



POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

DOCTORAL THESIS

Radio resource management for C-V2X communication systems

Author:

Mgr inż. Saif Sabeeh

Supervisor:

Prof. dr hab. inż.

Krzysztof WESOŁOWSKI

Supporting Supervisor:

Dr inż. Paweł SROKA

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy in Information and
Communication Technology*

Faculty of Computing and Telecommunications
Poznan University of Technology

November 2022

Abstract

Emerging wireless 5G and 6G technologies will support different applications, services, and use cases with extremely heterogeneous requirements. Examples of these requirements result from the main classes of 5G services such as enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable and Low-Latency Communications (URLLC), and massive Machine-Type Communications (mMTC). They include, among others, drive automation and Cellular-Vehicle-to-Everything (C-V2X) services. The increasing number of services that use wireless communications creates new challenges that need to be investigated. Several technologies share the same radio spectrum when implementing various services. In order to support these different services and their requirements, resource allocation and spectrum management play a critical role in the commercial and technical success of these applications.

This dissertation considers the scheduling and allocation of radio resources for C-V2X technologies to support highly reliable and error-free transmission. It investigates two modes of transmission of C-V2X communications in centralized and decentralized resource allocation in two technologies of air interfaces. Long Term Evolution (LTE) and New Radio (NR) are used to support sidelink C-V2X communications. The half-duplex, hidden terminal, and packet/radio resource collision errors are problems in decentralized resource allocation of LTE-V2X Mode 4 and NR V2X Mode 1. The signalling cost, limitation of resources, resource re-selection latency, and spectrum partitioning among cellular infrastructure in a network are problems in centralized resource allocation of LTE-V2X Mode 3 and NR V2X Mode 2. Therefore, all these problems are investigated in this dissertation.

We propose new resource scheduling algorithms to improve decentralized resource allocation management. These algorithms work by predicting the moment of the next free resources. They show excellent performance in terms of packet reception ratio and packet collision ratio. The high channel load in a network is another challenge investigated in this dissertation when the number of resources is limited (the channel frequencies are evenly divided between the vehicles) and the autonomous resource allocation is applied. We propose a new algorithm that works by adjusting the transmission parameters (that is, the modulation and coding scheme) to vary the number of vehicles currently served.

Another new algorithm is proposed to reduce congestion control problems in autonomous resource allocation. The 3GPP C-V2X standard does not solve this problem and depends on the solutions proposed in IEEE 802.11 technology. The proposed algorithm is based on the channel busy ratio to estimate channel load in the network. Thus, based on the value of this parameter, the algorithm can determine the values of the transmission parameters for subsequent transmission.

Another significant problem overlooked by the 3GPP C-V2X standard is the distribution of radio resources among the elements of cellular infrastructure in a highway scenario. Considering the sidelink overlapping coverage area of the vehicles' broadcast is essential in a centralized resource allocation of C-V2X. With this aim, we propose new spectrum partitioning techniques to avoid these overlaps.

The last problem investigated in this dissertation is the latency of resource allocation for the centralized resource allocation algorithm of NR V2X. We propose a new scheduling of radio resources managed by the centrally controlled cellular infrastructure. The proposed scheduling works by dividing the periodical time intervals of the vehicles' broadcasting between the roadside unit in the network to avoid creating an overlapped broadcasting area.

Streszczenie

Powstające technologie piątej i szóstej generacji 5G i 6G będą zapewniać realizację różnych aplikacji, usług i obejmować przypadki zastosowań o bardzo zróżnicowanych wymaganiach. Przykłady tych wymagań wynikają z głównych klas usług 5G takich jak: szerokopasmowy, wzbogacony dostęp mobilny (eMBB), ultra niezawodna komunikacja o niskich opóźnieniach (URLLC) i masowa komunikacja między maszynami i urządzeniami (mMTC). Przykłady te obejmują między innymi autonomiczne kierowanie pojazdami i usługi wykorzystania komunikacji komórkowej w komunikacji pomiędzy pojazdami i wszystkimi elementami struktury telekomunikacyjnej (C-V2X). Wzrastająca liczba usług stosujących komunikację bezprzewodową stwarza nowe wyzwania, które wymagają badań. Różne technologie współdzielą pasmo radiowe w realizacji różnych usług. Aby umożliwić realizację różnych usług i związanych z nimi wymagań, niezbędne jest odpowiednie zarządzanie zasobami i widmem, które spełnia istotną rolę w zapewnieniu komercyjnych i technicznych sukcesów tych usług.

