

相干激光探测中微动参数估计的克拉美-罗界

郭力仁^{1,2}, 胡以华^{1,2}, 王云鹏^{1,2}

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037;
2. 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 为选择最佳参数估计方法估计目标微多普勒特征, 需要研究参数估计的克拉美-罗界, 来评价各估计方法的性能。以相干激光探测为背景, 考虑噪声方差未知的影响, 严格推导了高斯白噪声环境下微动目标回波信号各参数估计的克拉美-罗界的闭合表达式, 仿真分析了目标相对于雷达的位置信息、数据处理长度以及回波信噪比与参数估计方差下界的关系。结果表明, 克拉美-罗界与噪声方差无关, 目标相对于雷达的方位角、俯仰角越小, 数据长度和信噪比越大, 参数估计的方差下界越小。对目前常用的两种微动参数估计方法方差进行了计算, 并与推导克拉美-罗界进行了对比。最后, 与通过近似处理方法得到的克拉美-罗界进行了对比, 指出了精确推导方差下界的意义。

关键词: 微多普勒效应; 参数估计; 克拉美-罗界; 激光雷达

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0706002

Cramer-Rao bounds for micro-motion parameters estimation in coherent laser detection

Guo Liren^{1,2}, Hu Yihua^{1,2}, Wang Yunpeng^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: To choose the optimal estimating method to evaluate micro-Doppler characteristic of target, the research on the Cramer-Rao Bounds (CRBs), which was used to evaluate the performance of the estimating method, was indispensable. The closed form of CRBs for lidar signals with Gaussian noise was derived strictly in this paper. The relationships between the CRBs and factors including the target position, the length of processing data and SNR were analyzed. The simulation results indicate that decreasing the azimuth angle and pitch angle or increasing the data length and SNR can minish the CRBs of estimated parameters, while, the lower bounds are insensitive to the information of the noise variance. The mean square error of two frequently used estimators for micro-Doppler parameters were simulated and compared with the CRBs. In the end, the meaning of the strict derivation of CRBs in this paper was presented by comparing with the result got from approximate process.

Key words: micro-Doppler effect; parameter estimation; Cramer-Rao bound; lidar

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61271353); 安徽省自然科学基金(1308085QF123)

作者简介: 郭力仁(1990-), 男, 博士生, 主要从事激光探测方面的研究。Email: guolirenone@163.com

导师简介: 胡以华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息处理方面研究。Email: skl_hyh@163.com

0 引言

微多普勒效应是指目标在与雷达有相对径向运动时,除质心平动外,由目标整体或局部的振动、转动等微运动产生的对回波信号多普勒频谱的附加频率调制现象,此概念最早由美国海军实验室的 V. C. Chen 教授系统提出^[1]。典型的雷达目标如坦克、汽车、飞机等都存在显著而又各自独特的微动现象^[2-3],而微多普勒效应被认为是反映目标微动的唯一特征,使用激光进行探测可以得到显著的微多普勒频移。因此,研究微多普勒效应的相干激光探测,可以准确反演目标的结构和微动特征,开辟了目标探测识别的新途径。

基于微多普勒效应可得到目标的距离-多普勒像,但在 SAR 成像中,微动会引起图像的非对称畸变,甚至产生“鬼影”,使 SAR 成像方法失效。所以要对 SAR 回波中的微多普勒效应进行补偿和校正,关键在于从回波信号中实现对微动参数的准确估计。对于实际含有噪声的信号,任何参数估计方法都存在一定的方差。为比较参数估计的准确性,评价估计器的性能,通常需要计算克拉美-罗界(Cramer-Rao Bounds, CRB)。CRB 提供了无偏估计器方差的下界,估计器的估计方差越接近 CRB 说明估计性能越好,但任何估计方法都不可能低于 CRB。而且 CRB 与具体估计算法无关,所以其可以作为所有估计方法的评价标准^[4]。此外,信号的波形设计、噪声分布规律、回波信号信噪比和处理数据的长度等都会对微动参数估计的 CRB 造成影响^[5-6],因此,还可以通过最小化 CRB 来实现对波形、数据处理长度等的优化设计^[7]。

