

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏名	瀬川 洋介	学籍番号	2031089
論文題目	C-V2Xにおける高信頼な無線リソースのスケジューリング法に関する研究		
要旨	<p>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 Vehicle-to-Everything（V2X）通信の研究・開発が急務となっている。そこで近年、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、車車間で直接通信可能な Sidelink（SL）と基地局を経由した広域通信をサポートしている。SL は、車載センサでは検知できないより広範かつ多様な情報収集を目的に利用される想定のため、SL の高信頼化に関する検討は重要事項となる。SL では、パケット衝突による信頼性の劣化を未然に防ぐため、ベースアルゴリズムとして SPS（Semi-Persistent Scheduling）方式を採用し、各車両が自律分散制御で安全な無線リソースを選択可能にしている。しかし、SPS 方式では、リソースごとに個別の評価がないため、依然としてパケット衝突の影響を強く受けたリソースを選ぶ可能性がある。さらに、隠れ端末問題により発生する、通信範囲外に位置する隠れ端末との送信衝突に対応できていないなどの問題が存在する。</p> <p>本論文では、はじめに隠れ端末問題を改善すべく、SPS をベースとして隠れ端末との間の車両で発生するパケット衝突車両数をリソースごとに推測する基本方式を検討した。さらに、基本方式では対応していなかった、追加情報により発生するオーバーヘッドと相異なる送信周期を持つ車両との共存を考慮した改良方式を提案する。改良方式では、追加情報を利用せずに通信範囲内の近接車両との間に存在する干渉車両（自車両と近接車両からの通信を受信可能な車両）の数を近接車両が使用するリソースに紐づけて推測する。さらに、推測した干渉車両数を最小化しかつ近接車両との距離を最大化したリソースを優先的に選択することで、パケット衝突の影響を抑制できる。また、相異なる送信周期の最小公倍数先のリソースをスケジューリングに考慮することで、リソース再選択後、将来的に発生するパケット衝突の回避を可能とする。</p> <p>基本方式と改良方式の有効性を確認するため、シミュレーションにより、SPS 方式を含めた比較方式とのパケット受信率とパケット衝突率を比較・評価した。SPS 方式と比較して改良方式により、都市環境（15km/h シナリオ）では、相対値で受信率を約 3.1% 向上、衝突率を約 47% 削減できた。さらに、高速道路環境（70km/h シナリオ）では、受信率を約 11% 向上、衝突率を約 40% 削減できることを確認した。さらに、改良方式を一部車両のみに適用した場合でも、改善効果を確認できたので、改良方式では SPS 方式との後方互換性を持つことが示せた。</p>		

C-V2X における高信頼な無線リソースの
スケジューリング法に関する研究

学籍番号 2031089

氏名 瀬川 洋介

指導教員 湯 素華

副指導教員 策力木格

電気通信大学 情報理工学研究科

情報・ネットワーク工学専攻

2022 年 3 月

C-V2X における高信頼な無線リソースの スケジューリング法に関する研究

瀬川 洋介

概要

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 Vehicle-to-Everything（V2X）通信の研究・開発が急務となっている。そこで近年、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システムを利用した Cellular V2X（C-V2X）が注目されている。C-V2X では、狭域で直接通信可能な Sidelink（SL）と基地局を経由した広域通信をサポートしている。特に 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である。そのため、安全性の高い事故防止を目的の 1 つとする、SL の高信頼化に関する検討は重要である。SL では、パケット衝突による信頼性の劣化を未然に防ぐために、ベースアルゴリズムとして SPS（Semi-Persistent Scheduling）方式を採用し、各車両が自律分散制御で無線リソースを選択可能にしている。しかし、SPS 方式では、統一の基準を満たす選択候補の中からランダムに再選択リソースを選ぶが、リソースごとに個別の評価がされていないため、パケット衝突の影響が大きいリソースが選ばれる可能性がまだ残されている。さらに、隠れ端末問題により発生する、通信範囲外に位置する隠れ端末との送信衝突に対応できていないなどの問題が存在する。

本論文では、はじめに隠れ端末問題を改善するべく、SPS 方式をベースとして追加情報を利用し、隠れ端末との間の車両で発生するパケット衝突車両数を推測する基本方式を検討した。さらに、基本方式では対応していなかった、追加情報によるオーバーヘッドの発生と異なる送信周期を持つ車両間の共存を考慮した、SPS 方式と互換性を持つ改良方式を提案する。改良方式では、追加情報を利用せずに通信範囲内の近接車両との間に存在する干渉車両（自車両と近接車両からの通信を両方受信可能な車両）の数を、近接車両が使用するリソースに紐づけて推測する。さらに、推測した干渉車両数を最小化しかつそのリソースを使用

する近接車両が存在する場合、その車両との距離を最大化したリソースを優先的に選択することで、パケット衝突の影響を抑制できる。また、異なる送信周期に適したスケジューリングのため、相異なる送信周期の最小公倍数先のリソースをスケジューリングの考慮に入れることで、リソース再選択後、将来的に発生するパケット衝突を回避できる。

基本方式と改良方式の有効性を確認するため、シミュレーションにより、SPS方式を含めた比較方式とのパケット受信率とパケット衝突率を比較・評価した。SPS方式と比較して改良方式により、都市環境（15km/h シナリオ）では、相対値で受信率を約 3.1%向上、衝突率を約 47%低減した。さらに、高速道路環境（70km/h シナリオ）では、受信率を約 11%向上、衝突率を約 40%低減できることを確認した。さらに、改良方式では、シナリオ内の一部車両にのみ適用した際にも改善効果を確認でき、共通のパケットフォーマットを利用するため、SPS方式との後方互換性を持つことも示せた。

目次

1. 序論	1
2. 研究の背景と目的	3
2.1. 研究の背景	3
2.1.1. ITS (Intelligent Transport Systems)	3
2.1.2. V2X (Vehicle-to-Everything)	4
2.1.3. DSRC (Dedicated Short Range Communications)	5
2.2. Cellular-V2X (C-V2X)	6
2.2.1. 概要	6
2.2.2. 基地局経由通信	7
2.2.3. サイドリンク	8
2.3. Sidelink と DSRC の比較	12
2.4. 研究の目的	13
3. 関連研究	14
3.1. 二段階無線リソース選択におけるパケット衝突の低減	14
3.2. 異なる送信周期の混在下におけるパケット衝突の低減	14
3.3. チャンネル状態を基にした分散輻輳制御	15
3.4. その他の研究	15
4. 基本方式	17
4.1. 干渉車両の推測	17
4.2. リソース再選択手順	18
4.3. 基本方式をふまえた課題	19
5. 改良方式	20
5.1. 概要	20
5.2. 干渉車両の推測	20
5.3. 異なる送信周期への拡張	22
5.4. IPMI アルゴリズム	25
6. シミュレーション評価	27
6.1. 比較方式	27
6.2. 評価項目	28
6.3. シミュレーション環境・条件	29

6.3.1. 都市モデル (Urban モデル)	30
6.3.2. 高速道路モデル (Freeway モデル)	31
6.4. シミュレーション結果	33
6.4.1. 信頼性の評価	33
6.4.2. 情報更新間隔の評価	37
6.4.3. 可用性の評価	39
6.4.4. 改良方式の機能ごとの評価	41
6.4.5. 再選択確率の評価	43
6.5. シミュレーション評価のまとめ	44
7. 結論	46
謝辞	47
参考文献	48
本研究に関する発表	51

1. 序論

令和3年中(2021年)の交通事故による死亡者数は2636人で、5年連続となる戦後最小を記録している[1]。一方、高齢者(65歳以上)は1520人となり、全年齢に占める割合は約57.7%であり、半数以上を占めている。このような状況をふまえて、走行中のドライバーへの注意喚起や衝突事故防止のための運転アシストを行う安全運転支援システムに代表される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Vehicle-to-Everything(V2X)通信の研究・開発が急務となっている[2]。国内ではすでに700MHz帯や5.8GHz帯で車両情報を共有する車車間・路車間通信が実用化されている[3][4]。

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システムを利用したCellular V2X(C-V2X)が注目されている。C-V2Xでは、狭域で無線基地局を介さずに近接車両間で直接通信可能なSidelink(SL)と、基地局を経由した広域通信をサポートしている[5]。特にSLは、車載センサ(カメラ、LiDARなど)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、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[6]。そのため、安全性の高い事故防止を目的の1つとする、SLの高信頼化に関する検討は重要である。SLでは、パケット衝突による信頼性の劣化を未然に防ぐために、ベースアルゴリズムとしてSPS(Semi-Persistent Scheduling)方式を採用し、各車両が自律分散制御でパケット送信のための無線リソースを選択可能にしている。しかし、SPS方式では、近接車両との干渉が小さい選択候補の中からランダムに割当てリソースを選ぶが、リソースごとの個別評価がされていないため、依然としてパケット衝突の影響が大きいリソースを選ぶ可能性がある。さらに、隠れ端末問題により発生する、通信範囲外に位置する隠れ端末との送信衝突に対応できていないなどの問題が存在する。

本論文では、はじめに隠れ端末問題を改善するべく、SPS方式をベースとして追加情報を利用し、隠れ端末との間の車両で発生するパケット衝突車両数を推測する基本方式を検討した。さらに、基本方式では対応していなかった、追加情報によるオーバーヘッドの発生と異なる送信周期を持つ車両間の共存を考慮した、SPS方式に依存しない改良方式を提案する。改良方式では、追加情報を利用せずに通信範囲内の近接車両との間に存在する干渉車両(自車両と近接車両か

らの通信を受信可能な車両) の数を, 近接車両が使用するリソースに紐づけて推測する. さらに, 推測した干渉車両数を最小化しかつそのリソースを使用する近接車両が存在する場合, その車両との距離を最大化したリソースを優先的に選択することで, パケット衝突の影響を抑制できる. また, 異なる送信周期に適したスケジューリングのため, 相異なる送信周期の最小公倍数先のリソースをスケジューリングの考慮に入れることで, リソース再選択後, 将来的に発生するパケット衝突を回避できる. 基本方式と改良方式の有効性を確認するためシミュレーションにより, SPS 方式を含めた比較方式とのパケット受信率とパケット衝突率を比較・評価した.

以降, 第 2 章では研究の背景と目的を述べ, 第 3 章では関連研究について述べる. 第 4 章では基本方式の手順と課題について述べ, 第 5 章では改良方式の手法について述べる. 第 6 章ではシミュレーション評価の環境・条件とその結果について考察し, 第 7 章では結論と今後の課題について述べる.

2. 研究の背景と目的

2.1. 研究の背景

2.1.1. ITS (Intelligent Transport Systems)

ITS (Intelligent Transport Systems, 高度道路交通システム) とは, 最新の ICT 技術を利用して, 人, 道路, 車両が一体となって構築されることで, 道路交通の安全性, 効率性, 快適性の向上を目指すために提案された, より高度な道路交通システムである. ITS は産学官連携のもとで国家プロジェクトとして推進されており, 現在 ITS に関する取り組みは以下の 9 つの開発分野に整理されている[9].

- 1). ナビゲーションシステムの高度化
- 2). 自動料金収受システム
- 3). 安全運転の支援
- 4). 交通管理の最適化
- 5). 道路交通の効率化
- 6). 公共交通の支援
- 7). 商用車の効率化
- 8). 歩行者等への支援
- 9). 緊急車両の運行案内

特に, カーナビゲーションシステム (カーナビ) は自動車の標準装備として一般化しており, 通信に用いる VICS (道路交通情報通信システム) は全国へと展開されている. また, 自動料金収受システムに代表される ETC では, 高速道路などに設置された路側機と車載器との間で各種情報 (車両情報, 入口, 出口など) を交換することで自車両の高速料金などを確定し, 利用者が一時停止せずに料金の支払いが可能となるため, 料金所での事故や渋滞の緩和に役立っている. またドライバへの安全運転を支援する安全運転支援システム (DSSS) による出会い頭での衝突事故防止や信号, 一時停止などの合図を出すことでドライバの負荷軽減を行っており, これらのシステムを搭載した先進安全自動車 (ASV) の普及も推進されている[10][11].

2.1.2. V2X (Vehicle-to-Everything)

通信の高速・大容量化に伴い、車どうしだけではなく車あらゆるモノ（歩行者、インフラ、ネットワークなど）とつながり情報を共有する V2X 通信の実現化が想定されている。V2X は通信形態に合わせて近距離で通信を行う狭域通信（V2V, V2P, V2I）と広範囲のエリアで通信する広域通信（V2N）に分類されている。

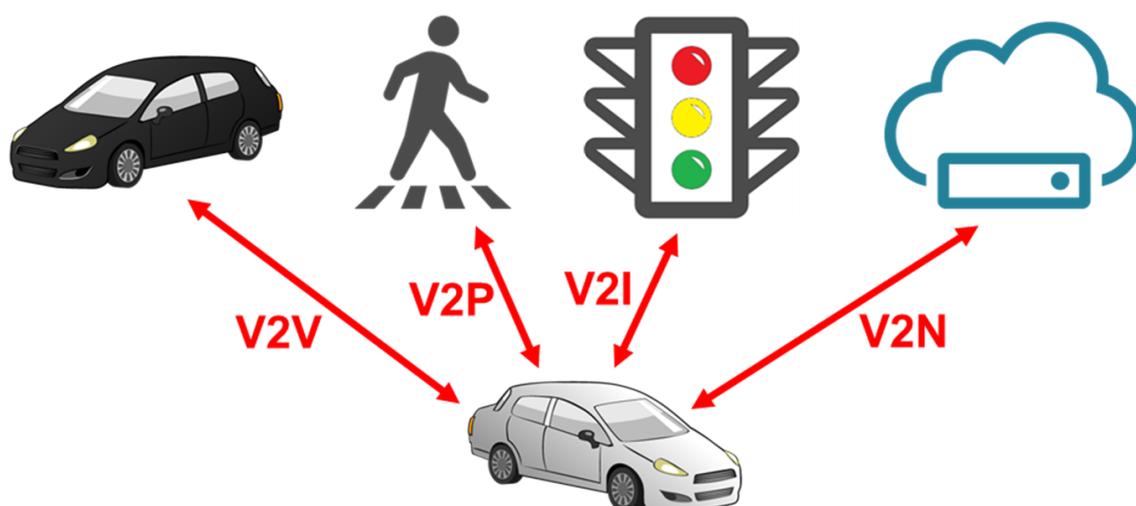


図 1. V2X の通信形態

2.1.2.1. V2V (車車間通信)

車車間通信では車両どうしが自身の車両情報（位置や速度など）を交換することで、出会い頭での衝突事故防止やドライバーへの注意喚起を含む運転アシストを行うために必要なものである。国内ではすでに、700MHz や 5.8GHz 帯で車車間通信が実用化されている。車車間通信はインフラなどが整備されていない山間部などでも利用可能であるが、通信する車両どうしが ITS に対応した車載器を装備している必要があるため、車載器を搭載した車両の普及が課題となっている。

