



移动通信中适用于高车速环境的精确 Doppler 频移与信噪比联合估计算法

林敏, 华惊宇*, 李溯南, 徐志江, 孟利民

浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023

* 通信作者. E-mail: eehjy@zjut.edu.cn

收稿日期: 2016-06-16; 接受日期: 2016-11-11; 网络出版日期: 2017-06-30

国家自然科学基金 (批准号: 61471322) 资助项目

摘要 车载移动通信中信噪比与 Doppler 频移对通信质量有重要影响. 本文探究了基于迭代自相关函数的 Doppler 频移估计算法, 指出其在高车速环境下估计误差较大, 提出了一种插值改进方法以改善高车速时的 Doppler 频移估计. 最后根据迭代 Doppler 频移估计在不同迭代环节具有不同估计误差这一特性, 提出了基于 Doppler 频移估计误差比的信噪比估计算法. 计算机仿真结果表明, 所提出的算法在一般通信系统的工作信噪比与车速范围内均有较好的估计性能, 最高仿真车速达到了 300 km/h.

关键词 信噪比, Doppler 频移, 车速估计, 移动通信, 车载通信

1 引言

近年来, 随着车联网研究的深入, 车载移动通信已经成为一个热点研究方向^[1~4], 它是智能交通系统 (intelligent traffic system, ITS) 和移动通信的交叉方向. 有效的车载通信不仅提供车辆间的数据通信, 同时也可用于交通安全领域^[4] 以及交通社会服务^[5]. 一般而言, 车载通信包括车对车 (vehicle to vehicle, V2V) 通信和车对基地台 (vehicle to infrastructure, V2I) 通信, 本文关注 V2I 系统, 比如蜂窝移动通信系统.

在车联网中, 车辆速度是一个重要参数, 比如超速安全预警, 因此速度估计在车联网中有实际的需求. 一般而言, 速度估计可以由测速雷达、环形线圈检测器 (inductive loop detector, ILD)^[6] 或者 Doppler 频移^[7] 来完成. 但是, 前两种方式不合同同时估计多部车辆的速度, 且需要额外的硬件开销. 而利用 V2I 通信中的信道衰落特性, 无须额外硬件, 我们就可以估计信道的 Doppler 频移. 进一步考虑到 Doppler 频移与移动台 (mobile terminal, MT) 速度之间的关系^[8], 车辆的速度估计可以等效于车载通信的信道 Doppler 频移估计. 另外, 不同车辆的通信信道之间具有独立性, 因此不同车辆的 Doppler

引用格式: 林敏, 华惊宇, 李溯南, 等. 移动通信中适用于高车速环境的精确 Doppler 频移与信噪比联合估计算法. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1705–1714, doi: 10.1360/N112016-00151

Lin M, Hua J Y, Li S N, et al. Accurate joint estimation of Doppler shift and SNR in mobile communications with high vehicle speed (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1705–1714, doi: 10.1360/N112016-00151

频移估计可以在基地台并行开展. 另一方面, 快衰落或快速移动是移动通信的一个核心问题^[9,10], 作为移动通信的一个分支, 车载通信也面临着高移动速度下的快衰落信道^[1,3,4], 因此本文着力研究高车速环境下的 Doppler 频移 (运动速度) 估计问题, 研究成果对于小区切换和信道估计等应用也具参考价值.

目前已有多种技术用于估计 Doppler 频移, 例如信道 ACF (autocorrelation function) 方法^[11]、信道相位差方法^[12] 和信道电平通过率方法^[9], 然而它们都受到加性高斯白噪声 (additive white Gaussian noise, AWGN) 的极大影响. 文献 [13] 提出一种抽取算法, 通过两次迭代在一定程度上减少了 AWGN 的影响. 在文献 [9,14,15] 中, 一般化的迭代算法进一步降低了 AWGN 的影响, 其中迭代停止准则是根据估计误差分析而得的. 需要指出的是基于 ACF 的方法^[14,15] 通常优于基于电平通过率 (level crossing rate, LCR) 的方法^[9]. 除此之外, 文献 [14] 利用了信道包络 ACF, 其表达式远比文献 [15] 的信道 ACF 表达式复杂. 前者同时包含超几何函数和 Bessel 函数, 而后者仅包含 Bessel 函数. 显然, Bessel 函数相对于超几何函数具有更小的非线性, 因此文献 [15] 的 Doppler 频移估计范围宽于文献 [14]. 但是本文后续研究表明, 当 AWGN 较小 (即 SNR 较高) 时, 文献 [15] 的 ACF 迭代方法在高速移动的环境下仍然会产生较大的估计误差, 因为其固有的多项式逼近误差在这种情况下超出了限制. 另一方面, 过去人们在研究接收机时通常假设已知 SNR, 而较少研究估计 SNR 的方法, 比如矩估计器^[16~18]、相关函数估计器^[19] 和谱分析方法^[20]. 上述 SNR 估计方法在高信噪比区域会产生较大的估计偏差.

