

车载自组网的物理层研究

董敏娥^{1,2} 刘龙伟² 张海林²

(陕西交通职业技术学院信息工程系¹ 西安 710018;

西安电子科技大学通信工程学院² 西安 710071)

摘要 车载自组网能有效提高道路交通安全。物理层作为车载移动自组网的底层,是整个网络的基础,需要满足高速移动时提供实时可靠、有效的接入。基于 802.11p 国际标准,对采用 OFDM 技术的车载自组网物理层传输帧格式、通信链路中的时频同步技术、多普勒估计与校正技术、通信信道的估计、均衡技术进行研究设计。仿真结果表明,该物理层能够满足车载自组网对可靠性和有效性的要求。

关键词 车载自组网 物理层 802.11p OFDM

中图分类号 TP393.03; **文献标志码** A

交通事故频繁、城市道路拥堵等道路交通安全形势日趋严峻;远程办公、车载娱乐、实时导航等增值服务应用需求,作为智能交通系统重要基础之一的车载移动自组网应运而生。车载自组网(vehicle Ad Hoc network, VANET)是运行于道路上的新型移动无线自组织网络,可以实现车辆间、车辆与路边节点的多跳无线通信^[1]。

在车载移动自组网中,物理层主要完成无线信号编码、译码、发送和接收等工作。车载移动自组网的独特性质决定了其对物理层的特殊要求^[2]:适用于高速移动,并能在高速移动时提供实时、可靠的接入;分布式网络结构,支持多跳链接;与 MAC 层协议相匹配;最好使用免费频段等,因此车载移动自组网的物理层设计至关重要。

1 车载无线自组网物理层研究现状

目前,国外所应用的车载自组网系统所采用的物理层技术主要是基于 802.11(Wi-Fi)标准和 UTRA-TDD(TD-CDMA)技术。例如 CarTalk 与

FleetNet 项目都采用了 UTRA-TDD 技术,C2C 联盟则主张使用改进后的 802.11b 技术。与 UTRA-TDD 相比 802.11b 的性能较差,但是由于 802.11b 无线模块目前应用普及、价格便宜、实现简单,而且工作在 2.4 GHz 的免费频段等特点,广泛被科研实验所采用;而 UTRA-TDD 技术实现复杂,造价较高,还有一些非技术因素阻碍其应用。2011 年 10 月,美国电机电子工程师协会(IEEE)在 802.11(Wi-Fi)的基础上进行了改进,制定了适用于车间通信环境的 802.11p 标准^[3],该标准以 IEEE 1609 系列协议作为上层协议,从而形成车辆无线通信的基本协议构架。802.11p 标准授权工作在 5.9 GHz 免费频段上,由 7 个 10 MHz 的信道组成,采用 OFDM(正交频分多路复用)技术。本文基于 802.11p 国际标准,采用 OFDM 技术对车载移动自组网物理层技术进行研究。

2 车载无线自组网物理层

车载移动自组网物理层 OFDM 技术信号处理流程^[4]如图 1 所示。

本文主要对车载移动自组网物理层的传输帧格式、通信链路中的时频同步技术、多普勒估计与校正技术、通信信道的估计、均衡技术进行了研究设计。

2013 年 4 月 17 日收到

2013 年陕西省教育厅自然科学类
专项科研计划项目(2013JK0966)资助

第一作者简介:董敏娥(1981—),女,陕西省咸阳市人,硕士研究生,讲师。研究方向:交通信息及控制工程、隧道机电、车载移动自组网等。E-mail: sundme@163.com。

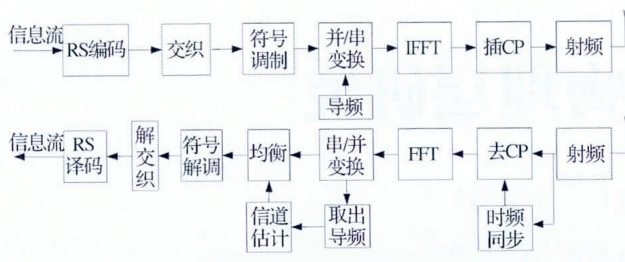


图1 OFDM 技术信号处理流程

2.1 系统的传输帧格式

系统的传输帧结构以无线帧为基本单位,每个无线帧包含10个子帧,每个子帧包含10个时隙,而时隙有前导序列时隙和业务时隙两种模式。前导序列时隙主要用于帧同步、信道估计和频偏纠正;业务时隙主要用于数据传输。前导序列由特殊序列构成,前导序列1用于载波捕获跟踪与帧同步,前导序列2用于信道估计与均衡,业务时隙由QPSK调制符号构成。参考802.11p标准,FFT点数确定为64点,有利于在保证传输速率的基础上,减小乘法器数目,降低资源消耗,同时分级较少,处理速度可以提高以实现乘法器复用,且兼容802.11p物理层参数设计。帧格式示意图如图2所示。

