



# 移动通信中基于 LCR-DSR 技术的信道参数估计算法分析与改进

姜胜园<sup>1</sup>, 华惊宇<sup>1\*</sup>, 卢为党<sup>2</sup>, 周凯<sup>1</sup>, 徐志江<sup>1</sup>

1. 浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023

2. 浙江工业大学通信网技术应用研究省重点实验室, 杭州 310023

\* 通信作者. E-mail: eehjy@zjut.edu.cn

收稿日期: 2017-03-31; 接受日期: 2017-11-13; 网络出版日期: 2018-02-07

国家自然科学基金 (批准号: 61471322) 资助项目

**摘要** 本文分析以及优化一种采用双采样率 (double sampling rate, DSR) 技术的信道参数联合估计算法. 论文首先对基于电平通过率 (level crossing rate, LCR) 的 Doppler 频移估计算法进行分析, 所采用的分析度量是均方误差 (mean square error, MSE). 其次, 将分析得到的 MSE 与信道采样间隔之间的关系用于优化所研究的算法. 最终论文的分析表明最优信道采样间隔可以获得更好的 Doppler 频移和信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 估计性能, 这一点也在仿真中获得了证实. 仿真结果显示优化后的算法具有最优的估计性能.

**关键词** 电平通过率, SNR, Doppler 频移, 双采样率, 移动通信

## 1 引言

无线信道的参数估计一直是国际上的研究热点<sup>[1,2]</sup>, 其中信道的双选择性衰落对于通信收发机性能造成了诸多不利影响, 比如接收信号的 SNR (signal-to-noise ratio) 波动和频域 Doppler 扩展<sup>[2,3]</sup>. 因此对于信道衰落参数的估计受到了诸多研究人员的关注, 如对于 Doppler 频移的估计可以用于无线定位<sup>[4]</sup>、小区切换<sup>[5]</sup>, 以及天线测量<sup>[6]</sup>. Doppler 频移估计可以转换为物体运动速度的估计, 后文不再专门区别二者.

过去研究人员一般对 SNR 和 Doppler 频移这两个信道参数进行独立估计, 如文献 [7] 中的 SNR 估计器与文献 [5, 8~12] 中的 Doppler 频移估计器. 其中 Doppler 频移估计算法的性能往往受限于加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 的影响, 因此文献 [13] 提出了一种迭代处理方法来改善噪声环境中的 Doppler 频移估计性能. 另一方面, 考虑到对 Doppler 频移和 SNR 进行联合估

**引用格式:** 姜胜园, 华惊宇, 卢为党, 等. 移动通信中基于 LCR-DSR 技术的信道参数估计算法分析与改进. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 349–358, doi: 10.1360/N112016-00243  
Jiang S Y, Hua J Y, Lu W D, et al. Evaluation and improvement of LCR-DSR channel parameter estimator in mobile communications (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 349–358, doi: 10.1360/N112016-00243

计更有利于实现系统的低复杂性, 文献 [14] 提出了基于频域峰值搜索的 SNR 和 Doppler 频移非参数联合估计器, 然而它的 Doppler 频移估计性能劣于文献 [13] 的迭代估计方法. 综上, 我们需要设计一种参数化联合估计方法来获得高精度 SNR 和 Doppler 频移的联合估计.

在文献 [15] 中, 基于 LCR (level crossing rate) 计算和 DSR (double sampling rate) 处理的参数化联合估计器, 即 LCR-DSR 估计器, 具有较好的 SNR 与 Doppler 频移估计性能. 进一步地, 在文献 [16] 中, 研究人员初步研究了 DSR 中信道采样间隔比值的影响, 但是比值被限定于整数域且该分析中的原始 LCR 计算误差取得过小. 因此, 对 LCR-DSR 估计器的性能分析不够充分, 需要在放宽限制前提下进一步研究该估计器的性能波动与优化改进 [16]. 鉴于此, 本文首先给出了适用于分数倍信道采样间隔比值的 Doppler 频移估计误差模型, 而后在较大的预定 LCR 计算误差以及不同信道采样间隔下充分分析 Doppler 频移估计器的性能波动, 有效修正了文献 [16] 分析的局限性. 相比于文献 [15] 中的原始 LCR-DSR 方法, 本文避免了多项式拟合带来的运算量增加, 并能够在中低 SNR 环境提供更好的估计性能. 分析结果表明 DSR 处理中两个信道采样间隔均对估计器性能产生较大影响, 且分数化的信道采样间隔比值相对于整数比值兼具运算量降低和估计性能不下降的优势. 进一步地, 在给定最高信道采样率的前提下, 论文基于 Doppler 频移性能波动的分析能获取信道采样间隔比值的最优值. 最终计算机仿真表明, 本文优化后的 LCR-DSR 估计器可以实现精确的 Doppler 频移估计以及可接受的 SNR 估计性能.

## 2 LCR-DSR 估计器的分析与优化

LCR-DSR 联合估计器虽然能产生比以往研究更优秀的估计性能, 但它需要假设其中的  $\hat{f}_{d1}$  和  $\hat{f}_{d2}$  为完美估计. 因此如果上述假设不完全满足, 则会产生明显的性能损失, 这在文献 [15] 中采用多项式拟合予以改善, 而本文后续的分析表明这一措施并不必要且非最优. 事实上, 文献 [15] 的拟合公式是根据经验仿真而非实时运算设定, 在实际应用中可能受到环境失配影响而性能下降.

