

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

瀬川洋介¹ 湯素華¹ 上野高明² 大岸智彦² 小花貞夫¹

概要 : Cellular V2X における, 車車間直接通信を行う Sidelink (SL) は, 見通しのきかない環境で, 周辺車両の把握による事故防止に有効であるが, リソース割り当てに使用される Semi Persistent Scheduling (SPS)方式は, 混雑環境で, 信頼性が低下し, また, 異なる送信周期への対応が不十分である. これらの問題に対して, 本稿では, C-V2X SL Mode 4 において, SPS との後方互換性を保ちながら, 近接車両との通信範囲が重複する範囲内の干渉車両数の最小化により, 送信衝突の影響を抑え, また, 将来の送信衝突の予測により, 送信周期の異なるアプリケーションが共存できるようにする手法を提案する. 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が高い信頼性を維持でき, 部分的に運用する場合でも十分な可用性があることを確認した.

High-Reliable Scheduling Method for Short Range Vehicular Communication Using C-V2X Sidelink

YOSUKE SEGAWA¹ SUHUA TANG¹ TAKA AKI UENO²
TOMOHIKO OGISHI² SADA O OBANA¹

1. はじめに

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, 車と全てのモノが繋がる V2X (Vehicle-to-Everything) 通信の研究・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 など) では検知できないより広範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のため, SL の高信頼化の検討は重要事項である.

C-V2X SL では, 同一周波数と時間軸で囲まれた無線リソースを選択して, そのリソース上で一定期間パケットを定期的に送信する. SL では, 使用する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) に接続している車両同士でないと通信できない[3]. また, 近接車両同士が自律分散制御でリソースを選択して通信する 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, 信頼性向上のために, 隠れ端末問題を考慮しなければならない. 例えば Mode 4 において, 隠れ端末同士が同一リソースを選択した時, 隠れ端末の影響下に存在する複数の干渉車両でのパケット受信時にパケット衝突が発生し, 信頼性の低下を招く. この理由は, Mode 4 で

は通信不可能な位置に存在する隠れ端末を考慮したスケジューリングができないので, 持続的にパケット衝突が発生するためである.

筆者らは先に先行方式として, 既存の Mode 4 で利用されている SPS (Semi Persistent Scheduling) 方式をベースとして, 隠れ端末問題へ対応した衝突回避方式を提案した[18]. しかし, この先行手法では, 近距離内での信頼性に改善の余地が残されている. さらに, スケジューリングのために, 追加される情報により, オーバーヘッドが発生する. また, 実環境における, 異なる送信周期を持つ車両の混在は考慮されていない.

本稿では, SL において, 追加情報を必要とせずに, 異なる送信周期を必要とするアプリケーションとの共存を考慮したスケジューリング手法を提案する. 提案方式では, 選択候補であるリソースに対して, そのリソースを現在使用する通信範囲内の車両 (近接車両) と自身との通信範囲が重複する領域に存在する干渉車両を推測する. さらに, 相異なる送信周期を持つ車両は, お互いの送信周期の最小公倍数毎に送信衝突を起こす危険性がある. そこで, 自身が選択予定のリソースだけでなく将来的に使用するリソースの干渉状況も考慮することで, 異なる送信周期に適したスケジューリングを実施する. 推測した干渉車両の数を最小化しつつそのリソースを使用する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, 特に近距離におけるパケット衝突の回避を試みる. 以上, 提案方式の有効性をシミュレーションにより評価する.

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications
² (株) KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc.

2. C-V2X 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) にて、2017 年 3 月に Release 14 (LTE-V2X) [4]として標準化作業が完了した。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) [5]では、5G-NR を用いた URLLC (Ultra-Reliable and Low Latency Communication: 超高信頼低遅延通信) の拡張及び 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 [6]、通信には PC5 インタフェースを用いる [7]。

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 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、パケットサイズ及び 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。

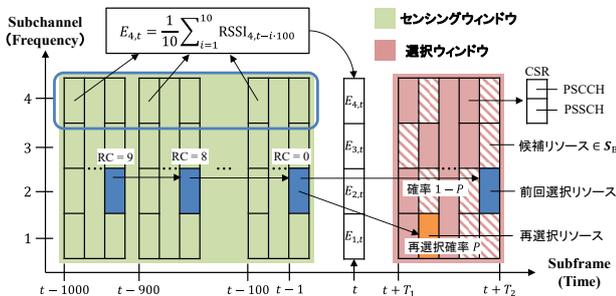


図 1. SPS 方式を用いたリソース再選択 (RRI = 100ms)

Figure 1. Reselection of resource with the SPS algorithm (RRI = 100ms)

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。C-V2X は、前述の LTE-V2X と NR-V2X の総称として用いられており、本稿では LTE-V2X に焦点を当てるが、NR-V2X への適用も可能と考えられる。

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。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り当てが可能となる。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 [8]、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 [3]。異なるキャリア同士の車両では、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 [9]。自律分散制御では、各車両がチャネルセンシング及び 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、周期的に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。

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 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)。

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

(1)式より、例えば RRI を 100ms に設定した時は、過去 1s 間で 10 個の受信電力状況を常に監視する。

2.2.2 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 1 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全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)。