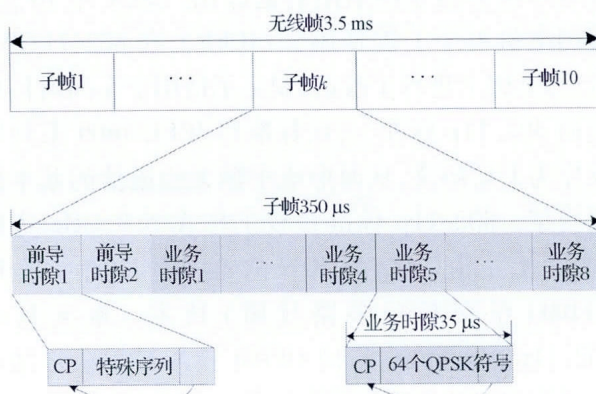


图2 物理层帧结构示意图

2.2 通信链路中的时频同步、多普勒估计与校正

正交频分复用(OFDM)系统对时间同步误差非常敏感,需要有比较精确的时间同步才能保证系统性能;此外,考虑到车载移动自组网收发两端具有高速相对运动,大的动态多普勒偏移也会严重影响OFDM系统的性能。故在基于OFDM传输的时频同步过程中,需要解决时间同步和频率同步两个主要

问题。然而,这两个处理过程是互相影响、互为条件的:频偏估计需要知道训练序列的大致起始位置,即要先进行时间同步,而在时间同步过程中,如果利用接收信号与本地训练序列做相关运算,那么频偏的存在会导致相关峰值出现偏移,使得同步位置不准确。因此,需要对时间同步和频偏估计进行联合设计,本文给出了如下的时频同步策略,基于前导训练序列时域/频域信道估计的OFDM传输方案。

2.2.1 时间粗同步

设计可以在存在任意频偏的条件下得到大致的帧起始位置。图3为时间粗同步示意图。

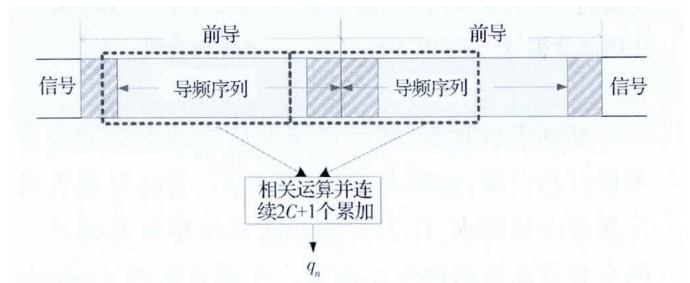


图3 时间粗同步示意图

利用两个训练序列的相关性,对接收信号做延迟相关,获得粗同步位置。具体方法如下:以第 n 个样值为起始点,计算 $p_n = r_{n-N}^H r_n$,其中 r_n 表示第 n 至第 $n-1+N$ 个样点值构成的矢量, N 为一个符号样点数(FFT变换点数)。计算连续 $2C+1$ 个相关值的和 $q_n = \sum_{j=n-2C}^n |p_j|$, C 为CP的长度。找出最大相关值的位置作为粗同步点^[5]。

2.2.2 频率细同步(小数倍频率估计与校正)

根据时间粗同步位置,得到归一化小数倍频偏,频偏 ε 可分成两部分:整数倍频偏 ε_1 和小数倍频偏 ε_2 。当获

得了时间粗同步位置 \tilde{d} ,小数倍频偏 ε_2 可表示为

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2\pi} \angle \phi_{\tilde{d}} \quad (1)$$

式(1)中, $\angle \Delta$ 表示取相位操作。估计出来的小数倍频偏 ε_2 可以通过将接收信号 $r(n)$ 在时域乘以 $e^{-\frac{j2\pi\varepsilon_2 n}{N}}$ 来去除,得到频偏校正后的信号 $\tilde{r}(n)$,即

$$\tilde{r}(n) = r(n) e^{-\frac{j^2 \pi \varepsilon_1 n}{N}} \quad (2)$$

2.2.3 频率粗同步(整数倍频偏估计与校正)