传统而言, Doppler 频移和 SNR 估计器通常是两个独立的个体^[9,11~19], 为了简化实现过程, 联合估计器更有前景. 文献 [21] 提出一种 SNR 和 Doppler 频移的频域非参数联合估计算法, 大幅降低了实现代价, 但其 Doppler 频移估计性能不如参数化方法, 比如文献 [15] 的迭代 ACF 方法. 因此, 一个更好的选择是找到一种参数化方法来获得 SNR 和 Doppler 频移的联合估计, 此时参数化方法和非参数方法的优点将融于一身, 即联合估计的低代价和参数化方法的优异性能.

本文首先开展迭代 ACF 方法的偏差分析, 指出该方法在高车速环境中具有明显的估计误差, 且误差对于不同 SNR 具有趋同性. 进而提出基于线性拟合的方法以改善 Doppler 频移估计, 计算机仿真证实了该方法的有效性. 文献 [15] 已经发现不同迭代环节的估计误差和 SNR 有关, 且本文方法在最后一次迭代时的 Doppler 频移估计接近其真实值. 因此本文定义 Doppler 频移的估计误差比为第一次迭代和最后一次迭代时的 Doppler 频移估计比值, 其近似包含了无噪声和有噪声场景的影响. 通过一系列分析, 本文得到了这一比率的解析多项式, 其唯一的自变量即为 SNR. 最后通过多项式求根实现了 SNR 估计. Monte-carlo 仿真结果表明在较大的 SNR 和车速范围内, 本文算法的 SNR 和 Doppler 频移估计性能优异, 且对于实际的 SNR 并不敏感. 除此以外, 本文的车速估计同样可以达到 ILD (inductive loop detector) 方法^[5] 的性能, 即相对误差在 5% 以下.

2 基于 ACF 的 Doppler 频移估计器

2.1 信号模型

一般情况下, 导频辅助的信道估计可以表示如下^[22]:

$$\hat{c}(n) = c(n) + z(n), \quad (1)$$

式中 $c(n)$ 和 $\hat{c}(n)$ 分别表示实际信道及其估计值. 注意 $c(n)$ 通常建模为方差为 σ^2 的广义平稳非相干散射 (wide sense stationary and mutually uncorrelated scattering, WSSUS) 高斯过程, $z(n)$ 表示方差为

σ_z^2 的 AWGN.

2.2 原始 ACF 方法

不失一般性, 我们假设运动径向夹角为零, 此时信道遭受最严重的 Doppler 扩展影响, 其 ACF 可以表示为^[15]

$$R(k) = \sigma^2 J_0(2\pi f_d T_s) \approx \left[1 - (\pi f_d k T_s)^2\right], \quad k \neq 0, \quad (2)$$

式中 $R(0) = \sigma^2 + \sigma_z^2$, T_s 表示导频符号间隔, $J_0(\bullet)$ 表示第 1 类 0 阶 Bessel 函数. 在获得 K 个样本以及确定相关滞后间隔 M 后, Doppler 频移以及 ACF 估计可表示为^[15]

$$\hat{f}_d = \hat{f}_{d,M} = \frac{1}{M\pi T_s} \sqrt{1 - \frac{\hat{R}(M)}{\hat{R}(0)}}, \quad (3)$$

$$\hat{R}(M) = \frac{1}{K-M} \sum_{i=0}^{K-1-M} \hat{c}(i)\hat{c}^*(i+M). \quad (4)$$

2.3 迭代 ACF 方法

由于 AWGN 和 ACF 函数逼近误差的影响, 式 (4) 的估计是有偏的. 为了定量分析误差, 文献 [15] 中定义了噪声环境与无噪声环境中的 Doppler 频移估计比如下:

$$\eta(M) = \frac{\hat{f}_d(\text{noisy})}{\hat{f}_d(\text{noise-free})} = \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s+1} + \frac{1}{\gamma_s+1} \frac{1}{(\pi f_d M T_s)^2}}, \quad (5)$$

式中 $\gamma_s = \sigma^2/\sigma_z^2$ 表示符号信噪比. $\hat{f}_d(\text{noisy})$ 和 $\hat{f}_d(\text{noise-free})$ 分别表示有无 AWGN 影响的 Doppler 频移估计量. 在式 (5) 中, $\hat{f}_d(\text{noisy})$ 通过 $\sigma_z^2 \geq 0$ 时 $R(M)/R(0)$ 求得, $\hat{f}_d(\text{noise-free})$ 要求 $\sigma_z^2 = 0$.

