

一种无源雷达高速机动目标检测新方法

杨宇翔* 同武勤 熊瑾煜

(西南电子电信技术研究所 成都 610041)

摘 要: 针对无源雷达中高速机动目标在积累时间内出现距离和多普勒徙动, 导致检测性能恶化的问题。该文建立了目标信号模型, 提出一种基于 Keystone 变换结合傅里叶变换分段计算的高速机动目标检测方法, 通过信号重叠分段划分快时间和慢时间, 利用 Keystone 变换校正径向速度差的距离徙动, 再对慢时间进行二次分段, 并结合傅里叶变换的分段计算完成径向加速度差的距离和多普勒徙动校正, 实现信号相参积累和目标检测。仿真和实测数据结果验证了该方法的有效性。

关键词: 无源雷达; 目标检测; 相参积累; 机动运动; Keystone 变换

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)12-3008-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01984

A Novel Algorithm for Detection of a Maneuvering Target in Passive Radar

Yang Yu-xiang Tong Wu-qin Xiong Jin-yu

(Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: For passive radar, the maneuvering target causes range cell migration and Doppler cell migration, leading to a detection ability loss. The signal model is established and a novel detection algorithm is proposed to solve the problem. Firstly, the fast and slow time domains are divided by the overlapping segment method and the Keystone transform is adopted in order to correct the range cell migration due to differential velocity. Then the signal is divided into segments second time in the slow time domain. Finally range cell migration and Doppler cell migration induced by differential acceleration are corrected by the segmentation implementation method of the Fourier transform to achieve long term coherent integration. Experiments based on simulated and practical signals verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Passive radar; Target detection; Coherent integration; Maneuvering; Keystone transform

1 引言

无源雷达具有配置灵活, 隐蔽性强等优点, 受到广泛关注。当目标距离较远时, 信号信噪比较低, 可通过延长积累时间增加信号能量, 但对于高速机动目标, 随着时间增加将出现距离和多普勒徙动, 造成能量分散, 导致检测性能恶化。

针对此问题, 文献[1]分析了目标机动导致的时/频差参数时变问题, 但并未深入研究距离和多普勒徙动的快速校正方法; 文献[2,3]利用 Keystone 变换校正径向速度距离徙动, 但未考虑目标机动性, 仅适用于匀速目标; 文献[4-6]虽在信号模型中引入了加速度, 并基于 Keystone 变换和时频变换分别校正了距离和多普勒徙动, 但其忽略了加速度引起的距离弯曲及速度距离徙动校正时在加速度指数项新引

入的快时间频率和慢时间的耦合关系。

此外, 关于机动目标徙动校正技术, 在脉冲雷达微弱目标检测与雷达运动目标成像中已存在大量研究。文献[7-9]先完成距离徙动校正, 再利用时频变换估计目标加速度, 进而完成多普勒徙动补偿, 但其同样未考虑加速度在距离徙动校正前后均存在的距离弯曲现象; 文献[10,11]利用广义二阶 Keystone 变换校正加速度距离弯曲, 再通过一个单元数据以时间频率变换估计调频率并完成补偿, 然后由二阶 Keystone 变换校正残余距离徙动, 但一次 Keystone 变换后, 距离徙动仍然明显, 调频率难以估计; 文献[12,13]利用线性调频信号的驻相原理, 在距离-多普勒 2 维频率域构造补偿函数, 同时消除径向速度和加速度的距离徙动影响, 但对于其它信号类型却并不适用; 文献[14,15]先基于 Keystone 变换完成速度距离徙动校正, 再构造由快时间频率和加速度组成的二次相位补偿函数, 校正加速度的距

2013-12-19 收到, 2014-05-06 改回

国家 863 计划项目(2013AA7074037B)资助课题

*通信作者: 杨宇翔 yxfoever@163.com

离和多普勒徙动,但其需在加速度搜索过程中反复计算 2 维傅里叶变换,复杂度高,应用受限。

对此,本文提出一种基于 Keystone 变换结合傅里叶变换分段计算的高速机动目标检测方法,通过信号重叠分段划分快时间和慢时间,利用 Keystone 变换校正速度差引起的距离徙动,然后在慢时间域进行二次分段,结合傅里叶变换的分段计算方法,校正加速度差的距离和多普勒徙动,实现相参积累。仿真和实测数据结果表明了该方法的有效性。

