Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen
Berichte des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze

Herausgegeben von: Prof. Dr.-Ing. C. Wietfeld

technische universität
dortmund

Resource-Efficient Vehicle-to-Cloud Communications Leveraging Machine Learning

Benjamin Sliwa

Band 21

Resource-Efficient Vehicle-to-Cloud Communications Leveraging Machine Learning

Genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund

von

Benjamin Sliwa, M.Sc.

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
Korreferent:	JProf. Dr. Thomas Liebig
Dissertation eingereicht am:	28.06.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	10.11.2021

Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 21

Benjamin Sliwa

Resource-Efficient Vehicle-to-Cloud Communications Leveraging Machine Learning

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2021

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8356-9
ISSN 1867-4879

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

Vehicular big data is anticipated to become the “new oil” of the automotive industry. Although the novel vehicle-as-a-sensor paradigm will fuel the emergence of innovative crowdsensing-enabled services, the tremendously increased amount of transmitted data represents a massive challenge for the cellular network infrastructure and impacts the intra-cell coexistence of users and services that compete for the limited spectrum resources. More dramatically, due to the complex vehicular radio channel conditions, the mobile devices need to frequently reduce the transmission efficiency in favor of more reliable data transfer, ultimately resulting in a wastage of the limited network resources.

This thesis focuses on the development and analysis of end-edge intelligence mechanisms for delay-tolerant vehicle-to-cloud communications. Taking the predicted end-to-end data rate into account, different opportunistic medium access methods are proposed to achieve a more efficient utilization of the existing network resources. For this purpose, supervised, unsupervised, and reinforcement learning methods are brought together to autonomously detect and exploit favorable transmission opportunities — the so-called connectivity hotspots — by leveraging context knowledge from the network, mobility, and application domains.

For the optimization and the performance evaluation of the novel transmission schemes developed in the scope of this thesis, data-driven network simulation is proposed as a new innovative methodology. Hereby, the combination of deterministic and probabilistic machine learning methods does not only enable close to reality representation of concrete real world evaluation scenarios, it also achieves a massive computational efficiency that is suitable for in-depth optimization of the reinforcement learning schemes. As a bridge for the existing methodological gap between the data analysis and the embedded systems domains, a novel high-level data analysis framework is proposed that builds upon the solid foundation of existing validated low-level model implementations. In addition to providing automatic code generation for the trained machine learning models, the implemented platform-in-the-loop approach allows to precisely assess the final platform-specific resource requirements and enables the determination of the sweet model parameterization for the targeted Internet of Things (IoT) devices ranging from embedded computers up to ultra low power microcontrollers.

The results of this thesis show that machine learning-based data rate prediction models are well able to account for the complex interplay of radio propagation effects, mobility behaviors, and communication protocols. As a result, they provide the fundamental information that allows to autonomously learn resource-efficient data transfer policies. As pointed out in a comprehensive real world performance evaluation of the novel opportunistic data transfer methods,

the apparently selfish goal of data rate maximization contributes to the good of all and allows to improve the intra-cell coexistence by significantly reducing the resource occupation time as well as the number of network resources per data packet. As a side-effect of the extensive utilization of highly reliable radio channel conditions, the communication-related energy consumption of the mobile device is also significantly improved. By adopting the model parameterization, the trade-off between the achievable benefits and the reduction of the data freshness inherently implied by the opportunistic medium access can be controlled with respect to the application requirements.

In addition to the key research topics, the contributions of this thesis also give an outlook on the enabling function of machine learning for the future network evolution beyond 5G and illustrate its potential to enrich existing scientific methods in the wireless communications domain for end-to-end network simulation and radio propagation modeling.

The thesis was developed during the participation in the German Research Foundation (DFG) Collaborative Research Center (SFB) 876 “Providing Information by Resource-Constrained Analysis”, subproject A4 “Resource Efficient and Distributed Platforms for Integrative Data Analysis” and subproject B4 “Analysis and Communication for Dynamic Traffic Prognosis”.

