

基于循环自相关/平均幅度差函数的 弹道目标微动周期估计

金家伟, 阮怀林

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230031)

摘要 雷达微多普勒(m-D)是弹道目标的突出特征,为弹头识别提供了重要手段。然而,当弹道目标的微动伴随平动时,时频分布不再表现为正弦调制曲线,此时基于时频分布正弦假设的微多普勒特征提取方法可能失效。针对这一问题,提出了一种循环自相关函数(CACF)和循环平均幅度差函数(CAMDF)相结合的估计算法,来获取时频分布的循环系数矩阵和该矩阵的平均循环系数,从而估计出弹道目标的微动周期。该算法以时频分布的循环周期性代替正弦调制的周期性,不需要假设目标平动已被准确补偿,有效克服了传统微动周期估计方法的不足。理论推导论证了该算法的可行性,仿真实验验证了该算法的有效性和抗噪性。

关键词 微多普勒;周期估计;循环自相关函数;平均幅度差函数;平动;时频分布

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.012

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)03-0074-08

A Micro-Doppler Period Estimation of Ballistic Targets Based on Circular Autocorrelation and Average Magnitude Difference Function

JIN Jiawei, RUAN Huailin

(Electronic Engineering Institute of National University of Defense Technology, Hefei 230031, China)

Abstract Micro-Doppler (m-D) in ballistic targets is characterized by applying an important means to war-head recognition. However, when the micro-motion of the ballistic targets is accompanied by macro-motion, the time-frequency representation is no longer a sinusoidal modulation curve. Aimed at the problem that the micro-Doppler feature extraction method based on the sinusoidal hypothesis of time-frequency representation may become ineffective, an estimation algorithm based on circular autocorrelation function (CACF) in combination with the circular average amplitude difference function (CAMDF) is proposed to obtain the circular coefficient matrix of time-frequency representation and average circular coefficients of the matrix, estimating the m-D period of ballistic targets. The algorithm does not need to assume with the target macro-motion having been accurately compensated and the shortcomings of traditional m-D period estimation methods having been overcome effectively. The feasibility of the algorithm is demonstrated by theoretical derivation, and the effectiveness and anti-noise of the algorithm is verified by simulation experiments.

Key words micro-Doppler (m-D); period estimation; circular autocorrelation (CACF); circular average

收稿日期: 2020-08-12

作者简介: 金家伟(1991—),男,安徽合肥人,硕士生,研究方向:雷达微多普勒特征提取。E-mail:jinjaawei@nudt.edu.cn

引用格式: 金家伟,阮怀林.基于循环自相关/平均幅度差函数的弹道目标微动周期估计[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(3):74-81. JIN Jiawei, RUAN Huailin. A Micro-Doppler Period Estimation of Ballistic Targets Based on Circular Autocorrelation and Average Magnitude Difference Function[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(3): 74-81.

amplitude difference function (CAMDF); macro-motion; time-frequency representation (TFR)

在弹道中段的飞行过程中,为了保持飞行的稳定性,弹头一般会进行姿态控制,不仅会绕自身对称轴作自旋运动,还会受到冲击力矩的作用,力矩消失后对称轴将在平衡位置做圆锥运动,即进动^[1]。而诱饵一般不具备姿态控制装置,因此,进动是中段弹头特有的微动方式,与目标形状结构、质量分布以及动力学特性等物理属性密切相关^[2]。由微动引起的雷达回波中多普勒频率的调制,一般被称为微多普勒效应^[3]。微多普勒特征体现出目标独特的动态和结构特征,在目标识别和分类方面具有巨大的潜力^[4-5]。

对于非刚性雷达目标,目标主体散射的雷达回波占返回能量的绝大部分,微动信号始终浸没在主体雷达回波中,需要将雷达回波分解为平动分量和微动分量,用微动分量来估计微多普勒参数^[6-8]。文献^[9]对信号进行小波变换,用分解出的微动分量的自相关来估计振动/旋转速率;文献^[10]通过信号分解提取单个散射点特征。而为了表示出散射点雷达回波的时变频率调制特性,时频分析被广泛用于分析微多普勒特征,基于时频分布的微动参数估计已成为微多普勒特征提取的重要部分。文献^[11]采用基于加权迭代自适应的时频分析方法结合逆 Radon 变换,分离重构不同散射点的微多普勒分量;文献^[12]利用短时分数阶傅里叶变换分离肢体和躯干的微多普勒信号;文献^[13]结合 Gabor 时频分布和变分模态分解,来估计目标的自旋频率和锥旋频率。