2 机动目标信号模型

无源雷达中,目标与接收站位置关系如图 1 所示。 S_1, S_2 为两接收站,目标初始位置为 O ,与两接收站的距离分别为 R_1, R_2 ,目标以速度 v ,加速度 a 作匀加速运动,运动方向与连线 OS_1, OS_2 的夹角分别为 α, β , t 时刻运动到 O' 。

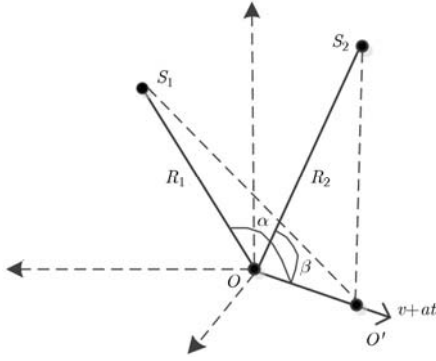


图1 目标与接收站几何关系

根据余弦定理可得 t 时刻目标与两接收站间的径向距离差 $\Delta R(t)$,在 $t=0$ 处对其作泰勒展开,可得

$$\Delta R(t) = R_0 + v_d t + \frac{1}{2} a_d t^2 \quad (1)$$

其中, $R_0 = R_1 - R_2$, $v_d = v(\cos \beta - \cos \alpha)$, $a_d = v^2(\sin^2 \alpha / R_1 - \sin^2 \beta / R_2) + a(\cos \beta - \cos \alpha)$, 分别为初始距离差、径向速度差和径向加速度差。

故两接收站的机动目标基带信号模型为

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= u(t) \\ y(t) &= \gamma u \left(t - \frac{R_0 + v_d t + \frac{1}{2} a_d t^2}{c} \right) \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{R_0}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{v_d}{c} t \right) \exp \left(-j\pi f_0 \frac{a_d}{c} t^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, γ 为相对幅度, f_0 为信号载波频率, c 为光速。

可见,信号包络和载频将随时间变化产生距离和多普勒徙动,直接积累将出现增益损失,需进行校正。

3 检测方法

3.1 分段原理

不失一般性,假设 $u(t)$ 为带限信号,带宽为 BW 。根据最大径向速度差 $v_{\max}$ 对信号分段,使得段内无径向速度差引起的距离徙动,即分段持续时间 $T_{\max}$ 内,最大速度差引起的距离差变化小于一个距离单元。

$$T_{\max} \leq \frac{c}{BW v_{\max}} \quad (3)$$

故分段长度为 $N = f_s T_{\max}$, 其中 f_s 为采样频率。采用 2 维分时处理的方式,划分段内为快时间 t_f ,段间为慢时间 t_m 。将式(2)写成快-慢时间形式为

$$\left. \begin{aligned} x(t_f, t_m) &= u(t_f) \\ y(t_f, t_m) &= \gamma u \left(t_f - \frac{R_0 + v_d t_m + (1/2) a_d t_m^2}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{R_0}{c} \right) \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{v_d}{c} t_m \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j\pi f_0 \frac{a_d}{c} t_m^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

此外,确定分段长度时还应基于积分抽取的思想考虑其对相参积累后峰值判决的影响^[16]。假设时差搜索区间为 $[\tau_0 - \tau_{\max}, \tau_0 + \tau_{\max}]$, 其中, τ_0 为时差中心, $\tau_{\max}$ 为时差范围,则单向时差搜索样点数为 $K = f_s \tau_{\max}$, 不失一般性,设 $K \leq N$ 。可采用重叠分段方式对信号进行分段,如图 2 所示。