### 2.1 通用采样间隔的 LCR-DSR 估计器

注意到信道采用间隔应该是系统导频插入间隔 ( $T_s$ ) 的整数倍, 本文使用以下两个间隔表达式:

$$T_{s1} = mT_s, \quad T_{s2} = nT_s, \quad (1)$$

其中  $m$  和  $n$  是正整数且满足  $m < n$ , 同时  $1/T_s$  即为信道的最高采样率. 降低信道采样率, 亦即增大  $n$  或者  $m$  最直观的好处在于显著降低了 LCR 的计算量. 相对于  $T_s$  级别信道采样率,  $nT_s$  对应的信道采样率可以使得所需的乘法、加法和比较操作规模均近似缩减为前者的  $1/n$ .

式 (1) 中的两个整数必须满足

$$f_m = f_d T_s < \frac{0.5}{\max\{m, n\}}, \quad (2)$$

其中  $f_m$  和  $\max\{m, n\}$  表示归一化的 Doppler 频移和  $\{m, n\}$  中的最大值. 式 (2) 表明信道作为一种特殊的随机信号, 采样定理也具备指导性, 即信道采样频率必须满足 2 倍信道带宽以上, 而信道带宽通常近似为  $f_d$ . 因此, 对一个给定的  $f_m$ , 其可选的  $(m, n)$  是有限的, 这也有利于后续的性能分析. 此外, 在本文的研究中, 最大  $f_m$  等于 0.1, 因此可选的最大  $m$  (或者  $n$ ) 为 5.

现在针对某一  $(m, n)$ , 可以给出一般性的 LCR-DSR 联合估计器

$$\hat{f}_d = \sqrt{\frac{1 + \hat{\gamma}_s}{\hat{\gamma}_s} \left( -\frac{1}{6(1 + \hat{\gamma}_s)T_{s1}^2} + \hat{f}_{d1}^2 \right)}, \quad (3a)$$

$$\hat{\gamma}_s = \frac{n^2 - m^2}{6n^2m^2T_s^2(\hat{f}_{d1}^2 - \hat{f}_{d2}^2)}. \quad (3b)$$

必须指出的是, 不同  $(m, n)$  将导致式 (3) 中不同的估计性能, 而文献 [15] 中的选择  $(m = 1, n = 2)$  已经被我们的仿真证实不是最佳的. 实际上, 上述所谓估计性能差异是由于  $\hat{f}_{dk}$  中的非理想估计偏差造成的.

## 2.2 Doppler 频移估计误差理论模型

Doppler 估计的非理想偏差可以用以下理论误差模型分析, 即

$$\begin{aligned} \hat{f}_{d1} &= f_d \times \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s + 1} + \frac{1}{6(\gamma_s + 1)} \left( \frac{1}{f_d T_{s1}} \right)^2} + \Delta_1, \\ \hat{f}_{d2} &= f_d \times \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s + 1} + \frac{1}{6(\gamma_s + 1)} \left( \frac{1}{f_d T_{s2}} \right)^2} + \Delta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  表示  $\hat{f}_{dk}$  的非理想估计偏差. 通常由于数值信道模型和仿真样本数等非理想因素 [12, 17], 基于 LCR 的 Doppler 频移估计器会产生误差. 而在文献 [18] 中, Ehrman 和 Esposito 已经指出基于 LCR 的 Doppler 频移估计的 r.m.s 波动可以近似为  $\frac{1}{\sqrt{K}}$ . 考虑到本文仿真样本数目达到 4000, 对应于最多 1.58% 的 r.m.s 波动, 这对于总的估计误差而言是可忽略的, 因此后文将  $\Delta_1$  ( $\Delta_2$ ) 视为确定但未知的常量, 这将极大简化本文的性能分析. 注意, 这里样本数目 4000 并不是必需的. 事实上, 根据我们的仿真研究, 样本数目大于 500 即可保证分析的效果, 此时的 r.m.s 波动小于 5%. 更小的样本数目会导致分析和仿真结果有所偏离, 但是 LCR-DSR 算法性能仍然较高. 另外本文在后面分析中也考虑了忽略 r.m.s 波动的补偿, 即设定较大的  $\Delta$ , 其值比通常仿真中观察到的要大, 这就保证即使针对较小的样本点数, 本文分析也能起到参考作用.

为了研究式 (4) 中的误差特性, 本文做了大量计算机仿真, 其结果揭示了如下结论:

- $T_{s1} < T_{s2} \Rightarrow \Delta_1 > \Delta_2$ , 原因在于信道采样满足采样定理且采样间隔较大时, 噪声带宽较小而信道带宽不变, 等效的信噪比较高, 所以波动降低.
- 误差  $\Delta_1$  ( $\Delta_2$ ) 近似为  $n$  的线性递减函数.
- 最大估计误差表示为  $\Delta$ , 其最大值设定为  $0.03/T_s$ . 由于本文最大可能的  $f_m$  为 0.1, 因此该最大误差相当于最大可能  $f_m$  的 30%.