目前,微动参数的提取通常先通过各种时频变换方法获得信号的时频分布图再进行解算^[8-9],国外又提出了基于统计学中最大似然估计思想的方法来求解参数^[10-11]。然而,在对各种参数估计方法的性能研究上却很有限,没有提出明确的性能评价标准,不利于各种方法的比较,无法选择最佳的方法对微动参数进行估计。国内对回波的 CRB 研究多是针对多普勒信号,只有参考文献[12]推导了两参数情况正弦调相信号的 CRB,但由于所求 Fisher 信息矩阵无

闭合表达式,只是给出了 CRB 的近似结果。文中为解决参数估计方法评价问题,针对目标微动激光回波信号,考虑未知噪声方差和目标方位的影响,推导了 Fisher 信息闭合表达式,得到了准确的参数估计下界,分析了 CRB 与信号长度和信噪比的关系,并与近似推导结果进行了对比。

1 微多普勒回波信号数学模型

1.1 微振动数学模型

微多普勒信号的数学模型建立在 V. C. Chen 提出的点散射模型基础之上,Chen 已在研究中给出了四种典型微动的雷达信号数学模型^[13],对于激光雷达探测,有相似的表达形式。产生微多普勒效应的本质是微动散射点的距离变化引起的回波相位调制,在不考虑噪声的理想情况下,回波信号可写为:

$$s_r(t) = \rho \exp \left\{ j \left[2\pi f_c t + 4\pi \frac{R(t)}{\lambda_c} \right] \right\} = \rho \exp \{ j [2\pi f_c t + \phi(t)] \} \quad (1)$$

式中: ρ 为目标散射点的反射率; f_c 为激光工作频率; λ_c 为激光波长; $\phi(t)$ 为相位函数。

$$R(t) = R_0 + D_v \cos(2\pi f_v t + \rho_0) \cos\beta \cos\alpha \quad (2)$$

式中: R_0 为初始距离; D_v 为最大振动幅度; f_v 为微动频率; ρ_0 为微动初始相位; α 、 β 分别为目标相对于雷达的方位角和俯仰角。在推导 $R(t)$ 过程中,为简便起见,考虑散射点振动方位角和俯仰角为 0。

回波信号与发射信号经光电探测器混频后,得到基带信号表达式为:

$$e(t) = A \cdot \exp \{ j [4\pi D_v \cos(2\pi f_v t + \rho_0) \cos\beta \cos\alpha / \lambda_c] \} \quad (3)$$

式中: $A = \alpha \rho \exp(j4\pi R_0 / \lambda_c)$ 为信号复振幅,其中 α 为探测器光电转换因子。

1.2 微动参数范围确定

参数估计结果只有在一定范围内才能保证参数的可分辨性,确定可分辨条件对估计结果的判断以及迭代估计算法初值的选择有重要作用。下面就对参数的范围进行分析。

在正弦调频信号中,只通过时域信号并不能直接获得参数可分辨条件。将公式(3)用第一类 k 阶贝塞尔函数表示^[14],令 $D = 4\pi D_v \cos\beta \cos\alpha / \lambda_c$,得到:

$$e(n) = A \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k^k \exp \{ jk(\omega_v n - \rho_0) \} J_k(D) \quad (4)$$

$$J_k(D) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{j(D\sin(u) - ku)\} du \quad (5)$$

对公式(4)进行傅里叶变换,有:

$$E(e^{j\omega}) = A \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k \delta(\omega - k\omega_0) \exp(-jk\rho_0) J_k(D) \quad (6)$$

根据公式(6)中的 $\delta(\cdot)$ 函数项可以看出,微多普勒频谱只在频率为 f_0 的整数倍是有值,频谱由一系列谱线间距为 f_0 的谱线对组成。

在参数估计中,为确保频率的可分辨性,根据奈奎斯特定理,有 $f_0 \geq B$, B 为信号带宽。但根据公式(4)可以看出由于信号由无数个谐波分量组成,信号的频谱是无限宽。考虑到贝塞尔函数随着阶数 k 的增加迅速下降,大部分信号的能量都集中在有限个数 K 的谐波中。实际上, $K=1$ 时就足够代表绝大部分的信号能量,所以,可认为信号带宽 $B=2f_0=\omega_0/\pi$, 有 $f_0/f_s \leq 1/2$, $\omega_0=2\pi f_0 \leq \pi$ 。

