

推薦論文

Cellular V2X Sidelinkにおける高信頼・低遅延な
スケジューリング法の提案と評価瀬川 洋介¹ 上野 高明² 大岸 智彦² 湯 素華^{1,a)} 小花 貞夫¹

受付日 2021年5月31日, 採録日 2021年12月3日

概要: 近年, 次世代の Vehicle-to-Everything (V2X) 通信手段として, LTE や 5G に代表される移動体通信を利用した Cellular V2X (C-V2X) が注目されている. 特に, 基地局の支援なしに狭域で直接通信を行う Sidelink (SL) は, 車載センサでは検知できないより広範囲かつ多様な情報収集のために利用される見込みのため, SL の高信頼・低遅延化は重要な課題の 1 つである. これを解決するために, 筆者らは先にパケット衝突検知機能を持ったスケジューリング方式の提案を行ったが, その検知能力は限定的かつより安全な無線リソースを選択するためのパケット衝突回避手法が検討されていなかった. 本稿では, C-V2X SL において, 高信頼・低遅延なリソースの自律分散スケジューリング方式を実現するために, クラスタリングを利用したリソースの一元管理による衝突検知手法とリソース選択時のフィードバックに基づく重み付けを利用した衝突回避手法を組み合わせた方式を提案する. シミュレーション評価により, 既存方式と比較して提案方式では, 最も輻輳が大きい設置車両台数 500 台の都市環境において, パケット受信率が 14.0% 向上, 遅延時間を 10.7% 削減できることを確認した.

キーワード: 高度道路交通システム, セルラ V2X, サイドリンク, SPS, 衝突検知, 衝突回避, クラスタリング

High-reliable and Low-latency Scheduling
Method for Cellular V2X SidelinkYOSUKE SEGAWA¹ TAKAAKI UENO² TOMOHIKO OGISHI² SUHUA TANG^{1,a)} SADA OOBANA¹

Received: May 31, 2021, Accepted: December 3, 2021

Abstract: Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X), as a next-generation V2X communication technique based on cellular communication that is represented by LTE and 5G, has attracted much attention recently. Sidelink (SL) of C-V2X, which is expected to disseminate various information in a wide and non-line-of-sight (NLoS) area via direct inter-vehicle communication without base stations, however, faces the challenges of high reliability and low latency. To meet these requirements, in our previous work, we have proposed a distributed scheduling method with the collision detection function, although its detection capability is limited. Therefore, in this paper we propose to combine collision avoidance (for reducing the collision probability) and collision detection (in case collisions happen). Specifically, vehicles are divided into clusters and clustering-based resource management is used to reduce collisions via the control with feedback in times of resource selection, and help collision detection via collision notification. Simulation results confirm that compared with the basic method, the proposed method improves packet reception rate by up to 14.0 % and reduces latency by up to 10.7%, in the severe urban scenario with 500 vehicles.

Keywords: ITS, cellular V2X, sidelink, semi-persistent scheduling, collision detection, collision avoidance, clustering

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo
182-8585, Japan

² KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc., Fujimino, Saitama 356-8502, Japan

a) shtang@uec.ac.jp

本稿の内容は 2020 年 6 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2020) シンポジウムにて報告され, 高度交通システムとスマートコミュニティ研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

1. はじめに

道路交通の安全性・利便性向上を目的として、ITS（高度道路交通システム）や自動運転技術の高度化に資するため、車とすべてのモノがつながる V2X (Vehicle-to-Everything) 通信の技術開発が急務となっている [1]。近年、次世代の V2X 通信手段として、LTE や 5G に代表される移動体通信を利用した Cellular V2X (C-V2X) が注目されている。C-V2X では、狭域で直接通信する Sidelink (SL) と基地局を経由した広域通信をサポートしている [2]。特に、SL は車載センサ（カメラ、LiDAR 等）では検知できないより広範囲・多種多様な情報収集のために、近接車両との定期的な情報共有に利用される見込みである。これらの情報は事故防止に関わるため、SL の高信頼・低遅延化は重要な課題の 1 つである [3]。

C-V2X SL では、同一周波数（サブチャネル）および時間軸（サブフレーム）で囲まれたリソースブロック（Resource Block: RB）内から、送信に必要な量の RB を選択して、このリソース上で一定期間パケットを送信する。SL では、使用する無線リソースを基地局が管理する Mode 3 をサポートしているが、支援範囲は基地局通信範囲内に限られており、同じ通信事業者（キャリア）どうしでないと通信できない [4]。また、近接車両どうしが自律分散制御でリソースを選択して無線通信する Mode 4 もサポートしている。しかし、自律分散制御による車車間通信では、信頼性を向上させるために見通し外や通信範囲外に位置する隠れ端末の問題を考慮しなければならない。たとえば Mode 4 において、隠れ端末どうしが同一リソースを選択したとき、隠れ端末の影響下に存在する複数車両間でパケット衝突が発生し、信頼性低下を招く可能性がある。これは、Mode 4 ではパケット衝突が発生した際に、自律的に検知・回避するための方法がないため、持続的にパケット衝突が発生するからである。また、パケット生成時刻と送信時刻が異なる場合、この差がスケジューリング遅延として加算される問題がある。

本稿では、C-V2X SL Mode 4 において、高信頼・低遅延なリソースのスケジューリング方式を提案する。はじめに、近接する車両間でクラスタを形成し、クラスタヘッドが他クラスタに対して衝突を示唆するリソース情報をパケットに付加して送信することで、近接車両間におけるパケット衝突を、自車両で自律的に検知できるようにする。また、近接車両から収集したリソースの使用状況（フィードバック情報）を基に、再選択候補のリソースごとに信頼性と遅延性能を反映した重み付けをすることで、優先的に高信頼・低遅延なリソースの再選択ができるようにする。以上の提案方式の有効性を、シミュレーションを用いて評価する。

以降、2 章では C-V2X SL の概要、3 章では提案方式の

ベースとなる先行方式および関連研究とその課題について述べる。4 章では提案方式を述べ、5 章では提案方式のシミュレーション評価と考察を行う。最後に、6 章では結論と今後の課題を述べる。

2. C-V2X SL の概要

C-V2X は、移動通信システムの仕様策定を行う国際標準化団体 3GPP (Third Generation Partnership Project) で、2017 年 3 月に Release 14 (LTE-V2X) [5] として標準化作業が完了した。C-V2X のさらなる性能強化に向けて、2020 年 7 月に作業が完了した Release 16 (NR-V2X) [6] では、5G-NR を用いた URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communication: 超高信頼低遅延通信) の拡張および V2X ユースケースの強化が行われた。3GPP では、C-V2X における車車間直接通信方式を Sidelink (SL) と呼称しており [7], [8], 通信には PC5 インタフェースを用いる [9]。

SL でパケットを送信するためには、図 1 で示すように、車両 (User Equipment: UE) が周波数軸 (サブチャネル) と時間軸 (サブフレーム) で囲まれた矩形の無線リソースである、CSR (Candidate Single Sub-frame Resource) を選択する必要がある。CSR は、データチャネル (Physical Sidelink Shared Channel: PSSCH) とデータチャネルに隣接した制御チャネル (Physical Sidelink Control Channel: PSCCH) から構成されている。さらにこれらは、最小単位となる RB の集合で構成されており、パケットサイズおよび MCS (Modulation and Coding Scheme) に基づいて RB 量を決定する。たとえば、MCS 9 (QPSK, Coding Rate = 0.7) を使用すると、12RB で構成される CSR を利用して、190 byte のパケットを送信できる [13]。パケット送信に利用するリソース (CSR) 内において、車両情報 (位置、速度等) を PSSCH へ、次回使用するリソースの予約情報等を PSCCH に含め、定期的にはパケットを送信する。

LTE-V2X のリソーススケジューリングでは、基地局がリソースを集中管理する Mode 3、近接車両間において自律分散制御で管理する Mode 4 をサポートしている。NR-V2X

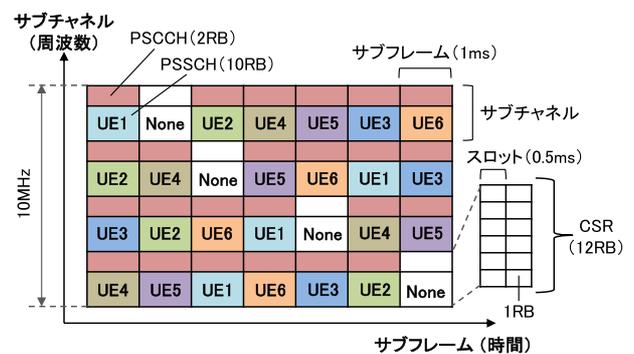


図 1 LTE-V2X SL におけるチャネル構成
Fig. 1 LTE-V2X SL channel structure.