2.1.2.2. V2P（歩車間通信）

歩車間通信では主に信号機などに設置されたカメラや自車両に搭載したカメラ、レーダーなどのセンサ類を用いて周囲の歩行者検知を行う自律型のシステムと車両が歩行者の端末と直接通信によって情報を共有する協調型のシステムがある。協調型のシステムでは自車両のみならず、検知した情報を基に周囲の歩行者への注意喚起なども行うことにより、潜在的な危険を防止できる。

2.1.2.3. V2I（路車間通信）

路車間通信では車両とインフラ（信号機などの路側機等）が無線通信を行うことで、交差点などに設置されたインフラが収集している情報（信号情報、交通規制、路面情報など）を車両が受け取り、ドライバーへの運転支援に利用するものである。路車間通信では車両側にはインフラ端末と通信を行える車載器を搭載する必要がある、インフラ側では主要な交差点などにインフラの整備を行う必要がある。そのため車載器を搭載した車両の普及やインフラ整備のためのコストを考慮すると、利用範囲は限定的となる。また、路車間通信は車車間通信と共用するのが望ましいため、両者の通信は基本的に通信範囲内に存在する端末への同報通信（ブロードキャスト）となるため、交差点などの車両台数が増加するエリアでの輻輳も考慮していく必要がある。

2.1.2.4. V2N（車ネットワーク間通信）

車ネットワーク間通信では従来の狭域通信とは異なり、車両情報をキャリア（モバイル事業者）の基地局を経由して配信できる広域型の通信である。通常V2Nでは車両への車載器に加え、キャリアと契約することでモバイル回線が利用可能となる。またキャリアごとに通信に使用する周波数や基地局設備が異なるため、異なるキャリアどうしでの通信をどのように行うか検討する必要がある。

2.1.3. DSRC（Dedicated Short Range Communications）

DSRCは、車両に搭載された車載器どうし、または路側機と双方向通信することで、有料道路での自動料金収受システム（ETC）や交通安全に関わるユースケースに対応するための無線通信技術である。DSRCは、IEEE 802.11を移動体通

信向けに拡張した IEEE 802.11p (以下 11p) をベースとしており、11p のプロトコルである CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance, 搬送波感知多重アクセス/衝突回避方式) が利用可能であるため、信頼性の高い通信が可能となっている。国内ではすでに一般社団法人電波産業会 (ARIB) によって、ARIB STD-75[4]として規格化されているが、国際的には DSRC の規格は複数存在し、その地域の通信特性や周波数の利用状況などを考慮している。さらに、11p の後継として、IEEE 802.11bd の標準化作業も進められており、11p と比較して少なくとも 2 倍のスループットおよび通信距離を確保 (最大相対速度 500km/h)、11p との後方互換性を持つことを主要な目的としている[12]。次の表 1 は、日欧米 3 か国での DSRC の主要な規格概要である[13]。

表 1 日欧米の DSRC の規格概要[13]

	日本	欧州	米国
規格名	ARIB STD-75	CEN EN12253 等	IEEE 802.11p
周波数帯	5.8GHz	5.8GHz	5.9GHz
通信速度	アクティブ	パッシブ	パッシブ
伝送速度	1or4Mbps	下り : 0.5Mbps 上り : 0.25Mbps	3~27Mbps
通信同時性	路側機 : 全二重 or 半二重 車載器 : 半二重	半二重通信	半二重通信

2.2. Cellular-V2X (C-V2X)

2.2.1. 概要

山間部や災害などによって基地局 (またはコアネットワーク) と通信できない環境における通信手段の確保を目的として端末間での直接通信である D2D (Device to Device) 通信の必要性が高まっている。そこで、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) にて、既存の携帯電話通信網である LTE (Long Term Evolution) 通信を利用した無線基地局を介さない D2D 通信の仕様が策定された (Release 12)。その後、さらなる高速移動体通信に対応するため、3GPP では 2017 年 3 月に Release 14 (LTE-V2X)

として、V2X 通信に LTE (Long Term Evolution) を適用した Cellular V2X (C-V2X) の仕様を策定した[14]. C-V2X の更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) では、5G-NR を用いた URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communication: 超高信頼低遅延通信) への拡張および V2X ユースケースの強化が行われた[15]. C-V2X は、前述の LTE-V2X (Release 14) と NR-V2X (Release 16) の総称として用いられている. C-V2X では、V2X 通信の特徴を生かして狭域通信 (V2V, V2P, V2I) に相当する端末間直接通信 (Sidelink: SL) [16][17]と広域通信 (V2N) に対応した基地局経由通信 (Uplink/Downlink: UL/DL) [18][19]をサポートしている[5]. 通信インタフェースとして、基地局経由通信では Uu インタフェース, SL では PC5 インタフェースを用いる[20]. 次の図 2 では基地局経由通信とサイドリンクにおける通信の違いを示す. ただし、図 2 中の eNodeB (eNB) は LTE 無線基地局のことである. NR-V2X では、図 2 中の eNodeB を gNodeB (5G 無線基地局) に置き換える.

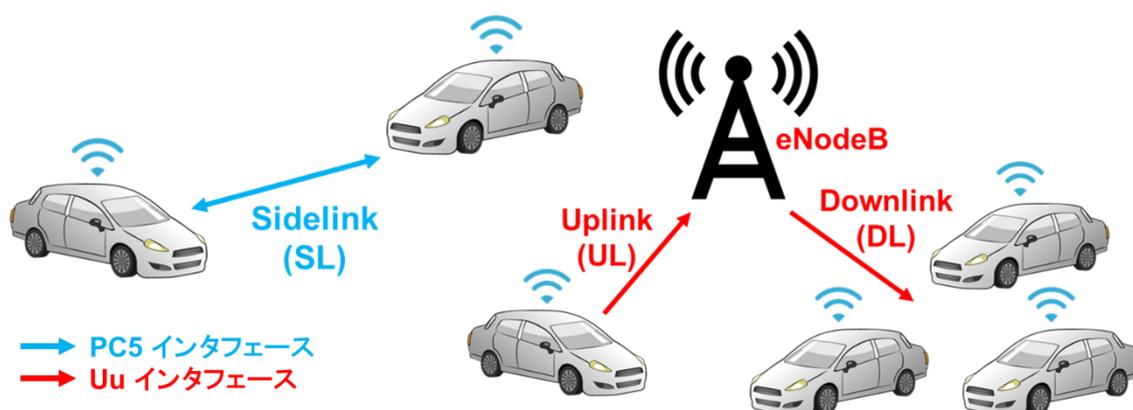


図 2. LTE-V2X の通信方式

2.2.2. 基地局経由通信

基地局経由通信では車両から基地局 (eNB) への通信を上り回線 (Uplink: UL), 基地局から車両への通信を下り回線 (Downlink: DL) で行う. 下り回線では基地局エリア内にいる車両すべてに対してブロードキャストで配信が行われる. 基地局からのブロードキャストには eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service, 基地局間同期配信) と SC-PTM (Single Cell Point to Multipoint, 基地局間非同期配信) が存在する. 基地局経由通信ではコアネットワークを介した通信が

行えるため広範囲での通信が可能だが、上りと下りの往復による遅延時間の増大が課題となっている。

2.2.3. サイドリンク

SL でパケットを送信するためには、図 3 で示すように、UE (User Equipment) 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。以降、本論文では断りがない限り CSR をリソースと呼ぶ。リソースは、PSSCH (Physical Sidelink Shared Channel) と PSSCH に隣接した PSCCH (Physical Sidelink Control Channel) から構成されている。さらに、これらは最小単位となる RB (Resource Block) 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 1 リソース当たりの RB 量を決定する。パケット送信に利用するリソースにおいて、車両情報 (位置、速度など) を PSSCH へ、次回使用するリソースの予約情報等を PSCCH に含め、定期的にパケットを送信する。

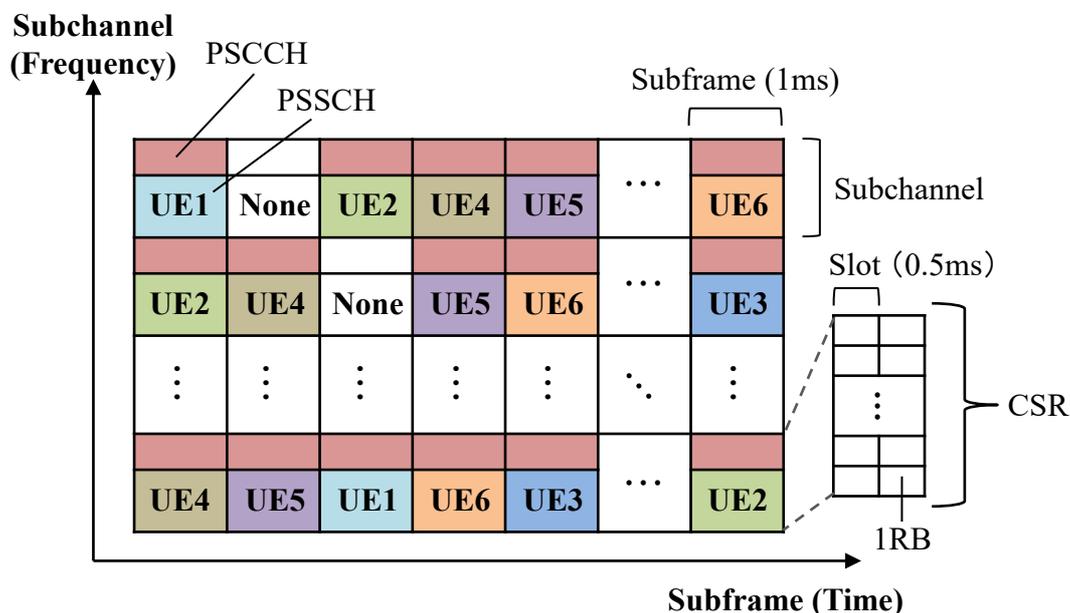


図 3. LTE-V2X のチャネル構成

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 では、Mode 1 と Mode 2 がそれぞれ LTE-V2X の Mode 3, Mode 4 に相当する。本稿では LTE-V2X に焦点を当てるが、NR-V2X への適用も可能である。

2.2.3.1. 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。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、信頼性や許容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。しかし、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おり[21]、対象が同じ通信事業者（キャリア）と契約する車両に限定される[22]。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。

2.2.3.2. 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、山間部や災害時など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[23]。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 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 方式により次回使用するリソースを再選択する手順を示す。

I. 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 Reservation Interval）として、 $t - 1000$ [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 RSSI である $E_{f,t}$ を計測する（ f はサブチャネル、 t はサブフレームの時刻）。

$$E_{f,t} = \frac{\text{RRI}}{1000} \sum_{i=1}^{1000/\text{RRI}} \text{RSSI}_{f,t-i \cdot \text{RRI}} \quad (1)$$

(1) 式より, 例えば RRI を 100ms に設定した時は, 過去 1s 間で 1 リソース当たり 10 個の受信電力状況をつねに監視することになる.

II. 再選択候補の特定

測定した平均 RSSI 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 4 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 \mathbf{S}_A とする. 次に, 以下の条件を満たすリソースを集合 \mathbf{S}_A から除外する. 1) センシングによって算出した各リソースの平均 RSSI に対して, RSRP (Reference Signal Received Power) 閾値以上のリソース, 2) 他車両が予約している自身の選択ウィンドウ内のリソースを集合 \mathbf{S}_A から除外して, \mathbf{S}'_A を形成する. 以上の操作を, $|\mathbf{S}'_A|$ が $|\mathbf{S}_A|$ の 20% 以上になるまで, RSRP 閾値を 3dB ずつ増加させて繰り返す ($|\mathbf{S}|$ は集合 \mathbf{S} の要素数).

III. リソース再選択

特定した干渉が小さいリソース集合 \mathbf{S}'_A において, $E_{f,t}$ に対して昇順に並べ替えを行い, \mathbf{S}'_A の先頭から 20% となるリソース候補を再選択集合 \mathbf{S}_B とする. 各車両は, 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 となった時に, 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, \mathbf{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, $[\text{RC}_{\min}, \text{RC}_{\max}]$ の整数値からランダムに選択する. RC_{\min} と RC_{\max} は RRI を用いて以下のように定義される.

$$\text{RC}_{\min} = \frac{5 \cdot \text{RRI}_{\max}}{\text{RRI}}, \quad (2)$$

$$\text{RC}_{\max} = \frac{15 \cdot \text{RRI}_{\max}}{\text{RRI}}. \quad (3)$$

ただし, RRI_{\max} は想定するアプリケーションの送信周期で最も大きい値である. 設定した RC を用いてパケット送信時に 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.

