



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

基于 RoF 的车路通信系统多业务数据传输
物理层关键技术研究

（国家高技术研究发展计划项目 编号：2004AA505560）
（国家重点基础研究发展计划项目 编号：2009BAG11B02）
（上海市科委重大科技项目 编号：10511500303）

姓 名： 卮炜

学 号： 1010120034

所在院系： 交通运输工程学院

学科门类： 工学

学科专业： 交通信息工程及控制

指导教师： 董德存 教授

二〇一三年九月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Key Technique Research of Multi-Service Data Transmission in Physics Layer for RoF Based Road-to-Vehicle Communication System

(Supported by National Basic Research Program, No. 2004AA505560, National Key Technology R&D Program, No. 2009BAG11B02, and Science and Technology Commission of Shanghai Foundation No. 10511500303.)

Candidate: NAI Wei

Student Number: 1010120034

School/Department: School of Transportation Engineering

Discipline: Engineering

Major: Transportation Information Engineering and Control

Supervisor: Prof. Dong Decun

September, 2013

基于
RoF的车路通信系统多业务数据传输物理层关键技术研究

卮炜

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘 要

信息与通信技术如今已被更多地作为工具应用于行业实体如交通系统中，并为交通信息化与智能化起到了革命性的推动作用。随着国家“十二五”规划的深入实施，光纤到路边（FTTC）将在未来几年成为现实，并为车路通信（RVC）乃至智能交通系统（ITS）的发展带来新的契机。光纤接入路侧单元（RSU）将为 RVC 带来巨大的带宽资源。充分利用这一优势，发展车载多业务接入，实现车载“三网融合”，无疑已成为未来 FTTC 背景下 RVC 系统新的发展趋势。

光载无线通信（RoF）因融合了光纤通信速率高、带宽大与无线通信接入灵活的优势，以及其所支持通信制式与协议的开放性，被视为实现未来 RVC 多业务数据传输最具潜力的技术。遗憾的是，目前对基于 RoF 的 RVC 多业务数据传输的研究，通信专业学者大多集中于对光纤接入与无线通信协议等技术本身的研究，缺乏对交通运行环境下对通信技术具体需求的解读；而交通专业学者则更关注其实现为交通行为所带来的变化，忽略了技术实现的可行性。

针对上述问题，本论从对 FTTC 背景下交通行业运行场景及其对多业务信息传输的特殊需求解读出发，以光通信、无线通信等相关理论为指导，分别对应用于道路与轨道交通场景下基于 RoF 的新型 RVC 多业务数据传输物理层关键技术及系统设计进行了深入研究。本文主要工作及创新（黑体部分）如下：

（1）在充分论述 RoF 技术应用于车路通信多业务数据传输系统基本机理的基础上，将车路通信多业务数据传输归为五种基本类型，并将基于 RoF 的车路通信系统按传输信号类型分为 FTTC 部分与无线接入部分，并针对两部分分别设计了上、下行各传输一种宽带业务的原型系统基本架构。针对其 FTTC 部分，设计了基于各 RSU 独享独立波长通道的 WDM-RoF 全双工链路实现方案，在该方案基础上提出省去 RSU 本地光源而采用再调制技术加载上行信号，以及在 CS 使用超连续谱光源等集约系统建设成本的方法，并通过仿真分析证明了相应设计的可行性；而针对其无线接入部分，为使车辆终端用户在 5.9GHz 专用频段的有限带宽内获得更高的传输速率，提出融合 IEEE 802.11p 协议对 DSRC 基本定义及 TD-LTE 通信制式中 OFDM 多载波调制方式的物理层专用优化协议，并基于该协议设计了可克服无线传输速率瓶颈的物理层实现方案。

（2）在充分解读道路交通通信场景下多业务数据内涵及其传输对系统资源

需求的基础上,针对实现三重业务的过渡系统 FTTC 部分,提出基于正交调制-再调制及基于载波复用-再调制的实现方案,理论分析了两种方案中关键参数的设置及不同类型信号传输特性,并通过仿真与性能参数利弊分析,确定载波复用-再调制方案具备进一步升级空间。在此基础上,针对实现五重全业务的系统 FTTC 部分,在单波长通道内提出基于主载波 DPSK 调制结合一阶上边带(USB) MSK/OOK 正交调制的双边带(DSB)载波复用-主载波 OOK 调制结合一阶下边带(LSB)OOK 调制的单边带(SSB)载波复用再调制的单光源系统实现方案,并通过理论分析、仿真及实验验证证明了设计的有效性。针对实现五重全业务的系统无线接入部分,根据专用优化协议设计了为业务信道与安全信道独立设置射频源传输乘客多媒体数据业务与交通信息服务数据业务,及利用射频 QAM-OFDM/DPSK 正交调制技术令广播业务对业务信道的 OFDM 信号包络作相位调制实现下行多播的物理层实现方案,并通过仿真论证了设计的有效性。