假设 $\eta(M) = 1$, 文献 [15] 中已经推导了 SNR 不敏感条件如下:

$$1 = \eta(M) = \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s+1} + \frac{1}{\gamma_s+1} \frac{1}{(\pi f_d M T_s)^2}}, \quad (6)$$

$$M = \frac{1}{\pi f_d T_s}. \quad (7)$$

显然, 如果 $\eta(M) = 1$, 则不存在估计误差. 若满足式 (6) 和 (7), 含噪信道估计在中低车速时对于 Doppler 频移估计的影响较小. 然而, 在速度较高的情况下, 本文后续会说明式 (2) 中的近似误差将会造成明显的估计误差, 这也是文献 [15] 方法的不足.

根据上述的 SNR 非敏感条件可以得到如下的迭代过程^[15]:

- (1) 初始化: 设 $\{M(1) = 1, \text{迭代计数器 } I_c = 1, \hat{f}_d(0) = 0\}$, 选择频率差阈值 Δ_{th} ;
- (2) 估计当前迭代的 Doppler 频移, 然后由式 (3) 和 (4) 得到 $\hat{f}_d(I_c)$;
- (3) 计算 $M(I_c) = \left\lfloor \frac{1}{\pi \hat{f}_d(I_c) T_s} \right\rfloor$, 这里 $\lfloor \bullet \rfloor$ 表示下取整函数;
- (4) 若 $M(I_c) = M(I_c - 1)$ 或者 $|\hat{f}_d(I_c - 1) - \hat{f}_d(I_c)| < \Delta_{th}$, 迭代过程停止. 否则 $I_c = I_c + 1$, 并且返回第 2 步.

这里的 $M(i)$ 和 $\hat{f}_d(i)$ 分别表示计算出的相关滞后系数和第 i 次迭代的 Doppler 频移估计. 注意以上的迭代过程可被进一步改进, 使得在较高速度时提高估计性能, 随后我们将探究这个问题.

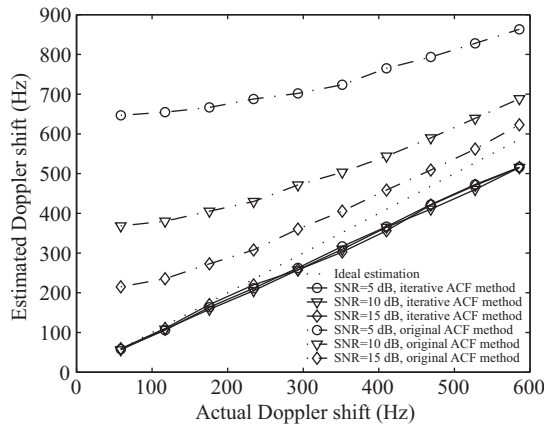


图 1 迭代 ACF 法与传统方法的性能比较

Figure 1 Performance of the iterative ACF method in comparison with the conventional ones

表 1 仿真参数

Table 1 The system parameters used in simulations

Slot length	1056 bits	Channel model	ITU-R M.1225 Veh.B
Bit rate	3.84 Mbit/s	Simulation length	1000 slots
Pilot length	32 bit	Path number	6
Carrier	2.11 GHz	Data block length	224 bits
Δ_{th}	10 Hz	Modulation	QPSK