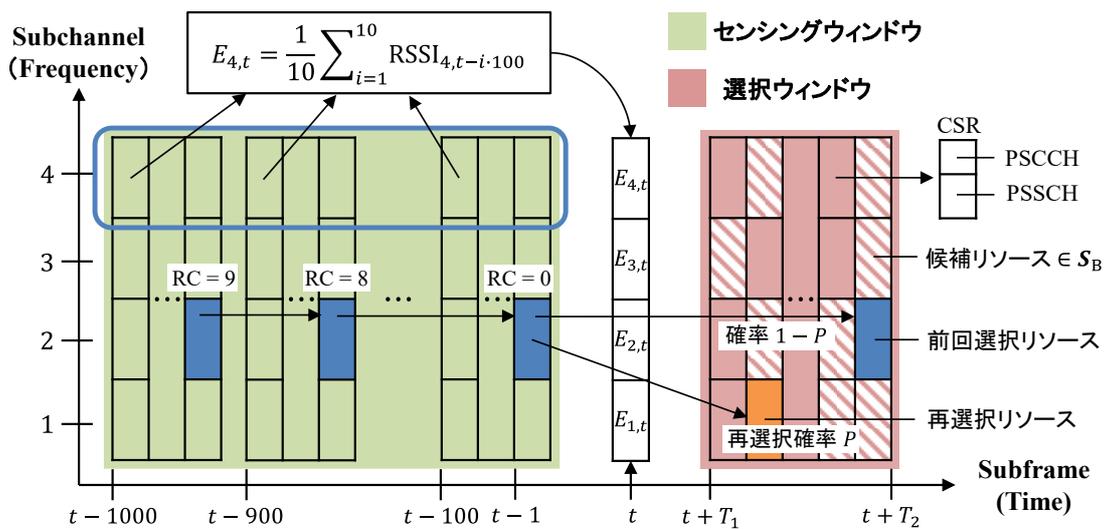


図 4. SPS 方式によるリソース再選択手法 (RRI = 100ms)

2.2.3.3. SPS 方式の課題

(1) 同一リソース選択によるパケット衝突

通信範囲内の隣接車両が自身と同じリソースを選択した場合、自身と隣接車両の両方から通信を受信できる車両でパケット衝突が発生する。SPS 方式では、隣接車両からのリソース予約とセンシングした RSSI を基にリソースを再選択するが、リソースごとの違いについては考慮されていない。しかし、パケット衝突が発生するリソースであっても、その影響を受ける車両台数はリソースごとに異なると推察される。

(2) リソース再選択時の持続的なパケット衝突

自身のリソース再選択時に隣接車両と同じリソースをすると、半二重通信により同一リソースを選択した車両の情報を一定期間更新できない。さらに、同一リソースを選択する車両の再選択カウンタが 0 となるまで持続的にパケット衝突が発生するため、周囲の車両も一定期間特定の車両情報を入手できない懸念がある。

(3) 隠れ端末問題による影響

車車間通信では、隠れ端末問題によるパケット衝突の影響を考慮しなければならない。例えば、お互いに通信範囲外の車両どうし (隠れ端末) の間に車両が存在する場合、隠れ端末どうしが同じリソースを選択してパケットを送信すると、両方の隠れ端末からパケットを受信できる車両間でパケット衝突が発生す

る。しかし、隠れ端末はお互いに通信が届かないためその存在を認識することができない。

(4) 異なる送信周期を持つ車両の混在環境

SL では、位置や速度のような車両情報を隣接車両間で定期的に交換することが主目的の 1 つである。しかし、共有した情報の使い道は様々であり、自律運転、隊列走行、センシングの拡張などのように目的とするアプリケーションによって情報の更新間隔が異なる。そのため、実環境ではパケットの送信周期も異なることが予想される。しかし SPS では、他車両の送信周期を考慮しておらず、異なる送信周期混在下でも利用可能ではあるが、適したスケジューリング手法であるとは言えない。

2.3. Sidelink と DSRC の比較

2.2.3 節で述べた C-V2X (LTE-V2X) Sidelink と 2.1.3 節の DSRC は共に車車間・路車間で狭域通信ができる。両者の通信方式の仕様比較を表 2 に示す。ただし、DSRC に V2N の機能はないため、LTE-V2X における Uu 通信を用いた基地局経由通信は比較対象から除外し、SL Mode 3 と Mode 4 のみを比較対象とする。

表 2. Sidelink と DSRC の仕様比較

	DSRC	SL Mode 3	SL Mode 4
変調方式	OFDM	SC-FDMA	
利用ユーザ	チャンネルを占有	複数ユーザが一つのチャンネルを共有	
リソース割当て	CSMA/CA	LTE 基地局	SPS
利用範囲	制限なし	基地局範囲内	制限なし
インフラ設備	対応設備が必要	既存の LTE 通信網を利用	

さらに[24]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などにより、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。

2.4. 研究の目的

2.3 節で示したように、Sidelink と DSRC は共に車車間で直接通信可能な技術であるが、その仕様と特徴は大きく異なる。特に SL Mode 4 は、チャンネルセンシングだけでなく、SPS 方式により制御されたスケジューリングを用いて、一定期間同じリソースを使い続けるため、より信頼性・応答性の高い通信を可能としている。そのため、DSRC ではなく SL Mode 4 に焦点を当てる。

本研究では、2.2.3.3 目で示した SPS 方式の課題に対して、SPS 方式を利用せずにリソースの干渉状況を個別に推測したうえで、最もパケット衝突の影響を受けにくいリソースを優先的に選択できるようにする。この考えに基づいて、はじめに基本方式の提案を行う。さらに、異なる送信周期を持つ車両が混在する環境下において、自車両の送信周期だけでなく異なる車両の送信周期を考慮して、リソースの使用状況に反映したうえでリソース再選択を実施できるようにするため、改良方式を考案し、その有効性をシミュレーションにより評価する。

3. 関連研究

3.1. 二段階無線リソース選択におけるパケット衝突の低減

リソース（再）選択時のパケット衝突を低減する目的で、標準の SPS 方式によるスケジューリングとは異なる手法が提案されている[25]. 同一リソース選択が発生する要因は同時期にリソースを選択する複数車両の選択ウィンドウが重なり、重複部分から次のリソースが選択されるためである. このとき、選択したリソースは初回のパケット送信時まで他車両に通知されないため、同時期にリソースを選択した車両群ではこのパケット衝突を検知できない. そこで、リソース再選択前の最後の送信時 ($RC = 0$) に選択ウィンドウ内で選択するリソースを仮予約する. 仮予約では、次回使用する予定のリソース情報を PSCCH に格納してパケットを他車両に配信する. しかし、仮予約は通常の予約とは異なるものとして認識される必要があるため、PSCCH のフォーマットを変更し仮予約リソースだと判別できるようにする. 仮予約することにより、本来であれば選択ウィンドウ内で選択する予定のリソース情報を他車両が知ることができるため、この仮予約が選択ウィンドウ開始時に他車両と衝突していなければ、同時期にリソース選択を行う車両とは異なるリソースを選択できる可能性が高い. 以上のように、デフォルトの選択ウィンドウ内でのリソース選択前に、事前にリソースを選択しておくことで、リソース選択時の衝突が低減できる. しかし、リソース再選択時の信頼性向上にはつながるが、従来の PSCCH のフォーマットを変更しなければならない. また、一連の動作は本来の SPS 方式のプロトコルにはないため、通常の SPS 方式を利用する車両との互換性がなく、その可用性は保証されていない.

3.2. 異なる送信周期の混在下におけるパケット衝突の低減

さらに[7]では、異なる送信周期を考慮したときに追加情報を利用せずにパケット衝突確率を低減する Preclude 手法を提案している. 異なる送信周期を持つ車両が混在した環境では、再選択ウィンドウ内のリソースだけでなく、ウィンドウ外のリソースを考慮する必要がある. Preclude では、将来的なパケット衝突を避けるために、自車両と他車両の送信周期の最小公倍数先までのリソースを確

認する。それらのリソース内に、他車両と衝突が発生するリソースがあれば、 S_A から事前に除外することで追加情報を必要とせずにパケット衝突のリスクを軽減可能とする。しかし、Preclude では、パケット衝突の発生有無だけでリソースを除外するため、そのリソースを選択したときの影響までは考慮していない。さらに、リソースが過剰に除外されてしまい選択候補が抑制される懸念がある。

3.3. チャンネル状態を基にした分散輻輳制御

通信に割当てられる帯域は限られるため、パケット配信に利用されるリソースも有限である。そのため、通信範囲内の車両台数が増加すると、輻輳が大きくなるため干渉の小さいリソースの割合が減少する。[26]では LTE-V2X (Mode 4) において輻輳を抑える目的で、チャンネル状態の変化を基にした分散輻輳制御（以下 DCC）を検討している。チャンネル状態は、チャンネルビジー率（Channel Busy Ratio: CBR）とチャンネル占有率（Channel Occupancy Ratio: CR）によって定義されている。CBR では、ある時間 t のリソースにおいて $t - 100$ (ms) までのリソースのうち、事前に設定された RSSI の値が閾値以上となるリソース数を計測する。CBR 値は、全体のチャンネル状態（CR）の推定に利用される。次に CR は、CBR を基にある時間 t において $[t - a, t + b]$ 内のすべてのサブチャンネルのうち、使用状態のリソースが存在するチャンネル数の割合である。ただし、 a と b は $a + b + 1 = 1000$ という条件があり、この値は基地局（ITS ステーション）によって決定される。CBR と CR は 1ms ごとに更新され、パケット送信を行う際に CR 値が閾値以上となる場合は CR を下げる必要がある。本手法では、CR の調整方法としてパケットドロップ方式を採用している。この手法では、CR が閾値以上のときに定期送信のパケットを意図的にドロップすることで、使用されるリソース量を一定に保ち、輻輳を抑える役割を持っている。しかし、パケットドロップ（送信周期の変更）は、AoI (Age of Information) [27]を低下させる要因となりうるため、損なわれた分の情報の質を保証する、もしくは輻輳制御以外での信頼性を維持する検討が必要である。

3.4. その他の研究

Mode 4 は基地局の支援なしに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[28][29]. 特に[28]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.

Mode 4 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[30]. そのため、チャンネルセンシングを基にした輻輳制御が存在し[26], [31]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. しかし、3.3 節で述べたようにパケットドロップや送信電力の制御は、AoI の低下要因となりうる.

4. 基本方式

既存の SPS 方式では, 隠れ端末問題によるパケット衝突が考慮されていない. そこで, SPS 方式をベースに隠れ端末と自車両の通信範囲が重複する領域 (干渉領域) に位置する干渉車両を推測するために, PSSCH にリソースごとの受信可否情報を付加し, リソース選択に利用する手法を先に検討した[8]. 本論文では, この基本方式を SPS with Collision Avoidance (SPS-CA) 方式とする.

4.1. 干渉車両の推測

はじめに, SPS-CA では前回のパケット送信時刻から現在のパケット生成時刻までに収集したリソースの受信可否情報から RBI (Resource Busy Information) を生成する. RBI とは, 自車両があるリソースにおいてパケットを復号できたときに 1, パケットを復号できなかったときに 0 を格納した 1 ビットの情報を, 前回のパケット送信時刻から現在のパケット生成時刻直前までのものと組み合わせた情報である. 各車両はパケット送信時に RBI を PSSCH へ追加情報として付加する. 例えば, 他車両から RBI を受信した車両が 1 のフラグが立っているリソースを選択すると, 送信元車両ではこのリソースを別車両がすでに使用しているためパケット衝突が発生する. そのため, RBI が 1 となっているリソースでのパケット衝突を推測できる. さらに, 複数車両からの RBI を対応するリソースごとに加算することで, 選択ウィンドウ内のリソースにおいてパケット衝突が発生する干渉車両数を推測することができる. RBI とは, 図 5 で示すようにリソース番号 r と受信したパケットのシーケンス番号 s (先に受信したものから順に付与される番号) を利用して $RBI_{r,s}$ と表すことができる.

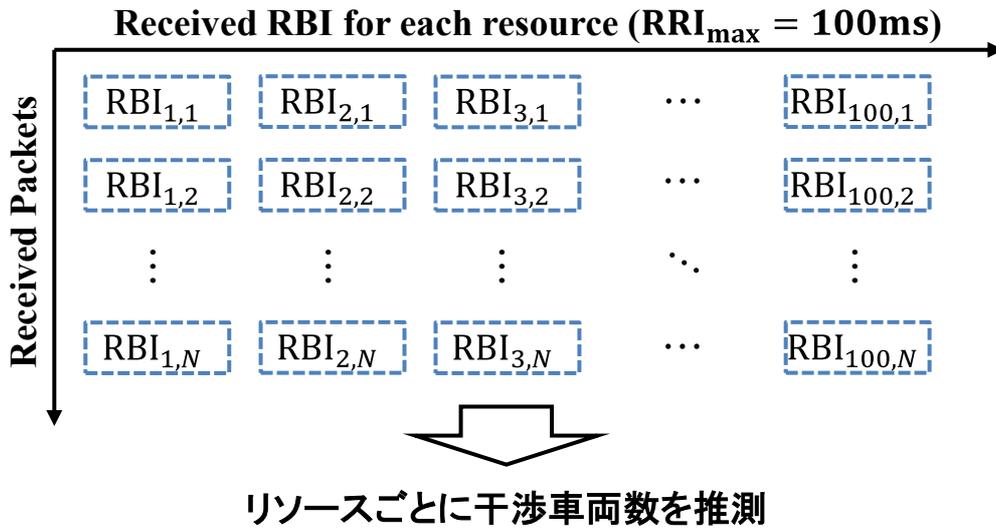


図 5. RBI に基づいた干渉車両数の推測 ($RRI_{\max} = 100\text{ms}$)

リソース番号とは、車両がリソースに割当てて共通の番号であり、サブチャネル数が 1 の時は、リソースのサブフレーム時刻を RRI_{\max} で割った剰余となる。例えば $RBI_{0,2}$ とは 2 番目に受信したパケットの RBI の内、リソース番号 0 の RBI を示している。推測した干渉車両数を一般式に表すと、あるリソース r に対して干渉車両数 I_r は、以下のように表される。

$$I_r = \sum_{s=1}^N RBI_{r,s}. \quad (4)$$

ただし、 N は前回のパケット生成時刻から現在のパケット生成時刻までに受信したパケットの内最後のシーケンス番号である。

4.2. リソース再選択手順

SPS-CA では、SPS をベースとしているため、リソース選択の開始は同じ手順をふむ。はじめに、2.2.3.2 目で説明したようにセンシング情報から近接車両との干渉が小さいと推測されるリソースの候補集合 \mathbf{S}'_A を形成する。次に、 \mathbf{S}'_A 内のリソースに対して 4.1 項で説明した推測干渉車両と SPS 方式によるセンシングの際に収集した RSSI を対応付けたテーブルを作成する。最後に、作成したテーブルに対して主キーとして干渉車両数を昇順にソートし、もし干渉車両数が同じものどうしで比較するときは第 2 キーとして RSSI を昇順にソートする。ソートしたテーブルの一番上にきたリソースを再選択リソースとする。

4.3. 基本方式をふまえた課題

基本方式では、各車両が収集したリソースの受信可否情報 (RBI) をパケットに付加して配信することで、受信車両での干渉車両の推測を可能とした。しかし、基本方式では、隠れ端末も考慮して干渉車両を推測しているため、遠距離でのパケット受信率 (Packet Reception Ratio: PRR) は向上するが近距離での PRR の改善効果は小さい。そのため、使用するアプリケーションによっては、通信範囲内ではなくより近距離の車両に優先してパケットを配信できる必要がある。さらに、実環境では異なる送信周期のアプリケーションが混在していることが想定されるため、それらのアプリケーションに適したスケジューリング手法が必要となる。また、基本方式では、干渉車両の推測に追加情報を利用しているが、これはオーバーヘッドとなるため、追加情報を利用せずにセンシングおよび受信したパケットの情報のみで運用可能な手法が必要である。