$\Delta$  是预先设定的常数, 不需要事先估计. 但是如本小节前文所述为了提高分析的容忍度, 一般用一个较大的数. 本文在仿真中观察到最大估计误差一般在最大可能  $f_m$  的 20% 左右, 因此选择  $0.03/T_s$  来提高分析的可靠性.

根据以上讨论可知, 必然存在比文献 [15] 更好的信道采样间隔选择. 同时式 (4) 可以近似为

$$\begin{aligned} \hat{f}_{d1} &\approx f_d \times \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s + 1} + \frac{1}{6m^2(\gamma_s + 1)} \left( \frac{1}{f_d T_s} \right)^2} + \frac{\Delta}{m}, \\ \hat{f}_{d2} &\approx f_d \times \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s + 1} + \frac{1}{6n^2(\gamma_s + 1)} \left( \frac{1}{f_d T_s} \right)^2} + \frac{\Delta}{n}. \end{aligned} \quad (5)$$

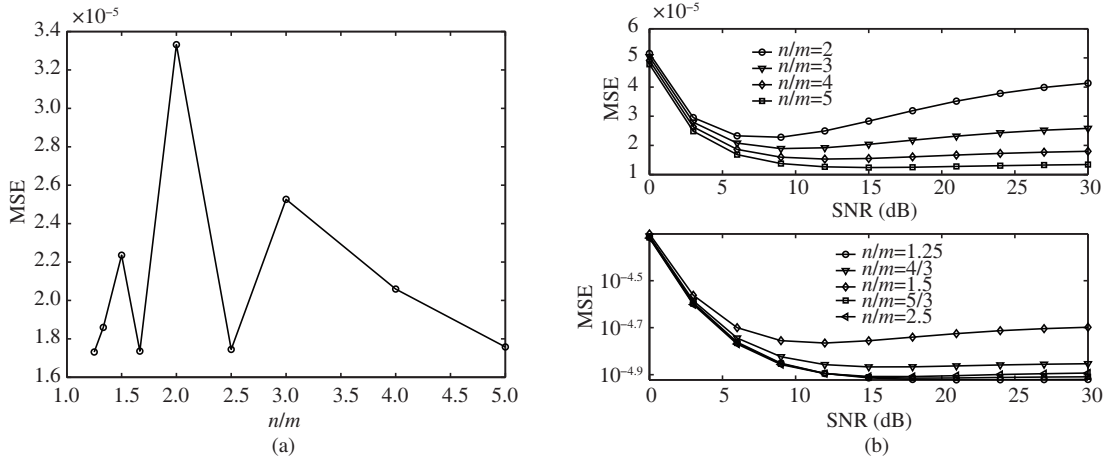


图 1 Doppler 频移估计的 MSE I

**Figure 1** The MSE of Doppler shift estimation I. (a) MSE averaged over different SNRs and  $f_d$ 's; (b) MSE averaged over different  $f_d$ 's

把式 (5) 代入式 (3), 可以分析估计由估计误差造成的性能损失, 其中 Doppler 频移估计的 MSE (mean square error) 定义为:

$$E_f = E[|\hat{f}_d - f_d|^2], \quad (6)$$

这里  $E[\cdot]$  和  $|\cdot|$  表示期望和绝对值. 在本文的研究中, 通过不同 Doppler 频移上的平均操作来实现求期望操作.

### 2.3 信道采样间隔的理论分析和优化

由于误差的概率密度函数是未知的, 因此很难类似于传统检测估计理论去分析方差. 但是对一个给定的  $\Delta$ , 利用式 (3), (5) 和 (6), 可以在理论上推导 Doppler 频移估计 MSE 的封闭形式表达式, 然而这将导致极为繁琐的过程和结果. 因此本小节通过数值计算研究 MSE, 并以曲线和图形展示结果, 这对读者来说更为直观清晰.

根据式 (2), 必须分析两类  $n/m$ , 即

- 整数:  $m=1$  和  $n \in \{2, 3, 4, 5\}$ ;
- 有理数: 互质的  $(n, m)$  且  $2 \leq m < n \leq 5$ .

#### 2.3.1 确定性 $\Delta T_s$ 情形

不失一般性, 本文设定  $\Delta T_s$  为 0.03, 即仿真中发现的最恶劣情形. 此外, 由于  $\frac{T_s^2}{T_{s1}} = \frac{n}{m}$ ,  $n/m$  用于区分不同的信道采样间隔.

图 1 给出了 Doppler 频移估计的 MSE. 从图 1 中可以发现,  $n/m$  不是唯一决定 MSE 的因素,  $n$  和  $m$  的取值同样对 MSE 有影响, 因此图 1(a) 呈现波动特性. 具体从图 1(a) 中可以清晰地看到:

- 更大的  $n$  导致更小的 MSE, 这意味着式 (5) 中的估计误差对 MSE 产生显著影响;
- 相同的  $n$ , 有理数  $n/m$  比整数  $n/m$  表现更好;
- 相同的  $n$ , 有理数  $n/m$  在更大的  $m$  时产生更好的性能;