では、Mode 1 と Mode 2 がそれぞれ LTE-V2X の Mode 3, Mode 4 に相当する。

2.1 Mode 3

Mode 3 では、基地局が自身のエリア内に存在する C-V2X 車両のリソーススケジューリングを集中制御で行う。スケジューリングのために、基地局に集約された膨大な情報とそれら进行处理できる演算能力を持つため、信頼性やスケジューリング遅延等の異なるアプリケーション要件を考慮した柔軟な割当てが可能となる。一方、Mode 3 のスケジューリングは基地局のカバレッジ内に限られている [10]。さらにスケジューリングは、同じ通信事業者（キャリア）と契約する車両に限定される [4]。異なるキャリアどうしの車両では、異なるスケジューリング下での通信となるため、信頼性に大きな影響を与える。

2.2 Mode 4

Mode 4 では、各車両が自律分散制御でリソーススケジューリングを実施する。基地局カバレッジ外においても利用可能であるため、山間部や災害時等、通信インフラが整っていない環境でも使用可能である。また、全車両が共通の周波数を利用して通信するため、キャリアに関係なくスケジューリングができる。Mode 4 の利用に際しては、使用する地域や環境に合わせて事前のパラメータ設定が必要となる [11]。自律分散制御では、各車両がチャネルセンシングおよび SPS (Semi Persistent Scheduling) 方式を利用し、パケット衝突の可能性が低いリソースを一定期間使用して、パケットを送信する。以下に、SPS 方式により新たなリソースを再選択する手順を示す。

2.2.1 チャネルセンシング

はじめに、各車両は SL で使用するチャネルのリソース使用状況を監視するために、現在のサブフレームの時刻を t (単位は ms)、送信周期を RRI (Resource Reselection Interval) として、 $t - 10 \times \text{RRI}$ [ms] から $t - 1$ [ms] の範囲で定義される、センシングウィンドウ内の全リソースの平均受信信号強度 $I_{f,t}$ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) を計測する (f はサブチャネル、 t はサブフレームの時刻)。

$$I_{f,t} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \text{RSSI}_{f,t-i \times \text{RRI}} \quad (1)$$

たとえば、RRI を 100 ms に設定したときは、過去 1 s 間の全リソースの受信電力状況をつねに監視することになる。

2.2.2 再選択候補の特定

測定した平均受信電力を基に、選択ウィンドウ内から候補となるリソース集合を特定する。選択ウィンドウとは図 2 で示すように、 $[t + T_1, t + T_2]$ ($T_1 \leq 4$ [ms], $20 \leq T_2 \leq 100$ [ms]) の範囲で定義される時間であり、SL で使用可能な選択ウィンドウ内すべてのリソース集合を

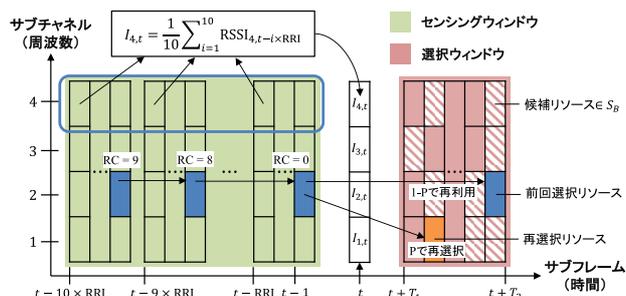


図 2 SPS 方式によるリソース再選択手順
Fig. 2 Reselection of resource with the SPS algorithm.

S_A とする。次に、センシングによって測定した各リソースの RSSI に対して、受信電力 (Reference Signal Received Power: RSRP) 閾値以上のリソースは干渉が大きいと判断し、それらを集合 S_A から除外して、 S'_A を形成する。以上の操作を、 $|S'_A|$ が $|S_A|$ の 20% 以上になるまで、RSRP 閾値を 3 dB ずつ増加させて繰り返す ($|S|$ は集合 S の要素数)。

2.2.3 リソース再選択

特定した干渉が小さいリソース集合 S'_A において、 $I_{f,t}$ が小さい順に並べ替えを行い、 S_A の先頭から 20% となるリソース候補を再選択集合 S_B とする。車両は、使用中であるリソースの残り使用回数を示す再選択カウンタ (RC) が 0 となったときに、再選択確率 (P) に従い、現在使用中のリソースを継続利用せずに、 S_B 内からランダムにリソースの再選択を行い、RC を再設定する。RC の初期値は、RRI によって定められ、RRI が 100 ms のときは [5, 15] の整数値からランダムに選択し、パケット送信時に RC を 1 ずつ減算する。1 - P の確率で、使用中のリソースを継続利用し、RC のみ再設定する。

3. 関連研究と課題

3.1 信頼性に関する研究

文献 [12] では、リソース (再) 選択時における衝突を防ぐために、仮予約を利用した 2 段階自律無線リソース選択法が提案されている。RC が 0 の送信では、次回の予約情報はパケットに含まれていないが、仮予約情報として次の再選択候補のリソース情報を含めて送信し、選択ウィンドウ開始までに受信したパケットから同じ仮予約がない場合、その仮予約を本予約とすることで、2 段階に分けたリソース再選択を行う。これにより、本来再選択時に衝突していたリソースを回避することが可能となる。

SL Mode 4 では、基地局の支援なしで動作することが前提となるため、事前に設定されるパラメータは特に重要である。Mode 4 において、多様な V2X ユースケースに対応するため、適切なパラメータ設定が検討されている [13], [14]。特に文献 [13] では、再選択確率と輻輳の関係性について解析しており、高輻輳環境では、再選択確率の低下が必ずしも信頼性の向上につながるとは限らないこと

を示している。SLでは、輻輳時にパケット衝突によりパケットロスが増加することが知られている [15]。そこで、輻輳制御として各車両が計測するチャンネル使用率 (Channel Busy Ratio: CBR) と自車両の使用率であるチャンネル占有率 (Channel occupation Ratio: CR) により、CBR が規定値を超えると CR を調整するために、パケットドロップ (送信周期の変更) をすることで輻輳を抑える分散輻輳制御 (Distributed Congestion Control: DCC) が検討されている [16]。さらに、チャンネルセンシングを基にした輻輳制御も存在し、文献 [17] では輻輳に応じて送信電力の動的調整により送信範囲を変えることで、パケット受信率の向上に努めている。また、車車間直接通信手段として、SL 以外にも DSRC (Dedicated Short Range Communications) が C-V2X よりも以前から検討されている。文献 [18] では両者の比較がなされているが、特定のシナリオでは遅延時間の観点に対して、DSRC に優位性が見られるものの、C-V2X で高度化された物理層等により、信頼性の観点からは SL の方が高いパフォーマンスを発揮できることが示されている。

3.2 提案方式のベースとなる先行方式

筆者らは、既存の SPS 方式では、1 度パケット衝突が発生すると RC が 0 になるまで衝突が続くことを問題視したため、SPS 方式における近接車両を利用した衝突検知手法を先に提案した [19]。本稿では、この方式を SPS with Collision Detection (SPS-CD) 方式と呼称する。SL は半二重通信であり、パケット送信中は他車両からのパケットを復号できないため、現在自身が使用するリソースの衝突を検知するのは困難である。そこで、自身とは異なるリソースを選択する近接車両が検知したリソースごとの衝突情報を定期的に送信するパケットに付加することで、受信車両は自身が選択しているリソースと照合し、衝突の有無を検知できる。