5. 改良方式

5.1. 概要

改良方式では、4.3 節で述べた問題に対応すべく、追加情報を利用せずに近距離の更なる改善(干渉車両の推測)および異なる送信周期の共存へ対応した IPMI (Interference Prediction and Multi-Interval extension) アルゴリズムを提案する。

本稿では、図 6 に示すように、自車両が過去 1.5 秒以内に受信したパケットの送信元車両を近接車両、その近接車両と自車両の通信範囲が重複する領域(干渉領域)に存在する車両を干渉車両と呼称する。はじめに、近接車両が現在使用するリソースに紐づけた干渉車両とその近接車両との距離を推測する。ここで、推測した干渉車両は近接車両が現在使用するリソースのみに紐づけされている。しかし、自車両と近接車両の送信周期が異なる場合は、リソースの選択時点では異なるリソースであっても、送信周期が異なるため将来的に衝突する可能性がある。そこで、自車両と近接車両の送信周期の最小公倍数 (Least Common Multiple: LCM) 先のリソースを考慮して干渉車両とその距離を推測する。最後に、選択ウィンドウ内のリソースにおいて、最小の干渉車両数かつ近接車両との距離が最大となるリソース群を特定し、再選択リソースを選択する。以降では、改良手法である IPMI アルゴリズムの詳細な説明を行う。

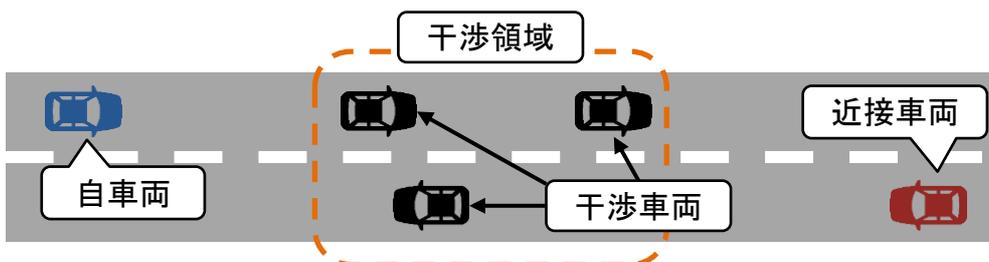


図 6. 近接車両と干渉車両 (干渉領域) の模式図

5.2. 干渉車両の推測

先行方式では、疑似的に通信範囲外の隠れ端末との干渉車両を推測していたが、パケットを配信する重要度は緊急性の観点から距離が近いほど高くなる。そのため、隠れ端末ではなく通信範囲内の近接車両との干渉車両の最小化を目指す。ここで、SL では複数車両から同時にパケットを受信した際、より近い車両

からのパケットは干渉が小さいため復号しやすい[32]. この特性を生かし、近接車両との干渉車両を推測する. 具体的には、図 7 で示すように、選択ウィンドウ開始時にこれまで受信したパケット内の PSCCH と PSSCH から現在使用するリソースと送信元車両の位置情報を利用して、自車両との干渉領域に存在する干渉車両集合 I を推測する. 図 7 において、自車両を i 、近接車両を j とする. このとき、自車両と近接車両 ($j = 1$) との干渉領域に位置する干渉車両は、ID が 4, 5, 7 の車両となるため、その干渉車両集合は $I_{i,1} = \{4,5,7\}$ となる. ここで、車両の位置情報の生存時間は 10 秒まで使用し、受信時刻のタイムスタンプと現在時刻との差と速度から現在の位置情報に補正する.

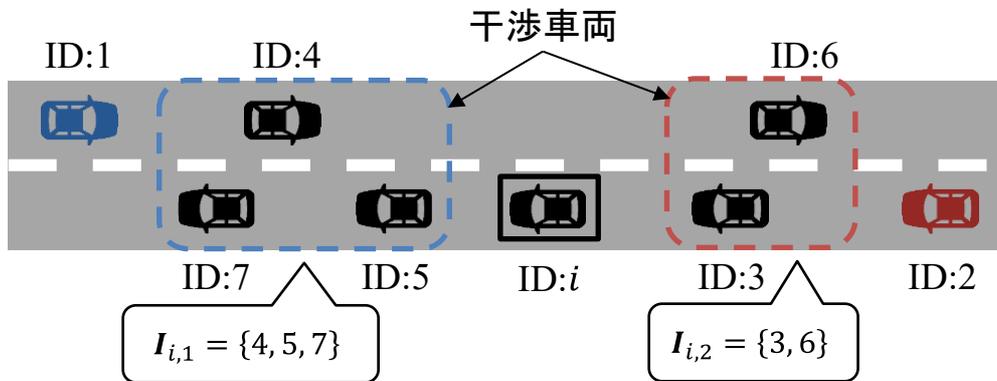


図 7. 自車両と近接車両間の干渉車両の推測

Algorithm 1 に、干渉車両集合 I を推測するための疑似コードを示す. 入力には、リソースを再選択する車両 i が与えられる. 出力では、現在時刻から過去 1.5 秒以内に受信したパケットの送信元車両 (近接車両) と自車両 i との干渉車両集合 I を返す. 4 行目で定義した車両 j は自車両 i の近接車両である. 次に、6 行目からは、 i と j との距離 ($\|P_x - P_y\|$ は車両 x の位置 P_x と y の位置 P_y のユークリッド距離) を計算して、互いの通信範囲 (D) が重なる領域に存在する干渉車両 k を特定する. 8 行目では i と j の干渉車両集合 $I_{i,j}$ に k を加える. ただし、干渉車両 k の位置情報の生存時間は 10 秒として計算する. Algorithm 1 は、改良手法の IPMI アルゴリズムにて、再選択リソースの判断指標となる干渉車両の推測に使用する.

ALGORITHM 1: 干渉車両数の推測

```
1: Procedure: PredictInterferenceVehicles
2: Input:  $i$ 
3: Output:  $I$  # Set of the interference vehicles
4: for each vehicle  $j$  whose signal is received by  $i$  within 1.5 seconds do
5:    $I_{i,j} \leftarrow \emptyset$  # Initialization of  $I_{i,j}$ 
6:   for each vehicle  $k$  whose signal is received by  $i$  within 10 seconds do
7:     if  $\|P_i - P_k\| < D$  and  $\|P_j - P_k\| < D$  then
8:        $I_{i,j} \leftarrow \{k\} \cup I_{i,j}$  # Vehicle  $k$  is a potential interference vehicle
9:     end if
10:  end for
11: end for
12: return
```

5.3. 異なる送信周期への拡張

各車両は使用するアプリケーションに応じて異なる RRI を使用する。送信周期が小さいほど選択できるリソース候補は減少してしまうが、送信機会は多くなるため選択時の状況だけでなく、リソース選択後の将来の干渉状況を推測する必要がある。しかし、SPS をベースとした手法では、RRI に基づいた選択ウィンドウ内のリソースのみが再選択対象となるため、選択後の状況を考慮することができない。本稿では、20, 50, 100ms の RRI を使用する環境を想定しているため、RRI の異なる車両どうしが別のリソースを選択したとしても、その最小公倍数である 100ms 以内にパケット衝突が発生する状況を考慮しなければならない。

図 8 では自車両 i が選択ウィンドウ (0-19) 内のリソースから近接車両 j が使用していない 5 番のリソースを選択したときを想定している。このとき、 i の RRI を 20ms, j の RRI を 50ms とすると、その最小公倍数は 100ms となる。ここで、 i が選択したリソースは 5 番のため、100ms 以内に使用予定のリソースは 25, 45, 65, 85 番である。しかし、 j の使用するリソースが 45 番の場合は、 i の 3 回目のパケット送信時にパケット衝突が発生する。しかし、45 番のリソースは i の選択ウィンドウ (S_A) には含まれていないため、デフォルトのままではその衝突を考慮することができない。そこで、選択ウィンドウ内だけでなく i が将来使用する

予定のリソース候補 (S_i) の干渉状況に基づいて選択ウィンドウ内のリソース情報を更新する。

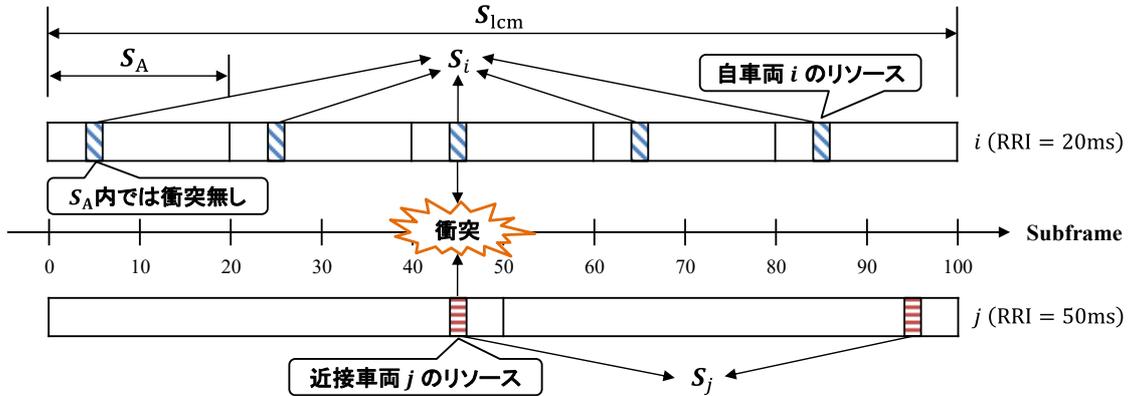


図 8. 異なる送信周期を持つ車両どうしのパケット衝突

異なる RRI に対応するための手法を Algorithm 2 に示す. 入力には, リソースを再選択する車両 i , 5.2 節の Algorithm 1 で推測した干渉車両集合 I が与えられる. 出力には, 車両 i の選択ウィンドウ内のリソースに対して将来のリソースを考慮したテーブル T が返される. T とは, あるリソース $r \in S_{lcm}$ を使用する自車両と近接車両との干渉車両数 T_r^I とその距離情報 T_r^D の 2 つの属性を持つテーブルである. S_{lcm} は, 自車両と近接車両の RRI の最小公倍数 (RRI_{lcm}) で考慮すべきリソース候補の集合である. 5-7 行目では, リソース r に紐づく T の属性 T_r^I , T_r^D に対して, T_r^I を 0, T_r^D を ∞ に初期化する. この関数では 2 ステップに分けて, 異なる送信周期に対応した T に修正する.

ステップ 1 (9 行目) では, 車両 j が RRI_{lcm} 先まで使用予定のリソース集合 S_j を定義している. 次に, 10-15 行目では, 使用予定のリソースをすべて確認し, リソース r に紐づくテーブルの距離情報 T_r^D よりも $\|P_i - P_j\|$ の方が小さい場合は T_r^D と T_r^I ($|I|$ は I の要素数) を更新する. これにより, 選択ウィンドウ内のリソースだけでなく将来使用する予定のリソースの干渉状況を推測できる.

ステップ 2 (18 行目) では, 自車両 i の選択ウィンドウのリソース集合 S_A において, 将来的に発生するパケット衝突の状況を考慮したテーブル情報に更新する. 19 行目の S_i とは, 車両 i がリソース r を選択したときに, 選択ウィンドウ以降で使用予定のリソース集合である. 20-24 行目において, リソース r の距離情報 T_r^D と S_i 内のリソース m の距離情報 T_m^D と比較し, r よりも m を使用する近接車両との距離が近い場合は, 将来的により大きな干渉が発生すると推測できるので, r のテーブルを m のテーブルに更新する. 以上により, 異なる RRI を持つ車両が

混在する環境でも、選択ウィンドウ以降の将来使用するリソースのテーブルと比較することで、将来的に発生するパケット衝突を考慮したテーブルに修正できる。

ALGORITHM 2: 異なる送信周期への拡張

```

1:  Procedure: ExtendMultiInterval
2:  Input:  $i, I$ 
3:  Output:  $T$ 
4:  # Initialization of table  $T$ 
5:  for each resource  $r$  of  $S_{lcm}$  do
6:     $T_r^I \leftarrow 0$  and  $T_r^D \leftarrow \infty$ 
7:  end for
8:  # 1st step
9:  for each vehicle  $j$  whose signal is received by  $i$  within 1.5 seconds do
10:    Set future resources of  $j$  to  $S_j$ 
11:    for each resource  $r$  of  $S_j$  do
12:      if  $\|P_i - P_j\| < T_r^D$  then
13:         $T_r^D \leftarrow \|P_i - P_j\|$  and  $T_r^I \leftarrow |I_{i,j}|$ 
14:      end if
15:    end for
16:  end for
17:  # 2nd step
18:  for each resource  $r$  of  $S_A$  do
19:    Set future resources of  $r$  used by  $i$  to  $S_i$ 
20:    for each resource  $m$  of  $S_i$  do
21:      if  $T_m^D < T_r^D$  then
22:         $T_r^D \leftarrow T_m^D$  and  $T_r^I \leftarrow T_m^I$ 
23:      end if
24:    end for
25:  end for
26:  return

```

5.4. IPMI アルゴリズム

改良方式では、これまで Mode 4 のベースアルゴリズムとして用いていた SPS 方式を利用せずに、センシングおよび受信パケットの情報のみからパケット衝突のリスクが低いリソースを特定する。改良手法である IPMI アルゴリズムを Algorithm 3 に示す。はじめに、リソースを再選択する車両を i とする。2 行目では、5.2 節で示した Algorithm 1 に従い、自車両 i と近接車両との干渉車両集合を I に設定する。3 行目では、5.3 節で示した Algorithm 2 に従い、自車両 i の選択ウィンドウ内のリソースに対して将来的に発生するパケット衝突を考慮した干渉車両数と距離情報のテーブル T を取得する。4-6 行目では、選択ウィンドウ内の選択候補となるリソース集合 S_A に対して、主キーを干渉車両数 $T_{r \in S_A}^I$ として昇順にソートを行い、もし同じ $T_{r \in S_A}^I$ での比較となった場合は、第 2 キーとして距離情報 $T_{r \in S_A}^D$ を降順にソートする。これにより、近接車両との干渉車両数が最も少なくかつ距離が遠くなるリソースが S_A の先頭となる。この先頭リソースを r_f とし、ソート後の候補集合 S_A から最終候補のリソース集合 S_B に移動する。7-13 行目では、ソート後の候補集合 S_A において r_f と同一条件のリソースがある場合は、それらを S_B へ移動する。最後に、14 行目では、最終候補のリソース集合 S_B 内から車両 i の再選択リソースをランダムに一つ選択する。以上により、IPMI アルゴリズムによって追加情報を利用せずに異なる RRI が混在する環境を考慮したリソーススケジューリングが可能となる。