利用经过时间同步和频率细同步之后的接收信号和本地导频序列进行整数倍频偏估计。首先对接收信号与导频序列分别进行 FFT 得到二者的频域序列, 将两个频域序列进行内积后再进行 IFFT, 此时得到的时域序列模值为时移后的信道序列的模值, 现已证明时偏等于整数倍频偏与导频序列生成因子的乘积。将此模值在最大频偏范围内进行搜索, 即可得到整数倍频偏的估计值 ε_1 , 完成了频率粗同步。图 4 为频率粗同步示意图。

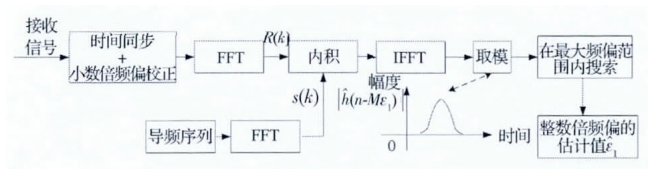


图 4 频率粗同步示意图

2.2.4 时间细同步

校正了全部频偏之后, 再与本地训练序列进行相关运算, 可以排除频偏对相关峰值的影响。图 5 为时间细同步示意图。

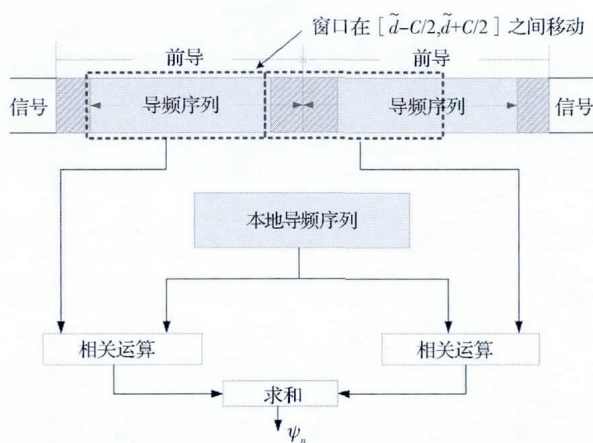


图 5 时间细同步示意图

去除频偏后的信号与本地导频序列 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_{N-1}, s_0, s_1, \dots, s_{N-1}\}$ 做与相关进行时间细同步, 时间细同步尺度定义如下

$$\psi_n = \sum_{k=0}^{2N-1} s_k^* \tilde{r}_{n+k} / \sqrt{\sum_{k=0}^{2N-1} |s_k|^2 \sum_{k=0}^{2N-1} |\tilde{r}_{n+k}|^2} \quad (3)$$

因为已经获得了粗同步位置 \tilde{d} , 在寻找细同步

位置的时候, 在 $[\tilde{d} - C/2, \tilde{d} + C/2]$ 的窗口范围内做相关, 所以时间细同步位置为

$$d = \arg \max_{\tilde{d} - C/2 \leq n \leq \tilde{d} + C/2} \{\psi_n\} \quad (4)$$

2.3 信道估计、均衡技术

OFDM 系统中频域均衡器的系数是根据估计到的信道状态信息而设计的, 因此信道估计在 OFDM 系统中起着至关重要的作用。精确的信道估计算法不仅需要设计好的训练序列, 而且需要设计与之相匹配的信号处理算法。本节中根据四种传输方案对应的训练数据帧结构, 设计了相应的训练序列设计和信道估计算法。需要说明的是, 信道估计是在接收机完成了时频同步后进行的。

在基于前导训练序列的时域信道估计算法中, 需要通过时域相关运算实现信道估计, 当训练序列长度增加时, 需要设计很长的相关器, 硬件实现的复杂度较高。针对这一问题, 我们提出了基于前导训练序列的频域信道估计算法, 信道估计在频域完成, 避免了硬件系统中的时域相关器。基于前导训练序列频域信道估计流程如图 6 所示。

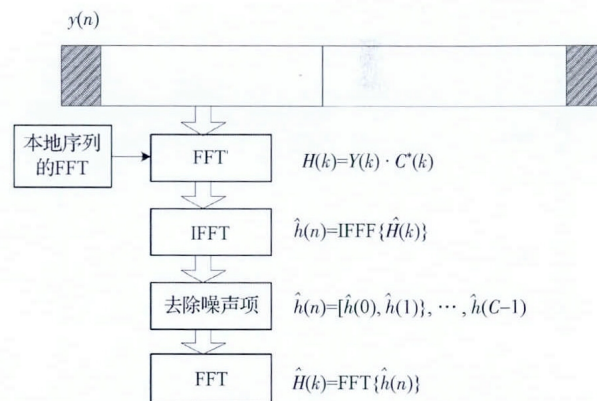


图 6 基于前导训练序列的频域信道估计流程示意图

如图 6 所示, 利用第一个训练符号进行频域信道估计的过程, 首先利用接收信号的 FFT 与本地导频序列的 FFT 得到 N 点初始频域信道估计值, 为了进一步降低噪声的影响, 对初始信道估计进行 IFFT 变换到时域, 将 $N-P$ 点纯噪声项置零后, 再经过 N 点 FFT 得到频域信道估计值。同理, 利用第二个训练序列得到第二组频域信道估计值, 再对这两组信道估计值进行平均, 即可得信道频域冲激响应估