衝突検知では、受信車両側でパケット衝突が発生したときに、受信信号の RSSI が高く復号に十分な大きさであるにもかかわらず、干渉の影響で SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) 低下により復号できないときに、当該リソース上で衝突が発生したと推測できる。衝突情報により衝突を検知した場合は、自身が現在使用するリソースでの次回送信時に RC を 0 として送信し、その次の送信周期のはじめにリソースを再選択する。

3.3 関連研究をふまえた課題

2 段階自律無線リソース選択法 [12] では、リソース (再) 選択時の信頼性向上にはつながるが、トポロジの変化により RC が 0 となる前にパケット衝突が発生した場合は、衝突を検知できないため、持続的な衝突が発生する。また、事前のパラメータ設定では、初期パラメータが重要となる

が、交通は流動的でありトポロジが急変する場合もあるため、自律分散制御では特に現環境に対応してパラメータを動的に調整する必要がある。次に輻輳制御として、1) パケットドロップ [16] や、2) 送信電力の制御 [17] が検討されているが、どちらも大きく信頼性を下げる要因となりうるため、定期的に送信するパケットに対しては、輻輳制御以外での信頼性を保つ方法の検討が重要である。また、遅延の観点からは、5G-NR のようにミニスロット単位でスケジューリングができるようになることで、時間分解能が向上し、遅延の削減効果も期待できる [20]。しかし、C-V2X SL において、遅延増大の根本的な課題であるスケジューリング遅延に関しての検討例は少なく、信頼性と遅延を両立させる研究はまだ検討の余地が残されている。

先行方式では、各車両が検知したリソースの衝突情報をパケットに付加して配信することで、自車両での衝突検知を可能としている。しかし、衝突情報を受信した車両が衝突を検知したときは必ず再選択が実行されるため、他の同一リソースを選択していた車両と近いタイミングで再選択を実施する。再選択が必要となるのは、同一リソースを選択する車両が存在するためなので、仮に 2 台以上の車両間で衝突が発生したとき、リソース効率の観点から、1 台の車両は当該リソースを使い続けるべきである。しかし、衝突車両どうしは協調できないため、互いの情報を持っておらず、衝突情報を受信したときに自身が再選択すべきかどうかの判断基準を持っていない。そこで、解決策の 1 つとして、車両がある基準に基づいたグループ分け (クラスタリング等) ができれば、衝突車両が自分と同じグループに存在するかどうかを確認し、再選択の判断をすることが可能だと考えられる。

また、先行方式では、衝突検知は可能であるが、再選択においては、SPS 方式に従ってリソースが選択される。しかし、SPS 方式では、自身の通信範囲内の干渉は考慮できるが、通信範囲外の車両である隠れ端末を考慮できないため、文献 [12] のようにパケット衝突を回避する手法が必要である。

一般的に車車間通信では、信頼性と遅延時間はトレードオフの関係にある。たとえば SL では、選択ウィンドウサイズに比例して選択できる送信候補が増えるため、信頼性向上につながる。しかし、選択ウィンドウサイズの拡大により、パケット生成から大きく離れたスロットで送信する車両が存在する場合、そのスケジューリング遅延は増大する。そのため、単純に干渉が小さいリソースを選ぶだけでなく、V2X アプリケーションの要求に従って、スケジューリング遅延の小さいリソースの選択を考慮した、信頼性と遅延を両立可能な手法が求められている。

4. 提案方式

4.1 概要

隠れ端末を考慮した衝突回避手法として、車車間で交換されるパケットにリソースの使用状況に関する情報（付加情報）を加えて送信し、これを再選択リソースへの重み付けに利用する手法を提案する。また、複数車両が同一リソースを選択してパケット衝突が発生した際に、衝突検知によりすべての衝突車両ではなく、1台の車両が同一リソースを使い続けるために、クラスタリングを用いた方式を提案する。図 3 に、提案方式のフレームワークを示す。

4.1.1 パケット送信時動作

各車両は、自車両が予約したリソースでの送信機会ごとに、RC を減算する。RC が 0 に達すると再選択確率（デフォルトでは 1.0 とする）に従いリソースを再選択する。RC が 0 より大きい場合、パケットを送信する前に後述のクラスタを利用してパケット衝突を検知したときは、RC の値によらずリソース再選択をトリガする。再選択時は、事前に収集した監視リソースでの受信可否情報（フィードバック情報）から、信頼性と遅延の重み付けをしたリソース内で再選択を行い、生成したパケットを送信する。この際、形成したクラスタ内に存在する、クラスタヘッド (CH) とクラスタメンバ (CM) で、生成パケットに付加する内容を変える。CM は、自車両が収集したフィードバック情報を付加し、CH は、自車両のフィードバック情報に加えて、自クラスタ内のリソース使用状況を付加して送信する。

4.1.2 パケット受信時動作

信号をチャンネルから受信したとき、パケットを復号できなかった際に原因が衝突だと推測した場合は、信号を受信したリソースに対応するフィードバック値 (F 値) をカウントする。パケットを復号できたとき、CH からのパケットであった場合は、付加内容から衝突を検知できるか確認する。衝突があった場合は、パケット送信時にリソース再選択をトリガする。その後、受信したフィードバック情報

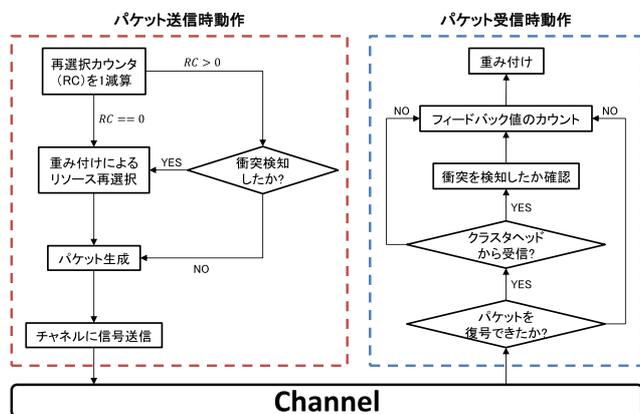


図 3 提案方式のフレームワーク

Fig. 3 Framework of the proposed method.

を F 値のカウントに利用する。CM からパケットを受信したときも同様に、F 値をカウントする。計測した F 値は、リソース再選択時の重み付けに利用する。

4.2 クラスタを利用したパケット衝突検知

4.2.1 固定座標を利用したクラスタ形成

衝突検知後、1台の車両が同一リソースを使い続けるための再選択の判断基準を作るために、CH がクラスタリングを利用したリソースの一元管理と近接車両に対するリソース使用状況を配信する。ただし、基地局等の集中制御システムが使用できないという前提のため、各車両が自律分散制御でクラスタを形成しなければならない。しかし、SL の通信では、衝突により正しく相手に通信を届けられるとは限らないため、通信によらず一意に定まるクラスタ形成手法が必要となる。

各車両が、一意に所属するクラスタを定めるために、図 4 で示すように固定の座標情報を利用する。車両は自身の位置を正確に知ることができるものとし、現在地から最も近い固定座標を自身の所属クラスタとする（クラスタは固定座標に紐づく情報）。そのため、都市では移動しないかつ見通しの良い交差点の中心を固定座標として用いる。高速道路等の直線道路では、道路上に一定間隔でクラスタの中心となる固定座標を設ける。車両は他車両から受信したパケット内の座標情報から、他車両がどのクラスタに所属しているか判断できる。クラスタ内では、クラスタ情報を一元管理して送信する役目を持つ CH、それ以外の同じクラスタに所属する CM に分かれている。CH は固定座標の中心に一番近い車両が担うものとし、各車両との位置関係を SL で互いに取得した位置情報で推測して、自身が一番近いと判断したときに CH としての役割を自律的に実行する。ただし、パケットロス等により複数の車両が CH となり送信する場合もあるが、CH は必ず 1台のみでなくても問題はない。所属クラスタの更新は、つねにパケット生成タイミング前で行われる。また、移動により前周期と異なるクラスタに所属するときは、次のパケット生成タイミングまで移行期間として後述のリソース再選択は行わない。