ALGORITHM 3: IPMI アルゴリズム

- 1: Set resource-allocation vehicle to i
 - 2: $\mathbf{I} \leftarrow \text{PredictInterferenceVehicles}(i)$
 - 3: $\mathbf{T} \leftarrow \text{ExtendMultiInterval}(i, \mathbf{I})$
 - 4: Sort \mathbf{S}_A in the increasing order of $T_{r \in \mathbf{S}_A}^I$ and in the decreasing order of $T_{r \in \mathbf{S}_A}^D$
 - 5: Set the first resource of \mathbf{S}_A to r_f
 - 6: Move the first resource from \mathbf{S}_A to \mathbf{S}_B *# Initial \mathbf{S}_B is \emptyset*
 - 7: **for** each resource r of \mathbf{S}_A **do**
 - 8: **if** $T_r^I = T_{r_f}^I$ and $T_r^D = T_{r_f}^D$ **then**
 - 9: Move the resource r from \mathbf{S}_A to \mathbf{S}_B
 - 10: **else**
 - 11: **break**
 - 12: **end if**
 - 13: **end for**
 - 14: Select a resource randomly from \mathbf{S}_B for vehicle i
-

6. シミュレーション評価

基本方式と改良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[33]を C-V2X（3GPP Release 14 に準拠[14]）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．以下にシミュレーション環境と条件，その結果について示す．

6.1. 比較方式

以下の5つの比較方式により，シミュレーション評価を行う．

- SPS 方式
- Preclude 方式[7]
- SPS-CA 方式[8]（基本方式）
- IPMI 方式（改良方式）
- IPMI+方式（改良方式 + 基地局経由通信）

表 3 に，SPS 方式，SPS-CA 方式，IPMI 方式，基地局を利用した IPMI 方式（IPMI+）との機能比較を示す（×は機能なし，○は機能あり）．IPMI+とは，改良方式（IPMI）の理想的な状況における性能限界を確かめるために，すべての車両が基地局経由通信により自身の位置情報およびリソース使用情報を共有できる前提の方式とする．そのため，位置情報等の生存時間の制約に縛られることなく，IPMI アルゴリズムをつねに最新の情報を用いて実行できる．比較した機能は，1)リソースごとの干渉量の推測，2)異なる送信周期への考慮，3)追加情報および異なる通信手段によるオーバーヘッドが発生しないことである．

表 3. 比較方式における主要機能の比較

機能	SPS	Preclude	SPS-CA	IPMI	IPMI+
リソースごとの干渉量の推測	×	×	○	○	○
異なる送信周期への拡張	×	○	×	○	○
オーバーヘッドが発生しない	○	○	×	○	×

6.2. 評価項目

比較方式の信頼性を定量的に比較するため、パケット受信率とパケット衝突率を主な評価項目とする。以下に、各評価項目の計算方法を示す。

(1) パケット受信率 (Packet Reception Ratio: PRR)

PRR では、車両からブロードキャストで送信されたパケットを検知できる他車両に対して、どれだけの割合の車両がその信号を復号できたかを確認。PRR が高いほど、多くのパケットを受信できることが示されるため、その通信手法の信頼性を評価できる。以下に PRR の計算方法を示す。

$$\text{PRR} = \frac{\text{復号に成功したパケット合計数}}{\text{車両が物理層で検知したパケットシグナルの合計数}} \quad (5)$$

(5) 式中の分子は、全車両がシミュレーション中に受信したパケットシグナルにおいて、干渉量が規定を下回り PSCCH および PSSCH の中身を正しく復号できたパケットの合計数である。ただし、受信時にパケット衝突が発生したとしても、距離が近いもしくは見通し内からのシグナルであれば干渉量が規定を下回る時は復号可能である。分母は、全車両が物理層においてキャッチしたシグナルの合計数である。もしシグナルを複数検知 (パケット衝突) した場合は、すべてのシグナルを合計数に加算する。また、PRR は送受信車両の距離ごとに算出するものとし、例えば 150m の場合は、送受信車両間の距離が 150m 以下のときの PRR を確認することができる。

(2) Packet collision ratio (PCR)

PCR では、複数車両から同時に受信したパケットシグナル (パケット衝突) によってどれだけの割合のパケットが復号に失敗したかを確認できる。これにより、PCR の値が小さいければ、PRR の向上要因がパケット衝突の削減によるものであると確認できる。以下に PCR の計算方法を示す。

$$\text{PCR} = \frac{\text{パケット衝突が原因で復号に失敗したパケット合計数}}{\text{車両が物理層で検知したパケットシグナルの合計数}} \quad (6)$$

(6) 式中の分子は、全車両が物理層において検知したパケットシグナルのうち、パケット衝突が原因で復号に失敗したシグナルの合計数である。ここで、パケット衝突とは、同時刻に複数車両からのシグナルを検知したときを指す。分母は、PRR の計算に使用したパケットシグナルの合計数である。

6.3. シミュレーション環境・条件

3GPPによりV2Xシミュレーション向けに規定されたシナリオを利用する[34]. シミュレーション環境として, 都市を想定した Urban モデルと郊外の高速道路を想定した Freeway モデルを用意した. 車両台数はシナリオごとに異なり, 車両速度に応じた 2.5 秒車間距離で設置した際の台数とする (初期位置はランダム). 車両はシナリオごとに 3GPP の規定による固定速度で道路上を走行し, 都市環境の場合は交差点に進入するとランダムに向きを変更する. サブチャネル数は, より輻輳が大きい状況を検証するためにすべてのシナリオにおいて 1 チャネルとする. [35]を基にヘッダおよび PSCCH を除いた位置情報等を含むパケットサイズを 128byte とする. シミュレーションで考慮する RRI は 20, 50, 100ms の 3 つであり, 設置車両台数に従い等分に配置され, シミュレーション中は最初に設定された RRI を最後まで使用する. RC は RRI に基づいて設定された $[RC_{\min}, RC_{\max}]$ の範囲内で再選択時にランダムに選択される. 再選択確率は一律に 1.0 とし, RC が 0 になると必ずリソース再選択を実行する. 選択ウィンドウサイズは $(T_1, T_2) = (0, RRI)$ [ms] とする. パケット生成タイミングは, すべての車両で非同期である. シミュレーション結果は, 車両のトポロジを 20 回変化させて実行した結果の平均をとったものとする. シミュレーション時間は全体で 50 秒とし, 10 秒から 40 秒の間で移動しながら通信を行い, それ以外の時間は移動のみ行う. 全シナリオの共通条件を表 2 に示す.

表 4 共通シミュレーション条件

項目	条件値
シミュレータ	Scenargie (C-V2X Rel-14 機能拡張)
周波数	5.9GHz
帯域幅	10MHz
サブチャネル数	1 チャネル
パケットサイズ	128bytes (ヘッダなし)
電波伝搬モデル	ITU-RP.1411
フェージングモデル	Nakagami
送信電力	23dBm
送信周期 (RRI)	20, 50, 100ms ($RRI_{max} = 100$)
初期受信電力閾値	-80dBm
再選択カウンタ	$[RC_{min}, RC_{max}]$
再選択確率 (P)	1.0
センシングウィンドウサイズ	1 秒
選択ウィンドウサイズ	$[0, \text{each RRI}]$
シミュレーション回数	20 回 (モビリティシード変更)
シミュレーション時間	50 秒 (10-40 秒で通信)

6.3.1. 都市モデル (Urban モデル)

Urban モデルでは、3GPP が都市環境の V2X シミュレーションのために規定した 1299m×750m (433m×250m の 9 グリッド分) のシナリオを利用する。車両は道路上を 15km/h あるいは 60km/h の固定速度で移動する。設置車両台数は車両速度に依存し、15km/h のシナリオでは 591 台 (96.1 台/km)、60km/h では 147 台 (23.9 台/km) 設置される。道路は片側 2 合計 4 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。通信範囲は、60km/h で逆方向に走行する車両間での 4 秒車間距離 (133.3m) を基準として 150m とする。4 秒車間距離とは、車両速度を基にしたパケットが必ず届くべき範囲を示しており、同方向に進む車両間と比べて逆方向に進む車両間ではその距離が 2 倍大きくなる。表 5 に Urban モデルのシミュレーション条件、図 5 にシミュレーション環境を示す。

表 5. シミュレーション条件 (Urban モデル) [34]

項目	条件値
シナリオサイズ	1299×750m
車線数	片側 2 車線 (合計 4 車線)
車両速度	15km/h or 60 km/h
設置車両台数	147 台 (60km/h) or 591 台 (15km/h)
通信範囲	150m
遮蔽物	あり

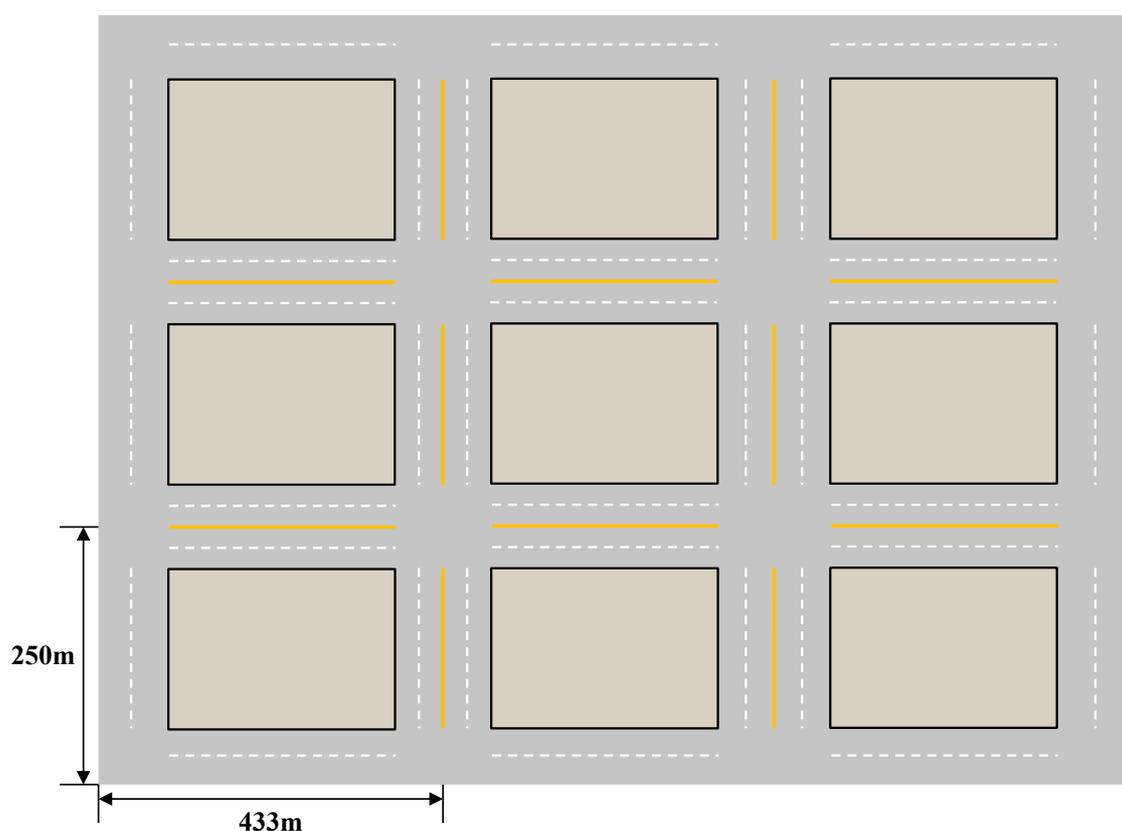


図 9. シミュレーション環境 (Urban モデル)

6.3.2. 高速道路モデル (Freeway モデル)

Freeway モデルでは、道路長が 3km の直線道路を使用して高速道路環境を模擬する。車両は道路上を 70km/h あるいは 140km/h で走行し、70km/h のシナリオでは 369 台 (20.5 台/km) , 140km/h では 126 台 (7 台/km) の車両を設置する。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などは設置され

ていない。車両は道路の左右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。両端での車両移動による結果への影響がないように、中心 1km 以内に位置する車両のみを評価対象とする。また、通信範囲は 140km/h で逆方向に走行する車両間の 4 秒車間距離(311.1m)より、320m とする。表 6 に Freeway モデルのシミュレーション条件、図 6 にシミュレーション環境を示す。

表 6. シミュレーション条件 (Freeway モデル) [34]

項目	条件値
シナリオサイズ	3km
車線数	片側 3 車線 (合計 6 車線)
車両速度	70km/h or 140 km/h
設置車両台数	126 台 (140km/h) or 369 台 (70km/h)
通信範囲	320m
遮蔽物	なし

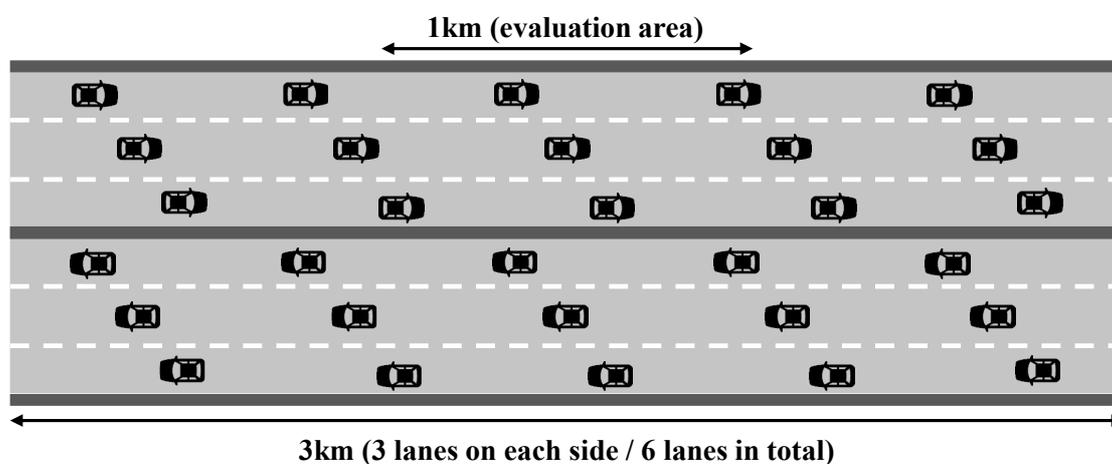


図 10. シミュレーション環境 (Freeway モデル)