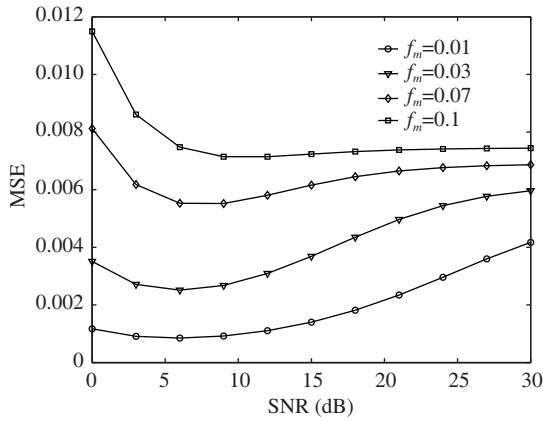


图 2 Doppler 估计的 MSE II:  $n/m=2$

Figure 2 The MSE of Doppler shift estimation II:  $n/m=2$

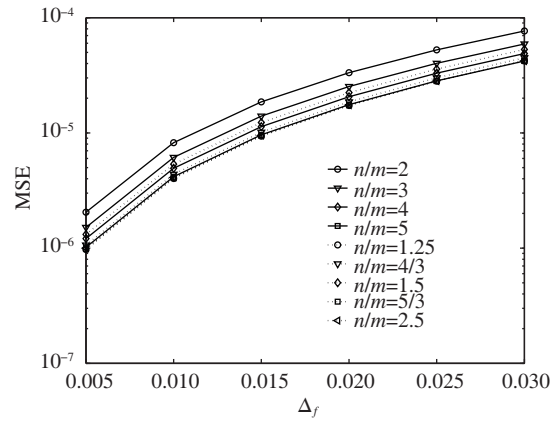


图 3 不同  $\Delta T_s$  的 Doppler 频移估计 MSE

Figure 3 The MSE of Doppler shift estimation for different  $\Delta T_s$ 's I

• 文献 [15] 中采用的  $n/m = 2$  是最坏的选择, 因此该文作者不得不采用多项式拟合予以改善, 但是留下了环境失配导致性能下降的风险。

此外, 随着 SNR 增加, 可以在图 1(b) 中找到转折点, 其中更大的  $n$  导致更高的转折 SNR. 为了清楚地显示转折点, 在图 2 中给出了不同  $f_d$  下的 MSE vs. SNR 曲线, 其中清楚地发现往往小  $f_m$  倾向于更高的转折 SNR. 之所以出现转折是因为本文的算法其实采用了代数方程求解, 本身是非线性的. 而且对于 MSE 的影响并不是 SNR 唯一决定的, 两个初始估计的误差以及真实的  $f_d$  等都有影响. 当其他因素的影响是负面的且大于 SNR 增加的正向影响时, MSE 就会出现上升现象, 尤其是  $f_d$  较小的时候. 事实上 2.3.3 小节有间接指出, 式 (3b) 中的 Doppler 频移估计差值小则敏感性高, MSE 上升明显, 尤其真实  $f_d$  小以及  $n - m = 1$  时, 即图 2 情形. 第 3 节的仿真将证实本文这一分析.

### 2.3.2 可变 $\Delta T_s$ 情形

根据仿真, 最大  $\Delta T_s$  能达到 0.03, 所以本小节评估  $\Delta T_s$  在 0.05 到 0.03 范围内的 MSE.

图 3 描述了具有可变  $\Delta T_s$  的 Doppler 估计 MSE 性能, 其中用  $\Delta_f$  表示  $\Delta T_s$ . 从图 3 中发现, 对于大  $\Delta_f$ , MSE 快速增加. 这表明如果式 (5) 的近似在某些情况下偏离实际, MSE 性能可能将明显降低. 因此, 应该仔细地选择最佳信道采用间隔. 此外, 本文也在图 4 中进一步展示了可变  $\Delta T_s$  下 MSE 性能的变化. 幸运的是, 可以得到与图 1, 2 相同的结论, 因此随后的分析将只在 2.3.1 小节中的参数设置下进行.

### 2.3.3 信道采样间隔的优化选择

根据前述分析, 似乎  $n/m$  的最佳选择是 5/4. 但是考虑到式 (5) 的误差模型是近似得到的,  $n/m$  的最优值还不能仅凭图 1~4 中的 MSE 分析结果. 事实上, 如果  $n - m$  很小, 则根据式 (3b),  $\hat{f}_{d1}^2 - \hat{f}_{d2}^2$  也会很小, 因此联合估计器对误差偏离现象会很敏感, 这也在仿真中得到了证实. 因此文献 [15] 中的选择和  $n/m = 5/4$  在实际应用中都不是最优选择. 为了找到较优比值, 本文定义失配 MSE 如下:

$$E_f(n, m) = \frac{1}{M-1} \sum_{1 \leq m_t < n_t \leq 5} \left( \hat{f}_d(n, m) - \hat{f}_d(n_t, m_t) \right)^2, \quad (7)$$