对得到的连续信号以频率 f_s 进行采样, $t=n/f_s$, 则得到离散信号为:

$$e(n) = A \cdot \exp\{j[4\pi D_v \cos(\omega_0 n - \rho_0) \cos\beta \cos\alpha / \lambda_c]\} \quad (7)$$

因为负频率并没有任何实际物理意义,所以,为避免混叠的微多普勒频率的范围是 $\omega_0 \in (0, \pi)$ 。可见,目标微多普勒频率可分辨范围由采样频率决定。

$D=4\pi D_v \cos\beta \cos\alpha / \lambda_c$ 作为贝塞尔函数的参数,其取任意实数时 $J_k(D)$ 都有效,但是,考虑到最大振动幅度 D_v 取负值时没有实际的物理意义,所以确定其取值范围是 $D_v > 0$ 。

对于微动的初始相位 ρ_0 , 其取值范围可直接取为 $[0, 2\pi]$ 。

2 微多普勒参数估计的克拉美-罗界

在实际观测的回波信号中往往夹杂着噪声,考虑噪声存在的情况,探测到的信号离散形式为:

$$x(n) = e(n) + w(n) = A \cdot \exp\{j[4\pi D_v \cos(\omega_0 n - \rho_0) \Delta / \lambda_c]\} + w(n) \quad (8)$$

式中: $w \sim N(0, \sigma^2)$ 为加性高斯白噪声; $\Delta = \cos\beta \cos\alpha$, 表示目标相对于雷达的方位信息。分析 CRB 时考虑 Δ 为已知, 否则得到的 Fisher 信息矩阵为奇异矩阵, 无法得到可分辨的参数。考虑噪声方差 σ^2 为未知时的

影响, 则待估计的参数矢量为 $\Psi = [D_v, \omega_0, \rho_0, A, \sigma^2]^T$ 。

此时, 对于确定矢量参数的 CRB 估计, $x \sim N(\mu(\Psi), C(\Psi))$, 观测样本的概率密度函数为^[15]:

$$p(x; \Psi) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \det^{1/2}[C(\Psi)]} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu(\Psi))^H C^{-1}(\Psi)(x - \mu(\Psi))\right] \quad (9)$$

则参数矢量对应的 Fisher 信息矩阵各元素为:

$$[I(\Psi)]_{ij} = \left[\frac{\partial \mu(\Psi)}{\partial \Psi_i} \right]^T C^{-1}(\Psi) \left[\frac{\partial \mu(\Psi)}{\partial \Psi_j} \right] + \frac{1}{2} \text{tr} \left[C^{-1}(\Psi) \frac{\partial C(\Psi)}{\partial \Psi_j} C^{-1}(\Psi) \frac{\partial C(\Psi)}{\partial \Psi_i} \right] \quad (10)$$

对应的各参数估计的 CRB 可表示为:

$$\text{CRB}([\Psi]_i) = [I^{-1}(\Psi)]_{ij} \quad (11)$$

即各参数的 CRB 为其 Fisher 信息矩阵求逆后对应的对角线上元素值。

以上有

$$\mu(\Psi) = E[x] = e$$

$$C(\Psi) = E[(x - e)(x - e)^H] = \sigma^2 [I]_{N \times N} \quad (12)$$

$$x = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$$

$$e = [e(0), e(1), \dots, e(N-1)]^T \quad (13)$$

$$w = [w(0), w(1), \dots, w(N-1)]^T$$

公式(10)中等号右侧第二项为求迹算子, 其中涉及到矩阵协方差对各参数的求导运算, 所以, 除了噪声方差 σ^2 这个参数外, 其余参数的迹运算结果都为 0。此外, 由于 $\mu(\Psi)$ 与 σ^2 无关, 求导为 0, 所以, Fisher 信息矩阵中所有涉及到 σ^2 的非对角线上的元素为 0。所以可将 Fisher 矩阵分区为:

$$I(\Psi) = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

矩阵中参数矢量分为两部分 $\Psi = [\xi, \sigma^2]$, 其中 $\xi = [D_v, \omega_0, \rho_0, A]^T$, 矩阵各部分表达式为:

$$I_{11}(\xi) = \frac{1}{\sigma^2} \begin{bmatrix} \frac{\partial e}{\partial \xi_i} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \frac{\partial e}{\partial \xi_j} \end{bmatrix}$$

