



同济大
Tongji



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

佘炜 董德存 著

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

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



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

卮 炜 董德存 著

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

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



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书从对光纤到路边(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。本书可作为相关领域的研究者和相关专业的高年级学生的学习参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

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/佘炜,董德存著. —上海:同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978 - 7 - 5608 - 6861 - 5

I. ①基… II. ①佘…②董… III. ①通信系统—应用—城市交通—交通运输管理—研究 IV. ①U491

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 070317 号

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

佘 炜 董德存 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 陆克丽霞 卢元姍

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 12.75

字 数 255 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6861 - 5

定 价 61.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佑红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李凤亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版110余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

前言

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所能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,本书从对 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。本书主要工作及创新(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 5.9 GHz 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—再调制的两种实现方案,理论分析了这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的升级空间。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。

本书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。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景	2
1.1.1 智能交通系统建设中车路通信的重要地位	2
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 研究内容介绍	22
1.5.1 研究内容及技术路线	22
1.5.2 研究意义及应用价值	25

1.6	组织结构	26
第2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	38
2.4	原型系统无线接入部分物理层设计	43
2.4.1	物理层通信协议优化设计	43
2.4.2	物理层结构设计	47
2.5	本章小结	48
第3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	75
3.3.4	结论	78
3.4	两种 FTTC 部分三重业务实现方案性能比较	78
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	83
3.5.3	仿真分析	84
3.5.4	结论	87
3.6	本章小结	87
第 4 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	89
4.1	道路交通车路通信五重业务接入需求解读	89
4.1.1	五重业务内涵	89
4.1.2	五重业务物理层实现思路	90
4.2	FTTC 部分五重业务实现方案研究	92
4.2.1	详细设计方案	92
4.2.2	关键参数设置理论分析	94
4.2.3	优化参数设置下的仿真分析	99
4.2.4	实验验证及分析	102
4.2.5	结论	105
4.3	无线接入部分五重业务实现方案研究	106
4.3.1	详细设计方案	106
4.3.2	关键参数设置	108
4.3.3	仿真分析	109
4.3.4	结论	111
4.4	本章小结	112
第 5 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	113
5.1	轨道交通车路通信多业务接入需求解读	114
5.1.1	轨道交通运营场景通信需求	114
5.1.2	安全苛求性运控数据传输需求	115
5.1.3	非安全苛求性业务数据传输需求	116



5.2	轨道交通运行控制数据通信子系统工作方式研究	118
5.2.1	运行控制信号系统整体工作方式	118
5.2.2	运行控制数据通信子系统工作方式	120
5.3	CBTC 模式下 FTTC 部分实现方案研究	123
5.3.1	详细设计方案	123
5.3.2	关键参数设置讨论	126
5.3.3	仿真分析	127
5.3.4	结论	131
5.4	降级模式下 FTTC 部分实现方案研究	132
5.4.1	详细设计方案	132
5.4.2	关键参数设置讨论	133
5.4.3	仿真分析	135
5.4.4	结论	137
5.5	无线接入部分实现方案研究	137
5.5.1	详细设计方案	138
5.5.2	关键参数设置	139
5.5.3	仿真分析	140
5.5.4	结论	143
5.6	本章小结	143
第 6 章	总结与展望	145
6.1	主要研究结论	145
6.2	尚待研究的工作	147
附录	缩略语	149
参考文献		154
后记		181