6.4. シミュレーション結果

6.4.1. 信頼性の評価

6.4.1.1. 都市環境

Urban モデルにおいて、提案手法（基本方式と改良方式）と比較方式の信頼性を評価するため、通信距離をパラメータとした PRR および PCR の結果を図 11 (a), (b)に示す。図 11 (a)より、Urban モデルの各シナリオにおいて通信距離によらず、IPMI が SPS, Preclude, SPS-CA よりも高い PRR を維持できることを確認した。また低密度環境（60km/h）では、Preclude の方が SPS-CA よりも若干優位であることが分かった。一方、高密度環境（15km/h）では、Preclude が SPS や SPS-CA よりも非常に高い信頼性を維持しており、通信範囲付近では、IPMI や IPMI+よりも若干の優位性が見られる。

図 11 (b)より、確かに PRR の改善効果が高い通信距離において PCR が低いいため、PRR の改善要因が PCR の低減であることが分かった。また、60km/h のシナリオでは、IPMI+が IPMI よりもさらに高い PRR を維持しており、通信範囲となる 150m 付近でも 100%近い PRR となった。15km/h のシナリオでも、通信範囲が 70m 付近までは IPMI+が IPMI よりも優位な結果となっているが、70m 以降、若干ではあるが IPMI よりも劣化が見られる。この原因は、本来はごく近距離でもパケット衝突により検知できない車両が存在するが、IPMI+では全車両の情報を保持しているため近距離での更なる改善効果とのトレードオフとして遠距離での PRR が小さくなったと考えられる。

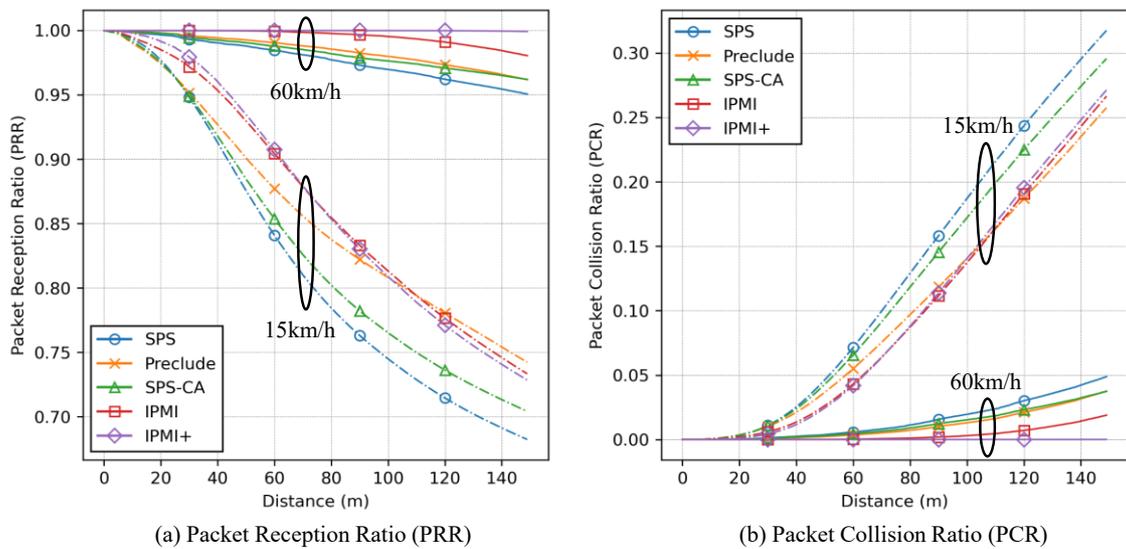


図 11. パケット受信率およびパケット衝突率 (Urban モデル)

さらに、同方向および逆方向に進む車両どうしの車間距離(4 秒)における PRR および PCR を表 7 に示す. 表 7 より、60km/h では逆方向でもすべての比較方式で PRR95%以上を達成した. しかし、輻輳が大きい 15km/h では、逆方向において SPS と SPS-CA の劣化が大きくなり、PRR95%以上を達成できたのは IPMI と IPMI+のみとなった. SPS と比較して IPMI では、60km/h (133.3m) において PRR を約 3.1%、PCR を約 70%削減、15km/h (33.3m) において、PRR を約 3.1% 向上、PCR を約 47%削減できた. SPS-CA では、近距離での改善が小さいという課題があったが、IPMI では近距離でも更なる改善効果を確認でき、超高信頼性を必要とするアプリケーションでの利用も期待できる.

表 7.4 秒車間距離（同方向と逆方向）での PRR および PCR（Urban モデル）

Scenario	Distance	Method	PRR (%)	PCR (%)
60km/h (147 vehicles)	66.7m (同方向)	SPS	98.241	0.717
		Preclude	98.900	0.448
		SPS-CA	98.623	0.560
		IPMI	99.892	0.043
		IPMI+	100.000	0.000
	133.3m (逆方向)	SPS	95.724	3.768
		Preclude	96.873	2.750
		SPS-CA	96.721	2.883
		IPMI	98.688	1.143
		IPMI+	99.972	0.003
15km/h (591 vehicles)	16.7m (同方向)	SPS	98.505	0.161
		Preclude	98.128	0.200
		SPS-CA	98.253	0.187
		IPMI	98.932	0.115
		IPMI+	99.482	0.056
	33.3m (逆方向)	SPS	93.813	1.456
		Preclude	94.452	1.297
		SPS-CA	94.025	1.403
		IPMI	96.702	0.777
		IPMI+	97.454	0.602

6.4.1.2. 高速道路環境

次に、Freeway モデルにおける信頼性を評価するため、PRR と PCR の結果をそれぞれ図 12 (a), (b)に示す。図 12 (a)より、どちらのシナリオにおいても通信距離によらず IPMI が SPS, Preclude, SPS-CA よりも優位な結果となった。

図 12 (b)より、IPMI の改善効果が PCR の削減によるものであると確認できた。IPMI では、近接車両間での改善効果は非常に高いが通信範囲が遠くなると効果が弱まり、70km/h のシナリオでは、比較方式と同程度になると分かった。高速道路環境では、通信範囲内の車両はすべて見通し内となるため、IPMI アルゴリズムにより近接車両どうしの PRR の改善が大きくなると考えられる。その

ため、遠距離の車両どうしとのリソース割当ての際に、干渉車両の考慮が弱まったため改善効果が小さくなったと考えられる。一方、70km/h シナリオにおいて、IPMI+では近距離で IPMI をさらに上回る結果となったが、遠距離では IPMI と同等性能となっている。高速道路のように輻輳が起きやすい環境では、理想的な割当てができたとしてもすべてを改善するのは難しいため、アプリケーションの要求に応じたトレードオフの考慮が必要だと考えられる。

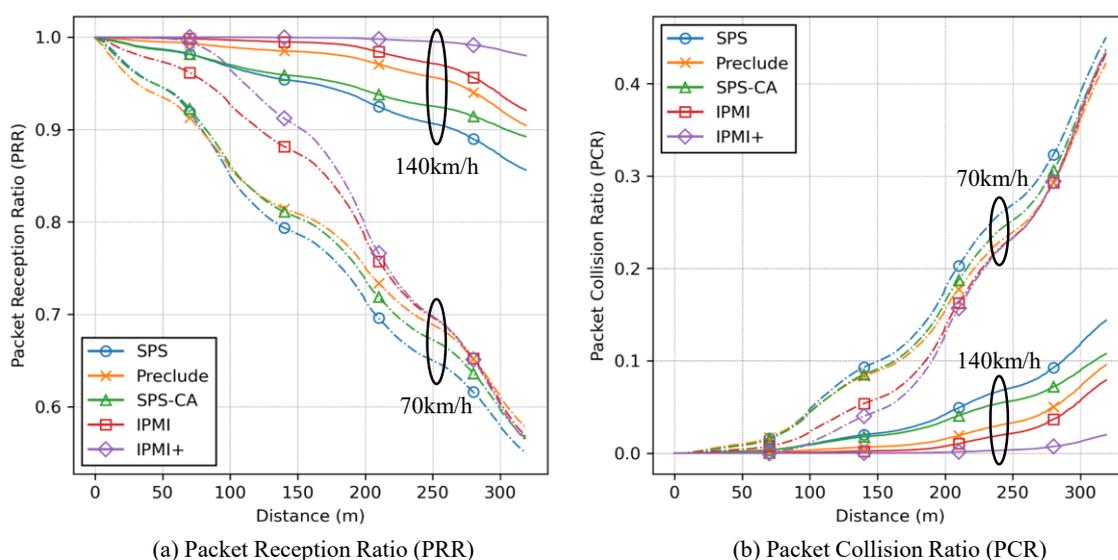


図 12. パケット受信率およびパケット衝突率 (Freeway モデル)

表 8 に、同方向および逆方向に進む車両の 4 秒車間距離での PRR と PCR を示す。表 8 より、高速道路では見通し内車両の増加により、輻輳が大きくなるため Urban モデルよりも全体的に低い PRR となっている。140km/h のシナリオでは、同方向ではすべての方式で PRR95%以上を満たしているが、逆方向で PRR90%以上を達成できたのは IPMI と IPMI+の 2 方式のみであった。輻輳がさらに大きい 70km/h では、同方向でも SPS と SPS-CA では PRR95%に到達しておらず、逆方向ではどの方式も PRR90%には到達できなかった。しかし、逆方向では SPS や SPS-CA の劣化が大きく IPMI+でも PRR90%を達成できなかったものの、SPS と比較した IPMI の改善率は約 11%と最も大きい改善効果となった。以上の結果より、改良手法では輻輳が大きくなりやすく速度が大きい高速道路環境においても、十分に従来方式の性能を上回ることを確認できた。

表 8.4 秒車間距離（同方向と逆方向）での PRR および PCR
 (Freeway モデル)

Scenario	Distance	Method	PRR (%)	PCR (%)
140km/h (126 vehicles)	155.6m (同方向)	SPS	95.122	2.238
		Preclude	98.410	0.729
		SPS-CA	95.701	1.968
		IPMI	99.440	0.258
		IPMI+	99.958	0.019
	311.1m (逆方向)	SPS	86.201	13.399
		Preclude	91.082	8.660
		SPS-CA	89.633	10.064
		IPMI	92.716	7.072
		IPMI+	98.248	1.700
70km/h (369 vehicles)	77.8m (同方向)	SPS	90.449	2.095
		Preclude	90.133	2.151
		SPS-CA	90.951	1.981
		IPMI	95.550	0.981
		IPMI+	99.068	0.207
	155.6m (逆方向)	SPS	78.352	10.265
		Preclude	80.649	9.149
		SPS-CA	80.163	9.398
		IPMI	87.022	6.199
		IPMI+	89.831	4.873

6.4.2. 情報更新間隔の評価

次に、情報が更新される間隔（情報更新間隔）によって受信率にどのような影響を与えるかを確認する。例えば送信周期が 100ms のパケットを配信するとき、そのパケットを受信できる車両群は、100ms ごとに送信元車両からの情報を更新する必要がある。しかし、パケット衝突や干渉によりパケットを一時的に復号できない期間が発生する可能性がある。情報更新間隔とは、送信元車両の情報を更新するときの遅延時間を示し、情報更新間隔に対応する受信率を確かめることで、ユースケースに沿った通信手法の妥当性を評価できる。[12]より、隊列走

行では 10-500ms の情報更新間隔で、90-99.99%までの受信率が要求される。さらに、安全運転支援と拡張センサとしてのユースケースでは、3-100ms の情報更新間隔で受信率が 90-99.999%を保証する必要がある。本シミュレーションでは、1-500ms の情報更新間隔内(分解能は 1ms)で計算されるパケット受信率を示す。ただし、取得する結果は送受信車両間の距離が 4 秒車間距離以下に限定され、その最大距離は Urban モデルでは 33.3m, Freeway モデルでは 155.6m とする。

図 13 (a), (b)に、Urban モデル (15km/h) と Freeway モデル (70km/h) での情報更新間隔ごとのパケット受信率の PRR を示す。ここで、図中の実線を IPMI 方式、破線が SPS 方式であり、送信周期 (100, 50, 20ms) のパケットごとに結果を示し、Urban モデルでは PRR が 0.8 以上、Freeway モデルでは 0.6 以上となる結果に限定して示す。図 13 (a)より、送信周期および情報更新間隔によらず IPMI の方が SPS よりもつねに高い PRR を維持できることを確認した。特に IPMI では、情報更新間隔 500ms 以内にどの送信周期でも PRR95%を達成できたが、SPS ではどの送信周期でも 95%を達成できなかった。また SPS では、送信周期が低い (100ms に近い) ほど PRR が低い傾向にあるが、IPMI では逆に低いほど高い受信率を維持している。さらに、SPS 方式では複数回の送信により PRR の受信率の改善が大きくなっていくが、IPMI では 1 回目の送信ですでに受信率を維持しており、2 回目程度でほぼ上限に達している。次に図 13 (b)より、Freeway モデルでも Urban モデルと同様に IPMI の方が SPS よりも高い受信率を達成できた。しかし、Freeway モデルでは輻輳が大きくなりやすいため、PRR95%を達成できたのは IPMI の 100ms のときのみであり、20ms では PRR80%程度までの改善に留まった。また、Urban モデルの IPMI では、50ms と 100ms の PRR はほぼ同程度であったが、輻輳の増加に伴い Freeway では 100ms の方が 50ms よりも顕著に改善効果が見られる。しかし、図 13 (a), (b)に共通して、IPMI の 20ms では改善効果が小さいため、送信周期の高いアプリケーションへの最適化を検討する必要がある。