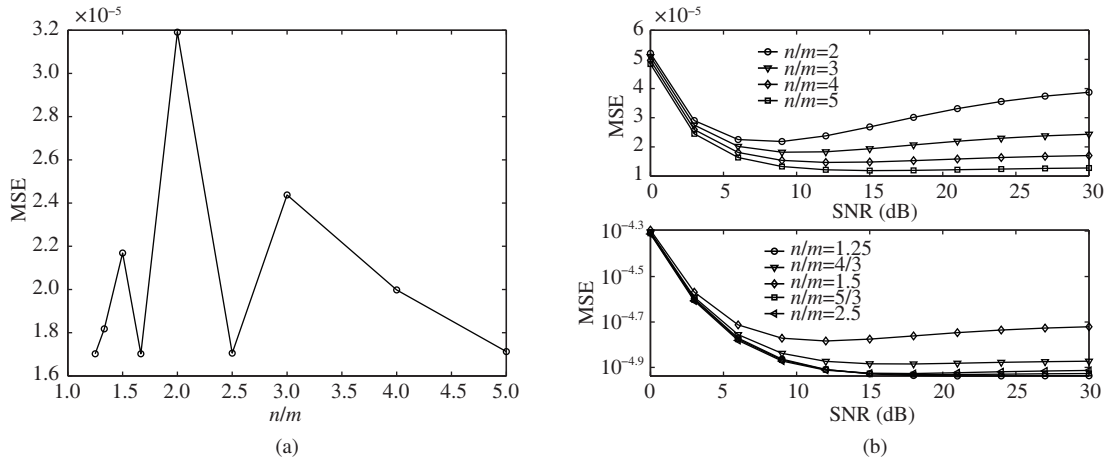


图 4 不同  $\Delta T_s$  的 Doppler 频移估计 MSE II

Figure 4 The MSE of Doppler shift estimation for different  $\Delta T_s$ 's II. (a) MSE averaged over different SNRs,  $f_d$ 's and  $\Delta T_s$ 's; (b) MSE averaged over different  $f_d$ 's and  $\Delta T_s$ 's

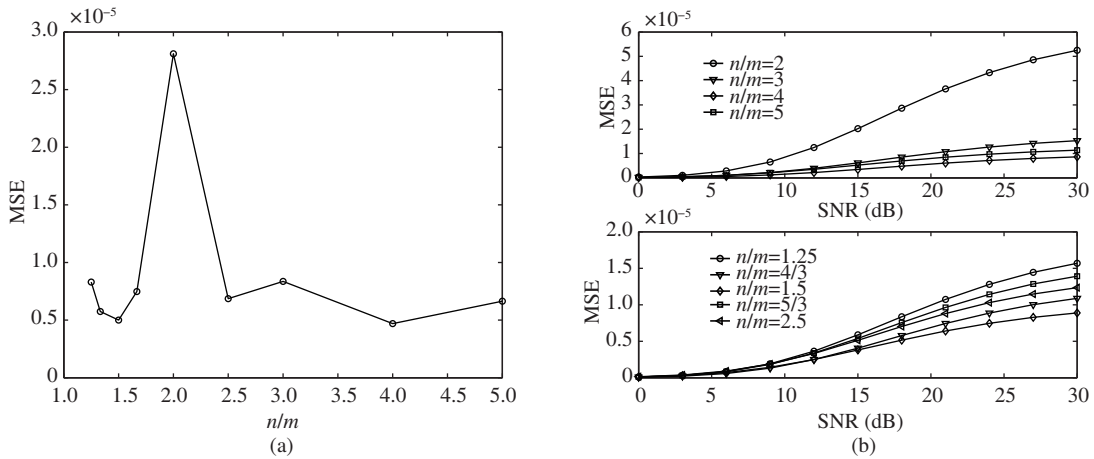


图 5 Doppler 频移估计的失配 MSE

Figure 5 The mismatched MSE for Doppler shift estimates. (a) MSE averaged over different SNRs and  $f_d$ 's; (b) MSE averaged over different  $f_d$ 's

其中,  $\bullet(n, m)$  表示从某个确定的  $(n, m)$  设置仿真得到的估计结果, 并且  $M$  表示  $(n, m)$  的可能组合数. 实际上, 式 (7) 可以视为最小二乘 (least square, LS) 原理下的估计稳定性测度. LS-最稳定的  $n/m$  对于非理想因素也应具有较强的鲁棒性. 之所以采用最小二乘评价, 一方面是我们不知道估计误差的概率密度函数, 无从利用检测估计理论确定最优比值, 另一方面是在先验信息不足时, LS 被认为是所能采取的最好对策.

图 5 显示 SNR 估计的失配 MSE. 再一次发现,  $n/m = 2$  是最坏的选择. 此外可以发现以下现象:

- $n > 2$  时,  $n$  和  $m$  之间更大的差距导致失配 MSE 的更高稳定性;
- $n > 2$  且  $(n, m)$  互质时, 更小的  $n$  导致失配 MSE 更高的稳定性.

根据第 2 节的研究分析, 可以看到  $n/m$  较好的选择是 5 或 2.5, 其中后者相对于前者还具有运算量下降的优点.