4.2.2 付加情報

形成したクラスタ内で、使用しているリソース使用情報

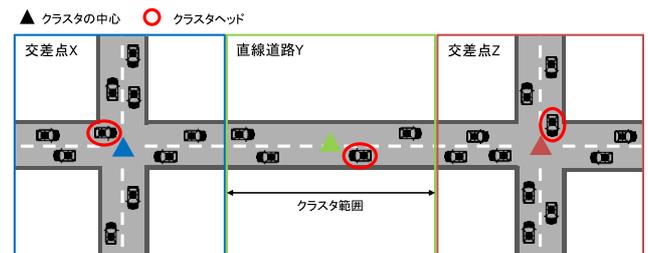


図 4 固定座標を基にしたクラスタとクラスタヘッド

Fig. 4 Clusters at pre-defined location such as intersections.

表 1 リソースごとの付加情報

Table 1 Additional information for each resource.

	CH	CM
0	使用されていない	
1	衝突無しで使用	衝突含め使用中
2	CM が使用中	-
3	衝突有り	-

表 2 SL で用いる拡張メッセージセット [21]

Table 2 Extended message set for SL [21].

領域	データ構造	内容	サイズ (byte)
共通領域	共通アプリヘッダ領域	共通領域管理情報	8
		時刻情報	4
	共通アプリデータ領域	位置情報	11
		車両状態情報	9
		車両属性情報	4
自由領域 (付加情報)	自由アプリヘッダ領域	自由領域管理情報	1
		個別アプリデータ管理情報	3
	自由アプリデータ領域	付加情報	12.5 or 25

および収集した監視リソース（送信時刻を除いて信号を受信可能なリソース）の受信可否情報（フィードバック情報）を、周囲の車両と共有するために、パケットにこれらの情報を付加情報として追加する。CH と CM では、付加する情報量が異なる。CH は、自クラスタの CM が使用するリソース使用情報および監視リソースのフィードバック情報をパケットに付加する。CH からのパケットを受信した車両は、クラスタ内のリソース使用情報から、リソース再選択が必要か判断する。CM は、フィードバック情報のみを付加して送信を行い、受信車両は、これらの情報を後述の重み付けに用いる。CM からの情報では、再選択の判断はしない。

付加する情報量は 1 つのリソースに対して、CH は 2 bit (0, 1, 2, 3), CM は 1 bit (0, 1) である。表 1 に付加情報の種別を示す。0 は当該リソース上で、パケット衝突なしで、信号を受信していない状況を示す。1 は、CH の場合、当該リソース上でパケット衝突なしに受信信号を復号できたことを示し、CM の場合、パケット復号の可否によらず信号を受信したとき、つまり当該リソースが 1 台以上の車両に利用されていることを示す。2 および 3 は、CH のみが付加する番号である。2 は、CH が属するクラスタの CM が使用するリソースに対して格納され、3 はクラスタによらず、パケット衝突があったと推測できた際に格納される。

表 2 に、文献 [21] を基にした SL で送信するパケット

のメッセージセットを示す。クラスタ内のリソース使用情報およびフィードバック情報の付加量は、選択ウィンドウサイズ（全リソース量）によって変化する。リソース 1 つ (CSR) に対して、表 1 のように 2 bit もしくは 1 bit の情報が付加されるため、全監視リソースの情報を送るためには、選択ウィンドウサイズと同じだけのリソース情報を送れば十分となる。そのため、付加量は 1 リソースに付加する情報量と選択ウィンドウサイズ T_2 、そしてサブチャネル数との積で計算できる。

表 2 において、自由領域がデフォルトから拡張された領域であり、CH はリソースの使用情報およびフィードバック情報を 25 byte, CM ではフィードバック情報として、12.5 byte がオーバーヘッドとしてパケットに付加される（本稿では、 $T_2 = 100$ ms, サブチャネル数を 1 とする）。

4.2.3 再選択手法

CH は、フィードバック情報に加え、自身が推測したパケット衝突および収集した自クラスタ内のリソース情報の配信を行い、衝突が発生している近接車両に対して、リソース再選択を促す。あるリソースにおいて、CH は衝突があると推測した場合、そのリソースへの付加情報に 3 を含める。もし、衝突の影響が小さく（もしくは、衝突なしにより）パケットを正常に復号化できたリソースにおいて、送信元車両が自クラスタの車両であった場合、CH は 2 を含め、他クラスタの CM の場合は、1 を付加情報として含める。これら以外で、RSSI が低く、使用されていないと推測されたリソースに対しては、0 の情報を含める。CH は、パケット送信ごとに、これらのリソース使用状況を示した付加情報を追加して送信する。

リソース使用情報を受信した車両は、自身が使用しているリソースと照合し、3 が入っていた場合は、原則次のパケット送信後にリソースを再選択する。もし 2 が入っていた場合、送信元の CH と自車両が同じクラスタに属しているときは、フィードバック情報として利用し、再選択はしない。しかし、異なるクラスタに属していた場合は、3 の衝突情報と同様に再選択する。これは、すべての衝突車両に再選択を促進せずに、CH が管理するクラスタ内の CM は、当該リソースを優先して使い続けるためである。

しかし、車両の通信範囲内には自クラスタ以外の CH も存在するため、複数の CH から同じリソースに対して、2 や 3 の付加情報を受信する可能性がある。このような状況下において、すべての受信車両が再選択を実施するのを防ぐために、再選択に判断基準を設ける。各車両には、唯一の車両 ID が付与されている。そこで、複数の CH から衝突を示唆するリソース情報を受信したときに、自身が属する CH の車両 ID が受信した CH の ID よりも一番大きい場合、再選択を実施しない。逆に、自 CH の車両 ID よりも大きい ID の CH から受信したリソース情報により、衝突検知した際は再選択を判断する。これにより、先行方式と

は異なり、受信したリソース情報から衝突検知した際に、全車両ではなく CH と同一クラスタに属する CM の車両が、衝突したリソースを使い続けることができる（必ず1台のみが継続利用するとは限らない）。ただし、輻輳の増加により、衝突検知が頻繁に発生する状況も考えられるため、1度再選択したリソースに対しては RC が 0 となるまで、次の再選択は行わない。

4.3 重み付けリソース選択手法

クラスタを利用したパケット衝突検知により、RC が 0 に達する前にリソースを再選択可能になった。しかし、再選択ができて、SPS 方式では、隠れ端末を考慮できていないため、再度衝突する可能性がある。そこで、衝突検知の際に CH から受信したリソース使用情報と、CM から受信したフィードバック情報をリソース再選択時に利用する。2.2.3 項で説明したように、SPS 方式では受信電力を考慮したうえで、リソースの再選択集合 S_B を形成するが、その後はランダム選択としている。しかし、 S_B において、信頼性は等しいわけではなく、隠れ端末が使用する可能性が高いリソースも存在する。また、選択するリソースによって、スケジューリング遅延も異なる。そこで、各リソースに対して、その使用状況および遅延を考慮した重み付けを行い、低遅延かつ隠れ端末の影響が小さいリソースを優先的に選択する。以下に、重み付けリソース選択手法のアルゴリズムを示す。