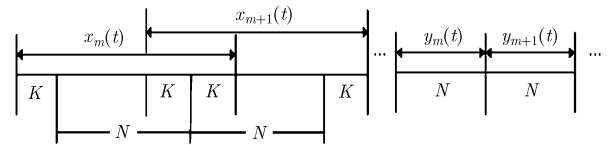


图2 分段示意图

为保证长度相同,需在 $y_m(t)$ 前后各补 K 个零。

3.2 径向速度差的距离徙动校正

沿快时间对式(4)所示两路信号作傅里叶变换,变换至快时间频率-慢时间域,可得各段匹配滤波结果

$$\left. \begin{aligned} R(f, t_m) &= \gamma' |U(f)|^2 \exp \left(-j2\pi f \frac{R_0}{c} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j2\pi (f_0 + f) \frac{v_d}{c} t_m \right) \\ &\quad \cdot \exp \left(-j\pi (f_0 + f) \frac{a_d}{c} t_m^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, f 为快时间频率, $\gamma' = \gamma \exp(-j2\pi f_0 R_0 / c)$ 。

式(5)的径向速度差和径向加速度差指数项中均存在快时间频率 f 与慢时间 t_m 的耦合关系, 变换到时域时, 目标位置会在各段间发生变化, 使得能量分散到不同的距离单元, 降低目标的检测性能。

利用 Keystone 变换校正速度差的距离徙动, 其本质为变量代换, 设

$$t_m = [f_0 / (f_0 + f)] t_n \quad (6)$$

其中, t_n 为虚拟慢时间, 将式(6)代入式(5)。

$$\begin{aligned} R(f, t_n) = & \gamma' |U(f)|^2 \exp\left(-j2\pi f \frac{R_0}{c}\right) \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{v_d}{c} t_n\right) \\ & \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_0^2}{f_0 + f} \frac{a_d}{c} t_n^2\right) \end{aligned} \quad (7)$$

可见, 速度差指数项中快时间频率 f 与慢时间 t_m 已解耦, 但加速度差指数项中的耦合关系仍然存在。

3.3 径向加速度差的距离和多普勒徙动校正

假设信号 $s(t)$ 持续时间为 T_s , 将其分成 G 段, 每段时间为 T_g , 则其傅里叶变换 $S(f)$ 可分段计算。

$$\begin{aligned} S(f) &= \int_0^{T_s} s(t) e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \sum_{g=0}^{G-1} \left[\int_0^{T_g} s_g(t) e^{-j2\pi f(t+gT_g)} dt \right] \\ &= \sum_{g=0}^{G-1} e^{-j2\pi g T_g f} S_g(f) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $s_g(t)$ 为 $s(t)$ 的第 g 个分段, $S_g(f)$ 为 $s_g(t)$ 的傅里叶变换。

对式(7)在慢时间域进行二次分段: 根据最大径向加速度差 $a_{\max}$ 对信号分段, 使得段内既无加速度差引起的距离徙动, 也无多普勒徙动, 即二次分段持续时间 $T_{D\max}$ 内, 最大加速度差引起的距离差和多普勒频差变化, 分别小于一个距离和频率单元。若 T 为积累时间, 则有

$$T_{D\max} = \min\left[\sqrt{\frac{2c}{\text{BW} a_{\max}}}, \frac{c}{f_0 a_{\max} T}\right] \quad (9)$$

定义二次分段段内为多普勒快时间 $t_k, l = 0, 1, \dots, L-1, L$ 为分二次分段数。由于段内无加速度差引起的距离和多普勒徙动, 故可在段内忽略加速度差影响, 而在段间以阶梯速度差表示加速度差引起的变化。此外, 由于距离弯曲主要由加速度差的时间平方项在包络末端引起, 故可忽略加速度差的时间一次项与快时间频率的耦合关系, 得到式(7)二次分段后的表达式。

$$\begin{aligned} R(f, t_k, l) \approx & \gamma' |U(f)|^2 \exp\left(-j2\pi f \frac{R_0}{c}\right) \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{v_d}{c} l T_{D\max}\right) \\ & \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_0^2}{f_0 + f} \frac{a_d}{c} (l T_{D\max})^2\right) \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi \left(f_0 \frac{v_d}{c} + f_0 \frac{a_d}{c} l T_{D\max}\right) t_k\right) \end{aligned} \quad (10)$$