(3)在对轨道交通运营环境下多业务数据传输的特殊需求进行分析,并对涉及行业安全苛求特点的运行控制数据通信子系统(DCS)在基于通信的列车控制(CBTC)模式与降级模式下数据传输工作方式进行深入解读的基础上,针对系统 FTTC 部分提出了一种新型集安全苛求性运控 DCS 数据业务与非安全苛求性运控监管业务及乘客多媒体业务于同一专用光纤数据环网,并为三组业务提供独立传输通道、且具备热备降级工作模式的多业务实现方案,并通过仿真验证了两种工作模式下的设计有效性。针对 CBTC 模式下的无线接入部分,根据专用优化协议进行了与 FTTC 部分相对应,将 RSU 端乘客多媒体业务的基带 OFDM 信号处理集中至中央控制室的设计方案,并通过仿真证明了该设计在多终端用户 RoF 信息处理方面具有更高的效率。

本论文针对道路与轨道交通不同需求所构建基于 RoF 的车路通信物理层多业务数据传输系统,可为每一类业务数据的传输提供独立的通道支持,且所提出方案均具有稳定、可靠的传输特性。所得到的相应结论将为未来 FTTC 背景下的车路通信系统建设提供重要的理论参考,并为完善城市道路、轨道交通车路通信多业务数据传输系统功能,加快智能交通发展进程起到积极作用。

关键词: 智能交通系统(ITS),光载无线通信(RoF),车路通信(RVC),多业务,物理层,道路交通,城市轨道交通,正交调制,载波复用,再调制,协议优化,运行控制系统,数据通信子系统(DCS)

Abstract

Information and telecommunication technology are employed more as tools in certain industries such as transportation systems, and have been playing an evolutionary role in realizing transport intelligence. With the implementation of Chinese 12th five-year-plan, fiber-to-the-curb (FTTC) will soon become a reality, which might bring new development chances for road vehicle communication (RVC), or even intelligent transportation systems (ITS). The fiber access to road side unit (RSU) would bring huge bandwidth resource to RVC, therefore, making the best of these advantages, developing car borne multi services, so as to realize “tri-network integration” in moving vehicles, will certainly be a new trend for RVC development in future FTTC era.

Radio-over-fiber (RoF) technique, which integrates the advantages of fiber optic communication and wireless communication, is transparent for protocols of any kind, and can provide high speed, broadband, and flexible access for vehicles. It has been considered as the most promising technique to realize future RVC multi services access. However, research on multi services for RVC based on RoF technique are somehow limitative till now, researchers major in communication have focused on either fiber access or wireless protocols, but on some level neglect the requirements of their application in transportation; while researchers major in transportation have focused on certain transport behavior changes brought by multi services of RVC, but neglect the feasibility of RoF technique itself.

To solve the problem above, in this thesis, the transportation environment in the context of FTTC and its special demand for multi services data communication has been analyzed in detail, then based on the basic theory of fiber optic communication and wireless communication, key technologies and system design in physics layer for novel RVC multi service data communication based on RoF technique in road traffic and urban rail transit application has been studied extensively. The main research work and creative points (*blacked*) of this thesis are as follows:

- (1) By an adequate discussion of the mechanism of RoF applied RVC multi

services data communication system, the service types of RVC have been divided into 5 categories, and the RoF based RVC system has been divided into FTTC part and wireless access part. Then the basic structure of a prototype system with only 1 service for both downlink and uplink has been designed. In FTTC part of the system, WDM-RoF scheme, in which each RSU has its own wavelength data channel, with full duplex bidirectional communication link has been adopted, based on this scheme, cost-effective designs including employing re-modulation technique to load uplink data in RSU and employing super-continuum light source in CS has been proposed and their effectiveness has been proved by simulation; and in wireless access part, in order to make terminal users in vehicle get higher data transmission rate in limited bandwidth, *a dedicated optimized protocol for physics layer has been proposed in 5.9GHz band based on the basic definition for DSRC channel in IEEE 802.11p and OFDM multi carrier modulation standard in TD-LTE*, and system structure for that part based on such protocol has been designed as well.