上述方法都需要假设目标平动已被准确补偿,在此前提下,目标时频分布中的微多普勒频率曲线通常应该表现为正弦曲线^[3]或是多个正弦分量的合成^[2]。现有的微多普勒特征提取技术,如经验模式分解(empirical-mode decomposition, EMD)^[14]和扩展 Hough 变换(extended hough transform, EHT)^[15],主要依赖于这种正弦调制假设。但目标运动由平动与微动复合而成,特别是对于高速运动的弹道目标,周期进动引起的弹道目标微多普勒效应并不像通常那样表现为正常的正弦调制^[16]。

针对目标微动伴随平动时,时频分布不再表现为正弦调制曲线,本文在雷达回波信号时频分布的基础上,结合循环自相关函数(circular autocorrelation function, CACF)和循环平均幅度差函数(circular average amplitude difference function, CAMDF),以获取时频分布的循环系数矩阵,并通过该矩阵的平均循环系数估计出弹道目标的微动周期。

1 模型建立

空间进动锥体目标模型如图 1 所示,坐标系 (U, V, W) 为雷达坐标系,雷达静止于原点 Q 。 O 为目标质心,以 O 为原点、目标对称轴 Oz 为 z 轴建立目标本体坐标系 $O-xyz$ 。以 O 为原点建立参考坐标系 $O-XYZ$,以初始时刻与目标对称轴 Oz 、进动轴 OZ 共面且垂直于 OZ 的方向为 Y 轴, X 轴根据右手准则确定。目标在平动的同时,以角速度 ω_s 绕对称轴 z 轴做自旋运动,同时以角速度 ω_c 绕轴 OZ 做锥旋运动(ω_s 和 ω_c 均采用参考坐标系中的表达式),自旋轴和锥旋轴之间的夹角为进动角 θ 。

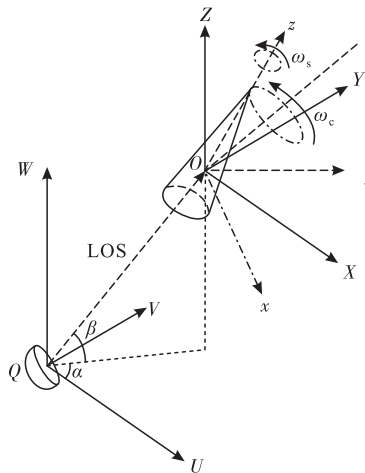


图 1 目标模型

在光学区,雷达目标的整体散射特性通常可以等效为若干个散射中心的叠加。为不失一般性,我们假设目标的微动是周期性进动,目标的平动是任意且未知的。假设目标等效为 K 个散射中心,各散射中心各向同性,雷达发射的电磁波为连续单频波,载频为 f_0 。考虑目标的平动,第 i 个散射中心与雷达之间的距离为:

$$r_i(t) \approx r_T(t) + r_{M_i}(t) \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, K$, 为散射中心序号; $r_T(t)$ 为目标平动对应的距离; $r_{M_i}(t)$ 为第 i 个散射中心微动对应的距离。从式(1)可以看出,散射中心的总体运动由锥体目标平动和散射中心微动合成,表现在距离上是周期性的正弦运动叠加一个平动趋势项。由文献^[3]可知:

$$r_{M_i}(t) = r_{M_i}(t + T_M) \quad (2)$$

式中: T_M 为目标的进动周期。雷达向由 i 个散射点组成的目标发射电磁波,返回的基带信号表示为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^K \sigma_i(t) \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} r_i(t) \right\} =$$

$$\exp(j \frac{4\pi}{\lambda} r_T(t)) \sum_{i=1}^K \sigma_i(t) \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} r_{M_i}(t)\right\} = s_T(t) s_M(t) \quad (3)$$

其中:

$$s_T(t) = \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} r_T(t)\right) \quad (4)$$

$$s_M(t) = \sum_{i=1}^K \sigma_i(t) \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} r_{M_i}(t)\right\} \quad (5)$$

式中: λ 为雷达载波波长; $\sigma_i(t)$ 为第 i 个散射中心的散射强度, 取决于目标的运动姿态, 对于远场目标, 平动对目标姿态的影响不大, 因此其对 $\sigma_i(t)$ 的影响可以忽略不计; $s_T(t)$ 是平动对雷达回波的调制部分, 本文称为平动信号; $s_M(t)$ 是微动对雷达回波的调制部分, 本文称为微动信号, 包含由微动引起的幅度调制部分 $\sigma_i(t)$ 及多普勒调制部分 $\exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} r_{M_i}(t)\right\}$ 。目标的姿态周期性变化带来周期性的微动, 因此 $\sigma_i(t)$ 与微动具有相同的周期, 即:

$$\sigma_i(t) = \sigma_i(t + T_M) \quad (6)$$

由式(2)和式(6)可得:

$$s_M(t) = s_M(t + T_M) \quad (7)$$

第 i 个散射中心的瞬时多普勒频率为:

$$f_{D_i}(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr_i(t)}{dt} = f_T(t) + f_{M_i}(t) \quad (8)$$

$$f_T(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr_T(t)}{dt} \quad (9)$$

$$f_{M_i}(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr_{M_i}(t)}{dt} \quad (10)$$