对式(10)在多普勒快时间域上作傅里叶变换:

$$\begin{aligned} R(f, f_k, l) = & \gamma' |U(f)|^2 \exp\left(-j2\pi f \frac{R_0}{c}\right) \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{v_d}{c} l T_{D\max}\right) \\ & \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_0^2}{f_0 + f} \frac{a_d}{c} (l T_{D\max})^2\right) \\ & \cdot T_{D\max} \text{sinc}\left[T\left(f_k + f_0 \frac{v_d}{c} + f_0 \frac{a_d}{c} l T_{D\max}\right)\right] \end{aligned} \quad (11)$$

其中, f_k 为多普勒快时间频率。可见, 加速度差影响表现为第 3 个指数项的段间距离徙动和最后一项的段间多普勒徙动, 需进行补偿。

加速度差距离徙动的补偿, 可构造相位补偿函数 $H(f, l)$ 与式(11)相乘, $H(f, l)$ 为

$$H(f, l) = \exp\left[j\pi \frac{f_0^2}{f_0 + f} \frac{a_d}{c} (l T_{D\max})^2\right] \quad (12)$$

而多普勒徙动的补偿无需额外运算, 根据加速度差在各段引起的频移大小 $f_0 a_d l T_{D\max} / c$ 和频率分辨率 $1/T$ 的关系, 确定跨越的多普勒单元数 $\text{round}(f_0 a_d l T_{D\max} T / c)$, 对各段频谱作反向频移即可。经相位补偿和频谱搬移后, 快时间频率-多普勒快时间频率域表达式为

$$\begin{aligned} R'(f, f_k, l) = & \gamma' |U(f)|^2 \exp\left(-j2\pi f \frac{R_0}{c}\right) \\ & \cdot \exp\left(-j2\pi f_0 \frac{v_d}{c} l T_{D\max}\right) T_{D\max} \\ & \cdot \text{sinc}\left\{T\left(f_k + f_0 \frac{v_d}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(8)累加式(13)所示各段频谱, 得快时间频率-慢时间频率域表达式。

$$\begin{aligned} R'(f, f_k) = & \sum_{l=0}^{L-1} \exp(-j2\pi l T_{D\max} f_k) R'(f, f_k, l) \\ = & \gamma' |U(f)|^2 \exp\left(-j2\pi f \frac{R_0}{c}\right) T_{D\max} \\ & \cdot \text{sinc}\left\{T\left(f_k + f_0 \frac{v_d}{c}\right)\right\} \\ & \cdot \sum_{l=0}^{L-1} \exp\left(-j2\pi l T_{D\max} \left(f_k + f_0 \frac{v_d}{c}\right)\right) \end{aligned} \quad (14)$$

对式(14)在快时间频率域求逆傅里叶变换:

$$r(t_f, f_k) = \gamma BW T_{\max} T_{D_{\max}} \operatorname{sinc}\left(BW\left(t_f - \frac{R_0}{c}\right)\right) \cdot \operatorname{sinc}\left\{T\left[f_k + f_0 \frac{v_d}{c}\right]\right\} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} \exp\left(-j2\pi l T_{D_{\max}}\left(f_k + f_0 \frac{v_d}{c}\right)\right) \quad (15)$$

当 $t_f = R_0/c$, $f_k = -f_0 v_d/c$ 时, 有

$$r(t_f, f_k) = \gamma BW T_{\max} L T_{D_{\max}} = \gamma BW T \quad (16)$$

式(16)表明目标信号能量能够有效积累。由于两信号间多普勒频差有限, 对式(10)在多普勒快时间域作傅里叶变换时, 利用 Chirp-Z 变换(Chirp-Z Transform, CZT)计算关注范围内频谱即可。