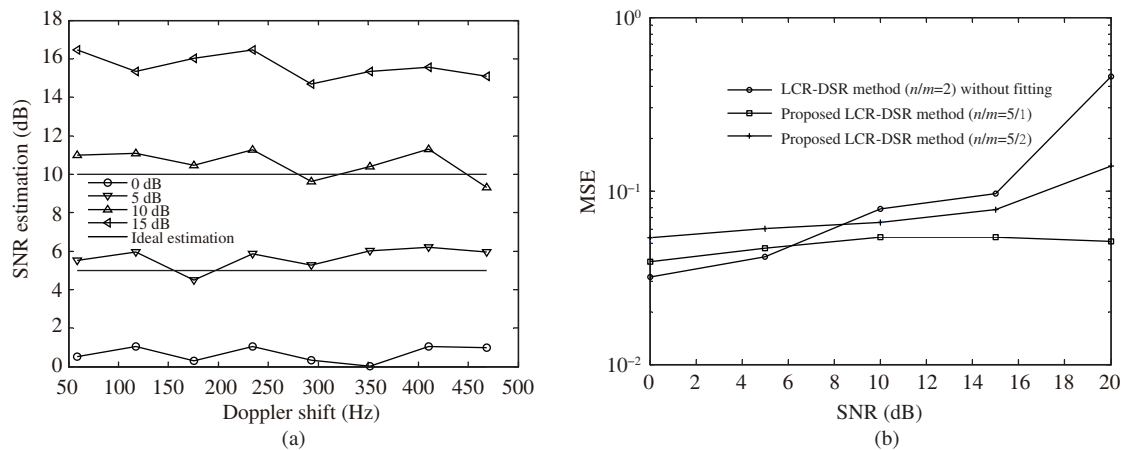


图 6 SNR 估计性能

Figure 6 The SNR estimation performance. (a) Accuracy:  $n/m=5$ ; (b) MSE

截至目前, 本文的理论分析全部结束, 第 3 节将给出仿真结果. 如前所述, 鉴于过程的繁琐和冗长, 本文并没有给出 MSE 的闭合表达式, 而是用数学逼近和数值计算方法给出图表说明.

### 3 仿真与分析

本节对比本文提出的方法和传统方法, 例如, 相位差方法<sup>[9]</sup>、原始 LCR-DSR 方法 ( $n/m=2$ )<sup>[15]</sup>、对数包络 (logarithmic envelope, LE) 方法<sup>[5]</sup>、自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 方法<sup>[11]</sup>, 以及本文提出的 LCR-DSR 方法 ( $n/m=5$  或者 2.5). 此外, 在本文的仿真中采用 ITU R M.1225 信道模型, 其中信道采样间隔  $T_s = 0.2$  ms 以及移动速度取值 30~240 km/h, 且载波频率是 2.11 GHz.

图 6 叙述本文优化后的 LCR-DSR 方法 SNR 估计性能. 可以清晰地看到, 由于 AWGN 等因素引起式 (3) 中  $\hat{f}_{dk}$  的估计误差, 图 6 中所有的曲线都是波动的. 但是曲线波动并不强烈且对于较宽范围的 SNR 和车速 (等效于 Doppler 频移), SNR 估计性能是可接受的. 同时, 我们发现 SNR 估计误差在高 SNR 时比在低 SNR 时更大, 这是因为基本方程组 (3) 对 SNR 估计是敏感的, 即式 (2) 中哪怕轻微的 Doppler 频移估计误差都可能对 (3b) 中的 SNR 估计产生显著的影响. 从图 6 可以得出结论,  $n/m=5$  (或者 2.5) 在无线通信系统工作 SNR 范围 (5~10 dB) 表现较好.

图 7 对比多种 Doppler 频移算法的估计精确度. 很容易发现 LE 方法产生显著的偏差, 而本文提出的方法在这 5 个方法中表现最好. 甚至在 SNR=0 dB 处, 本文提出的方法其估计偏差仍然很小. 此外, 图中结果也证实了 2.3 小节的结论, 即更大的  $n$  导致更好的性能. 最后, 对于所有方法, 在更高的速度或者 SNR 处, 可以观察到更小的偏差.

图 8 提供了 Doppler 频移估计的平均 MSE 比较. 由于在算法推导中没有考虑 AWGN 的影响, 相位差方法、ACF 和 LE 方法存在显著的性能下降. 对比之下, LCR-DSR 方法利用 Doppler 频移估计偏差中隐藏的信息, 因此能产生更稳定和更好的 MSE 性能. 此外, 在 LCR-DSR 方法的 4 条曲线中, 对应于无拟合  $n/m=2$  的曲线展现出最大的估计偏差. 同时只要 SNR 属于 5~10 dB, 对应于  $n/m=2.5$  (或者 5) 的曲线甚至比对应于拟合  $n/m=2$  的曲线更好. 最后, 尽管肉眼不可分辨, 但是 LCR-DSR 方法 ( $n/m=2.5$ ) 的估计性能略优于 LCR-DSR 方法 ( $n/m=5$ ), 而且前者的计算量约为后者的一半.