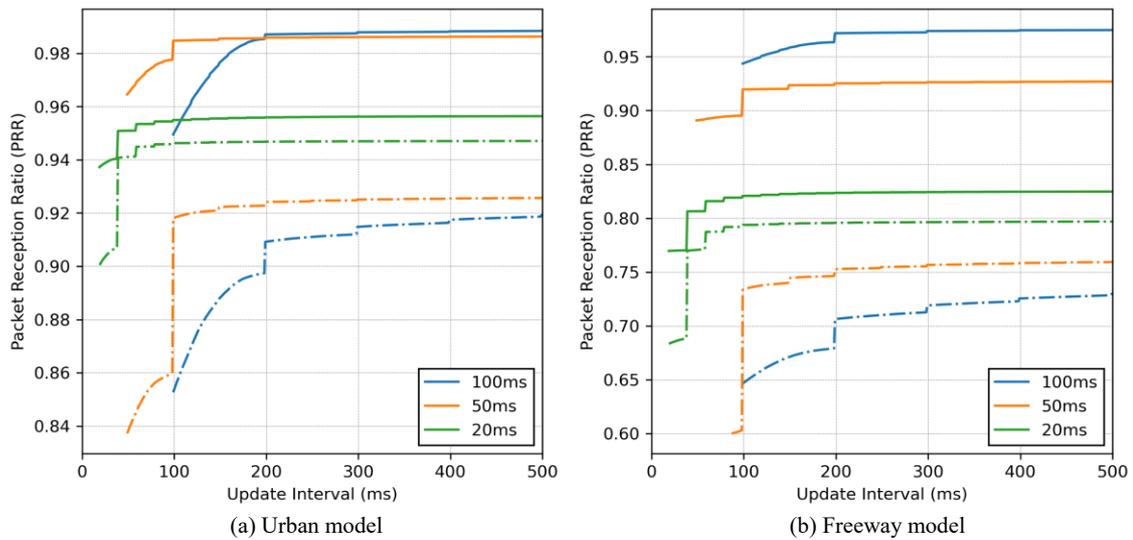


図 13. 情報更新間隔に対するパケット受信率
 (a) Urban モデル (15km/h) , (b) Freeway モデル (70km/h)

6.4.3. 可用性の評価

次に改良手法の可用性を評価するために、シナリオ内に存在する車両に対して、IPMI アルゴリズムを適用する車両台数の割合を変更したときの結果を確認する。もし IPMI をシナリオ内の全車両のうち 75% に適用したときは、残り 25% の車両は SPS 方式のみを用いてスケジューリングする。このときの PRR は、IPMI を適用した 75% の車両から受信したパケットで計算した PRR と残り 25% の SPS を利用する車両からの受信パケットのみで計算した PRR に分けて計算する。以上により、改良方式の性能だけでなく IPMI を適用していない SPS 方式を利用する車両の性能が劣化していないことも確認する。凡例において、例えば IPMI を 75% 適用したときの IPMI を利用する車両からの受信パケット数で計算した PRR は IPMI (75%)、残りの SPS 方式を利用する車両からの受信パケットで計算した PRR を SPS (25%) と表す。

6.4.3.1. 都市環境

図 14(a), (b) に、Urban モデルの 60km/h と 15km/h での IPMI の適用割合を変化させたときの PRR をそれぞれ示す。図 14(a) より、距離に関係なく IPMI がどの適用割合でも SPS より高いことが分かった。IPMI を適用した車両割合が高いほど PRR も高い結果となった。また、IPMI を適用していない残りの SPS 方式

の車両群の PRR では、SPS を 100%適用している場合よりも距離によらず優位な結果となった。これは、IPMI により信頼性の高い通信ができることで、SPS を利用する車両のセンシング情報の質が高まり結果的に SPS の性能向上にもつながったためだと考えられる。

次に図 14(b)より、15km/h でも IPMI の方が SPS よりも優位な結果となった。しかし、IPMI を 100%適用していないときはどの方式も同じような結果となったため、輻輳が大きいときには適用割合の影響が小さいことが分かった。また IPMI が適用されていない残りの SPS の車両では、逆方向の 4 秒車間距離まではどの方式でも SPS (100%) に対して劣化がないことを確認した。

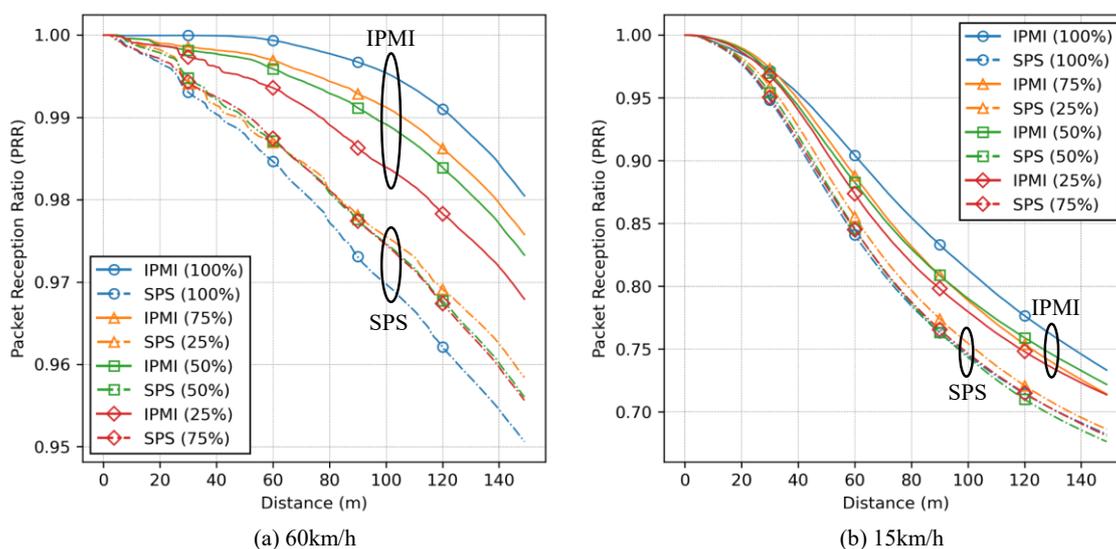


図 14. 改良方式の適用割合を変化させたときのパケット受信率。
(a) 60km/h, (b) 15km/h.

6.4.3.2. 高速道路環境

図 15 (a), (b)に、Freeway モデルの 140km/h と 70km/h での IPMI の適用割合を変化させたときの PRR をそれぞれ示す。図 15 (a)より、140km/h では IPMI の方がどの適用割合でも SPS より高い PRR となり、残りの SPS においても劣化は見られなかった。また図 15 (a)では、140km/h という非常に高速な環境で検証したが、速度による IPMI への影響は小さいと分かった。

次に図 15 (b)より、70km/h のシナリオでは IPMI が SPS よりも高い PRR を維持できることを確認した。しかし、100m 付近までの近距離では、IPMI を 100%適用するよりも 75%や 50%適用したときの方が高い PRR を維持している。高輻

轉環境では、IPMI による近接車両に重点を置いたスケジューリングが効きすぎている可能性があり、今後改善の余地があることが分かった。以上の結果より、モデル、輻輳、車両速度によらず IPMI では適用車両台数が少ないときにも一定の改善効果を期待でき、適用しない車両においても副次的効果を得られるため実環境においての可用性を確認できた。

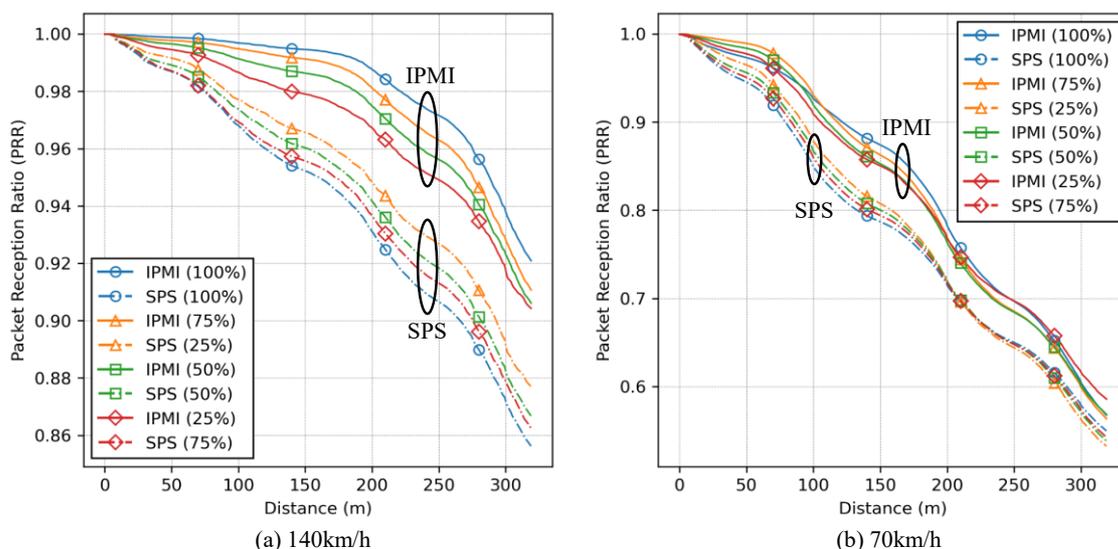


図 15. 改良方式の適用割合を変化させたときのパケット受信率

(a) 140km/h, (b) 70km/h

6.4.4. 改良方式の機能ごとの評価

改良方式である IPMI アルゴリズムにおいて、異なる送信周期への考慮をせずに干渉車両数を推測する機能のみを適用した手法を IPMI-とし、両機能を持った IPMI との比較を行う。図 16 (a), (b)に、urban モデル (15 or 60km/h) と freeway モデル (70 or 140km/h) における IPMI-と通常の IPMI の PRR の向上率を示す。ここで、PRR の向上率とは、既存手法である SPS 方式と比較して相対値でどれだけの PRR の向上があったかを百分率で算出したものである。SPS の PRR は、5.4.1.1 目と 5.4.1.2 目の結果を基にしている。図 16 (a)より、urban モデルでは、速度の異なるシナリオによらず、全体的に見て異なる送信周期を考慮した IPMI の方が優位なことが分かった。特に 60km/h では、元々の SPS の性能が良いため向上率が低くなる傾向があるが、異なる送信周期の考慮によりさらにその性能を高められることを確認した。しかし、15km/h では、向上率自体は高いものの

IPMI と IPMI-において大差はないため、輻輳が大きくなると異なる送信周期への考慮の効果は弱まることが分かった。

次に図 16 (b)より、freeway モデルでは、urban モデルの振舞いとは異なり、速度が小さいシナリオ (70km/h) において IPMI よりも IPMI-の方が高い性能を引き出せることが分かった。図 16 (a)で見た通り、輻輳が大きいほど IPMI と IPMI-の性能差は近くなっていたため、高速道路のように高輻輳環境の場合はむしろ異なる送信周期への考慮によって性能が劣化してしまう恐れがある。これは、異なる送信周期への対応において、将来のリソースを考慮するため、高輻輳環境では、どのリソースもパケット衝突する可能性が高く再選択候補のリソースのテーブル情報がつねに最悪のケースを想定したものに書き換えられる可能性が高くなる。よって、最悪のケースだけを想定するのではなく、総合的に見てリスクが高いリソースを選択できるやり方が必要だと考えられる。ただし、既存手法である SPS より高い信頼性は保持しているため、より高輻輳な環境において、どのように異なる送信周期に対応していくかが今後の課題となる。一方、140km/h シナリオでは、IPMI-では向上が小さいが、IPMI ではさらにその向上率を伸ばせているため、高速道路環境であっても輻輳が抑えられている際は依然として異なる送信周期への対応は有効だと考えられる。輻輳の判断基準として CBR などを計測することで、輻輳の判定を行い異なる送信周期への対応を変えるなどのやり方も考えられる。

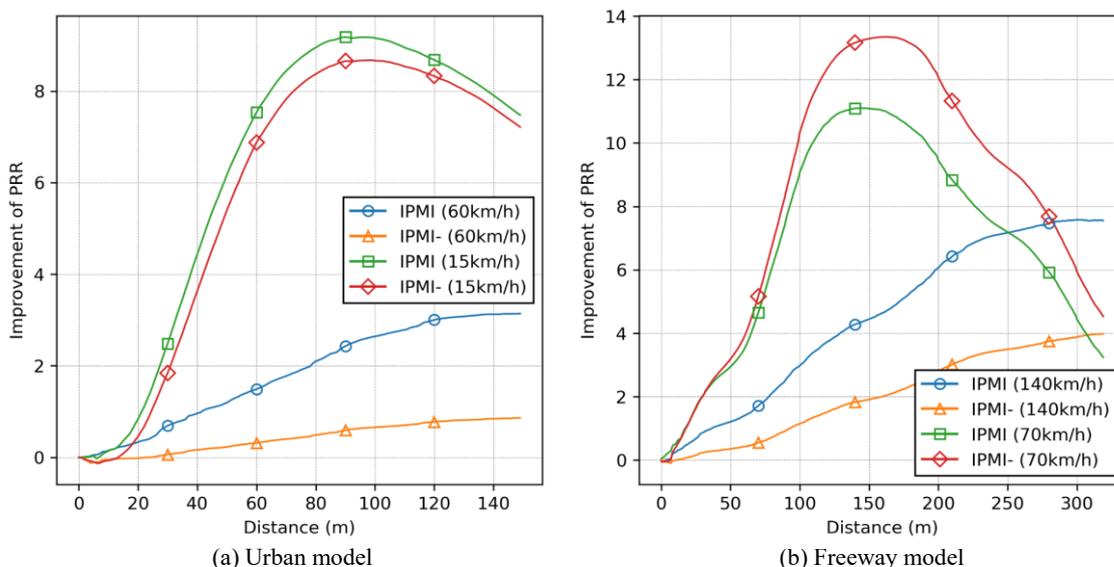


図 16. 異なる送信周期への拡張の有無によるパケット受信率の向上率の違い

6.4.5. 再選択確率の評価

次に再選択確率を 1.0 から下げたときの、SPS 方式と改良方式の受信率の変化を確認する。確率は 1.0, 0.6, 0.2 のように変化させ、Urban モデル (15 or 60km/h シナリオ) と Freeway モデル (70 or 140km/h シナリオ) において性能評価する。図 17 (a)に再選択確率を変化させたときの Urban モデルの PRR, (b)に Freeway モデルの PRR を示す。図 17 (a)より、60km/h では SPS が若干確率を下げたときに 1.0 のときよりも改善されているが、IPMI ではほぼ変化は見られない。しかし、15km/h では、SPS ではほとんど変化はないが、IPMI では確率を下げるほど PRR の劣化が見られる。IPMI では、近接車両の定義として過去 1.5 秒以内に受信したパケットの送信元車両としているが、この 1.5 秒はリソースが必ず 1.5 秒以内には再選択されることが前提として設定されている。そのため、再選択確率が下がると必ずしもリソースが 1.5 秒以内に再選択されるとは限らないため、特に輻輳環境ではその影響が強まったと考えられる。