$f_{M_i}(t)$ 为目标第 i 个散射中心的微多普勒频率, $f_T(t)$ 为目标的平动多普勒频率, 可以被建模为多项式函数^[17]如下:

$$f_T(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_L t^K \quad (11)$$

2 雷达微动信号的时频分析

由式(7)可知, 微动信号有着与进动相同的周期, 目标周期性的进动对雷达回波进行了周期性的时变频率调制。时频分析可以描述信号的频率随着时间变化的规律, 因此可用来体现进动目标微多普勒效应的周期性。短时傅里叶变换(STFT)是时变信号的线性时频表示, 为简单起见, 这里使用 STFT 来证明微动信号时频分布的周期性:

$$\rho_M(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_M(\tau) g(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (12)$$

下面分析式(12)的周期性, 令 $t = t + T_M$, 由于 $s_M(t) = s_M(t + T_M)$, 可得:

$$\rho_M(t + T_M, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_M(\tau) g(\tau - t - T_M) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (13)$$

令 $\tau = \tau_1 + T_M$, 可得:

$$\rho_M(t + T_M, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s_M(\tau_1 + T_M) g(\tau_1 - t) \exp(-j2\pi f(\tau_1 + T_M)) d\tau_1 = \exp(-j2\pi f T_M) \rho_M(t, f) \quad (14)$$

因此, 可得:

$$|\rho_M(t + T_M, f)| = |\rho_M(t, f)| \quad (15)$$

周期进动引起的微动信号的时频分布与进动具有相同的周期, 式(15)的离散形式为:

$$|\rho_M(n + N_T, m)| = |\rho_M(n, m)| \quad (16)$$

式中: $t = n\Delta t, n = 0, 1, \dots, N-1$; $f = m\Delta f, m = 0, 1, \dots, M-1, \Delta f = f_s/M, \Delta t$ 是采样间隔, f_s 是采样频率; $N_T = \lceil T_M/\Delta t \rceil, \lceil \cdot \rceil$ 表示将元素四舍五入为最接近的整数。

当存在平动时, 由式(3)可知雷达回波 $s(t) = s_T(t) s_M(t)$, 其 STFT 为:

$$\rho(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) g(\tau - t) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (17)$$

$\rho(t, f)$ 的离散形式为 $\rho(n, m)$, 则根据文献[18]可知:

$$|\rho(n + N_T, m)| = \left| \rho\left(n, \text{mod}\left(m - \frac{f_T(n)}{\Delta f} + \frac{f_T(n + N_T)}{\Delta f}, M\right)\right) \right| \quad (18)$$

3 微动周期估计

CACF 和 CAMDF 都能独立进行周期估计^[17], 但如果将两种方法组合, 可更为充分地体现出微动信号的周期性, 并且会有更强的稳定性, 文献[19]通过合成 CACF 和 CAMDF 来估计弹道中段目标的 RCS 周期。当雷达目标存在平动时, 虽然雷达回波信号的时频分布并不表现为正常的正弦调制形式, 但雷达回波信号的循环周期性仍然存在, 本文正是利用这一特性, 将时频分布的 CAMDF 的倒数和 CACF 相乘, 来估计弹道目标的进动周期。

首先, 分别定义 $\rho(n, m)$ 2 个时间切片 n_1 和 n_2 的循环自相关函数 CACF^[18] 和平均幅度差函数 CAMDF^[20] 如下:

$$C_r(k; n_1, n_2) = \sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_1, m)| |\rho(n_2, \text{mod}(k + m, M))| \quad (19)$$

$$A_c(k; n_1, n_2) = \sum_{m=0}^{M-1} \left| |\rho(n_1, m)| - |\rho(n_2, \text{mod}(k + m, M))| \right| \quad (20)$$

然后构造新的函数,定义时间切片 n_1 和 n_2 的 CACF/CAMDF 如下:

$$F_{CC}(k; n_1, n_2) = \frac{C_r(k; n_1, n_2)}{A_c(k; n_1, n_2)} = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_1, m)| |\rho(n_2, \text{mod}(k+m, M))|}{\sum_{m=0}^{M-1} \left| |\rho(n_1, m)| - |\rho(n_2, \text{mod}(k+m, M))| \right|} \quad (21)$$