Kurzfassung

Aktuelle Vorhersagen prophezeien Big Data als den neuen „Treibstoff" für die Automobilindustrie. Obwohl durch das neue „Fahrzeug-als-Sensor" Paradigma die Entstehung einer Vielzahl von neuartigen datengetriebener Diensten vorantreiben wird, stellt der enorme Zuwachs an mobilfunkgestützten Datenübertragungen eine massive Herausforderung für die zellulare Netzinfrastruktur dar und beeinträchtigt die zellinterne Koexistenz von Nutzern und Diensten, welche um die begrenzten Ressourcen des Funkfrequenzspektrums konkurrieren. Dieses Problem erfährt zudem eine weitere Verschärfung, da die komplexen Funkkanaleigenschaften für die fahrzeugbasierte Datenübertragung häufig eine Verringerung der Übertragungseffizienz zugunsten einer erhöhten Übermittlungszuverlässigkeit erfordern, welche letztendlich in einer Verschwendung der begrenzten Ressourcen resultiert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Analyse von neuartigen Lösungsansätzen zur endgeräteseitigen Nutzung von maschinellen Lernverfahren zur Verbesserung des Übertragungsprozesses für verzögerungstolerante Applikationen. Das zugrundeliegende Gesamtziel liegt hierbei in der effizienteren Nutzung der gegebenen Ressourcen durch einen opportunistischen Kanalzugriff. Für diesen Zweck werden Methoden des überwachten, unüberwachten und des verstärkenden maschinellen Lernens gemeinsam verwendet, um autonom günstige Übertragungsmöglichkeiten — die sogenannten Konnektivitätshotspots — auf Basis von dynamisch erfassten Netzwerk-, Mobilitäts- und Applikationskontextindikatoren zu erkennen und zu nutzen.

Für die Optimierung und die Leistungsbewertung der neuen Übertragungsverfahren wird die datengetriebene Netzwerksimulation als neue innovative Methodik vorgestellt, welche eine realitätsgetreue Verhaltensanalyse neuer Kommunikationsverfahren in virtuellen Abbildern realer Evaluationsszenarien ermöglicht. Durch die enorme Recheneffizienz, welche durch eine Kombination verschiedener maschineller Lernverfahren erzielt wird, können die neuartigen Verfahren zur autonomen Entscheidungsfindung effizient in realistischen virtuellen Netzwerkumgebungen trainiert werden. Als Brücke zur Schließung der methodische Lücke zwischen den Forschungsfeldern der Datenanalyse und der eingebetteten Systeme, wird ein neuer Lösungsansatz vorgestellt, welcher eine zielgerichtete Automatisierung von Datenanalysen auf Basis von validierten Modellimplementierungen ermöglicht. Zusätzlich zur automatischen Generierung von Quellcode für die trainierten Prädiktionsmodelle, erlaubt die explizite Einbeziehung der Eigenschaften und Beschränkungen der Zielplattform, den resultierenden Ressourcenbedarf präzise zu bestimmen und plattformspezifische Parametriserungen der Modelle vorzunehmen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit belegen, dass maschinelle Lernverfahren imstande sind, das komplexe Zusammenspiel von Funkausbreitungseigenschaften, Mobilitätsverhalten und Kommunikationsprotokollen in ein geschlossenes Modell zur Vorhersage der erzielbaren Datenrate zu überführen. Dieses stellt fundamentale Informationen zur Einschätzung der Güte der Datenübertragung bereit und ermöglicht das eigenständige Lernen von Entscheidungsrichtlinien zur ressourceneffizienten Datenübertragung. Wie in einer umfassenden experimentellen Evaluationskampagne der neuen opportunistischen Übertragungsmethoden gezeigt wird, trägt das scheinbar eigennützige Ziel der Datenratenmaximierung zum Wohle aller bei und verbessert die Intrazellkoexistenz durch eine signifikante Reduzierung der notwendigen Zellressourcen pro Datenpaket. Als Nebeneffekt führt die umfangreiche Ausnutzung hochzuverlässiger Funkkanalsituationen zudem zu einer starken Verbesserung des kommunikationsbezogenen Energieverbrauchs des mobilen Endgeräts. Durch Anpassung der Modellparameter kann ein Kompromiss zwischen den erzielbaren Verbesserungen und der durch den opportunistischen Kanalzugriff implizierten Reduzierung der Aktualität der übertragenen Daten auf Basis der Applikationsanforderungen eingestellt werden.