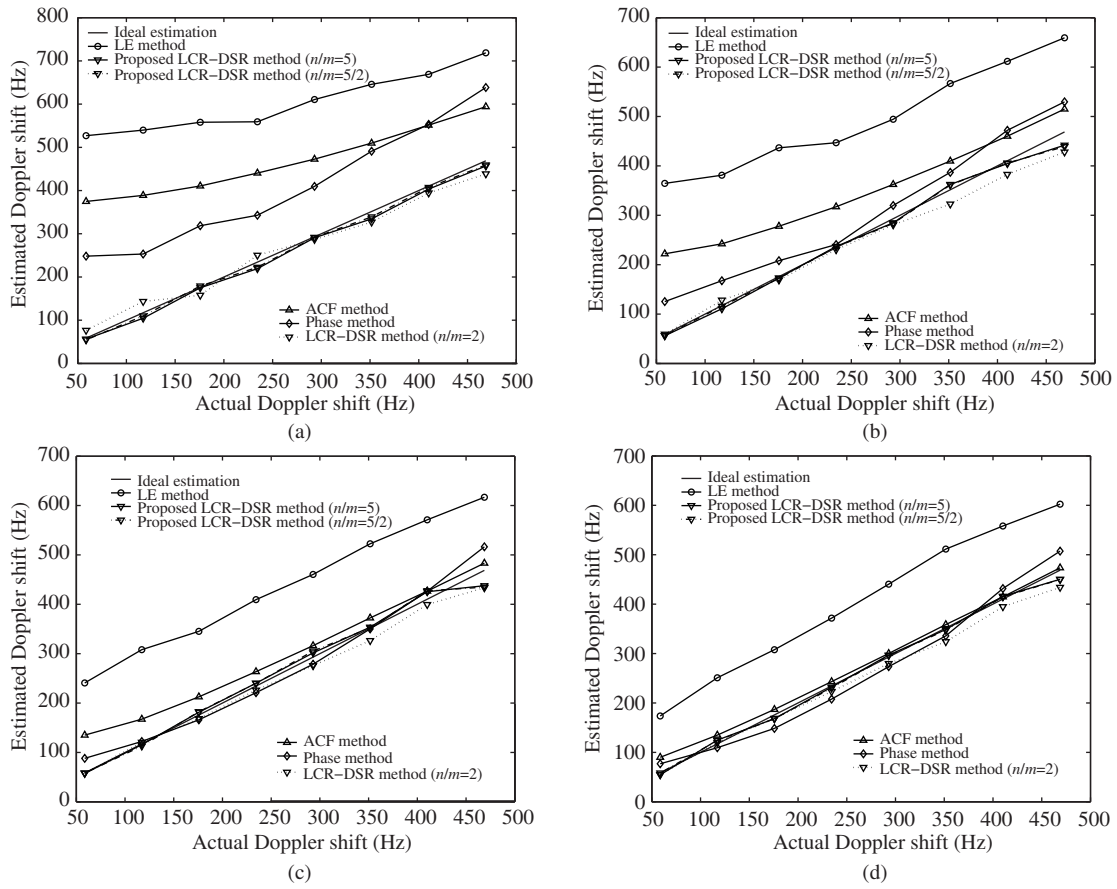


图 7 Doppler 频移估计的比较: 原始 LCR-DSR 方法<sup>[15]</sup>、LE 方法<sup>[5]</sup>、相位差方法<sup>[9]</sup>、ACF 方法<sup>[11]</sup>, 和本文提出的 LCR-BSR 方法

Figure 7 Comparison of Doppler shift estimates: the original LCR-DSR method<sup>[15]</sup>, LE method<sup>[5]</sup>, phase difference method<sup>[9]</sup>, ACF method<sup>[11]</sup>, and proposed LCR-DSR method. Signal-to-noise ration (a) 0 dB, (b) 5 dB, (c) 10 dB, (d) 15 dB

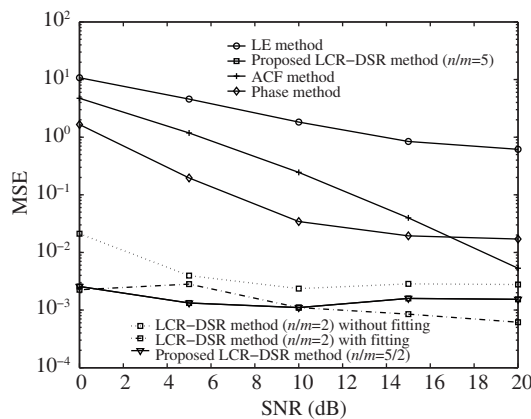


图 8 Doppler 频移估计器的 MSE 性能比较

Figure 8 The MSE performance comparison of the Doppler shift estimators



如引言所述, 如果忽略 SNR 估计的要求, 迭代 Doppler 频移估计器也是有效的方法. 然而 LCR-DSR 估计器在联合估计能力方面优于这些迭代估计器. 实际上, 我们也执行了文献 [13] 中迭代估计方法的仿真, 结果表明本文提出的 LCR-DSR 方法 ( $n/m=5$  或者 2.5) 可以获得与文献 [13] 方法相近的 MSE. 例如, LCR-DSR 方法 ( $n/m=2.5$ ) 产生 0.0015 的 MSE (@SNR 10 dB), 而文献 [13] 的迭代方法产生 0.001 的 MSE.

## 4 结论

本文对 LCR-DSR 方法中的 Doppler 频移估计性能进行了综合分析, 主要通过研究估计误差波动和信道采样间隔对估计性能的影响来选择 DSR 中最优的信道采样间隔组合. 进而从该最优组合导出了无需多项式拟合的 Doppler 频移和 SNR 联合估计方法, 计算机仿真表明在较宽 SNR 和车速范围内该方法都能提供精确的联合估计.