综上, 得加速度差目标函数为

$$|r(t_f, f_k, a)| = \left| \operatorname{IFFT}_f \left\{ \sum_{l=0}^{L-1} \exp\left(j2\pi l T_{D_{\max}} \left[\frac{f_0^2}{f_0 + f} \frac{a}{2c} \right] \cdot T_{D_{\max}} - f_k \right) R(f, f_k - \operatorname{round} \left(f_0 a l T_{D_{\max}} T / c \right), l) \right\} \right| \quad (17)$$

显然, $\hat{a} = \arg \max_a \{|r(t_f, f_k, a)|\}$ 。

3.4 检测方法流程及运算量分析

本文所提检测方法流程如图 3 所示。首先, 基于式(3)和积分抽取思想^[16]确定分段长度, 对信号进行重叠分段, 划分快、慢时间, 在快时间频率-慢时间域利用 Keystone 变换校正径向速度差的距离徙动, 得到 $R(f, t_n)$; 然后, 根据式(9)对 $R(f, t_n)$ 在慢时间域进行二次分段, 结合傅里叶变换的分段计算方法, 构造加速度差目标函数, 完成加速度差的搜索估计, 而目标函数的最大值即为相参积累结果 $|r(t_f, f_k)|$ 。其中, 加速度差搜索估计应采用变步长法, 即先以较大步长, 如 1.00 m/s^2 , 在加速度差搜索范围 $[-a_{\max}, a_{\max}]$ 内进行粗略搜索, 根据目标函数最大值位置确定加速度差真实区间后, 再以较小步长, 如 0.01 m/s^2 , 进行精确搜索。

设信号长度 $G = MN$, N 和 M 分别为第 1 次分段长度和段数, I 和 L 则为慢时间域上二次分段的长度和段数, 单向时差和频差搜索样点数为 K 和 F , 加速度差的粗略和精确搜索总次数为 Q 。检测方法中所有傅里叶变换均利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)实现, Keystone 变换采用复杂度较小的 CZT-IFFT 方法。则根据图 3 所示流程图, 可得本文方法的总复乘次数为

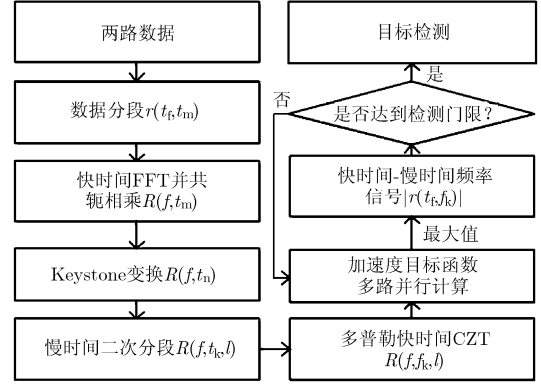


图3 检测方法流程图

$$MP(\log_2(P) + 3) + P\left(M_1 + \frac{3}{2}M_1 \log_2 M_1 + \frac{1}{2}M \log_2 M + LC_{\text{czt}}(I, F)\right) + Q\left(PLF + M \frac{P}{2} \log_2(P)\right) \quad (18)$$

其中, $P \geq N + 2K$, $M_1 \geq M$, 均为满足不等式的最小的 2 的整数次幂, $C_{\text{czt}}(A, B)$ 表示对 A 点序列做 B 点输出的 CZT 计算时的复乘次数, 若 E 为满足不等式 $E \geq A + B - 1$ 的最小的 2 的整数次幂, 有 $C_{\text{czt}}(A, B) = 3/2E \log_2 E + 5A + E + B$ 。