计值。

3 仿真测试

为了验证物理层算法的正确性和有效性,下面利用 MATLAB 进行仿真^[6],评估时频同步估计及信道估计算法的均方误差 (MSE) 性能及车载自组网通信系统的误码性能。仿真基于以下通信系统假设:系统带宽为 8 MHz,载波频率为 2.4 GHz,物理层导频序列采用 Zadoff-Chu 序列^[7],采用 QPSK 星座映射,IFFT 长度 $N = 1024$,循环前缀长度为 $N_{cp} = 64$,假设收发两端时钟晶体的频率稳定度都为 1PPM,则对应的最大频率偏移为 $2.4 \text{ GHz} \times 1\text{PPM} \times 2 = 4.8 \text{ kHz}$,归一化频偏 $|\Delta f_m| = 0.4096$,仿真过程中频率偏移 Δf_m 在 $[-0.5, 0.5]$ 内均匀分布。假设其中一辆车发射的信号传输到另外一辆的最大多径时延差为 $2 \mu\text{s}$,对应时间偏移 $0 \leq \Delta t_k \leq 25$,仿真时在 $[0, 25]$ 范围内均匀选取。另外,假设信道为瑞利衰落信道,功率时延谱的包络服从指数分布,信道时延长度 $P = 12$ 阶。最大多径时延与信道时延的总长度为 36 小于 CP 长度 $N_{cp} = 64$ 。

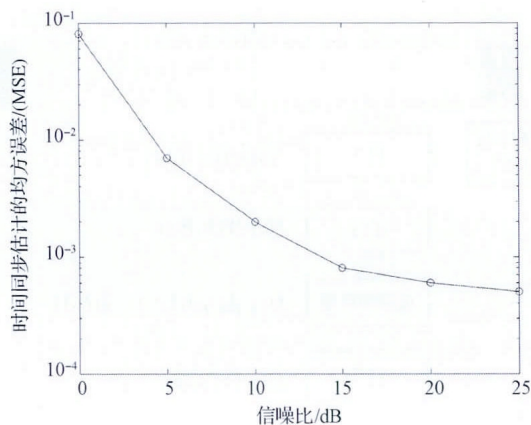


图7 时间同步均方误差

按以上设定的参数对系统进行了仿真,仿真结果见图7~图9。其中,图7给出了采用延迟相关方法进行时间同步时的均方误差与信噪比的关系曲线,从图中可以看出,在信噪比较低的情况下,时间同步的均方误差已经较小,继续提高信噪比均方误差减小逐渐缓慢,最终趋于稳定,这是由于算法本身及计算精度决定了时间同步系统具有一定的固