3 改进 Doppler 频移估计器和 SNR 估计器

3.1 迭代 ACF 方法的误差分析

相比较原始的 ACF 方法, 文献 [15] 中提出的迭代 ACF 方法性能有了很大提升. 但是随着移动速度上升, 由于级数展开造成的逼近误差使该方法产生较大的估计误差. 图 1 的仿真结果说明文献 [15] 方法的估计误差值随着速度上升而增大, 仿真参数同表 1. 其中滞后间隔 M 是根据式 (7) 迭代计算的, 频率差门限为 10 Hz. 需要指出的是, 频率差门限的选择会影响到算法的估计精度, 仿真表明大门限时收敛较快并且类似图 1 中的过迭代问题较小, 此时估计的绝对误差基本等同于门限值, 然而一旦真实 Doppler 频移与门限值具有可比性, 则估计的相对误差较大, 这对于低车速时的估计是极为不利的. 反之, 一旦选择较小的门限值, 则低车速时的估计精度可以保证, 但是易产生高车速时的过迭代问题, 如图 1 所示. 因此门限的选择是一个折衷的过程, 文献 [15] 选择了 10 Hz, 本文亦如是, 主要原因在于低车速时的估计器改进比高车速时困难. 事实上, 我们后续会说明即使选择了较小的门限值, 在高车速时产生了明显的过迭代, 但最终的高车速估计误差也具备某种趋同性, 从而可以用一个统一的拟合公式予以解决.

图 1 比较频率差门限为 10 Hz 时 Doppler 频移的迭代 ACF 估计器和非迭代 ACF 估计器. 结果表明迭代方法的改进是有效的, 但是由于高车速时级数逼近误差的影响, 过迭代问题逐步趋于严重, 从而这种改进性能将随着速度的上升而下降. 同时, 对应不同信噪比值, 迭代过程最终将趋同, 这意味着我们可以用单一的拟合过程来改进所有 SNR 下的估计值. 除此以外, 尽管迭代过程产生的估计曲线在

某种程度上似乎是非线性的,但简单的线性拟合技术仍然可以用于本文.

3.2 改进的 Doppler 频移估计器

用 f_d^k 和 \hat{f}_d^k 表示在仿真中第 k 个 Doppler 频移及迭代估计结果. 这里 $k = 1, 2, \dots, Q$, Q 表示仿真所采用的 Doppler 频移数量. 在图 1 中 $Q = 10$, 对应于车速范围 30~300 km/h. 对于某个 SNR 下的估计曲线, 可以得到如下所示线性表达式:

$$\frac{\hat{f}_d^Q - \hat{f}_d^1}{f_d^Q - f_d^1} = \frac{\hat{f}_d^k - \hat{f}_d^1}{f_d^k - f_d^1}, \quad (8)$$

式中 \hat{f}_d^k 由前述迭代 ACF 方法提供. 在式 (8) 中, $\hat{f}_d^Q, \hat{f}_d^1, f_d^Q$ 和 f_d^1 是根据仿真结果预先确定的, 因此是已知的. 我们必须指出式 (8) 实际上和 SNR 无关, 因为在不同 SNR 条件下迭代过程最终产生相似的估计值, 进而导致拟合系数对于 SNR 不敏感. 根据式 (8), 我们重新给出 Doppler 频移估计如下:

$$\bar{f}_d = \frac{f_d^Q - f_d^1}{\hat{f}_d^Q - \hat{f}_d^1} \times (\hat{f}_d^k - \hat{f}_d^1) + f_d^1. \quad (9)$$

如前所述, 对于所有的 SNR 值, 只需要一个拟合公式, 因为对应不同的 SNR 值产生如图 1 所示的几乎相同的估计曲线. 本文的研究中, 拟合方程根据 SNR = 5 dB 时的估计曲线建立. 此外, 在实际应用中, f_d^1 和 f_d^Q 常被选为 Doppler 频移的最小可能值和最大可能值, 其估计值可以由第 3 节描述的方法获得. 最后, 方程 (9) 将用于改进 $f_d^1 \sim f_d^Q$ 之间任意 Doppler 频移的估计. 注意文献 [15] 中已经证明了迭代 ACF 方法的稳定性和收敛性, 而本文提出的线性拟合技术不会改变这些特性.

3.3 SNR 估计器

如文献 [15] 所述, 迭代 ACF 方法在 N 次迭代后收敛, 同时第 3.1 小节的改进方法使得在较高车速下, 最终的估计值也有 $\bar{f}_d \approx f_d$. 具体而言,

$$\eta(1) = \frac{\hat{f}_d(\text{noisy})}{\hat{f}_d(\text{noise-free})} \approx \frac{\hat{f}_d}{f_d} = \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_s + 1} + \frac{1}{\gamma_s + 1} \frac{1}{(\pi \bar{f}_d T_s)^2}}. \quad (10)$$

通过求解方程 (10), 可得 SNR 估计表达式如下:

$$\hat{\gamma}_s = \frac{\frac{1}{\pi^2} \frac{1}{\bar{f}_d^2 T_s^2} - 1}{\eta(1)^2 - 1} - 1. \quad (11)$$

在式 (10) 与 (11) 中, 我们利用了 $\bar{f}_d \approx f_d$ 的性质.