4 仿真分析与实测数据验证

4.1 仿真分析

地心固定坐标系下, 假设空间两无源雷达接收站坐标为 $[-2764.1 \text{ km}, 4787.6 \text{ km}, 3170.4 \text{ km}]^T$ 和 $[-2470.5 \text{ km}, 5065.4 \text{ km}, 2976.5 \text{ km}]^T$ 。目标作高速机动运动, 其航迹满足 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{a}_1 t + \mathbf{a}_2 t^2 + \mathbf{a}_3 t^3$ 。其中, $\mathbf{R}_0 = [-2604.5 \text{ km}, 4857.8 \text{ km}, 3236.4 \text{ km}]^T$, $\mathbf{a}_1 = [-560.1 \text{ m/s}, 853.3 \text{ m/s}, -1719.9 \text{ m/s}]^T$, $\mathbf{a}_2 = [-26.10 \text{ m/s}^2, 43.72 \text{ m/s}^2, -86.06 \text{ m/s}^2]^T$, $\mathbf{a}_3 = [-0.69 \text{ m/s}^3, -2.06 \text{ m/s}^3, 2.52 \text{ m/s}^3]^T$, 目标发射 QPSK 信号, 载波频率 1 GHz, 带宽 20 MHz。系统探测的最大径向速度差和径向加速度差为 1000 m/s 和 100 m/s^2 , 加速度差粗略和精确搜索时的步长采用 1.00 m/s^2 和 0.01 m/s^2 。

仿真 1 分析比较本文方法与传统互模糊函数^[16](CAF, Cross Ambiguity Function)方法和文献[14]的二次相位补偿法的运算量。图 4 给出了 3 种方法运算量随信号长度的变化曲线。

可见, 由于本文方法在加速度差搜索过程中, 仅需在第 1 次搜索时计算 2 维傅里叶变换, 其余时刻则只计算快时间域的逆傅里叶变换, 相比直接利用全部数据进行时频 2 维相关的 CAF 方法和需反复计算 2 维傅里叶变换的二次相位补偿法, 其运算复

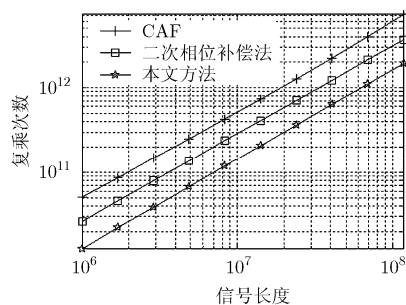


图4 运算量对比图

杂度最低。仿真条件下, 本文方法运算量约为 CAF 方法的 25%, 比二次相位补偿法低 50%。

仿真 2 对比验证本文方法对高速机动目标信号的能量积累效果。积累时间 $T=2$ s, 采样率 $f_s=20$ MHz, 其余仿真条件不变, 根据目标与两接收站间径向距离差的变化产生两路信号。此时, 径向速度差 763.88 m/s, 径向加速度差 83.14 m/s²。图 5 给出了 4 种方法的处理结果, 其中, 距离单元均加上了参考值 12000。

图 5(a)是利用 CAF 方法直接处理的时频 2 维结果, 距离和多普勒均存在严重的徙动; 图 5(b)是经 Keystone 变换(KT)方法校正了速度差距离徙动后的时频 2 维图, 可见跨越的距离单元个数明显降低, 但加速度差引起的距离弯曲和多普勒徙动仍然十分明显, 并且 Keystone 变换改变了加速度差的距离曲方向; 图 5(c)则是经文献[7]的基于 Keystone 变换后, 再利用 Wigner-Ville 变换实现调频率估计与补偿(KT+WV)方法的处理结果, 可以看出多普勒徙动现象得到显著改善, 但加速度差的距离徙动仍然存