Zusätzlich zu den Kernforschungsfragen ermöglichen die im Kontext dieser Arbeit entstandenen Forschungsbeiträge einen Ausblick auf die Schlüsselfunktion maschineller Lernverfahren für die zukünftige Netzevolution über 5G hinaus und veranschaulichen das diesen Ansätzen innenliegende Potenzial zur Verbesserung existierender wissenschaftlicher Methoden, wie z.B. zur Ende-zu-Ende Netzwerksimulation und für die Modellierung von Funkausbreitungseigenschaften.

Die Arbeit ist im Rahmen der Mitarbeit im Sonderforschungsbreich (SFB) 876 „Verfügbarkeit von Information durch Analyse unter Ressourcenbeschränkung", Teilprojekt A4 „Ressourcen-effiziente und verteilte Plattformen zur integrativen Datenanalyse" und Teilprojekt B4 „Analyse und Kommunikation für die dynamische Verkehrsprognose" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entstanden.

Contents

List of Acronyms

3GPP 3rd Generation Partnership Project

5GAA 5G Automotive Association

AECC Automotive Edge Computing Consortium

AMC Adaptive Modulation and Coding

ANN Artificial Neural Network

AODV Ad-hoc On-demand Distance Vector

AoI Age of Information

API Application Programming Interface

ARIMA Autoregressive Integrated Moving Average

ARQ Automatic Repeat reQuest

ASU Arbitrary Strength Unit

B.A.T.M.A.N. Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking

BLER Block Error Rate

BS-CB Black Spot-Aware Contextual Bandit

BS-pCB Black Spot-Aware Preditive Contextual Bandit

C-V2X Cellular V2X

CAGR Compound Annual Growth Rate

CAM Cooperative Awareness Message

CAN Controller Area Network

CART Classification And Regression Tree

CASTLE Client-side Adaptive Scheduler That minimizes Load and Energy

CAT Channel-aware Transmission

Cat-M Category M

CBR Constant Bitrate

CLAW Cellular Link-Aware Web loading

CLI Command Line Interface

CN Core Network

CoAST Collaborative Application-Aware Scheduling of Last Mile Cellular Traffic

CoPoMo Context-aware Power Consumption Model

CPS Cyber-Physical System

CPU Central Processing Unit

CQI Channel Quality Indicator

CRS Cell Specific Reference Signal

CSI-RS Channel State Information Reference Signal

CUSCUS CommUnicationS-Control distribUted Simulator

D2D Device-to-Device

DBSCAN Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

DCI Downlink Control Information

DDNS Data-Driven Network Simulation

DES Discrete Event Simulation

DFT Discrete Fourier Transform

DL Downlink

DSRC Dedicated Short Range Communication

ECDF Empirical Cumulative Distribution Function

EDR Event Data Recorder

eMBB enhanced Mobile Broadband

eNB evolved Node B

EPC Evolved Packet Core

EPS Encapsulated Postscript

ESP-IDF Espressif IoT Development Framework

E-UTRAN Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

EVA Extended Vehicular A

FALCON Fast Analysis of LTE Control channels

FANET Flying Ad-hoc Network

FG-ML5G Focus Group on Machine Learning for Future Networks Including 5G

FG-NET-2030 Focus Group on Technologies for Network 2030

FPC Fractional Path Loss Compensation

GAN Generative Adversarial Network

gNB Next Generation Node B

GNSS Global Navigation Satellite System

GPR Gaussian Process Regression

GPS Global Positioning System

GPSR Greed Perimeter Stateless Routing

H2H Human-to-Human

HARQ Hybrid ARQ

HAS HTTP Adaptive Streaming

HD High Definition

HLA High Level Architecture

HMM Hidden Markov Model

IDE Integrated Development Environment

IDM Intelligent Driver Model

IoT Internet of Things

IoV Internet of Vehicles

IPC Interprocess Communication

IQN In-advance QoS Notification

ITS Intelligent Transportation System

ITU International Telecommunication Union

ITU-T ITU Telecommunication Standardization Sector

JNI Java Native Interface