(2) By deeply analyzing the content of multi service data and its demand for transmission resource in road traffic environment, for the FTTC part of transitional system which supports triple services, two schemes based on orthogonal modulation – re-modulation and carrier multiplexion – re-modulation have been proposed, the setting of their key parameters has been studied in theory, and by simulation and comparison of the performances, the latter one has been pointed out to have potential to be upgraded for more services access. Based on that, for the FTTC part which supports all quintuple services, *a novel scheme based on downlink double sideband (DSB) carrier multiplexion with carrier DPSK combined with first order upper sideband (USB) MSK/OOK orthogonal modulation – uplink single sideband (SSB) carrier multiplexion re-modulation with carrier OOK combined with first order lower sideband (LSB) OOK modulation realized by a single light source in each wavelength channel has been proposed*, and its communication performance for data services has been proved to be reliable by theory, simulation and experiment study. For the wireless access part which also support quintuple services, according to the optimized protocol, 2 RF sources have been set to transmit passenger multimedia service and transport information service separately, and *a RF QAM-OFDM/DPSK*

orthogonal modulation method has been proposed to let broadcast service modulate the phase of the OFDM signal envelope in service channel so as to save bandwidth resources, and the effectiveness of the design above has been proved by simulation.

(3) The special requirements of multi service data transmission in urban rail transit operating environment have been analyzed, and the work principles of data communication system (DCS) as a safety-critical system for train operation control in both communication-based train control (CBTC) mode and fallback mode have been intensively studied. For the FTTC part, *a novel multi service scheme which integrates safety-critical DCS data service, non-safety-critical operation supervision service and passenger multimedia service in to the same fiber data ring network, and provides independent data transmission channel as well as hot-standby and fallback work mode has been proposed*, by simulation the effectivenesses of the scheme in both work mode have been proved. For wireless access part in CBTC mode, a design correspond to the FTTC part has been proposed in which the baseband OFDM signal processing modules have been centralized into central control room, and its higher efficiency in supporting huge terminals to access into the RVC system has been proved via simulation.

The RVC system structures in physics layer based on RoF technique for road traffic and urban rail transit environment that have been proposed in this thesis, can provide independent data transmission channel for each kind of service, moreover, those structures all have stable and reliable data transmission performances. The results acquired in this thesis would provide meaningful theory references for the construction of RVC system in future FTTC era, and would play an active role in improving multi services access functions for urban road traffic and rail transit, and accelerating the developing process of intelligent transportation.

Key Words: Intelligent Transportation System (ITS), Radio-over-fiber (RoF), Road Vehicle Communication (RVC), Multi services, Physical layer, Road Traffic, Urban Rail Transit, Orthogonal modulation, Carrier Multiplexing, Re-modulation, Protocol optimization, Operation control system, Data Communication System (DCS)

目 录

| | |
|----------------------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题背景 | 1 |
| 1.1.1 智能交通系统建设中车路通信的重要地位 | 1 |
| 1.1.2 车路通信的研究与发展 | 2 |
| 1.2 车路通信系统的多业务发展 | 5 |
| 1.2.1 车路通信系统的多业务发展定义及其重要意义 | 5 |
| 1.2.2 发展车路通信系统多业务数据传输的技术要求 | 7 |
| 1.2.3 发展车路通信系统多业务数据传输的设计思路 | 8 |
| 1.3 用于车路通信系统的 RoF 技术简介 | 9 |
| 1.3.1 RoF 技术应用于车路通信的原理 | 9 |
| 1.3.2 RoF 技术应用于车路通信的优势 | 13 |
| 1.4 基于 RoF 的车路通信系统多业务发展研究现状 | 14 |
| 1.4.1 FTTC 部分研究现状 | 15 |
| 1.4.2 无线接入部分研究现状 | 18 |
| 1.4.3 全系统多业务发展研究现状 | 20 |
| 1.4.4 相关研究中存在的问题 | 21 |
| 1.5 论文工作介绍 | 22 |
| 1.5.1 论文研究内容及技术路线 | 22 |
| 1.5.2 论文研究意义及应用价值 | 25 |
| 1.6 论文组织结构 | 26 |
| 第二章 基于 RoF 的车路通信物理层数据传输 原型系统设计研究 | 28 |
| 2.1 多业务数据传输物理层需求解读 | 28 |
| 2.1.1 道路交通车路通信多业务数据传输需求 | 29 |
| 2.1.2 轨道交通车路通信多业务数据传输需求 | 30 |
| 2.2 原型系统基本架构设计 | 31 |
| 2.2.1 FTTC 部分 | 32 |
| 2.2.2 无线接入部分 | 34 |
| 2.3 原型系统 FTTC 部分物理层设计 | 35 |