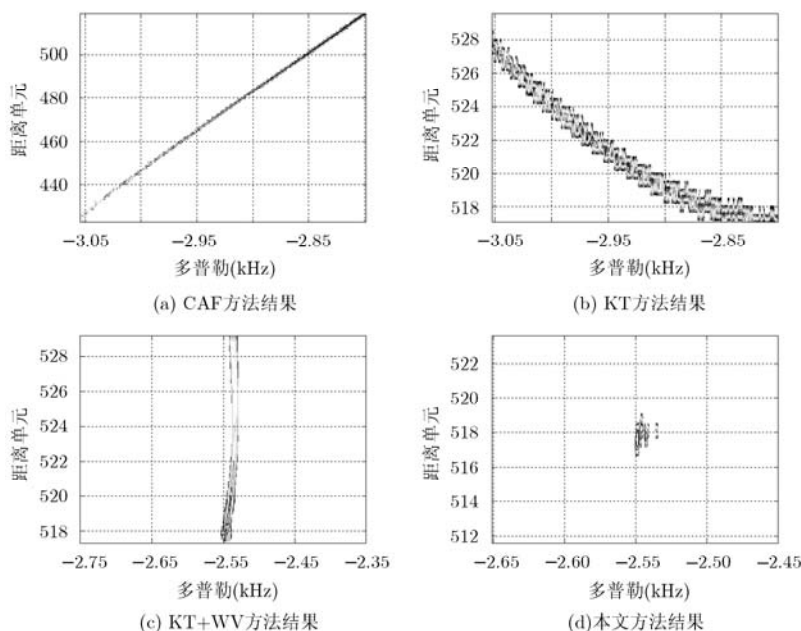


图5 几种方法的时频 2 维能量积累效果图

在; 图 5(d)是经本文方法处理后的结果, 可见距离和多普勒徙动均得到了有效校正, 实现了信号能量的相参积累。而经过校正后, 图 5(c), 图 5(d)中仍存在的多普勒徙动现象, 则是由于径向距离差随时间变化并非严格的匀加速运动所致。

4.2 实测数据验证

利用小型宽波束天线组阵, 形成宽空域覆盖的接收天线阵。多个这样的天线阵组网, 可对过境低轨卫星无源定位, 实现监测。下面主要就两个天线阵组成无源雷达, 对过境低轨卫星检测的实测数据进行分析。

由于低轨卫星距离较远, 小型天线增益较低, 接收信号功率远低于噪声功率, 需通过长时积累实现目标检测。同时, 低轨卫星高速机动的特性, 导致了距离和多普勒徙动的产生。下面给出 UTC 时间 2013-11-21 13:23:52, 针对编号 28254 的低轨卫星的一组实测数据结果, 如图 6 所示。其信号调制类型为 BPSK, L 波段, 码速率 1599.61 kbps, 采样率 2 MHz, 积累时间 4 s, 低轨卫星在两天线接收阵间产生的径向速度差约 4244.53 m/s, 径向加速度差约 36.88 m/s²。

若不作徙动校正, 增益损失十分严重, 无法检测到峰值; 图 6(a)为利用 KT+WV 方法的处理结果, 可见加速度差引起的距离徙动造成了峰值的展宽, 增益出现了损失; 图 6(b)为本文方法的处理结果, 距离和多普勒徙动均得以校正, 其峰值更加尖锐, 相比 KT+WV 方法的信噪比提高了约 2.78 dB, 表明了算法的有效性。

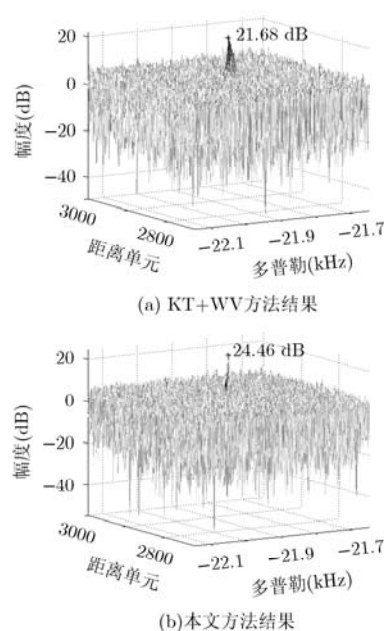


图6 实测数据处理结果

5 结束语

高速机动目标辐射源信号在长时间积累时将发生距离和多普勒徙动, 影响相参积累效果, 严重制约无源雷达对此类目标的检测能力。本文提出的基于 Keystone 变换结合傅里叶变换分段计算的高速机动目标检测方法, 通过 Keystone 变换校正径向速度差距离徙动, 结合傅里叶变换的分段计算方法构造了加速度差的搜索目标函数, 并通过相位补偿和反向频移方式补偿加速度差引起的距离和多普勒徙动。该方法复杂度低, 具有明显的并行计算特征, 能够有效提高无源雷达探测中高速机动目标的检测性能。