次に図 17 (b)より、140km/h では、低密度環境であるが見通し内車両が増えたことにより輻輳が大きくなっているため、再選択確率を下げたときに IPMI の性能劣化を確認した。さらに、SPS でも性能の劣化が見られたため、一概に輻輳のみで再選択確率を操作するのは良いと言えず、更なる解析が必要だと考えられる。また、70km/h では、再選択確率を下げたときの IPMI の劣化が大きくなっているが、既存の SPS よりは高い PRR を維持できていることが分かった。しかし、再選択確率がつねに 1.0 になるとは限らないため、再選択確率の変化に対応したアルゴリズムが必要である。

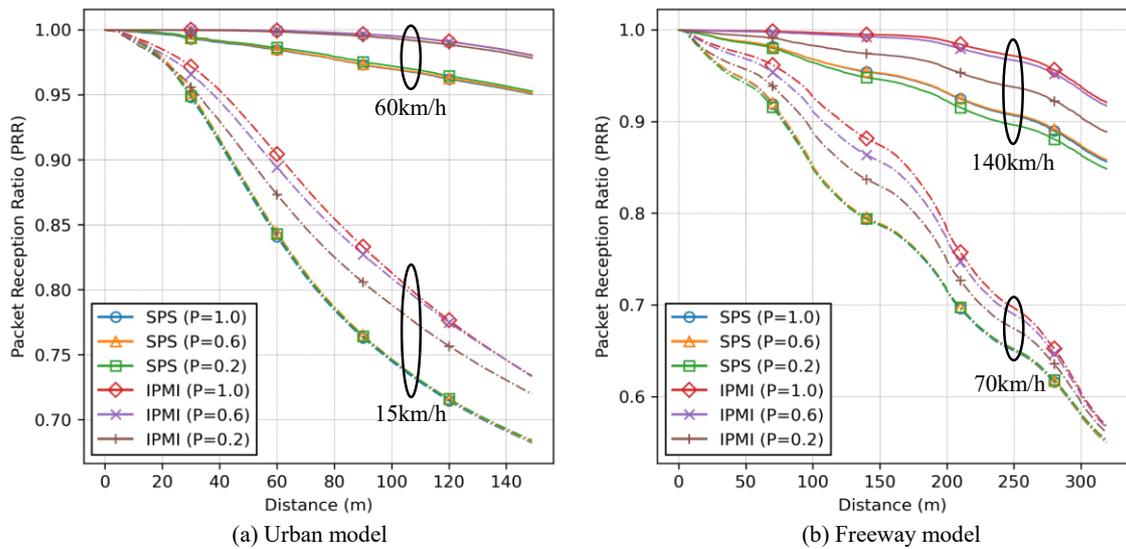


図 17. 再選択確率を変更したときのパケット受信率

6.5. シミュレーション評価のまとめ

本シミュレーション評価により、既存の SPS 方式と比較して改良方式 (IPMI) では、特に顕著な性能改善が見られた。以下に、得られた成果を示す。

- パケット受信率では SPS 方式と比較して、都市環境において、低密度環境 (133.3m 以内) で約 3.1% 向上、高密度環境 (33.3m 以内) で約 3.1% 向上できた。また、高速道路環境において、低密度環境 (311.1m 以内) で約 7.6% 向上、高密度環境 (155.6m 以内) で約 11% 向上できた。
- パケット衝突率では SPS 方式と比較して、都市環境において、低密度環境 (133.3m 以内) で約 70% 削減、高密度環境 (33.3m 以内) で約 47% 削減できた。また、高速道路環境において、低密度環境 (311.1m 以内) で約 47% 削減、高密度環境 (155.6m 以内) で約 40% 削減できた。
- 情報更新間隔では SPS 方式と比較して、高密度の都市環境において、更新間隔を 100ms としたパケット受信率を約 11% 向上、50ms のパケット受信率を約 15% 向上、20ms のパケット受信率を約 4.0% 向上できた。また、高速道路環境において、更新間隔を 100ms としたパケット受信率を約 46% 向上、50ms のパケット受信率を約 52% 向上、20ms のパケット受信率を約 13% 向上できた。さらに、更新間隔を延ばした (複数回送信した) ときには、更なる改善効果を確認できた。

- SPS 方式と IPMI 方式を共存させたときの packets 受信率では, IPMI の適用割合を 100%から 25%まで変化させたとき, どの適用割合でも SPS 方式より高い受信率を維持できることを確認した. さらに, 近距離 (逆方向の 4 秒車間距離以内) では, IPMI と共存関係にある SPS 方式を利用した車両の packets 受信率も向上できることを確認した.

7. 結論

本論文では、C-V2X SL mode 4において、はじめに SPS 方式をベースに隠れ端末問題に対処した基本方式を検討した。基本方式では、PSSCH に無線リソースの使用状況に係る追加情報を付加し、周辺車両が送信元車両で発生するリソースごとのパケット衝突を推測できるようにした。さらに、基本方式では対応していなかった、追加情報によるオーバーヘッドと相異なる送信周期を持つ車両との共存を考慮するために、改良方式を提案した。改良手法では、SPS 方式に依存せずに、PSSCH への追加情報や従来の PSCCH のフォーマット変更なしで、受信パケットのみから近接車両との干渉車両を推測し、最もパケット衝突の影響を受けにくいリソース群の中から優先的に送信用のリソースを再選択する手法を考案した。さらに、相異なる送信周期の最小公倍数先のリソースを考慮することで、将来発生するパケット衝突の回避を可能とした。

基本方式と改良方式の有効性を確認するため、シミュレーションにより、SPS 方式を含めた比較方式とのパケット受信率とパケット衝突率を比較・評価した。SPS 方式と比較して改良方式により、都市環境 (15km/h シナリオ, 33.3m) では、相対値で受信率を約 3.1% 向上、衝突率を約 47% 低減できた。さらに、高速道路環境 (70km/h シナリオ, 155.6m) では、受信率を約 11% 向上、衝突率を約 40% 低減できることを確認した。さらに、改良方式では、一部車両のみに適用した場合でも改善効果を確認でき、SPS 方式との後方互換性を持つことが示せた。

今後の課題として、輻輳環境での更なる信頼性の改善、NR-V2X (Rel-16) システムや 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。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大変多くの方々からのご協力、ご支援を頂き、ここに深く感謝の意を表します。

3年間を通じて研究の着想から、推敲、本論文の執筆をはじめ、多くのご支援とご指導を賜りました指導教員の電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 湯素華 准教授に心より厚く御礼申し上げます。また、副指導教員の同専攻 策力木格 准教授には、修士論文の執筆や技術的な観点から、ご助言を頂きましたこと深く感謝申し上げます。産学官連携センター長 小花貞夫 特任教授には、本学学域に在籍時から研究の実施並びに論文執筆に際して的確なご助言を頂きましたこと、心から御礼申し上げます。さらに、博士前期課程の2年間共に共同研究を実施させて頂きました、株式会社 KDDI 総合研究所の大岸智彦様、上野高明様には、企業の方ならではの実用性に基づいた知見やご指摘をご教示頂き、深く感謝致しますとともに、御礼申し上げます。

研究生生活を共に切磋琢磨し、非常に有意義なものにしてくれた、湯研究室の学生の皆様に深く感謝致します。最後に、何よりも私の学生生活をここまで経済的・精神的に支えて頂いた家族に深い敬意と感謝を示し、御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 警察庁, “令和 3 年中の交通事故死者数について”, 2022.1
- [2] S. Zeadally, M. A. Javed, and E. B. Hamida, “Vehicular Communications for ITS: Standardization and Challenges,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 11-17, March 2020.
- [3] 一般社団法人 電波産業会 (ARIB) , “ARIB STD-T109”, 2022.1
- [4] 一般社団法人 電波産業会 (ARIB) , “ARIB STD-T75”, 2022.1
- [5] H. Seo, K. D. Lee, S. Yasukawa, Y. Peng, and P. Sartori, “LTE evolution for vehicle-to-everything services,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 6, pp. 22-28, June 2016.
- [6] N. Bonjorn, F. Foukalas, and P. Pop, “Enhanced 5G V2X services using sidelink device-to-device communications,” *Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, June 2018.
- [7] T. H. Lee and C. F. Lin, “Reducing Collision Probability in Sensing-Based SPS Algorithm for V2X Sidelink Communications,” *IEEE REGION 10 CONFERENCE (TENCON)*, November 2020, pp. 303-308.
- [8] 瀬川洋介, 上野高明, 大岸智彦, 湯素華, 小花貞夫, “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,” *情報処理学会論文誌*, vol. 64, no. 4, 2022.04.
- [9] 国土交通省, “ITS 全体構想”, 2022.01
- [10] 一般社団法人 UTMS 協会, “安全運転支援システム (DSSS) ”, 2022.01, <https://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>
- [11] 国土交通省, “ASV (先進安全自動車) 自動車総合安全情報”, 2022.01, <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/index.html>
- [12] G. Naik, B. Choudhury, and J. M. Park, “IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70169-70184, May 2019.
- [13] 一般社団法人建設電気技術協会, “DSRC (狭域通信) の現状と動向”, 2022.01
- [14] 3GPP TR 21.914 (V14.0.0), “The 3GPP Summary of Rel-14 Work Items,” May 2018.
- [15] 3GPP TR 21.916 (V0.5.0), “The 3GPP Summary of Rel-16 Work Items,” July 2020.

- [16] 3GPP TS 36.213 (V14.4.0), “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures,” October 2017.
- [17] 3GPP TS 36.321 (V14.4.0), “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification,” September 2017.
- [18] D. Lecompte and F. Gabin, “Evolved multimedia broadcast/multicast service (eMBMS) in LTE-advanced: Overview and Rel-11 enhancements,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 11, pp. 68-74, November 2012.
- [19] D. G. Barquero, D. Navratil, S. Appleby, and M. Stagg, “Point-to-Multipoint Communication Enablers for the Fifth Generation of Wireless Systems,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 53-59, March 2018.
- [20] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, Y. Peng, J. Fang, R. Zhao, and L. Zhao, “Vehicle-to-Everything (V2X) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 70-76, July 2017.
- [21] R. M. Masegosa and J. Gozalvez, “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, December 2017.
- [22] Y. Segawa, S. Tang, T. Ueno, T. Ogishi, and S. Obana, “Reliable and Efficient Dissemination of Traffic Events Among Vehicles Associated with Different Operators by Using Cellular V2X,” *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, December 2020.
- [23] ETSI TS 103 613 (V1.1.1), “Using LTE Vehicle to everything communication in the 5.9 GHz frequency band; Access layer specification,” November 2018.
- [24] A. Bazzi, G. Cecchini, M. Menarini, B. M. Masini, and A. Zanella, “Survey and Perspectives of Vehicular Wi-Fi versus Sidelink Cellular-V2X in the 5G Era,” *Future Internet* 2019, vol. 11, no. 6, 122, May 2019.
- [25] T. Maruko, S. Yasukawa, R. Kudo, S. Nagata, and M. Iwamura, “Packet Collision Reduction Scheme for LTE V2X Sidelink Communications,” *IEEE VTC-Fall*, August 2018.
- [26] A. Mansouri, V. Martinez, and J. Harri, “A First Investigation of Congestion Control for LTE-V2X Mode 4,” *Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, January 2019.

- [27] S. Kaul, M. Gruteser, V. Rai, and J. Kenney, "Minimizing age of information in vehicular networks," in *Proc. IEEE SECON 2011*, pp. 350-358, June 2011.
- [28] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez, and M. Sepulcre, "Configuration of the C-V2X Mode 4 Sidelink PC5 Interface for Vehicular Communication," *Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*, December 2018.
- [29] M. G. Martin, M. Sepulcre, R. M. Masegosa, and J. Gozalvez, "Analytical Models of the Performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1155-1166, December 2018.
- [30] B. Toghi, M. Saifuddin, H. N. Mahjoub, M. O. Mughal, Y. P. Fallah, J. Rao, and S. Das, "Multiple Access in Cellular V2X: Performance Analysis in Highly Congested Vehicular Networks," *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, December 2018.
- [31] B. Kang, S. Jung, and S. Bahk, "Sensing-Based Power Adaptation for Cellular V2X Mode 4," *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, October 2018.
- [32] K. Whitehouse, A. Woo, F. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, "Exploiting the capture effect for collision detection and recovery," in *Proc. EmNetS-II*, 2005, pp. 45-52.
- [33] Scenarigie, Space-Time Engineering, <https://www.spacetime-eng.com/en/>
- [34] 3GPP, TR 36.885 (V14.0.0), "Study on LTE-based V2X Services (Release 14)," June 2016.
- [35] ITS Connect Promotion Consortium, Inter-vehicle Communication Message Specifications ITS Connect TD-001 ver. 1.0, 2015.

本研究に関する発表

- 瀬川洋介, 上野高明, 大岸智彦, 湯素華, 小花貞夫, “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,” 情報処理学会論文誌, vol. 64, no. 4, 2022.04.
- 瀬川洋介, 湯素華, 上野高明, 大岸智彦, 小花貞夫, “C-V2X sidelink を用いた近距離通信の高信頼スケジューリング法,” 情報処理学会第 88 回高度交通システムとスマートコミュニティ研究会 (ITS). (2022.03 オンライン)
- 瀬川洋介, 湯素華, 小花貞夫: 車載装置、通信方法および車載装置プログラム, 特願 2022-029178 (2022.2.28) .
- Y. Segawa, S. Tang, T. Ueno, T. Ogishi, and S. Obana, “Reliable and Efficient Dissemination of Traffic Events Among Vehicles Associated with Different Operators by Using Cellular V2X,” IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), December 2020.
- 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. (2020.06 オンライン) (優秀プレゼンテーション賞, 優秀論文賞)
- 瀬川洋介, 小花貞夫, 湯素華, “Cellular-V2X による自律分散制御を用いた無線リソースの低遅延・高信頼なスケジューリング法の提案,” 情報処理学会第 82 回全国大会, 4Y-01, pp. 367-368. (2020.03 オンライン) (学生奨励賞)