数为 $M = 256$ ，故理想相参积累的 SNR 增益为 $10 \lg(M) \approx 24 \text{ dB}$ 。图 6 给出了脉冲压缩前 $\text{SNR} = -25 \text{ dB}$ 时第 171 个距离单元的数据采用不同算法的检测结果比较情况，其中图 6(a)为本文算法结果，图 6(b)为 Radon-Wigner 变换算法结果，图 6(c)为 Radon-Ambiguity 变换算法结果。比较图 6(a), 6(b) 和 6(c)可知，当 $\text{SNR} = -25 \text{ dB}$ 时，本文算法的检测结果明显优于 Radon-Wigner 变换算法和 Radon-Ambiguity 变换算法结果。

表 2 给出了不同 SNR 时本文算法目标参数估计情况。由式(26)可知，2 维 FFT 后所得数据的横坐标为多普勒频率 f_d ，纵坐标为尺度因子与调频率之积 $C\gamma_a$ ，图 5(a)和图 6(a)的纵坐标已经除以尺度因子 C ，因此对应的是调频率 γ_a 。这两图中目标峰值对应的横坐标均为 $\hat{f}_d = 80.0787 \text{ Hz}$ ，纵坐标均为 $\hat{\gamma}_a = 29.6826 \text{ Hz/s}$ 。由于 $f_r = 200 \text{ Hz}$ ，而目标多普勒为 $f_d = 680 \text{ Hz}$ ，所以估计的多普勒为混叠后的多普勒，且折叠因子 $F = 3$ 。由此得到的径向速度和径向加速度的估计值分别为 $\hat{v} = 680.0787 \text{ m/s}$ ， $\hat{a} = 29.6826 \text{ m/s}^2$ 。

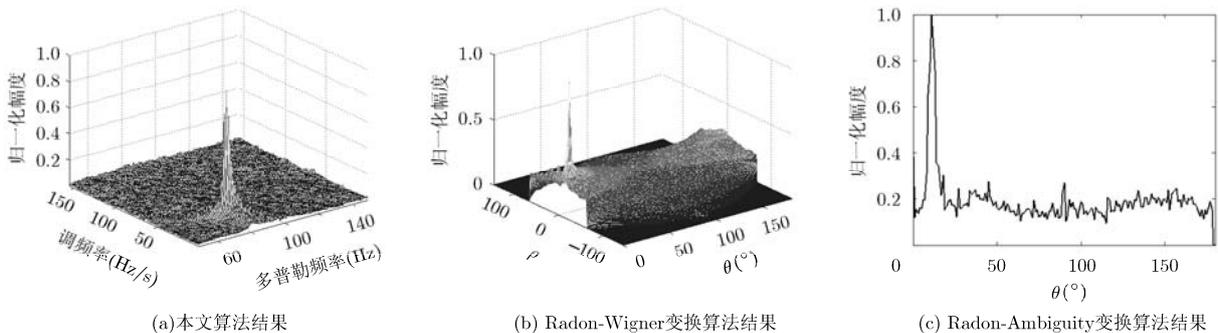


图 5 $\text{SNR} = -15 \text{ dB}$ 时不同算法结果比较情况

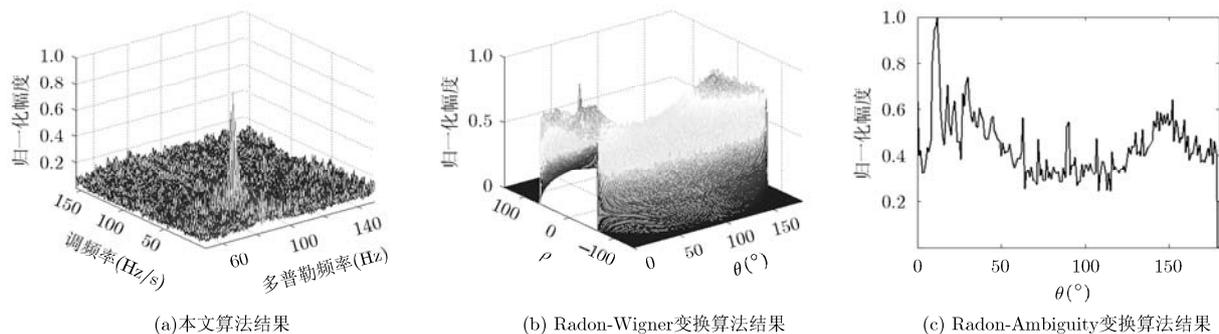


图6 SNR=-25 dB 时不同算法结果比较情况

表2 不同 SNR 时本文算法目标参数估计情况

	\hat{f}_d (Hz)	$\hat{\gamma}_a$ (Hz/s)	\hat{v} (m/s)	\hat{a} (m/s ²)
SNR=-15 dB	80.0787	29.6826	680.0787	29.6826
SNR=-25 dB	80.0787	29.6826	680.0787	29.6826