令 $n_2 = n_2 + N_T$, 可得:

$$F_{CC}(k; n_1, n_2 + N_T) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_1, m)| |\rho(n_2 + N_T, \text{mod}(k+m, M))|}{\sum_{m=0}^{M-1} \left| |\rho(n_1, m)| - |\rho(n_2 + N_T, \text{mod}(k+m, M))| \right|} \quad (22)$$

将式(18)代入式(22)得:

$$F_{CC}(k; n_1, n_2 + N_T) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_1, m)| \left| \rho(n_2, \text{mod}(k+m - \frac{f_T(n_2)}{\Delta f} + \frac{f_T(n_2 + N_T)}{\Delta f}, M)) \right|}{\sum_{m=0}^{M-1} \left| |\rho(n_1, m)| - \left| \rho(n_2, \text{mod}(k+m - \frac{f_T(n_2)}{\Delta f} + \frac{f_T(n_2 + N_T)}{\Delta f}, M)) \right| \right|} \quad (23)$$

$$\text{令 } l = \text{mod}(k - \frac{f_T(n_2)}{\Delta f} + \frac{f_T(n_2 + N_T)}{\Delta f}, M),$$

由式(23)可得:

$$F_{CC}(\text{mod}(l + \frac{f_T(n_2)}{\Delta f} - \frac{f_T(n_2 + N_T)}{\Delta f}, M); n_1, n_2 + N_T) = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_1, m)| |\rho(n_2, \text{mod}(l+m, M))|}{\sum_{m=0}^{M-1} \left| |\rho(n_1, m)| - |\rho(n_2, \text{mod}(l+m, M))| \right|} \quad (24)$$

由式(21)和式(24)可得:

$$F_{CC}(k; n_1, n_2) = F_{CC}(\text{mod}(l + \frac{f_T(n_2)}{\Delta f} - \frac{f_T(n_2 + N_T)}{\Delta f}, M); n_1, n_2 + N_T) \quad (25)$$

由式(25)可以看出, $F_{CC}(k; n_1, n_2)$ 是 $F_{CC}(k; n_1, n_2 + N_T)$ 的循环移位, 并且 CACF/CAMDF 保持了 $\rho(n, m)$ 的循环周期性。

然后, 基于 CACF/CAMDF 定义 $\rho(n, m)$ 的循环系数矩阵为:

$$\mathbf{M}_F = \begin{bmatrix} F_m(0,0) & F_m(0,1) & \cdots & F_m(0,N-1) \\ F_m(1,0) & F_m(1,1) & \cdots & F_m(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_m(N-1,0) & F_m(N-1,1) & \cdots & F_m(N-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: $C_m(n_1, n_2)$ 是 $C_r(k; n_1, n_2)$ 的归一化最大值,

$A_m(n_1, n_2)$ 是 $A_c(k; n_1, n_2)$ 的归一化最小值, 即:

$$F_m(n_1, n_2) = \frac{C_m(n_1, n_2)}{A_m(n_1, n_2)} = \frac{\max_k \{C_r(k; n_1, n_2)\}}{\min_k \{A_c(k; n_1, n_2)\}} \cdot \frac{\sum_{m=0}^{M-1} (|\rho(n_1, m)| + |\rho(n_2, m)|)}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_1, m)|^2} \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\rho(n_2, m)|^2}} \quad (27)$$

由 $F_m(n_1, n_2)$ 的定义, 可得:

$$\begin{cases} F_m(n_1, n_2) = F_m(n_2, n_1) \\ F_m(n_1, n_2) \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

特别地, 当 $n_2 = n_1 + aN_T (a = 0, 1, \dots)$ 时, $F_m(n_1, n_2) = 0$, 所以很容易可以看出 $F_m(n_1, n_2)$ 与 $F_m(k; n_1, n_2)$ 具有相同的周期, 即:

$$F_m(n_1, n_2) = F_m(n_1, n_2 + N_T) \quad (29)$$

因此, $\rho(n, m)$ 的循环系数矩阵保留了行和列维的周期性, 并且在同一对角线上的滞后是常数。

最后, 将循环系数矩阵 \mathbf{M}_F 第 k 个对角线的平均值定义为平均循环系数, 即:

$$\overline{F_{CC}}(k) = \text{mean}\{\text{diag}(\mathbf{M}_F, k)\} \quad (30)$$

其中:

$$\text{diag}(\mathbf{M}_F, k) = \{F_m(n_1, n_2), n_2 = n_1 + k, 1 \leq n_1 \leq N, 1 \leq n_2 \leq N\} \quad (31)$$

易得 $\overline{F_{CC}}(k)$ 与 $F_m(n_1, n_2)$ 具有相同的周期, 并在位置 $iN_T (i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 具有波峰。因此, 可以通过提取(特别是前两个)波峰的间隔来估计微动周期。该算法的实现流程如图 2 所示。