$$I_{11} = I_{21}^T = [0, 0, 0, 0]^T \quad (15)$$

$$I_{22} = \frac{N}{2\sigma^4}$$

根据公式(15)可以看出, 与信号有关的参数估计的 CRB 与噪声方差解耦, 表明信号参数的估计结

果对于估计噪声方差时引入的信息变化并不敏感,也就是说无论噪声方差是否已知都不影响信号参数估计的CRB。

将公式(8)代入公式(10)中进行计算,可以得到待估参数的 Fisher 信息矩阵各元素为:

$$I_{D_v D_v} = \eta_1 \Delta^2 \sum_{n=0}^{N-1} \cos^2(\omega_0 n - \rho_0) \quad (16)$$

$$I_{D_v \omega_0} = -\eta_1 \Delta^2 D_v \sum_{n=0}^{N-1} \begin{bmatrix} n \cos(\omega_0 n - \rho_0) \\ \times \sin(\omega_0 n - \rho_0) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$I_{D_v \rho_0} = \eta_1 \Delta^2 D_v \sum_{n=0}^{N-1} \begin{bmatrix} n \cos(\omega_0 n - \rho_0) \\ \times \sin(\omega_0 n - \rho_0) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$I_{D_v A} = \eta_2 \Delta \sum_{n=0}^{N-1} \cos(\omega_0 n - \rho_0) \quad (19)$$

$$I_{\omega_0 \omega_0} = \eta_1 \Delta^2 D_v^2 \sum_{n=0}^{N-1} n^2 \sin^2(\omega_0 n - \rho_0) \quad (20)$$

$$I_{\omega_0 \rho_0} = \eta_1 \Delta^2 D_v^2 \sum_{n=0}^{N-1} n \sin^2(\omega_0 n - \rho_0) \quad (21)$$

$$I_{\omega_0 A} = \eta_2 2\Delta D_v \sum_{n=0}^{N-1} -n \sin(\omega_0 n - \rho_0) \quad (22)$$

$$I_{\rho_0 \rho_0} = \eta_1 \Delta^2 D_v^2 \sum_{n=0}^{N-1} \sin^2(\omega_0 n - \rho_0) \quad (23)$$

$$I_{\rho_0 A} = \eta_2 \Delta D_v \sum_{n=0}^{N-1} \sin(\omega_0 n - \rho_0) \quad (24)$$

$$I_{AA} = \frac{N}{2} \sigma \quad (25)$$

其中, $\eta_1 = \left[\frac{4\pi A}{\lambda_c \sigma} \right]^2$, $\eta_2 = \frac{4\pi A}{\lambda_c \sigma}$ 。以上推导的 Fisher 信息矩阵元素的表达式为非闭式表达式。

从公式(16)~(25)中可以看出, Fisher 信息是目标相对于雷达方位角、俯仰角的函数,为分析方位信息对 CRB 的影响,可以将 Fisher 矩阵进行分解

$$I(\xi) = \Delta \circ I'(\xi) \quad (26)$$

其中

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta \\ \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta \\ \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta \\ \Delta & \Delta & \Delta & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

“ \circ ”表示两矩阵的Hadamard 乘积, $I'(\xi)$ 为从 $I(\xi)$ 中提取出 Δ 后的矩阵。容易看出是秩为 1 的矩 Δ 阵,由于 CRB 对应 Fisher 逆矩阵的对角线元素,所以,要确保 $I(\xi)$ 可逆。对于秩为 1 且对角线元素不为 0 的矩阵有^[16]:

$$I(\xi)^{-1} = (\Delta \circ I'(\xi))^{-1} = (\Delta^T)^{-1} \circ I'(\xi)^{-1} = \begin{bmatrix} 1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 & 1/\Delta \\ 1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 & 1/\Delta \\ 1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 & 1/\Delta^2 & 1/\Delta \\ 1/\Delta & 1/\Delta & 1/\Delta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_{D_v D_v} & I'_{D_v \omega_0} & I'_{D_v \rho_0} & I'_{D_v A} \\ I'_{\omega_0 D_v} & I'_{\omega_0 \omega_0} & I'_{\omega_0 \rho_0} & I'_{\omega_0 A} \\ I'_{\rho_0 D_v} & I'_{\rho_0 \omega_0} & I'_{\rho_0 \rho_0} & I'_{\rho_0 A} \\ I'_{A D_v} & I'_{A \omega_0} & I'_{A \rho_0} & I'_{AA} \end{bmatrix} \quad (28)$$