4 仿真结果和分析

表 1 列出了仿真参数, 其中 1 次仿真需要 1000 时隙的信道估计, 每个时隙由比特率为 3.84 Mbps 的 1056 位组成, 1 个时隙包括 5 个导频符号和 4 个数据块. 另外, 仿真采用 ITU-R M.1225 Veh.B 信道模型 [23, 24], 该模型有 6 个独立路径, 载波频率为 2.11 GHz. 考虑到 M.1225 Veh.B 已经被广泛用于车载通信信道建模, 我们的仿真属于车载网络情形, 研究结果对于 V2I ITS 系统是有参考价值的.

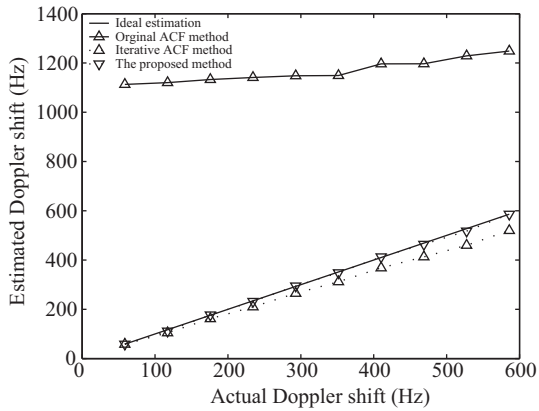


图 2 SNR 为 0 dB 时 Doppler 频移估计性能比较

Figure 2 The comparison of Doppler shift estimation at SNR 0 dB

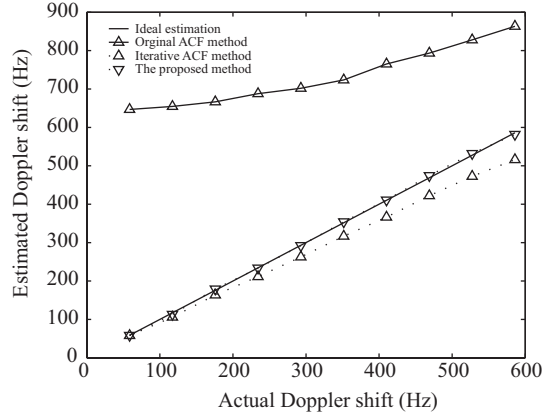


图 3 SNR 为 5 dB 时 Doppler 频移估计性能比较

Figure 3 The comparison of Doppler shift estimation at SNR 5 dB

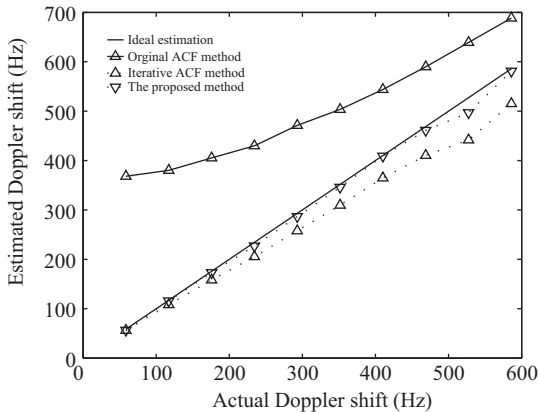


图 4 SNR 为 10 dB 时 Doppler 频移估计性能比较

Figure 4 The comparison of Doppler shift estimation at SNR 10 dB

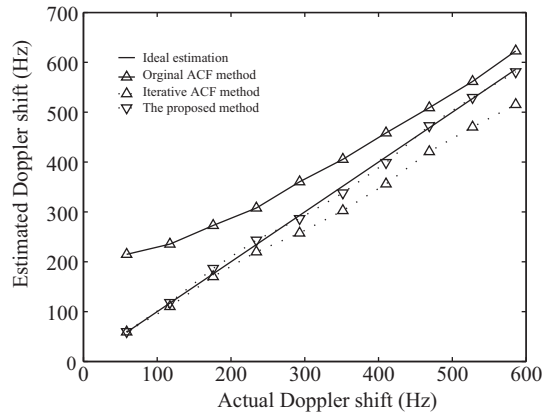


图 5 SNR 为 15 dB 时 Doppler 频移估计性能比较

Figure 5 The comparison of Doppler shift estimation at SNR 15 dB

本文比较的方法包括改进的迭代 ACF 方法、相位差方法^[12]、原始 ACF 方法 ($M = 1$)、电平通过率 (LCR) 方法^[25] 和迭代 ACF 法^[15]。同时为了清楚地显示不同 ACF 方法的性能差异, 我们在图 2~6 中只给出 ACF 方法的曲线, 而在图 7 中比较所有方法。