- I. 前周期で受信したパケットのうち、あるリソースが使用されていると報告した合計車両数（受信したフィードバック情報からカウント）をそのリソースのフィードバック値 (F 値) とする。
- II. 平均 RSSI の並べ替えをする前の候補集合 S'_A に対して、 F 値が小さい順に S'_A の先頭から (SPS 方式と同様に) 20%以上となるリソース候補の集合を S_B とする。
- III. S_B における F 値の最大値 F_{max} を求める。
- IV. S_B の先頭から i 番目のリソースにおいて、信頼性に対する重み $w_{R,i} > 0$ と遅延に対する重み $w_{L,i} > 0$ を、それぞれ次式のように計算する。

$$w_{R,i} = (F_{max} - F_i + 1)^2, \quad (2)$$

$$w_{L,i} = 1 - \frac{n_i}{T_2}, \quad (3)$$

ただし、 n_i は S_B 内における先頭から i 番目のリソースのサブフレームの時刻 t_i と T_2 により、 $n_i = t_i \bmod T_2$ で計算でき、そのリソースのスケジューリング遅延を示す。

- V. 求めた 2 つの重みの積から S_B 内のリソースの評価値 E_i を算出する。

$$E_i = w_{R,i} \times w_{L,i}, \quad (4)$$

さらに、下記のように正規化する。

i	1	2	3	4	5
n_i	98	68	18	2	44
F_i	0	1	3	5	10
E_i	2.42	32	52.48	35.28	0.56
RE_i	0.020	0.260	0.428	0.287	0.005

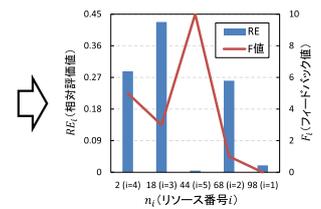


図 5 重み付けリソース選択手法

Fig. 5 Weighted resource selection.

表 3 各方式との機能比較

Table 3 Comparison of key functions among different methods.

	SPS	SPS-CD	SPS-CA/CD
衝突検知	×	△	○
衝突回避	△	△	○
遅延の考慮	×	×	○

$$RE_i = \frac{E_i}{\sum_{j=1}^{|S_B|} E_j}. \quad (5)$$

- VI. RE_i (相対評価値) を各リソースの選択確率とし、 S_B から使用するリソースを選択する。

図 5 に、5 つのリソースでの重み付けの様子を示す。

4.4 提案方式の機能比較

表 3 に、既存方式 (SPS) と先行方式 (SPS-CD) [19]、提案方式 (SPS with Collision Avoidance and Collision Detection: SPS-CA/CD) との機能比較を示す (×は機能なし、△は部分的に機能あり、○は機能あり)。

5. シミュレーション評価と考察

提案方式の有効性を評価するため、ネットワークシミュレータ Scenargie [22] を C-V2X (3GPP Release 14 に準拠) 向けに拡張し、実環境を考慮したシミュレーション評価を行う。

5.1 比較方式

以下の 3 つの比較方式により、シミュレーション評価を行う。ただし、提案方式では、重み付けによる信頼性への影響を比較するため、4.3 節で述べた重みの調整を行い、信頼性と遅延を考慮した最適化だけでなく、信頼性のみ (i によらず重み $w_{L,i}$ の値を 1 に設定) を考慮した最適化についても評価する。

- SPS 方式 (既存方式)
- SPS-CD 方式 (先行方式) [19]
- SPS-CA/CD 方式 (提案方式)

5.2 評価項目

信頼性と遅延性能を定量的に比較するため、パケット受

表 4 シミュレーション条件
Table 4 Simulation conditions.

シミュレータ	Scenargie 機能拡張[22]
シナリオ	Urban : 400×400m Freeway : 3000m
通信方式	C-V2X SL Mode 4
周波数	5.9GHz
帯域幅	10MHz
車両台数	100-500 台 (100 台刻み)
車両速度	Urban : 40-60km/h Freeway : 80-100km/h
送信周期 (RRI)	0.1 秒
送信範囲	Urban : 100m Freeway : 200m
再選択確率	1.0 (default) or 0.2
選択ウィンドウサイズ	100ms
電波伝搬モデル	ITU-RP.1411
シミュレーション回数	20 回

信率と遅延時間を評価項目に加える。また、パケット受信率の向上要因がパケット衝突の削減によるものであることを確かめるため、パケット衝突率もあわせて評価する。以下に、各評価項目の計算方法を示す（受信可否判断数は受信信号強度が一定閾値以上のパケット数とする）。

- (1) パケット受信率：受信パケット数/受信可否判断数
- (2) パケット衝突率：衝突パケット数/受信可否判断数
- (3) 遅延時間：パケット受信時刻 - パケット生成時刻

5.3 シミュレーション環境・条件

シミュレーション環境として、都市を想定した Urban モデルと高速道路を想定した Freeway モデルを用意した。車両台数は、100 台から 500 台まで変化させた 5 つのシナリオを考慮した。パケットサイズは表 2 で示したように、共通領域に加えて先行方式では、衝突情報を 12.5 byte、提案方式では CH が 25 byte、CM が 12.5 byte、情報を付加する。残りの領域は空ビットで埋めて計 190 byte で送信する（サブチャネル数は 1）。デフォルトでは、輻輳によらず SPS 方式の特性を生かすため、再選択確率を 1.0 に設定するが、0.2 に下げたときも評価する。RC は再選択時 [5, 15] の範囲内でランダムに選択される。選択ウィンドウサイズは $(T_1, T_2) = (0, 100)$ [ms] とする。パケット生成は、全車両で同期されたタイミングで行う。近接車両の位置座標は、SL で交換されるパケットにより既知とする。その他の条件を表 4 に示す。

(1) Urban モデル

Urban モデルでは、400×400 m のシナリオを利用する。車両は、シナリオ内の道路上にランダムに配置され、最高

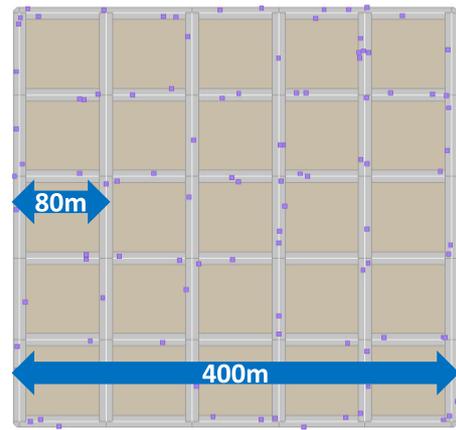


図 6 シミュレーション環境 (Urban モデル)

Fig. 6 Simulation area (Urban model).

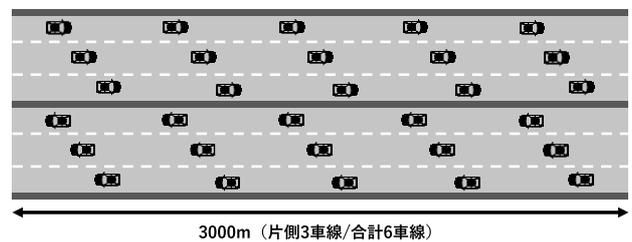


図 7 シミュレーション環境 (Freeway モデル)

Fig. 7 Simulation area (Freeway model).