“-1”表示对矩阵中每个元素求逆。因为 $1/\Delta^2$ 不能为 0,所以方位角和俯仰角为 $\pi/2$ 整数倍时,矩阵不可逆,此时参数估计的方差下界为无穷大,没有实际物理意义。

同理,可用此方法分析波长对 CRB 的影响,在此不再重复。

3 CRB 仿真结果和分析

3.1 CRB 与各因素关系分析

首先分析 Δ 与 CRB 的关系,从公式(28)中可以明显看出回波信号幅度估计的 CRB 与 Δ 无关,而微动参数估计的 CRB 与 Δ^2 成反比。目标相对于雷达的方位、俯仰角增大会导致 CRB 增加,参数估计准确性下降,当 Δ 为 1 时,即目标沿雷达视线方向运动时,可得到最小的参数估计方差下限。同理可得波长与 CRB 的关系,类比公式(28),可知 CRB 与 λ_c^2 成正比,波长越小,CRB 越低。所以,采用激光探测手段,参数估计的 CRB 可比微波探测低 10 个量级左右,微动特征的探测精度可以更高。

下面分析数据长度和信噪比与 CRB 关系,为简便起见,令 $\Delta=1$,依据公式(34)~(43)的推导对各参数估计的 CRB 进行仿真,设置仿真环境为 $\lambda_c=1550 \text{ nm}$, $D_v=0.01 \text{ m}$, $\omega_0=\pi/5$, $\rho_0=\pi/5$, $\text{SNR}=10 \text{ dB}$, $\sigma^2=1$,数据长度 $N=10\sim 10^5$,图 1 显示各参数估计的 CRB 与数据长度的关系曲线。

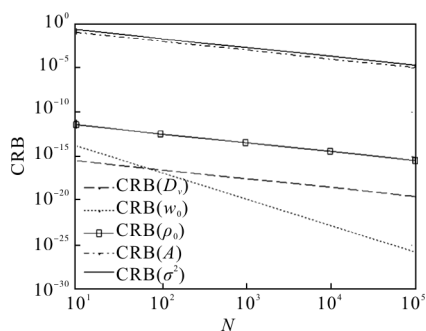


图 1 各参数估计的 CRB 与数据长度 N 的关系

Fig.1 CRB of each parameter versus data length N

从图 1 中可以看出,随着采样数据的增加,各参数估计的 CRB 呈单调下降的趋势。而且,所有待估计参数中,微多普勒频率 ω_0 的 CRB 随数据长度 N 的下降速度最快,因为其与 N 的三次方成反比。从 CRB 的变化趋势中可以看到,各参数对 N 的灵敏度不同,这反映了参数估计中的先后顺序问题,应先估计对 N 最敏感的微多普勒频率,再估计微多普勒幅度和相位参数,以减少传递误差^[15-16]。虽然信号处理长度越大,CRB 越小,但是 N 过大也会增加信号处理复杂程度,占用更多时间,所以实际选择时 N 要综合考虑二者影响。

设定不同信噪比,得到各参数估计的 CRB 随 SNR 变化的关系曲线如图 2 所示。分别对 $N=100$ 和 $N=1\ 000$ 的情况进行了仿真。从图中可以看出,CRB 随信噪比的增加而单调下降,说明回波信噪比升高,参数估计的方差减小。相同信噪比时, N 越大,可获得的克拉美-罗界越低。而且参数 ω_0 的 CRB 最低,所以在估计顺序中,应该最先估计^[16]。