| | |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.1 链路双工设计 | 35 |
| 2.3.2 RSU 结构简化设计 | 37 |
| 2.3.3 CS 成本集约设计 | 39 |
| 2.4 原型系统无线接入部分物理层设计 | 43 |
| 2.4.1 通信协议优化设计 | 43 |
| 2.4.2 物理层结构设计 | 47 |
| 2.5 本章小结 | 48 |
| 第三章 基于 RoF 的道路交通车路通信三重业务 物理层数据传输研究 | 49 |
| 3.1 道路交通车路通信三重业务接入需求解读 | 49 |
| 3.1.1 三重业务内涵 | 49 |
| 3.1.2 三重业务物理层实现思路 | 50 |
| 3.2 基于正交调制-再调制技术的 FTTC 部分三重业务实现方案研究 | 52 |
| 3.2.1 详细设计方案 | 52 |
| 3.2.2 关键参数设置理论分析 | 53 |
| 3.2.3 优化参数设置下的仿真分析 | 61 |
| 3.2.4 结论 | 65 |
| 3.3 基于载波复用-再调制技术的 FTTC 部分三重业务实现方案研究 | 65 |
| 3.3.1 详细设计方案 | 65 |
| 3.3.2 关键参数设置理论分析 | 67 |
| 3.3.3 优化参数设置下的仿真分析 | 74 |
| 3.3.4 结论 | 77 |
| 3.4 两种 FTTC 部分三重业务实现方案性能比较 | 77 |
| 3.5 无线接入部分三重业务实现方案研究 | 80 |
| 3.5.1 详细设计方案 | 80 |
| 3.5.2 关键参数设置 | 82 |
| 3.5.3 仿真分析 | 83 |
| 3.5.4 结论 | 86 |
| 3.6 本章小结 | 87 |
| 第四章 基于 RoF 的道路交通车路通信五重业务 物理层数据传输研究 | 88 |
| 4.1 道路交通车路通信五重业务接入需求解读 | 88 |
| 4.1.1 五重业务内涵 | 88 |

| | |
|-----------------------------------------|-----|
| 4.1.2 五重业务物理层实现思路 | 89 |
| 4.2 FTTC 部分五重业务实现方案研究 | 90 |
| 4.2.1 详细设计方案 | 90 |
| 4.2.2 关键参数设置理论分析 | 93 |
| 4.2.3 优化参数设置下的仿真分析 | 97 |
| 4.2.4 实验验证及分析 | 100 |
| 4.2.5 结论 | 104 |
| 4.3 无线接入部分五重业务实现方案研究 | 104 |
| 4.3.1 详细设计方案 | 104 |
| 4.3.2 关键参数设置 | 106 |
| 4.3.3 仿真分析 | 107 |
| 4.3.4 结论 | 110 |
| 4.4 本章小结 | 110 |
| 第五章 基于 RoF 的轨道交通车路通信多业务 物理层数据传输研究 | 111 |
| 5.1 轨道交通车路通信多业务接入需求解读 | 111 |
| 5.1.1 轨道交通运营场景通信需求 | 112 |
| 5.1.2 安全苛求性运控数据传输需求 | 113 |
| 5.1.3 非安全苛求性业务数据传输需求 | 114 |
| 5.2 轨道交通运行控制数据通信子系统工作方式研究 | 116 |
| 5.2.1 运行控制信号系统整体工作方式 | 116 |
| 5.2.2 运行控制数据通信子系统工作方式 | 118 |
| 5.3 CBTC 模式下 FTTC 部分实现方案研究 | 121 |
| 5.3.1 详细设计方案 | 121 |
| 5.3.2 关键参数设置讨论 | 124 |
| 5.3.3 仿真分析 | 126 |
| 5.3.4 结论 | 130 |
| 5.4 降级模式下 FTTC 部分实现方案研究 | 130 |
| 5.4.1 详细设计方案 | 130 |
| 5.4.2 关键参数设置讨论 | 132 |
| 5.4.3 仿真分析 | 133 |
| 5.4.4 结论 | 135 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 5.5 无线接入部分实现方案研究 | 136 |
| 5.5.1 详细设计方案 | 136 |
| 5.5.2 关键参数设置 | 138 |
| 5.5.3 仿真分析 | 139 |
| 5.5.4 结论 | 142 |
| 5.6 本章小结 | 142 |
| 第六章 总结与展望 | 144 |
| 6.1 主要研究结论 | 144 |
| 6.2 尚待研究的工作 | 146 |
| 致 谢 | 148 |
| 参考文献 | 151 |
| 附录：缩略语 | 175 |
| 个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果 | 180 |