从图 2~5 中, 我们发现文献 [11] 中的原始 ACF 方法在低速移动或低 SNR 值时产生明显的偏差, 而文献 [15] 中的迭代 ACF 方法, 在高速移动时, 无论 SNR 为何值, 都会产生显著的偏差。因此, 改进的迭代 ACF 算法在低 SNR 值和高速移动环境中具有更好的性能。

图 6 测试了改进的 Doppler 频移估计方法。结果表明改进算法具有高准确度, 即使在 SNR 为 0 dB 时估计误差仍然很小。进一步地, 文献 [6] 指出 ITS 系统要求车速估计相对误差小于 5%, 同时其本身估计精度为 {3.3% @ 90 km/h, 12.5% @ 60 km/h}。显然即使 SNR 为 0 dB, 本文的 Doppler 频移估计性能满足要求且优于文献 [6], 此时相对误差为 {0.61% @ 90 km/h, 4.92% @ 60 km/h}。另外, 我们能够从图 6 和 1 中发现线性拟合过程使得理想曲线和估计曲线之间仅存在轻微的偏差, 这也意味着拟

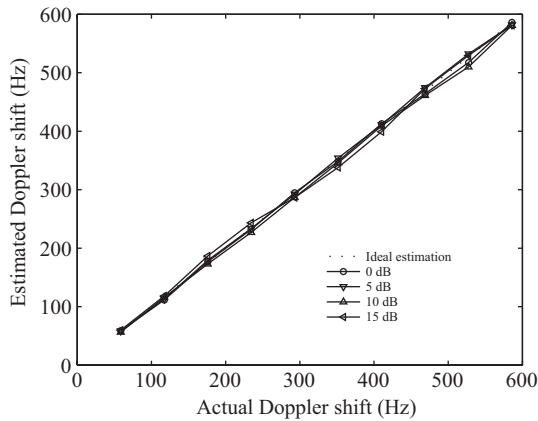


图 6 改进的 Doppler 频移估计器的线性拟合性能

Figure 6 The refined Doppler shift estimation with a linear curve fitting

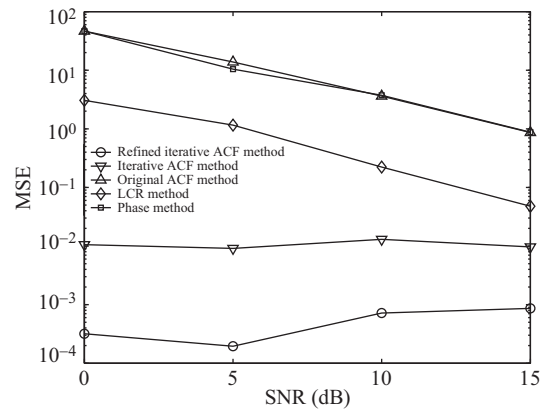


图 7 5 种 Doppler 频移估计器的 MSE 比较, 分别为本文改进的方法, 迭代 (自适应) ACF 方法 [12], 原始 ACF 方法 ($M = 1$) [11], LCR 方法 [25] 和相位差分法 [13]

Figure 7 The comparison of MSE of the five Doppler shift estimators, namely, our proposed method, the iterative (adaptive) ACF method [12], the original ACF method ($M = 1$) [11], the LCR method [25] and the phase difference method [13].

合过程对式 (3) 中的逼近误差并不敏感. 因此, 改进方法在较宽的车速范围内显著提升了迭代 ACF 方法的性能, 以下 MSE (mean square error) 的比较将进一步证实这一点.