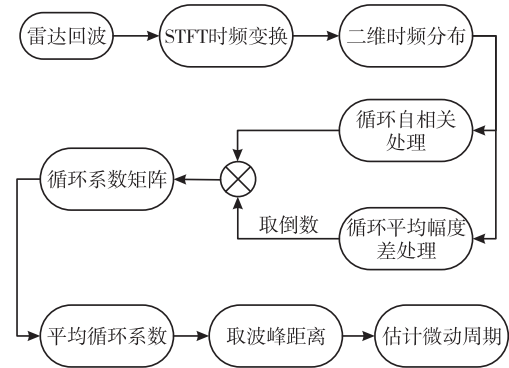


图2 算法实现流程

4 实验与分析

下面通过仿真验证本文提出的 CACF/CAMDF 的估计效果和抗噪性能, 并将其与 CACF、CAMDF 进行对比。首先分别在目标的平动被补偿、目标存在平动条件下, 对比 3 种算法的平动敏感性; 然后加入不同信噪比的噪声, 进一步对比 3 种算

法在低信噪比条件下的估计性能。

仿真条件:假设雷达工作在 10 GHz,且雷达坐标系中本体坐标系原点 O 的坐标为(400,500,100) km,本地坐标系和参考坐标系之间的初始欧拉角(x - y - z 序列)为(30°,60°,45°)。假设目标绕 z 轴旋转,目标上有 2 个散射点:第一散射点 A 位于锥顶,在本体坐标系中的坐标为(0,0,1)m;第二个散射点 B 位于锥底的尾翼,在本体坐标系中的坐标是(0.5,0,-0.5)m。雷达照射时间为 8 s。旋转频率为 $f_s=1$ Hz,圆锥运动频率为 $f_c=0.5$ Hz。当目标存在平动时,其平动模型为 $r_T(t)=-vt+0.4t^2+0.5t^3$ 。

4.1 平动敏感性分析

当不存在噪声时,图 3 给出了平动被补偿和存在平动两种情况下的雷达回波 STFT 时频分布图。

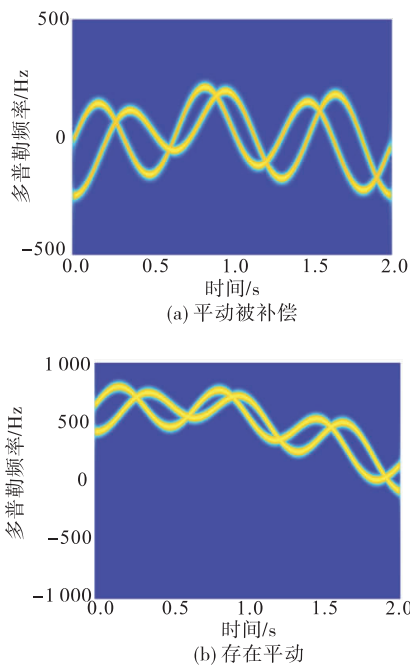


图 3 无噪声条件下的时频分布

由图 3 可知,当平动被完全补偿时,雷达回波的时频图是多个正弦分量合成的类正弦曲线,如图 3(a)所示;而时频图在目标平动的调制下,其图形不再表现为正常的类正弦曲线,如图 3(b)所示。此时,CACF/CAMDF 的估计结果如图 4 所示,其中图 4(a)和图 4(b)分别为时频分布的循环系数矩阵和平均循环系数。

由图 4 可知,CACF/CAMDF 的平均循环系数图中的波峰分别在 2 s、4 s 和 6 s 处,从而可以估计出进动周期 $\tilde{T}_c=2$ s。而仿真条件中设置的进动频率 $f_c=0.5$ Hz,即进动周期 $T_c=2$ s,与估计结果相符。