W niniejszej dysertacji rozważane są alokacja i planowanie zasobów w technologiach V2X, aby zapewnić wysoce niezawodną i bezbłędną transmisję. Przedstawione są w niej wyniki badań dwóch trybów transmisji w komunikacji C-V2X w przypadku scentralizowanej i zdecentralizowanej alokacji zasobów dla dwóch technologii dostępu radiowego. Systemy LTE oraz NR (New Radio) są zastosowane do wspierania transmisji komunikacji C-V2X w łączach bezpośrednich (sidelinks). W systemie LTE-V2X w trybie 4 oraz w systemie NR V2X w trybie 1 problemami są transmisja półdupleksowa, zjawisko terminala ukrytego oraz błędy wynikające z kolizji pakietów i rozdziału zasobów. Z kolei w scentralizowanej alokacji zasobów w systemie LTE-V2X w trybie 3 oraz w

systemie NR V2X w trybie 2 problemami są koszty sygnalizacji, ograniczenia ilościowe zasobów, opóźnienia w ponownym wyborze zasobów oraz podział widma częstotliwości. Z tych więc powodów problemy te stały się przedmiotem badań w tej dysertacji.

W rozprawie zaproponowano więc nowe algorytmy szeregowania zasobów, aby poprawić zarządzanie alokacją zasobów w trybie zdecentralizowanym. Algorytmy te działają dokonując predykcji chwil, w których wystąpią nowe wolne zasoby. Charakteryzują się doskonałą jakością działania mierzona stopą odebranych pakietów i stopą kolizji pakietów. Kolejnym wyzwaniem badanym w tej rozprawie jest problem dużego obciążenia sieci, gdy liczba dostępnych zasobów jest ograniczona a jest zastosowana zasada autonomicznej alokacji zasobów. Dlatego w rozprawie zaproponowano nowy algorytm, który działa przez dopasowanie parametrów transmisyjnych (tj. schematu modulacji i kodowania kanałowego), aby zmienić liczbę aktualnie obsługiwanych terminali/pojazdów.

Inny nowy algorytm zaproponowany w tej rozprawie ma za zadanie redukcję problemu sterowania przeciążeniem w autonomicznej alokacji zasobów. Standard 3GPP C-V2X nie rozwiązuje tego problemu i stosuje rozwiązania użyte w technologii IEEE 802.11. Zaproponowany algorytm bazuje na stopniu zajętości kanału, aby estymować obciążenie kanałów w sieci, Tak więc, biorąc pod uwagę wartość tego parametru, algorytm może zdecydować o wartościach parametrów dla kolejnych transmisji.

Kolejny znaczący problem niedostrzeżony w standardzie 3GPP C-V2X to dystrybucja zasobów radiowych między elementy infrastruktury komórkowej w scenariuszu komunikacji z pojazdami i między nimi na autostradzie. Rozważanie nakładania się obszarów pokrycia w transmisji bezpośredniej wiadomości rozsiewczych wysyłanych przez pojazdy jest kluczowym zagadnieniem w scentralizowanej alokacji zasobów w systemie C-V2X. W tym celu w rozprawie proponujemy nowe techniki podziału widma, aby uniknąć nakładania się tych obszarów pokrycia.

Ostatnim problemem badanym w rozprawie jest opóźnienie w alokacji zasobów w systemie scentralizowanej alokacji w systemach NR V2X. Zaproponowano nowe szeregowanie zasobów radiowych zarządzane przez centralnie sterowaną infrastrukturę komórkową. Proponowane szeregowanie działa na zasadzie podziału okresowych odstępów czasowych w rozsiewaniu wiadomości do pojazdów pomiędzy jednostki infrastruktury drogowej w sieci w celu unikania tworzenia obszarów nakładania się pokrycia.

List of Publications

Journal Papers

[1] S. Sabeeh, K. Wesołowski. and P. Sroka. "C-V2X centralized resource allocation with spectrum re-partitioning in highway scenario," *Electronics*, vol. 11, no. 2, p.279, 2022. **(100 pt)**

[2] S. Sabeeh and K. Wesołowski, "Congestion control in autonomous resource selection of cellular-V2X," *IEEE Access*, vol. 11, 20 Jan. 2023, pp. 7450 - 7460, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238466, **(100 pt)**.

International Conference Papers

[3] S. Sabeeh, P. Sroka, and K. Wesołowski, "Estimation and reservation for autonomous resource selection in C-V2X mode 4," in *Proc. 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, 8-11 Sept. 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIMRC.2019.8904095. **(70 pt)**

[4] S. Sabeeh, and K. Wesołowski, "C-V2X mode 4 resource allocation in high mobility vehicle communication," in *Proc. 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, Sept. 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIMRC.48278.2020.9217297. **(70 pt)**

[5] S. Sabeeh and K. Wesołowski, "Resource re-selection with adaptive modulation and collision detection in LTE V2X mode 4," in *Proc. 2021 IEEE 32nd*

Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Helsinki, Sept. 2021, pp. 1005-1010, doi: 10.1109/PIMRC.50174.2021.9569449. **(70 pt)**

[6] S. Sabeeh, "Centralized resource allocation latency of SideLink communication in NR V2X," in *Proc. The 4th International Workshop on Intelligent Communication Network Technologies (ICNET-4) accompanying the IEEE 96th Vehicular Technology Conference - VTC 2022-Fall*, Helsinki, Sept. 2022. **(70 pt)**