第一章 绪论

“通信乃是互通信息”，中国通信业界功勋前辈周炯槃先生曾对通信所作出了一种最为简明的定义[1]。如这一定义所述，始于莫尔斯电报机发明时期的现代通信，历经百余年的发展，在不断产生如无线电通信、毫米波通信、光纤通信等新兴通信技术的同时，逐步融合机械、控制、计算机、传感等多种技术，正快步向“实现任何时候，在任何地方与任何人及时实现任何形式的信息互通”这一目标进军[1-2]。快速发展的通信技术给了享受通信服务的主体更多机动性，使人们可以根据工作、生活的场景需要选择更合理的通信方式，于是，通信系统有了更多的应用内涵，所互通的信息也成为了各种应用在物理层上的外延，通信技术的发展正在逐步在各类通信应用与人类的日常行为之间建立起一种既辩证又统一的关系。

将通信的定义引申开来，应用型通信亦即应用实体之间的信息互通，车路通信（RVC，Road to Vehicle Communication）即是一种重要的应用型通信系统，并已在近年来成为智能交通系统（ITS，Intelligent Transportation System）中先进的交通信息服务系统（ATIS，Advanced Transportation Information Service system）的重要组成，专为交通运输行业提供必要的通信支持[3-6]。车路通信系统作为具有特殊应用背景的保障性通信系统，需要对其应用主体——道路交通中的驾驶员、乘客、车辆、干扰体、调度人员及轨道交通中的驾驶员、车辆、传感器[7]、乘客[8]、监控人员、调度人员等[9-10]所需的通信应用进行深层解读，并采取包括信息通信技术在内的多种交叉学科技术实现信息的有效收集、处理、发布、交换、分析和利用，确保人、车、路及其之间关系的辩证统一，实现城市中大容量、高机动性交通系统安全、迅速、准确、节能等运输目标。时至今日，针对车路通信的相关研究已成为通信、交通学科交叉领域的学术热点[11-13]。

1.1 课题背景

1.1.1 智能交通系统建设中车路通信的重要地位

城市 ITS 体系除了包括前文所述的 ATIS 系统外，还包括先进的交通管理系

统(ATMS, Advanced Transportation Management System)、先进的公共交通系统(APTS, Advanced Public Transportation System)、先进的车辆控制系统(AVCS, Advanced Vehicle Control System)、货运管理系统、电子收费系统(ETC, Electronic Toll Collection)及紧急救援系统(EMS, Emergency Management System)等若干子系统。可以看出,没有 ATIS 系统进行信息的互通,一切交通管控措施就无法执行,而车路通信技术作为 ATIS 系统的组成部分,是串联道路与道路载体中所活动的车辆、行人等交通实体的重要工具,它是 ITS 体系实时交通信息获取、发布、交换等功能实现的重要途径,堪称城市 ITS 体系的神经网络。

车路通信系统能够成为备受关注的应用型通信系统,一方面因为其本身代表着未来城市交通的发展趋势,即通过其与包括先进的信息技术、数据可信传输技术、电子传感技术、控制技术及计算机技术等多种技术手段的有效集成运用,构成一种服务于道路交通乃至轨道交通,并可在大范围内全方位发挥作用的综合交通运输管理系统;另一方面则是由于近年来随着国内外大中型城市居民汽车保有量的增加,交通拥堵、交通事故的频繁发生促使交通系统中各参与主体对于包括道路工况、实时路况等多源信息的获取需求日益迫切[4,14]。对于中国国内大中型城市而言,随着“十二五”规划下城市化建设进程的逐步提速[15-18],建立并完善城市配套车路通信系统以确保城市 ITS 体系的完整,使得交通基础设施建设适应不断加快的城市建设速度,而不成为对城市发展产生负面影响的阻碍因素[19-20],已成为城市与交通规划管理职能部门的共识。

1.1.2 车路通信的研究与发展

对于车路通信技术的研究,日本从 80 年代起就已从汽车驾驶员的角度出发,致力于通过采用各类通信技术提升驾驶安全,此后其在系统级层面的车路通信研究项目,包括 Japanese ITS, VICS (Vehicle Information Communication System) 等,也多是基于驾驶员所做的智能信息交互研究。近年来,日本在车路通信方面所开展的项目中颇具代表性的是始于 2007 年的 SMARTWAY[21],该项目由日本政府及民间 20 余家企业共同发起,力求整合国内一切可整合的 ITS 资源,最大程度降低交通事故与交通拥堵。尽管以车路通信技术为依托,但 SMARTWAY 依然更为关注车辆的智能化,并将 SMARTCAR 项目与之并行,以最新的车路联网思想为依托,通过先进的通信技术力求最终实现道路与车辆的高度协调,并使得车辆可在道路提供的必要信息支持下实现自动驾驶,并促进旅游、运输、