## 参考文献

- 1 Khan N M, Simsim M T, Rapajic P B. Generalized model for the spatial characteristics of the cellular mobile channel. *IEEE Trans Veh Tech*, 2008, 57: 22–37
- 2 Ai B, Cheng X, Kürner T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway. *IEEE Trans Intell Trans Syst*, 2014, 15: 2143–2158
- 3 Wang D M, Zhang Y, Wei H, et al. An overview of transmission theory and techniques of large-scale antenna systems for 5G wireless communications. *Sci Sin Inform*, 2016, 46: 3–21 [王东明, 张余, 魏浩, 等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46: 3–21]
- 4 张渭乐, 殷勤业, 韩玮, 等. 基于 Doppler 效应的无线传感网络射频干涉定位方法. *中国科学: 信息科学*, 2009, 39: 909–917
- 5 Sampath A, Holtzman J M. Estimation of maximum Doppler frequency for handoff decisions. In: *Proceedings of the 43rd Vehicular Technology Conference, Secaucus*, 1993
- 6 Liu Q H, Tsuruta S, Asari K, et al. New method of measuring phase characteristics of antenna using Doppler frequency measurement technique. *IEEE Trans Antenn Propag*, 2004, 52: 3312–3318
- 7 Beaulieu N C, Toms A S, Pauluzzi D R. Comparison of four SNR estimators for QPSK modulations. *IEEE Commun Lett*, 2000, 4: 43–45
- 8 Baddour K E, Beaulieu N C. Nonparametric Doppler spread estimation for flat fading channels. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking, New Orleans*, 2003
- 9 Hua J, Sheng B, You X. The phase probability distribution of general clarke model and its application in Doppler shift estimation. *IEEE Antenn Wirel Propag Lett*, 2005, 4: 373–377
- 10 Hua J Y, Sheng B, You X H, et al. A scheme for the Doppler shift estimation despite the power control in mobile communication systems. In: *Proceedings of the 59th Vehicular Technology Conference, Milan*, 2004
- 11 Xiao C S, Mann K D, Olivier J C. Mobile speed estimation for TDMA based hierarchical cellular systems. *IEEE Trans Veh Tech*, 2001, 50: 981–991
- 12 Dogandzic A, Zhang B. Estimating Jakes' Doppler power spectrum parameters using the whittle approximation. *IEEE Trans Signal Process*, 2005, 53: 987–1005
- 13 Hua J Y, Meng L M, Li G, et al. An accurate scheme for channel parameter estimation in mobile propagations. *IEICE Trans Electron*, 2009, 92: 116–120
- 14 Hua J Y, Meng L M, Xu X J, et al. Novel scheme for joint estimation of SNR, Doppler, and carrier frequency offset in double-selective wireless channels. *IEEE Trans Veh Tech*, 2009, 58: 1204–1217
- 15 Hua J Y, Meng L M, Li G, et al. A joint estimation of channel parameters for very low signal-to-noise ratio environment in mobile radio propagations. *Radio Sci*, 2010, 45: 1–8

- 16 Hua J, Fang Q, Xu Z, et al. An improved Doppler shift and SNR estimator in wireless communications. In: Proceedings of International Conference on Information and Communications Technologies, Nanjing, 2014
- 17 Jake W C. Microwave Mobile Communication. New York: IEEE Press, 1974
- 18 Ehrman L, Esposito R. On the accuracy of the envelope method for the measurement of Doppler spread. IEEE Trans Commun, 1969, 17: 578-581

## Evaluation and improvement of LCR-DSR channel parameter estimator in mobile communications

Shengyuan JIANG<sup>1</sup>, Jingyu HUA<sup>1\*</sup>, Weidang LU<sup>2</sup>, Kai ZHOU<sup>1</sup> & Zhijiang XU<sup>1</sup>

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Communication Networks and Applications, Hangzhou 310023, China

\* Corresponding author. E-mail: eehjy@zjut.edu.cn

**Abstract** Evaluation and improvement of LCR-DSR channel parameter estimator in mobile communications. This paper presents a comprehensive investigation on the optimization of a joint estimator employing the double sampling rate (DSR) technique, in which the Doppler shift estimation based on the level crossing rate (LCR) has been evaluated analytically in terms of the mean square error (MSE). Subsequently, the relationship between the MSE and the channel sampling interval is presented for optimization. Finally, the optimal channel sampling interval is obtained as well as an improved performance of the signal-to-noise ratio (SNR) and Doppler shift estimation. Sufficient simulations demonstrate a good performance for the proposed algorithm.

**Keywords** level crossing rate, SNR, Doppler shift, double sampling rate, mobile communication



**Shengyuan JIANG** was born in 1992. She received a B.S. degree in communication engineering from the Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China, in 2015. Currently, she is a graduate student at the Zhejiang University of Technology. Her research interests include channel modeling, and physical layer encryption algorithms.



**Jingyu HUA** was born in Zhejiang province, China, in 1978. He received his Ph.D. degree of radio engineering from Southeast University in 2006. In 2006, he joined the Zhejiang University of technology first as an assistant professor, and now as a full professor. His research interests lie in the area of parameter estimation, channel modeling, wireless localization and digital filtering in mobile communications.