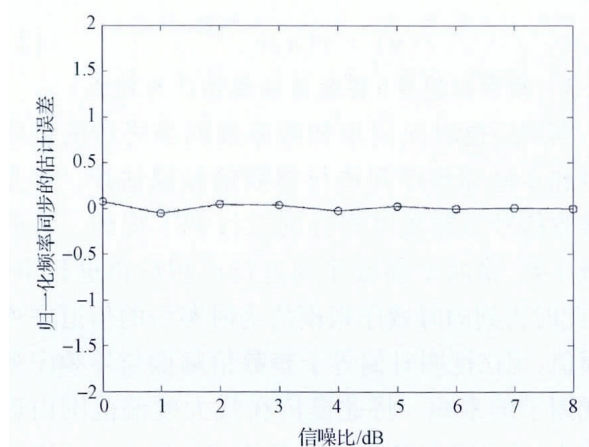


图8 归一化频率同步的估计误差

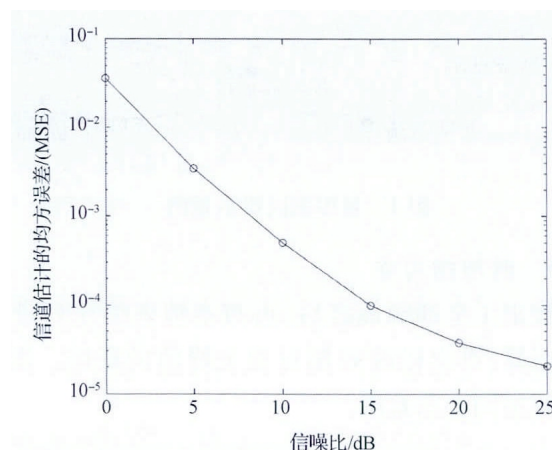


图9 信道估计均方误差

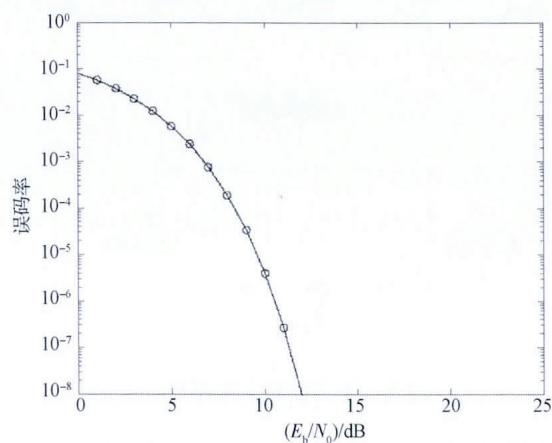


图10 系统误码率与信噪比关系示意图

有误差。图8给出了采用相关技术进行频率同步时频率同步的归一化频率误差与信噪比的关系曲线,从曲线可以看出,频率同步的估计误差随信噪比增加迅速减小,信噪比大于 5 dB 时估计误差已经趋近

于零。该曲线说明系统采用的频率同步方法有效其收敛很快。图 9 给出了系统信道估计的均方误差与信噪比的关系曲线,从图中看出,信道估计的均方误差随信噪比增加迅速降低,由于算法及计算精度原因,误差逐渐趋于稳定。该曲线说明车载自组网的信道估计算法也能够满足系统要求。图 10 给出系统的误码率与信噪比的关系曲线,从曲线可以看出 E_b/N_0 在 9 dB 左右时,系统误码率就可以达到 10^{-5} 以下,说明系统性能较优异,在车载自组网环境中可以应用。

4 结语

本文针对车载自组网的应用环境,进行了车载自组网物理层的设计,该设计兼容 802.11p 物理层参数,在保证传输速率的基础上,尽量减小硬件系统的资源消耗,节省了系统成本。该物理层设计的关键是系统的时频同步算法及信道估计算法,本设计采用在信道相干时间内插入时域导频来完成时频同步及信道估计,仿真结果表明,系统采用的时

频同步算法及信道估计算法有效且能保证系统性能。对系统整体仿真表明,系统性能优异,适用于车载自组织网络的应用环境。

参 考 文 献

- 1 朱存智. 车载自组织网络(VANET)综述. 湖北广播电视大学学报 2011; 31(11): 157—158
- 2 常促宇, 向 勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展. 北京: 通信学报 2007; 28(11): 116—126
- 3 Daniel J, Luca D. IEEE 802.11p: towards an international standard for wireless access in vehicular environments 2008
- 4 叶庆云, 夏 斐. OFDM 物理层系统性能仿真分析. 武汉: 武汉理工大学学报 2006; 28(6): 93—95
- 5 刘 云, 徐子龙. 一种改进的 OFDM 系统定时粗同步算法. 仲恺农业工程学院学报 2012; 25(4): 1—3
- 6 吕爱琴, 田玉敏, 朱明华. 基于 MATLAB 的 OFDM 系统仿真及性能分析. 计算机仿真 2005; 22(10): 164—168
- 7 Lotter M P, Linde L P. A class of bandlimited complex spreading sequences with analytic properties. IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, 1996; 2: 662—666

Physical Layer Research of Vehicular Ad Hoc Network

DONG Min-e^{1,2}, LIU Long-wei², ZHANG Hai-lin³

(Department of Information Engineering, Shaanxi College of Communication Technology¹, Xi'an 710021, P. R. China;

School of Telecommunications Engineering, Xidian University², Xi'an 710071, P. R. China)

[Abstract] Vehicular Ad Hoc Network can effectively provide road traffic safety. The physical layer is the basis of the whole network as the bottom of the Vehicular Ad Hoc Network, it provide a reliable and effective real-time access when it needs to meet the high-speed mobile. The physical layer of using OFDM technology based on the 802.11p international standards, including transmission frame formats is studied design, Time and frequency synchronization technology of communication link, Doppler estimation and correction techniques, estimation and equalization techniques of communication channel. The simulation results show that the physical layer to meet the requirements of vehicular Ad Hoc networks on the reliability and validity.

[Key words] vehicular Ad Hoc network physical layer 802.11p OFDM