参 考 文 献

- [1] Yang Yu-xiang, Xiong Jin-yu, and Tong Wu-qin. Joint estimation of the time-varying location parameters of a moving target in tri-satellites Geo-location[C]. International Congress on Image and Signal Processing, Chongqing, China, 2012: 2301-2305.
- [2] 关欣, 胡东辉, 仲利华, 等. 一种高效的外辐射源雷达高径向速度目标实时检测方法[J]. 电子信息学报, 2013, 35(3): 581-588.
Guan Xin, Hu Dong-hui, Zhong Li-hua, *et al.*. An effective real-time target detection algorithm for high radial speed targets in passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 581-588.
- [3] 赵耀东, 吕晓德, 李纪传, 等. 无源雷达多普勒谱分析实现动目标检测的方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 247-256.
Zhao Yao-dong, Lü Xiao-de, Li Ji-chuan, *et al.*. Detection of moving targets based on Doppler spectrum analysis technique for passive coherent radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 247-256.
- [4] 杨金禄, 单涛, 陶然. 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 401-411.
- [5] 关欣, 仲利华, 胡东辉, 等. 一种基于 RSPWVD-Hough 变换的无源雷达多普勒展宽补偿方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 430-438.
Guan Xin, Zhong Li-hua, Hu Dong-hui, *et al.*. A compensation algorithm based on RSPWVD-Hough transform for Doppler expansion in passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(4): 430-438.
- [6] Liu Lei, Tao Ran, and Zhang Nan. The CAF-DFRFT-KT algorithm for high-speed target detection in passive radar[C]. Proceedings of International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Beijing, China, 2011: 748-751.
- [7] 吴仁彪, 贾琼琼, 李海, 等. 机载雷达高速空中机动目标检测新方法[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 86-90.
Wu Ren-biao, Jia Qiong-qiong, Li Hai, *et al.*. Detection of fast air maneuvering targets via STAP[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(1): 86-90.
- [8] 贾琼琼, 吴仁彪, 李海. 基于修正 STAP 的高速空中机动目标检测方法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(2): 220-226.
Jia Qiong-qiong, Wu Ren-biao, and Li Hai. Detection of fast air maneuvering targets via modified STAP[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2013, 28(2): 220-226.
- [9] Wu Ren-biao, Jia Qiong-qiong, and Li Hai. A novel STAP method for detection of fast dim air moving target[C]. Proceedings of IEEE 10th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2010: 2160-2163.
- [10] 苏军海, 邢孟道, 保铮. 宽带机动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1283-1287.
- [11] Zhang Long and He Xiao-hui. Approach for airborne radar ISAR imaging of ship target based on generalized keystone transform[C]. Proceedings of IEEE 10th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2010: 2137-2141.
- [12] 吴孙勇, 廖桂生, 朱圣棋. 提高雷达机动目标检测性能的二维频率域匹配方法[J]. 电子学报, 2012, 40(12): 2415-2420.
Wu Sun-yong, Liao Gui-sheng, and Zhu Sheng-qi. A new method for radar maneuvering target detection based on matched filtering in two-dimensional frequency domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(12): 2415-2420.
- [13] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Xia Xiang-gen, *et al.*. Robust ground moving-target imaging using deramp-keystone processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 966-982.
- [14] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 511-516.
Zhan Li-xiao, Tang Zi-yue, and Zhu Zhen-bo. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(3): 511-516.
- [15] Kirkland D. Imaging moving targets using the second-order keystone transform[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(8): 902-910.
- [16] 严航, 朱珍珍. 基于积分抽取的时/频差参数估计方法[J]. 宇航学报, 2013, 34(1): 99-105.
Yan Hang and Zhu Zhen-zhen. Fast algorithm for joint estimation of DTO and DFO based on integrate-and-dump filters[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(1): 99-105.

杨宇翔: 男, 1984 年生, 博士, 研究方向为信号处理、无源定位。
同武勤: 男, 1980 年生, 博士, 研究方向为 SAR/ISAR 成像。
熊瑾煜: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为信号处理、目标检测。