60 km/h で道路上を移動し、交差点に進入するとランダムに進行方向を決める。道路は、片側 1 (合計 2) 車線であり、道路以外の部分には遮蔽物が設置されている。Urban モデルでは、クラスタ形成のために交差点を利用し、図 6 では計 36 個の交差点が存在する（クラスタ範囲は交差点を中心として直径 80 m の円内）。

(2) Freeway モデル

Freeway モデルでは、道路長が 3 km の直線道路を使用して高速道路を模擬する。Urban モデルと同様に、車両は道路上にランダムに配置され、最高 100 km/h で道路上を移動する。道路は片側 3 (合計 6) 車線であり、道路上および道路外に遮蔽物等は存在しない。高速道路では、車両が高速移動するため、ある程度の車間距離を保つ必要があることから輻輳を抑えやすい。そのため、送信範囲を拡大して 200 m に設定する。また、左右の道路両端に達すると対向車線に車両が移り、反対端に向けて移動する。高速道路には交差点という概念がないので、クラスタ形成のために道路上の一定間隔にクラスタの中心となる座標を設ける。さらに、対向車線どうしは頻繁にトポロジが変化することから、同じクラスタに属する時間が短いため、クラスタを分けて設置する。クラスタ間隔は、送信範囲を考慮し 200 m ごとに設置を行い、3 km の道路上に計 30 個設ける（片側車線 15 個）(図 7)。

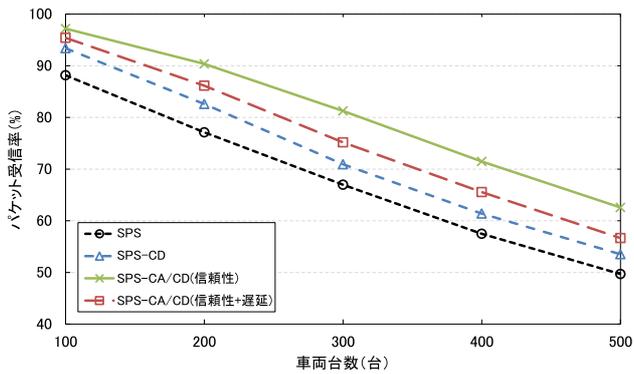


図 8 パケット受信率 (Urban モデル)
Fig. 8 Packet Reception Rate (Urban model).

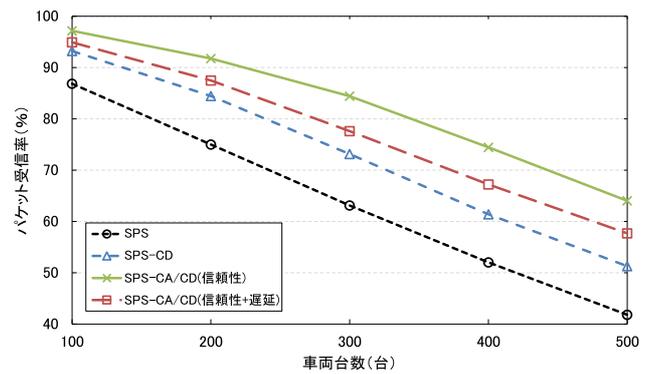


図 10 パケット受信率 (Freeway モデル)
Fig. 10 Packet Reception Rate (Freeway model).

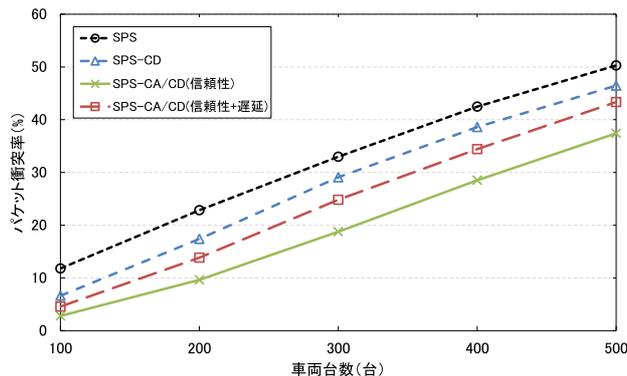


図 9 パケット衝突率 (Urban モデル)
Fig. 9 Packet Collision Rate (Urban model).

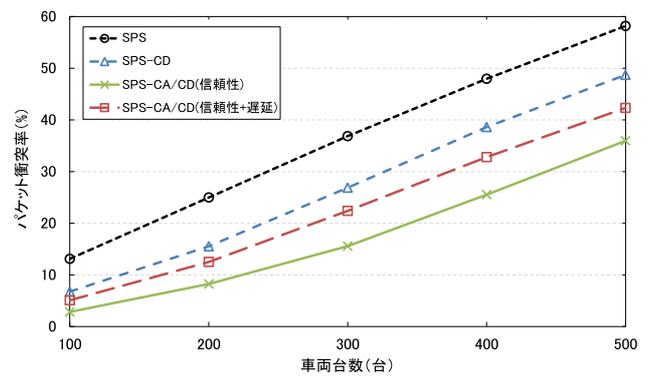


図 11 パケット衝突率 (Freeway モデル)
Fig. 11 Packet Collision Rate (Freeway model).

5.4 シミュレーション結果・考察

5.4.1 パケット受信率とパケット衝突率の評価

(1) Urban モデル

Urban モデルにおいて、比較方式の信頼性を評価するため、車両台数をパラメータとしたパケット受信率およびパケット衝突率の結果をそれぞれ図 8, 図 9 に示す。パケット受信率では、車両台数によらず SPS-CA/CD の方が SPS および SPS-CD よりも高い結果となった。特に輻輳が大きい車両台数 500 台のときでは、SPS と比較して SPS-CA/CD (信頼性+遅延) では相対値で受信率を 14.0%向上させることができることを確認し、車両台数 100 台では、8.2%向上させることができた。また SPS-CA/CD では、信頼性のみおよび遅延との両立を考慮した 2 種の最適化を比較したが、信頼性のみを考慮した方がより高い受信率となることが分かった。これは 3.3 節で述べたように、信頼性と遅延はトレードオフの関係にあるため、遅延を考慮する場合、ある程度の信頼性低下は免れないからである。

(2) Freeway モデル

次に、Freeway モデルにおける信頼性を評価するため、パケット受信率およびパケット衝突率の結果をそれぞれ図 10, 図 11 に示す。図 10 より、Urban モデルと同様に、SPS よりも SPS-CA/CD の方が高い受信率を維持できていることを確認した。SPS-CA/CD (信頼性のみ) と

の比較では、SPS-CA/CD (信頼性+遅延) で若干の劣化が見られるが、これは遅延とのトレードオフによるものである。

Urban モデルと異なる振舞いとして、SPS の受信率劣化が見られた。これは、SPS では、衝突を検知できないため、輻輳の影響をより強く受けたのが原因だと考えられる。SPS 以外では、車両台数増加による劣化が Urban モデルと同程度であった。SPS と比較して、SPS-CA/CD (信頼性+遅延) では、車両台数 500 台のときに、受信率が 38.0%向上した。車両台数 100 台では、9.3%の向上効果を確認した。

Urban モデルと異なり、Freeway モデルの条件では、送信範囲が 200 m かつ遮蔽物がないことにより、さらに高輻輳環境となる。特に遮蔽物がないという条件により、通信範囲内の車両はすべて通信対象となるため、遮蔽物により通信できなかった車両間(隠れ端末)とも通信することができる。そのため、SPS-CD や SPS-CA/CD では、隠れ端末を考慮した衝突検知および重み付け手法の精度向上により、高輻輳環境でも、受信率の維持が可能だったと考えられる。

5.4.2 遅延時間の評価

(1) Urban モデル

Urban モデルの遅延時間を評価するために、車両台数を

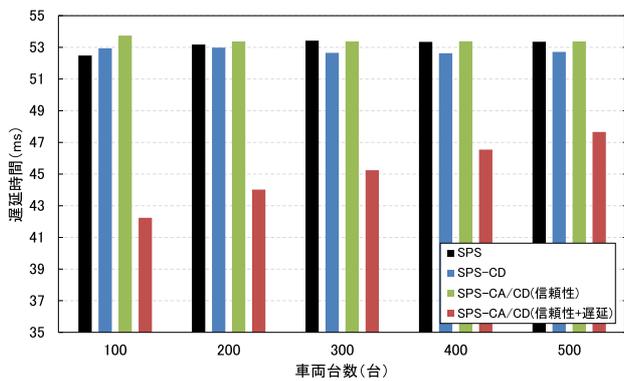


図 12 遅延時間 (Urban モデル)
Fig. 12 Latency (Urban model).