图 7 给出了改进方法和其他典型估计器的 MSE 比较, 其中 MSE 均在速度方向上做了平均. 因为 3 种经典方法, 即 LCR 方法、相位差方法和原始 ACF 方法均没有解决 AWGN 的影响, 它们都有精度上的大幅下降. 相比之下, 迭代 ACF 方法不管 SNR 为何值都能维持较低 MSE, 且在信噪比为 0 dB 到 15 dB 时相对上述 3 种方法有至少一个数量级的性能增益. 进一步我们发现改进方法提升了 MSE 性能且优于迭代 ACF 方法. 因此, 在被评估的方法中, 本文的改进方法能够最大限度地满足实际应用的需求. 此外, 尽管我们只给出 5 种方法之间的比较. 事实上, 仿真结果表明改进迭代 ACF 方法也优于许多其他的估计器, 例如对数包络法 [24] 和迭代 LCR 法 [9], 在 SNR 为 5 dB 的时候, 它们的 MSE 分别大约为 0.2 和 $7.5e-4$.

图 8 是本文 SNR 估计器的性能评估, 其中我们用双坐标系描述 MSE 和准确度. 如图 8 所示, 在较宽的 SNR 和车速范围内, 我们都能观察到准确的 SNR 估计值. 特别地, MSE 曲线是一个最小值在 SNR 为 5 dB 处的 U 型曲线. 这个特殊的形状可以由以下两个理由来解释. 首先, 线性拟合方程 (9) 是在 SNR = 5 dB 时推导而得, 而后应用于所有 SNR 值. 其次, 当 SNR 较大时, AWGN 的影响变得微乎其微, 但是 $R(k)$ 的逼近误差仍然是显著的.

5 总结

本文研究迭代 ACF 方法在迭代过程中的估计误差变化, 据此提出线性拟合改进 Doppler 频移估计性能, 并基于 Doppler 频移估计误差比提出 SNR 估计器, 从而实现 Doppler 频移和 SNR 的联合估计. 仿真结果表明, 本文提出的联合估计器在较宽的车速和 SNR 范围内, 即 0~15 dB 的 SNR 范围和

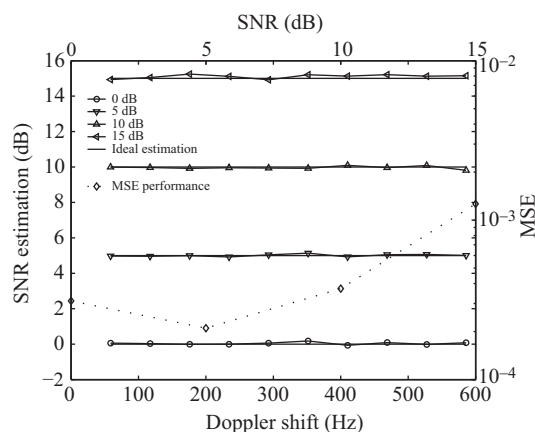


图 8 双坐标系中所提出 SNR 估计器的准确性和归一化 MSE 性能

Figure 8 The accuracy and the normalized MSE performance for the proposed SNR estimator in double coordinates

30~300 km/h 的车速范围内, 都具有良好的性能, 可以有效用于车载通信领域的信道参数估计应用。

参考文献

- Masud A A, Mondal M I, Ahmed K M. Vehicular communication system for vehicle safety using RFID. In: Proceedings of IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications, Kuala Lumpur, 2009. 697-702
- Ai B, Cheng X, Kürner T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway. IEEE Trans Intell Transp Syst, 2014, 15: 2143-2158
- Tan I, Tang W, Laberteaux K, et al. Measurement and analysis of wireless channel impairments in DSRC vehicular communications. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Beijing, 2008. 4882-4888
- Ai B, Guan K, Rupp M, et al. Future railway services-orient mobile communications network. IEEE Commun Mag, 2015, 53: 78-85
- Ai B, Cheng X, Yang L Q, et al. Social network services for rail traffic applications. IEEE Intell Syst, 2014, 20: 63-69
- Ki Y K. Speed-measurement model utilizing embedded triple-loop sensors. IET Intell Transp Syst, 2011, 5: 31-37
- Jakus K, Coe D S. Speed measurement through analysis of the Doppler effect in vehicular noise. IEEE Trans Veh Tech, 1975, 24: 33-38
- Hua J Y, You X H. A Scheme for the Doppler shift estimation despite the power control in mobile communication systems. J Commun, 2004, 25: 1-9 [华惊宇, 尤肖虎. 移动通信中一种不受功率控制影响的多谱勒频偏估计方法. 通信学报, 2004, 25: 1-9]
- Hua J Y, Yuan D H, Li G, et al. Accurate estimation of Doppler shift in mobile communications with high vehicle speed. Int J Commun Syst, 2014, 27: 3515-3525
- 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]
- Xiao C S, Mann K D, Olivier J C. Mobile speed estimation for TDMA based hierarchical cellular systems. IEEE Trans Vech Tech, 2001, 50: 981-991
- Hua J Y, Sheng B, You X H. The phase probability distribution of general clarke model and its application in Doppler shift estimation. IEEE Antenn Wirel Propag Lett, 2005, 4: 373-377
- Hua J Y, You X H, Sheng B, et al. A scheme for the Doppler shift estimation despite the power control in mobile communication systems. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Los Angeles, 2004. 284-288
- Hua J Y, Hua H, Li J, et al. An envelope ACF based iterative Doppler shift estimator in mobile communication systems. In: Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Communications, Bucharest, 2006. 1-4