当目标存在平动时,CACF/CAMDF 的估计结

果见图 5,可估计出进动周期 $\tilde{T}_c=2$ s。

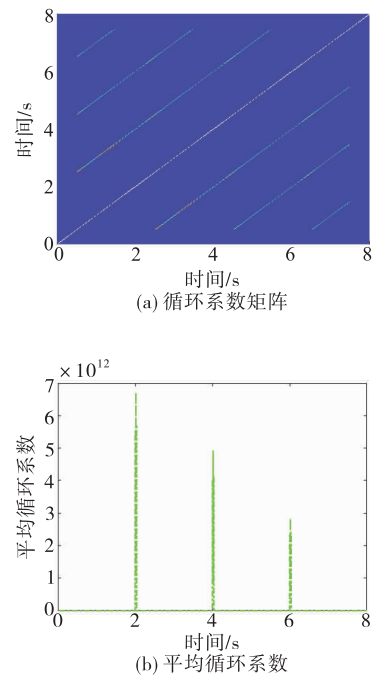


图 4 平动被补偿、无噪声时的 CACF/CAMDF 估计结果

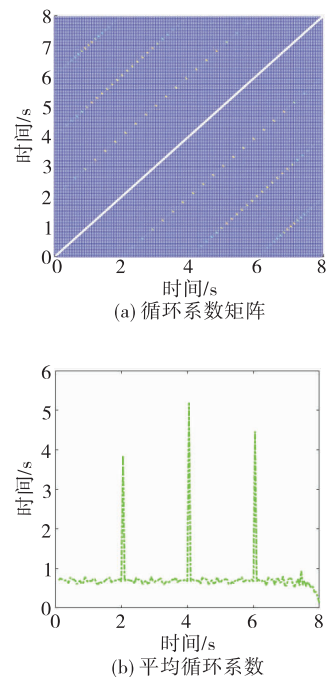


图 5 存在平动、无噪声时的 CACF/CAMDF 估计结果

当目标存在平动时,其他条件相同,图 6 分别给出了 CAMDF 和 CACF 的估计结果。将图 6 与图 5 对比可看出,在平动条件下,CAMDF 和 CACF 两种算法都具有一定的估计能力,且 CACF 性能更好,但性能都劣于 CACF/CAMDF。这说明了 CACF/CAMDF 具有更低的平动敏感性,能够在目标存在平动时,具有更好的估计性能。

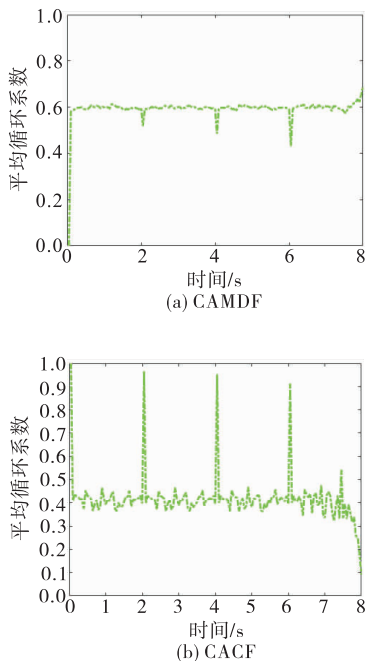


图 6 存在平动、无噪声时 CAMDF、CACF 的平均循环系数

4.2 抗噪性能分析

为进一步验证 CACF/CAMDF 在噪声条件下的表现,分别向目标信号中添加不同信噪比的高斯白噪声进行仿真。由图 7 可知,即使信噪比低至 -5 dB,STFT 仍然能够较好地获取雷达回波的时频分布。