KNIME Konstanz Information Miner

KPI Key Performance Indicator

LET Link Expiry Time

LIDAR Light Detection And Ranging

LIMITS LIghtweight Machine learning for IoT Systems

LIMoSim Lightweight ICT-centric Mobility Simulation

LinUCB Linear Upper Confidence Bound

LOS Line-of-Sight

LSTM Long Short-term Memory

LTE Long Term Evolution

M2M Machine-to-Machine

M5 M5 Regression Tree

MAC Medium Access Control

MAE Mean Absolute Error

MANET Mobile Ad-hoc Network

MCN Multi-hop Cellular Network

MCS Modulation and Coding Scheme

MCU Microcontroller Unit

MDI Mean Decrease Impurity

MDP Markov Decision Process

ML-CAT Machine Learning CAT

ML-pCAT Machine Learning pCAT

mMTC massive Machine Type Communication

mmWave millimeter Wave

MNO Mobile Network Operator

MSS Maximum Segment Size

MTC Machine Type Communication

MTU Maximum Transmission Unit

NB-IoT Narrowband IoT

NDK Native Development Kit

NLOS Non-Line-of-Sight

NR New Radio

ns-3 network simulator 3

NSA Non-standalone

NWDAF Network Data Analytics Function

OEM Original Equipment Manufacturer

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OLSR Optimized Link State Routing

OMNeT++ Objective Modular Network Testbed in C++

OpenGL Open Graphics Library

OSM OpenStreetMap

OTA Over-the-Air

OWL Online Watcher for LTE

PAPR Peak-to-Average Power Ratio

PARRoT Predictive Ad-hoc Routing fueled by Reinforcement learning and Trajectory knowledge

pCAT predictive CAT

PERCEIVE Predicted pERformance by CEllular Inferring deVicE

PDCCH Physical Downlink Control Channel

PDCP Packet Data Convergence Protocol

PDR Packet Delivery Ratio

PRB Physical Resource Block

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QoS Quality of Service

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

QxDM Qualcomm eXtensible Diagnostic Monitor

RAIK Regional Analysis to Infer KPIs

RADAR Radio Detection and Ranging

RAM Random Access Memory

RAN Radio Access Network

RAT Radio Access Technology

RB Resource Block

RBF Radial Basis Function

REM Radio Environmental Map

RF Random Forest

RIS Reconfigurable Intelligent Surface

RL-CAT Reinforcement Learning CAT

RL-pCAT Reinforcement Learning pCAT

RLC Radio Link Control

RMSE Root Mean Square Error

RNTI Radio Network Temporary Identifier

RoI Region of Interest

RSRP Reference Signal Received Power

RSRQ Reference Signal Received Quality

RSSI Received Signal Strength Indicator

RSU Roadside Unit

RTT Round-trip Time

SA Standalone

SC Subcarrier

SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access

SDR Software-defined Radio

SEQ Sequence Number

SINR Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio

SNR Signal-to-noise Ratio

SMO Sequential Minimal Optimization

SPS Semi-persistent Scheduling

SS Signal Strength

SUMO Simulation of urban mobility

SVM Support Vector Machine

TA Timing Advance

TBS Transport Block Size

TCP Transmission Control Protocol

TPC Transmission Power Control

TRUST Throuput Prediction based on LSTM

TTI Transmission Time Interval

TTL Time to Live

TUBE Time-dependent Usage-based Broadband price Engineering

UART Universal Asynchronous Receiver Transmitter

UAV Unmanned Aerial Vehicle

UCB Upper Confidence Bound

UDP User Datagram Protocol

UE User Equipment

UI User Interface

UL Uplink

UMa Urban Macrocell

URLLC Ultra-Reliable Low Latency Communication

USD US-Dollar

V2X Vehicle-to-Everything

VANET Vehicular Ad-hoc Network

Veins Vehicles in Network Simulation

WAVE Wireless Access in Vehicular Environments

WCET Worst Case Execution Time

WEKA Waikato Environment for Knowledge Analysis

WGS84 World Geodetic System 1984

WLAN Wireless Local Area Network

WSN Wireless Sensor Network

XAI Explainable Artificial Intelligence