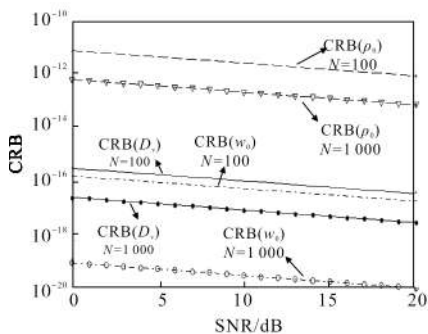


图 2 各参数估计的 CRB 与 SNR 关系

Fig.2 CRB of each parameter versus SNR

3.2 两类估计方法的方差与 CRB 对比

目前比较常用的两类微多普勒参数估计方法有

基于时频分布加峰值提取的方法(TFD-PE)和基于微多普勒信号谱循环平稳性的方法^[16](Spectrum),二者都属于微动参数估计的亚最佳方法。对两种方法的估计方差进行仿真分析,设信号长度 $N=100$,信噪比每间隔 1 dB 进行 100 次 Monte Carlo 仿真实验,按照公式: $MSE = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} [\hat{\omega}_0(i) - \omega_0]^2$ 计算估计方差。这里只以对微动频率的估计为例进行仿真与 CRB 对比,因为根据 3.1 分析的参数估计顺序, ω_0 是最先应被估计的参数,由于传递误差的存在,其他参数估计方差受到 ω_0 估计精度的影响,结果是建立在 ω_0 方差基础上的,这里不再赘述。得到估计方差随信噪比变化的关系如图 3 所示。

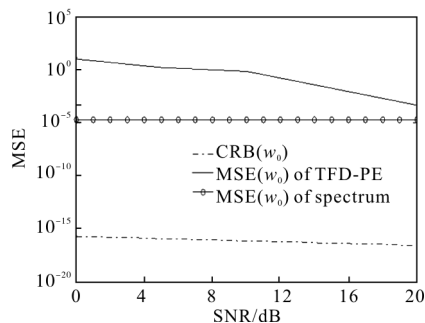


图 3 两种方法估计方差与 CRB 对比

Fig.3 Comparison of MSE of two estimating method and CRB

从图 3 可以看出,基于 TFD-PE 方法(实线段表示),其微多普勒频率估计均方误差随信号的信噪比提高而降低,但整体误差值仍较大,这种方法的性能严重受限于时频分析算法对信号处理的结果,当信噪比低于 0 dB 时失效;基于频谱循环平稳性的方法,估计方差对 SNR 不敏感,在低信噪比时性能优于 TFD-PE 方法。总的来说,现有的两种亚最佳参数估计方法的估计方差与克拉美-罗界还有很大距离,并没有体现出激光的短波长在高精度微动特征探测中的优势,估计算法性能还具有较大的提升空间,下一步有必要研究基于最大似然的最佳渐进参数估计方法,进一步降低参数估计方差。

在所有条件相同情况下将文中结果与参考文献[12]结果进行对比,如图 4 所示。参考文献[2]中是在两参数情况下求 CRB,而 CRB 总是随着估计参数的增加而增加,不过,CRB 的这一增量与 N^k 成反

比(k 为各参数估计的 CRB 对应的 N 的阶数), 所以当 N 很大时, 该增量也可忽略不计。这里为了减少分析误差, 对比时也选用了在两参数下得到的 CRB。

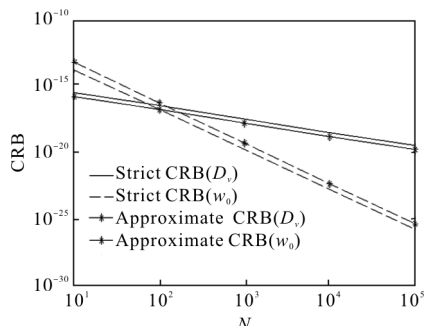


图 4 近似与精确推导 CRB 对比

Fig.4 Comparison of strict and approximate derivation of CRB

图 4 中, 实线表示文中所求 D_v 的 CRB, 虚线表示 w_0 的 CRB, 对应的加星号线表示参考文献[12]中的结果。可以看出, 经过近似处理后 D_v 的 CRB 要低于无近似的结果, 这时, 任何估计方法, 即使性能再好都不可能达到估计方差的下限, 这就导致难以确定有效估计方法, 而且还会在估计性能评价中夸大估计方法的方差, 影响性能评价的准确性; 近似处理后 w_0 的 CRB 高于真实结果, 这会导致对最佳估计方法的误判, 甚至出现估计方差低于 CRB 的现象。由此可见对参数估计 CRB 进行精确推导是十分必要的。