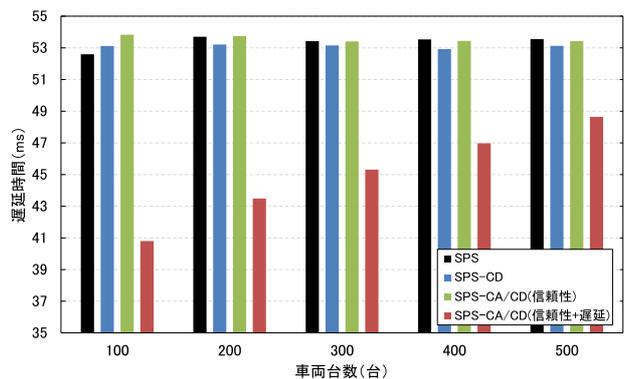


図 13 遅延時間 (Freeway モデル)
Fig. 13 Latency (Freeway model).

パラメータとした遅延時間の結果を図 12 に示す。図 12 より、SPS、SPS-CD、SPS-CA/CD (信頼性のみ) の 3 方式では遅延に対する最適化を実施していないため、車両台数によらず遅延時間に大差はない。しかし、SPS-CA/CD (信頼性+遅延) では、SPS と比較して、車両台数が 100 台のときに最大 19.5%削減可能であることを確認した。車両台数 500 台では、SPS と比較して、10.7%削減できることが分かったが、削減効果は減少している。これは SPS-CA/CD (信頼性+遅延) では、重み付けによりパケット生成時刻に近いサブフレーム時刻のリソースが選択されやすくなっているため、車両台数の増加にともない、遅延の小さいリソースを選択する車両が増えると、衝突が頻繁に発生するため、相対的に遅延時間に対する重み付けの効果が弱まったからだと考えられる。

(2) Freeway モデル

Freeway モデルの遅延時間を評価するために、遅延時間の結果を図 13 に示す。図 13 より、Urban モデルと同様に SPS-CA/CD (信頼性+遅延) 以外の 3 方式の結果は車両台数によらず、誤差程度の違いである。しかし、SPS-CA/CD (信頼性+遅延) では、SPS と比較して、車両台数 500 台では 9.2%削減、車両台数 100 台では最大 22.4%の削減効果が見られた。輻輳発生時は、信頼性が高いリソース候補の減少により、遅延が小さいリソース選択も困難となるため、

遅延時間の削減効果は減少するが、通信範囲内がすべて見通し内となったため、フィードバックにより信頼性が高まり、遅延の最適化に対しても有利に働いたと考えられる。

5.4.3 再選択確率を下げたときの評価

SPS 方式において、再選択確率を下げたときの影響を確認するため、再選択確率を 1.0 および 0.2 としたときのパケット受信率と遅延時間のシミュレーション結果を表 5 に示す。輻輳の大小による影響を確認するため、パラメータとして車両台数 (100 or 500 台) を利用する。また比較は、SPS および SPS-CA/CD (信頼性+遅延) の 2 方式で行う。表 5 より、輻輳状況によらず、再選択確率を下げた方が高い受信率を維持できていることが分かった。これは、再選択確率の低下により、信頼性に対して影響を与えるほどの輻輳を本シミュレーション条件で再現しきれていなかったことが原因の 1 つと考えられる。また、SPS では、再選択確率によらず、Freeway モデルの方が信頼性の劣化が大きかった。一方、SPS-CA/CD では、5.4.1 項で確認したように、確率が 1.0 かつ車両台数 500 台のときに、若干の信頼性向上が見られるが、確率を 0.2 に下げると、受信率をより高く維持できることが分かった。Freeway モデルでは、輻輳は大きい、車両のトポロジが変わりにくいという特徴がある。そのため、1 度リソースを選択すると、長期間使い続ける方がより安全なためである。ただし、文献 [13] で示したように、小さい再選択確率が、つねに信頼性向上につながるわけではないため、より高輻輳な環境において、再選択確率を固定値ではなく輻輳に応じて動的に変更する手法の検討が必要である。

5.4.4 クラスタの配置条件に関する考察

本シミュレーションで設定したクラスタ範囲の条件は、Urban モデルでは直径 80 m、Freeway モデルでは直径 200 m となっている。これは、クラスタの範囲を車両の送信範囲以下に設定したものであり、クラスタの両端に位置する車両間で通信できるようにするためである。また、定期的な位置情報等の交換には、遠方に位置する車両との通信は必要ないため、必然的に送信範囲も短くなることから、クラスタ範囲の大幅な拡大という可能性は低いと考えられる。

また、本稿では、クラスタ範囲が重なる状況でのシミュレーションをしていない。しかし、実環境では、クラスタの設置座標により重なる状況が発生しうる。重なった範囲に位置する車両が、パケット衝突していた場合、その車両群は再選択することとなるが、これは稀な状況だと考えられる。なぜなら、近接車両は提案方式の重み付け手法により、衝突が発生しにくいので、衝突が発生する主な車両群は通信範囲外に位置する車両どうしと考えられるためである。今後、クラスタ範囲による影響を考慮するために、Open Street Map を用いて実環境に即したシミュレーションをする予定である。

表 5 パケット受信率と遅延時間 ($P = 1.0$ or 0.2)
 Table 5 Packet reception ratio and latency ($P = 1.0$ or 0.2).

	パケット受信率 (%)				遅延時間 (ms)			
	Urban		Freeway		Urban		Freeway	
	100 台	500 台	100 台	500 台	100 台	500 台	100 台	500 台
SPS ($P = 1.0$)	88.2	49.7	86.8	41.8	52.5	53.4	52.6	53.6
SPS ($P = 0.2$)	91.7	56.4	90.9	53.9	52.6	53.6	53.3	53.4
SPS-CA/CD ($P = 1.0$)	95.4	56.7	94.9	57.7	42.2	47.7	40.8	48.6
SPS-CA/CD ($P = 0.2$)	98.0	59.6	98.3	68.0	45.1	47.6	44.6	49.0

5.4.5 クラスタ形成のための固定座標に関する考察

本稿では、クラスタを形成するための基準となる固定座標を、各車両が保持しているという前提条件を設けていた。この前提条件の妥当性については、3次元地図データのダイナミックマップ [23] で規定されている静的情報の配信により可能だと考えている。静的情報とは、約1カ月以内に更新される路面情報や3D建物データである。ここで、交差点や道路座標は、ごく頻繁に変わるものではないため、約1カ月ごとの更新間隔で十分だと考えられる。そのため、クラスタ形成のための基準座標を静的情報と見なし、基地局等の集中制御で管理されたデータベースから、前回との差分だけ配信することで、現実的に考えて可能なデータ量の配信で、車両が固定座標情報を保持することが可能だと考えられる。

5.4.6 シミュレーション評価のまとめ

提案方式 (SPS-CA/CD) により、信頼性と遅延を両立させたリソーススケジューリング手法を示すことができた。本研究では、単一サブチャネルのみ利用する条件のため、つねにリソースの空きが少なく、遅延の大きいリソースも使用せざるをえない状況を想定した。そのため、遅延が小さいリソースを選ぶ際は、近接車両と同一リソースを選ぶ可能性が非常に高いと考えられるが、提案方式の重み付けにより、隠れ端末の影響が小さいリソースをなるべく優先して選択できるようにすることで、遅延とのトレードオフによる受信率劣化の低減に貢献した。また、都市環境より相対速度が非常に大きい高速道路環境でも、受信率と遅延性能を高く維持できたことから、5G-NR のようにより高度な V2X ユースケース (相対速度 500km/h) でも、十分に利用可能であると考えられる。さらに、重み付けの最適化手法として、本稿では信頼性と遅延の両立を目指すべく設計したものであるが、重み付けの計算を柔軟に変更することで、異なる V2X アプリケーションの要求にも対応できると考えられる。