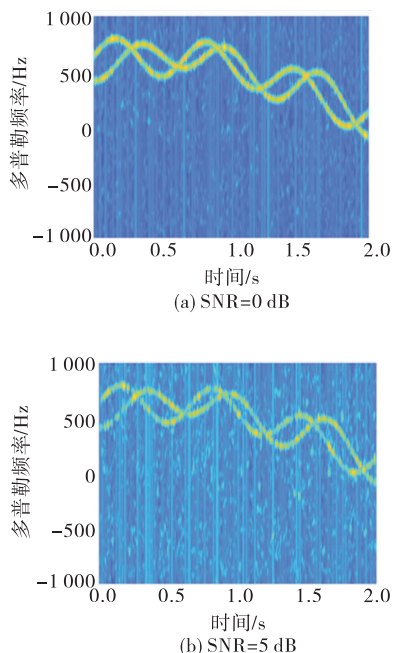


图 7 噪声环境下存在平动时的时频分布

由图 5 和图 8 对比可知,本文算法在噪声环境下具有良好的表现。

为进一步分析算法的抗噪性能,图 9 给出了不同信噪比条件下、目标存在平动时的 CACF/CAM-

DF 平均循环系数图。分析图 9 可知,该算法具备良好的抗噪性能。即使目标存在平动、信噪比低至 -2 dB,仍可准确估计出目标的进动周期。

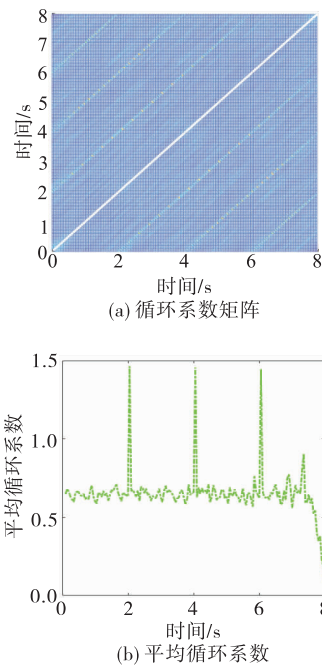
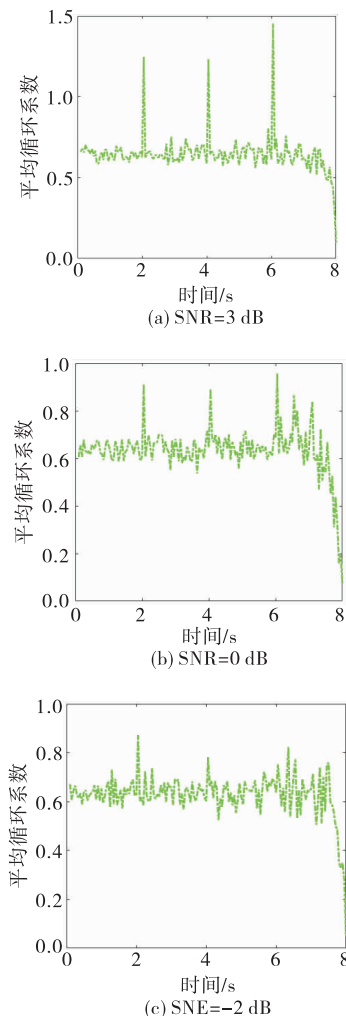


图 8 存在平动、SNR=5 dB 时的 CACF/CAMDF 估计结果



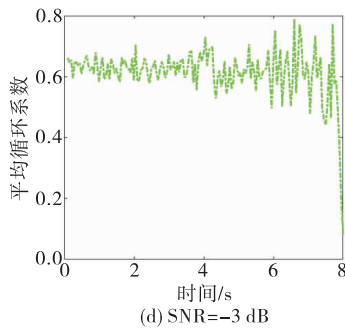


图9 存在平动时 CACF/CAMDF 的平均循环系数

目标存在平动时,图 10 和图 11 分别给出了不同信噪比条件下 CAMDF 和 CACF 的估计结果。对比图 9~图 11 可知,噪声环境下,CAMDF 的性能极限是 2 dB,CACF 的性能极限是 0 dB,与 CACF/CAMDF 的-2 dB 都具有较大差距。这进一步体现了 CACF/CAMDF 在低噪声环境中的性能优越性。

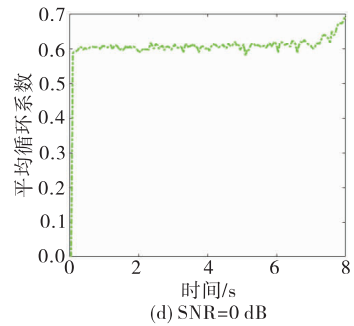
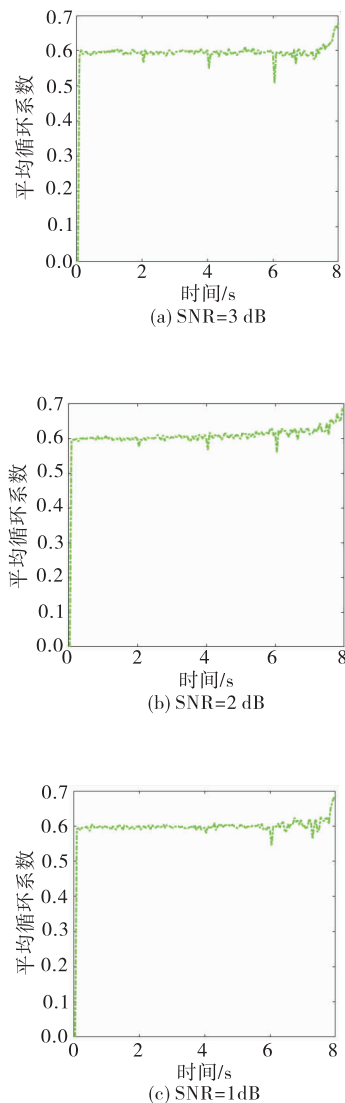