4 结 论

文中严格推导了高斯白噪声环境下, 微动目标相干激光探测回波信号中各参数估计的克拉美-罗界, 并给出了其闭合表达式。推导过程中考虑了目标方位信息和噪声方差未知的情况, 仿真分析了数据处理长度以及回波信噪比与参数估计方差下界的关系, 以及两类微动参数估计方法方差与克拉美-罗界关系。结果表明: 噪声方差对微多普勒信号参数估计的 CRB 没有影响; 减小雷达的方位角俯仰角, 增加数据处理长度和信噪比, 可以有效减小微动参数估计的 CRB; 参数估计中应先估计微动频率, 再估计微动幅度, 以减小误差传递; 现有方法的参数估计精度远达不到克拉美-罗界, 不能发挥激光探测微动的高精度优势, 有必要进一步研究具有更高精度的微动特征估计方法。最后, 与通过近似处理方法得到的

克拉美-罗界进行了对比, 指出了精确推导方差下界的意义, 这为以后微动参数估计方法的性能评价和选择打下了基础。

参考文献:

- [1] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: a review[C]//Aero Sense 2003. International Society for Optics and Photonics, 2003: 240-249.
- [2] Wang Xueqin. Simulation and experiment research on micro-Doppler effect in laser detection [D]. Yantai: Yantai University, 2007. (in Chinese)
王学勤. 激光微多普勒效应的仿真与实验研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2007.
- [3] Garcia -Romeu -Martinez M -A, Rouillard V. On the statistical distribution of road vehicle vibrations [J]. *Packag Technol Sci*, 2011, 24(8): 451467.
- [4] Ye Zhongfu. Statistical Signal Processing [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 247-255. (in Chinese)
叶中付. 统计信号处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 247-255.
- [5] Wang Jiqiang, Zhang Chunxi, Ma Zongfeng, et al. Cramer-Rao lower bounds of parameter estimation from laser Doppler velocimetry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(9): 1419-1422. (in Chinese)
王纪强, 张春熹, 马宗峰, 等. 激光多普勒测速参数估计的下限[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1419-1422.
- [6] Li Lei, Ren Lixiang, Bao Yunxia, et al. On the Cramer-Rao bound of parameter estimation for wideband stepped frequency signal [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(4): 982-986. (in Chinese)
李磊, 任丽香, 包云霞, 等. 宽带频率步进信号参数估计的克拉美罗界研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 982-986.
- [7] Satyabrata Sen, Jacob Barhen, Charles W Glover. Performance bounds on micro -Doppler estimation and adaptive wave form design using OFDM signals [C]//SPIE, 2014, 9077: 907713.
- [8] Luo Y, Zhang Q, Qiu C W, et al. Three -dimensional micromotion signature extraction of rotating targets in OFDM-LFM MIMO radar [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, 140: 733-759.
- [9] Zhang W, Tong C M, Zhang Q, et al. Extraction of

- vibrating features with dual-channel fixed-receiver bistatic SAR[J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2012, 9(3): 507–511.
- [10] Fogle O R, Rigling B D. Micro-range/ micro-Doppler feature extraction and association[C]//Proc IEEE Radar Conf, 2011: 167–171.
- [11] Setlur P, Amin M, Ahmad F. Optimal and suboptimal micro-Doppler estimation schemes using carrier diverse Doppler radars[C]//Proc 34th Int Conf on Acoustics, Speech, and Signal Process(ICASSP), 2009: 3265–3268.
- [12] Huo Kai, You Peng, Jiang Weidong, et al. The Cramer-Rao lower bounds for parameter estimation of signals with sinusoid modulated phase [J]. *Signal Processing*, 2009, 25(9): 1342–1376. (in Chinese)
霍凯,游鹏,姜卫东,等. 正弦调制相位信号参数估计的下限[J]. 信号处理, 2009, 25(9): 1342–1376.
- [13] Chen V. The Micro-Doppler Effect in Radar [M]. Boston: Artech House, 2011.
- [14] Setlur P, Ahmad M, Amin F. Maximum likelihood and suboptimal schemes for micro-Doppler estimation using carrier diverse Doppler radars [J]. *IET Signal Processing*, 2011, 5(2): 194–208.
- [15] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2006.
- [16] Setlur P, Amin M, Ahmad F. Dual frequency Doppler radar for indoor range estimation: Cramer-Rao bound analysis[J]. *IET Signal Process, Special Issue on Time-Frequency Approach to Radar Detection, Imaging, and Classification*, 2010, 4(3): 256–271.