6. おわりに

本稿では、C-V2X において、高信頼・低遅延な自律分散制御のスケジューリング方式を提案した。はじめに、ク

ラスタリングを利用したパケット衝突検知により、リソース効率の改善を可能とした。さらに、パケット衝突回避手法として、定期的なパケットの送受信によって得られた、近接車両からのリソース使用情報を用いて、重み付けしたリソースから再選択することで、信頼性だけでなく遅延も考慮したリソーススケジューリングを可能にした。シミュレーション評価により、高車両密度 (車両台数 500 台) の都市環境において、既存方式と比較して提案方式では、パケット受信率を 14.0% 向上、遅延時間を 10.7% 削減できることを確認した。また、低車両密度 (車両台数 100 台) でも、パケット受信率を 8.2% 向上、遅延時間では 19.5% 削減できた。

今後の課題として、1) 複数アプリケーション混在環境、2) 基地局を利用した Mode 3 との併用、3) Open Street Map による実環境に即したモデルでの評価等があげられる。

参考文献

- [1] Zeadally, S., Javed, M.A. and Hamida, E.B.: Vehicular Communications for ITS: Standardization and Challenges, *IEEE Communications Standards Magazine*, Vol.4, No.1, pp.11–17 (2020).
- [2] Seo, H., Lee, K.D., Yasukawa, S., Peng, Y. and Sartori, P.: LTE evolution for vehicle-to-everything services, *IEEE Communications Magazine*, Vol.54, No.6, pp.22–28 (2016).
- [3] Bonjorn, N., Foukalas, F. and Pop, P.: Enhanced 5G V2X services using sidelink device-to-device communications, *Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, DOI: 10.23919/MedHocNet.2018.8407085 (2018).
- [4] Segawa, Y., Tang, S., Ueno, T., Ogishi, T. and Obana, S.: Reliable and Efficient Dissemination of Traffic Events Among Vehicles Associated with Different Operators by Using Cellular V2X, *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, DOI: 10.1109/VNC51378.2020.9318358 (2020).
- [5] 3GPP TR 21.914 (V14.0.0), The 3GPP Summary of Rel-14 Work Items (May 2018).
- [6] 3GPP TR 21.916 (V0.5.0), The 3GPP Summary of Rel-16 Work Items (July 2020).
- [7] 3GPP TS 36.213 (V14.4.0), Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Oct. 2017).
- [8] 3GPP TS 36.321 (V14.4.0), Evolved Universal

Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Sep. 2017).

[9] Chen, S., Hu, J., Shi, Y., Peng, Y., Fang, J., Zhao, R. and Zhao, L.: Vehicle-to-Everything (v2x) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G, *IEEE Communications Standards Magazine*, Vol.1, No.2, pp.70–76 (2017).

[10] Masegosa, R.M. and Gozalvez, J.: LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol.12, No.4, pp.30–39 (2017).

[11] ETSI TS 103 613 (V1.1.1), Using LTE Vehicle to everything communication in the 5.9 GHz frequency band; Access layer specification (Nov. 2018).

[12] Maruko, T., Yasukawa, S., Kudo, R., Nagata, S. and Iwamura, M.: Packet Collision Reduction Scheme for LTE V2X Sidelink Communications, *IEEE VTC-Fall*, DOI: 10.1109/VTCFall.2018.8690903 (2018).

[13] Molina-Masegosa, R., Gozalvez, J. and Sepulcre, M.: Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communication, *Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*, DOI: 10.1109/MSN.2018.00014 (2018).

[14] Gonzalez-Martin, M., Sepulcre, M., Molina-Masegosa, R. and Gozalvez, J.: Analytical Models of the Performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.68, No.2, pp.1155–1166 (2018).

[15] Toghi, B., Saifuddin, M., Mahjoub, H.N., Mughal, M.O., Fallah, Y.P., Rao, J. and Das, S.: Multiple Access in Cellular V2X: Performance Analysis in Highly Congested Vehicular Networks, *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, DOI: 10.1109/VNC.2018.8628416 (2018).

[16] Mansouri, A., Martinez, V. and Harri, J.: A First Investigation of Congestion Control for LTE-V2X Mode 4, *Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, DOI: 10.23919/WONS.2019.8795500 (2019).

[17] Kang, B., Jung, S. and Bahk, S.: Sensing-Based Power Adaptation for Cellular V2X Mode 4, *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, DOI: 10.1109/DySPAN.2018.8610405 (2018).

[18] Bazzi, A., Cecchini, G., Menarini, M., Masini, B.M. and Zanella, A.: Survey and Perspectives of Vehicular Wi-Fi versus Sidelink Cellular-V2X in the 5G Era, *Future Internet 2019*, Vol.11, No.6, p.122 (May 2019).

[19] 瀬川洋介, 上野高明, 大岸智彦, 小花貞夫, 湯素華: Cellular-V2X を用いたリアルタイム情報共有と配信のための無線リソースの効率的なスケジューリング法の提案, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2020) シンポジウム, 6F-1, pp.1079–1087 (June 2020).

[20] Naik, G., Choudhury, B. and Park, J.M.: IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications, *IEEE Access*, Vol.7, pp.70169–70184 (May 2019).

[21] ITS Connect 推進協議会: 車車間通信メッセージ仕様 ITS Connect TD-001 1.0 版 (2015).

[22] Scenarigie, Space-Time Engineering, available from <https://www.spacetime-eng.com/en/>

[23] Shimada, H., Yamaguchi, A., Takada, H. and Sato, K.: Implementation and Evaluation of Local Dynamic Map in Safety Driving Systems, *Journal of Transportation*

Technologies, Vol.5, No.2, pp.102–112 (2015).

推薦文

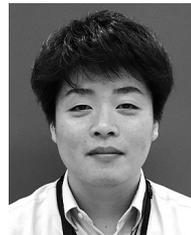
本稿は DICOMO2020 の発表論文の中で特に評価が高かったものである。本稿は、セルラ移動通信技術に基づく車車間通信の安全運転支援の実現に必要な低遅延での情報配信に関して実用的な実現方式を提案し、丁寧なシミュレーションでその効果を明らかにしている。提案内容・評価方法・結果ともに完成度、質が高く、ジャーナル論文としての十分な品質を満たしている。

(高度交通システムとスマートコミュニティ研究会主査
重野 寛)



瀬川 洋介 (学生会員)

2020年電気通信大学卒業。2022年同大学大学院情報理工学研究科情報・ネットワーク工学専攻修士課程修了見込み。車車間通信に関する研究に従事。



上野 高明

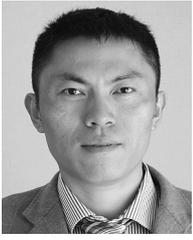
2011年九州大学芸術工学部芸術情報設計学科卒業。2011年KDDI入社。以来、法人向けソリューション業務、メール誤送信防止の研究開発業務に従事。現在、KDDI総合研究所でコネクティッドカー関連の研究開発に従事。

電子情報通信学会員。



大岸 智彦 (正会員)

1992年東京大学工学部電気工学科卒。1992年国際電信電話株式会社(現、KDDI)入社。以来、研究所にて、通信システムの試験、IPネットワークの運用管理、IoT・センサの運用管理、コネクティッドカーの研究に従事。現在、(株)KDDI総合研究所コネクティッドカー2グループリーダー。博士(工学)。電子情報通信学会等会員。



湯 素華 (正会員)

1998年中国科学技術大学電子情報工学科卒業。2003年同大学大学院博士課程修了。工学博士。同年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所研究員。2014年電気通信大学大学院情報理工学研究科助教, 2019年同研究科准教授。アドホックネットワーク, ITS, 省電力無線通信, マルチメディア通信の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE各会員。



小花 貞夫 (正会員)

1953年生。1976年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1978年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現, KDDI(株))入社。パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSIプロトコル実装, データベース, ビデオテックス, 分散処理, ネットワーク管理の研究・開発に従事。2004年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所所長。2011年電気通信大学大学院情報理工学研究科教授。2020年電気通信大学理事。無線アドホックネットワーク, 高度交通システム(ITS), センサネットワーク, ネットワーク低消費電力化等の研究に従事。工学博士。2001年文部科学大臣賞(研究功績者), 電子情報通信学会会員。本会フェロー。