- 15 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
- 16 Beaulieu N C, Toms A S, Pauluzzi D R. Comparison of four SNR estimators for QPSK modulations. *IEEE Commun Lett*, 2000, 4: 43–45
- 17 Chen Y F, Beaulieu N C. Estimation of Ricean K parameter and local average SNR from noisy correlated channel samples. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2007, 6: 640–648
- 18 Xu Z J, Wang K, Hua J Y, et al. Blind SNR estimation with empirical characteristic function derivative in high-order modulation system. In: *Proceedings of IEEE Conference on Communications, Circuits and Systems, Xiamen, 2008*. 242–245
- 19 Karastergios E, Sumanasena M A K, Evans B G. Simple SNR estimator for mobile fading channels. *IEEE Electron Lett*, 2003, 39: 244–245
- 20 Hua J Y, Meng L M, Xu Z J, et al. An adaptive signal-to-noise ratio estimator in mobile communication channels. *Digit Sign Proc*, 2010, 30: 692–698
- 21 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
- 22 Gao X Q, Jiang B, You X H, et al. Efficient channel estimation for MIMO single-carrier block transmission with dual cyclic timeslot structure. *IEEE Trans Commun*, 2007, 55: 2210–2223
- 23 Marques A G. Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000. Recommendation ITU-R, M.1225. 1997
- 24 Hua J Y, You X H. Doppler shift estimation methods in mobile communication systems. *J Southeast Univ*, 2004, 20: 405–412
- 25 Ma Z Y, Yan Y Q, Zhao C M, et al. An improved channel estimation algorithm based on estimating level crossing rate for CDMA receiver, *Chin J Electron*, 2003, 12: 235–238

Accurate joint estimation of Doppler shift and SNR in mobile communications with high vehicle speed

Min LIN, Jingyu HUA*, Suonan LI, Zhijiang XU & Limin MENG

College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

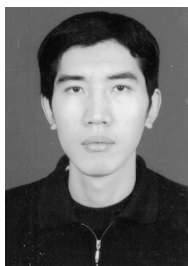
* Corresponding author. E-mail: eehjy@zjut.edu.cn

Abstract The signal-to-noise ratio (SNR) and Doppler shift significantly affect vehicular communication. Therefore, we investigate the biases of an iterative Doppler shift estimator by addressing the approximation of the autocorrelation function (ACF), and then explicitly view the estimation errors occurring at high vehicle speeds. Accordingly, a refined process by exploiting the interpolation operation is proposed to reduce the estimation bias at high moving speeds. Subsequently, an SNR estimator is presented by utilizing the bias variation in different iterations, where the estimates of the Doppler shift in the first and final rounds of iterations are combined to construct a bias ratio, and this ratio is then employed to derive an SNR estimator. Computer simulations have shown that our proposed algorithm achieves accurate estimates for both the SNR and Doppler shift in wide ranges of working SNRs and mobile speeds, i.e., at a simulated velocity approaching 300 km/h.

Keywords SNR, Doppler shift, speed estimation, mobile communications, vehicular communications



Min LIN was born in 1989. He received his B.S. degree in electronic engineering from Zhejiang University of Technology in 2015. He is currently pursuing his MS degree in electronic engineering at Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China. His research interests lie in the area of channel estimation in mobile communication.



Jingyu HUA was born in 1978. He received his B.S. and MS degrees in electronic engineering from South China University of Technology in 1999 and 2002, respectively, and his Ph.D. degree in radio engineering from Southeast University in 2006. He is currently a full professor and Ph.D. advisor at Zhejiang University of Technology. His research interests lie in the area of parameter estimation, channel modeling, wireless localization, and digital filtering in mobile communications.