为了从统计意义上说明本文算法的目标检测性能,图7给出了不同SNR条件下的检测性能曲线,其中米波相控阵雷达和目标参数如表1所示,噪声为零均值加性复高斯白噪声。仿真中虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$, Monte Carlo 仿真次数为 10^4 次。作为比较,同时给出了相同条件下 Radon-Wigner 变换算法和 Radon-Ambiguity 变换算法的检测性能曲线。由文献[13]可知,虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$,检测概率 $P_d = 0.5$ 条件下单脉冲检测所需SNR约为11.2 dB,而理想相参积累时,总的SNR增益为 $10\lg(DM) \approx 41$ dB,故本文参数条件下的最低可检测SNR约为-29.8 dB。由图7可知, Monte Carlo 仿真结果较理想相参积累时约有1.5 dB的SNR损失。由仿真可知,本文算法通过对四代机目标回波的长时间相参积累,可以提升对四代机目标的探测能力,也为雷达反隐身提供了一种新的技术途径。

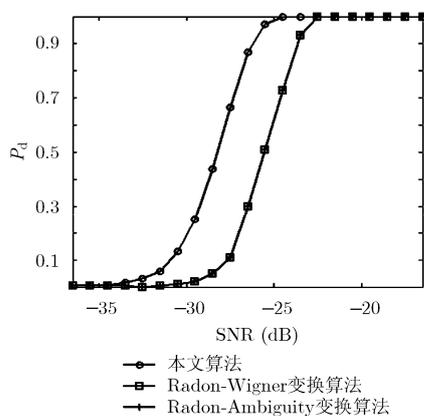


图7 不同算法检测性能曲线比较情况

5 结束语

传统雷达利用脉冲压缩,动目标检测等相参积累技术即可实现对匀速运动目标的良好检测。但对以F22和F35为代表的四代机目标存在回波距离徙动、多普勒徙动和检测信噪比不足的问题。为了解决这些问题,本文基于米波相控阵雷达,提出了一种长时间相参积累检测算法。该算法可以同时完成目标检测和参数估计。从仿真结果来看,所提算法所需检测SNR比Radon-Wigner变换算法和Radon-Ambiguity变换算法降低约2~3 dB,证明了其有效性。本文算法的数字实现方法复杂度较低,便于工程实现。

参考文献

- [1] Zachepitsky A. VHF (metric band) radars[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, 15(6): 9-14.
- [2] 保铮. 雷达信号的长时间积累[C]. 第七届中国雷达学术年会特邀报告, 南京, 1999. 10: 9-15.
Bao Z. Long term integration of radar signal[C]. Specially Invited Report in the 7th Radar Conference of China, Nanjing, 1999. 10: 9-15.
- [3] Xing M, Su J, Wang G, et al. New parameter estimation and detection algorithm for high speed small target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 214-224.
- [4] 杨志伟, 贺顺, 吴孙勇. 天基雷达高速微弱目标的积累检测[J]. *宇航学报*, 2011, 32(1): 109-114.
Yang Z, He S, and Wu S. A long-term accumulated detection approach to high speed weak target form space-borne radars[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(1): 109-114.
- [5] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, Asensio-Lopez A, et al. Small-target detection in high-resolution heterogeneous sea-clutter: an empirical analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 1880-1898.
- [6] 陈远征, 朱永锋, 赵宏钟, 等. 基于包络插值移位补偿的高速

- 运动目标的积累检测算法研究[J]. 信号处理, 2004, 20(4): 387-390.
- Chen Y, Zhu Y, Zhao H, *et al.*. Detection algorithm research of high velocity moving target based on the envelope interpolation[J]. *Signal Processing*, 2004, 20(4): 387-390.
- [7] 张卫杰, 高昭昭, 许博, 等. 基于 Keystone 变换的警戒雷达信号处理[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2007-2011.
- Zhang W, Gao Z, Xu B, *et al.*. Novel signal processing method for surveillance radar based on Keystone transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 2007-2011.
- [8] 庞存锁. 基于离散多项式相位变换和分数阶傅里叶变换的加速目标检测算法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 184-188.
- Pang C S. An accelerating target detection algorithm based on DPT and fractional Fourier transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 184-188.
- [9] Bao Q, Chen Z, Zhang Y, *et al.*. Long term integration of radar signals with unknown Doppler shift for ubiquitous radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(2): 219-227.
- [10] Liu Y, Xing M, Guo R, *et al.*. Sandglass transformation for synthetic aperture radar detection and imaging of ship at low signal-to-clutter-plus-noise ratio[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(3): 361-373.
- [11] 许建忠, 孙红伟, 孙业岐, 等. 采用 Radon-Wigner 变换的二维波达方向估计[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 997-1001.
- Xu J, Sun H, Sun Y, *et al.*. 2-D direction of arrival estimation method using Radon-Wigner transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 997-1001.
- [12] Sharif M and Abeysekera S. Efficient wideband signal parameter estimation using a Radon-Ambiguity transform slice[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(2): 673-688.
- [13] 何友, 关键, 孟祥伟, 等. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. (第 2 版), 北京: 清华大学出版社, 2011: 14-23.
- He Y, Guan J, Meng X, *et al.*. Radar Target Detection and CFAR Processing[M]. Second Edition, Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 14-23.
- 战立晓: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像.
- 汤子跃: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理、雷达成像等.
- 朱振波: 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像.