图 10 存在平动时 CAMDF 的平均循环系数

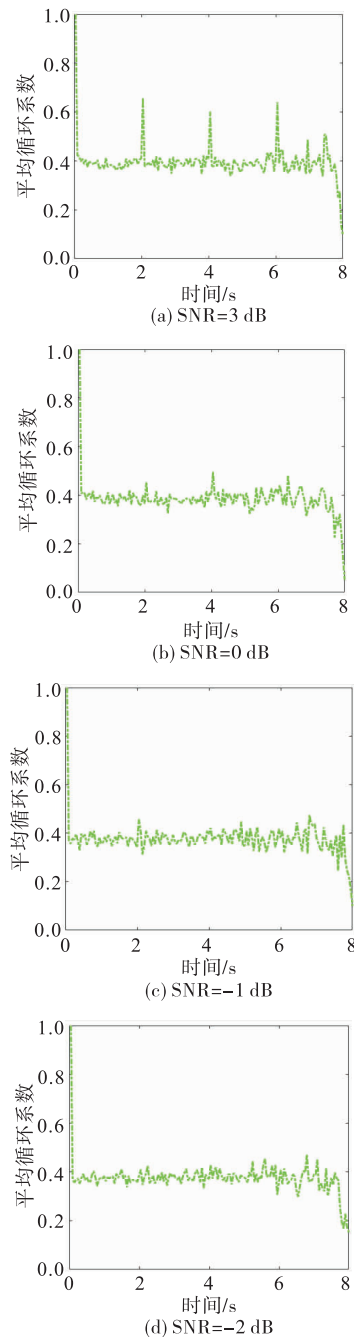


图 11 存在平动时 CACF 的平均循环系数

5 结语

本文分析了微动和平动对雷达回波时频分布的

影响,结合 CAMDF 和 CACF,在时频分布的基础上提出了基于 CACF/CAMDF 的估计算法。仿真实验表明,该算法在目标存在平动的情况下,无需补偿平动分量可以直接估计微动周期,且估计性能优于 CAMDF 和 CACF,这在信噪比较低时体现得更加明显。

参考文献

- [1] 马梁. 弹道中段目标微动特性及综合识别方法[D]. 长沙:国防科技大学,2011.
- [2] 马梁,刘进,王涛,等. 旋转对称目标滑动型散射中心的微 Doppler 特性[J]. 中国科学:信息科学,2011,41(5):605-616.
- [3] CHEN V C, LI F, HO S, et al. Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model and Simulation Study [J]. IEEE Transactions Aero Elec Sys, 2006, 42: 2-21.
- [4] SUN H X, LIU Z. Nutation Feature Extraction of Ballistic Missile Warhead [J]. Electronics Letters, 2011, 47(13):770-772.
- [5] HE F Y, XIAO Z Y. Micro-Motion Modelling and Analysis of Extended Ballistic Targets Based on Inertial Parameters[J]. Electronics Letters, 2013, 49(2):129-130.
- [6] ZHAO Y C, SU Y. The Extraction of Micro-Doppler Signal with EMD Algorithm for Radar-Based Small UAVs' Detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(3):929-940.
- [7] ZHU L Z, ZHANG S N, XU S N, et al. Classification of UAV-to-ground Targets Based on Micro-Doppler Fractal Features Using IEEMD and GA-BP Neural Network[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(1):348-358.
- [8] SONG C, WU Y R, ZHOU L J, et al. A Multicomponent Micro-Doppler Signal Decomposition and Parameter Estimation Method for Target Recognition [J]. Science China, 2019, 62(2):029304.
- [9] 韩立珣,田波,冯存前,等. 进动弹道目标平动补偿与分离[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(7):1459-1466.
- [10] LI P, WANG D C, WANG L. Separation of Micro-Doppler Signals Based on Time Frequency Filter and Viterbi Algorithm[J]. Signal Image & Video Processing, 2013.
- [11] 赵彤璐,廖桂生,杨志伟. 基于短时迭代自适应-逆 Radon 变换的微多普勒提取方法[J]. 电子学报,2016,44(3):505-513.
- [12] QIAO X S, SHAN T, TAO R, et al. Separation of Human Micro-Doppler Signals Based on Short-Time Fractional Fourier Transform[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24):12205-12216.
- [13] 鲁逸杰,宫志华,张群,等. 基于变分模态分解的进动目标微多普勒特征提取方法[J]. 探测与控制学报,2019,41(4):30-35.
- [14] ZHAO M M, ZHANG Q, LUO Y, et al. Micromotion Feature Extraction and Distinguishing of Space Group Targets[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2017, 14(2):174-178.
- [15] ZHANG Q, YEO T S, TAN H S, et al. Imaging of a Moving Target with Rotating Parts Based on the Hough Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [16] 罗迎,柏又青,张群,等. 弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法[J]. 电子与信息学报,2012,34(3):602-608.
- [17] LI X L, CUI G L, YI W, et al. A Fast Maneuvering Target Motion Parameters Estimation Algorithm Based on ACCF[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 22(3):270-274.
- [18] ZHANG W P, LI K L, JIANG W D. Parameter Estimation of Radar Targets with Macro-Motion and Micro-Motion Based on Circular Correlation Coefficients [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(5): 633-637.
- [19] 冯德军,刘进,丹梅. 弹道中段目标 RCS 周期特性及其估计方法[J]. 宇航学报,2008,29(1):362-365.
- [20] PAN X Y, FU Q X, GU Z Y, et al. Micro-Doppler Period Estimation from Ballistic Targets with Precession[C]//International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). Brussels: IEEE, 2016:1-6.

(编辑:徐敏)