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 \mathbf{S}'_A において、 $E_{f,t}$ が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 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、 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。また、確率 $1 - P$ に従い再選択しないときは、使用中のリソースを継続利用し、RC のみ再設定する。RC の初期値は、送信周期によって定められ、 $[RC_{\min}, RC_{\max}]$ 内の整数値からランダムに選択する。 RC_{\min} と RC_{\max} は自身のRRIを用いて、 $RC_{\min} = 5 \cdot RRI_{\max} / RRI$ 、 $RC_{\max} = 15 \cdot RRI_{\max} / RRI$ と表される。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。

3. 関連研究とその課題

3.1 関連研究

リソース再選択時におけるパケット衝突を防ぐために、仮予約を利用した Pre-reserved 手法が提案されている[10]。Pre-reserved では、RC が 0 の送信時に、フォーマットを一部変更して再選択先のリソースを仮予約する。この仮予約が選択ウィンドウ開始までに衝突していなければ、正式にこのリソースを使用する。この手法では、再選択時の信頼性向上には繋がるが、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、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。

さらに[11]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。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が軽減可能である。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、リソース個別毎の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。

Mode 4 は、基地局の支援無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[12][13]。特に[12]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繋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[14]。そのため、輻輳制御として各車両が計測する CBR (Channel Busy Ratio) と自車両の使用率

である CR (Channel occupation Ratio) 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)することで輻輳を抑える DCC (Distributed Congestion Control) が検討されている[15]。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、[16]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、パケットドロップや送信電力の制御は、AoI (Age of Information) [17]を低下させる要因となり得るため、輻輳制御以外での信頼性を維持する検討が必要である。

3.2 先行方式

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。筆者らは、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に位置する車両を推測するために、PSSCH にリソース毎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提案した。本論文では、この先行方式を SPS with Collision Avoidance (SPS-CA) 方式[18]とする。

3.2.1 パケット衝突車両数の推測

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時に 1、パケットを復号できなかった時に 0 を格納した 1 ビットの情報 (受信可否情報) 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、このリソースを既に使用している車両が存在するため、送信元車両でパケット衝突が発生する。そのため、RBI が 1 のリソースでのパケット衝突を推測できる。さらに、複数車両から受信した RBI を対応するリソース毎に加算することで、選択ウィンドウ内のリソース毎に、パケット衝突が発生する車両数を推測できる。

3.2.2 リソース選択

SPS-CA では、SPS をベースとするため、リソース選択の開始は同じ手順を踏む。はじめに、2.2 節で説明したように、センシング情報から候補集合 S'_A を形成する。次に、 S'_A 内のリソースに対して、3.2.1 項で説明したパケット衝突車両数と 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パケット衝突車両数を昇順にソートし、もし同じパケット衝突車両数で比較する時は、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のリソースを再選択リソースとする。

3.2.3 先行方式を踏まえた課題

SPS-CA では、隠れ端末も考慮してパケット衝突車両数

を推測しているため、通信範囲内の PRR を向上できるが、近距離での PRR の改善効果は小さい。また、SPS-CA では、パケット衝突車両数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。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。

4. 提案方式

4.1 概要

提案方式では、3.2.3 節で述べた課題に対応すべく、追加情報を利用せずに近距離での更なる改善(干渉車両の推測)及び異なる送信周期へ拡張した IPMI (Interference Prediction and Multi-Interval extension) アルゴリズムを提案する。

4.2 干渉車両の推測

本稿では、図 2 で示すように、自車両が過去 (RC_{max} に基づいて) 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。SL では、複数車両から同時にパケットを受信した時は、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 [19]。この特性を生かし、近接車両間との干渉車両集合を推測する。図 2 において、自車両を i 、近接車両を j とする。このとき、 i と j との干渉領域に位置する干渉車両の集合は $I_{i,j} = \{1,2,3\}$ となる。ここで、干渉車両の位置情報の生存時間は 10 秒とし、受信時刻のタイムスタンプと現在時刻との差、速度から現在の位置情報に補正して使用する。

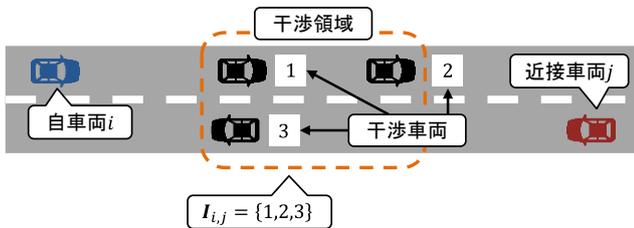


図 2. 干渉領域と干渉車両の定義

Figure 2. Interference area and interference vehicle

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、リソースの再選択車両 i が与えられる。出力では、近接車両と自車両 i との干渉車両集合 I を返す。2 行目で定義した車両 j は自車両 i の近接車両である。ここで、近接車両の定義は、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とする。次に、4 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。7 行目では i と j の干渉車両集合 $I_{i,j}$ に k を加える。Algorithm 1 は、提案手法の 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: PREDICTION OF INTERFERENCE VEHICLES

```

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

```

4.3 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送信周期を使用する。しかし、SPS をベースとした手法では、送信周期に基づいた選択ウィンドウ内のリソースのみが再選択候補となるため、選択ウィンドウ以降の状況が考慮されていない。本稿では、20, 50, 100ms の送信周期を想定しているため、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。例えば、図 3 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場合を想定する。このとき、 i の送信周期を 20ms、 j の送信周期を 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が、45 番のリソースは i の選択ウィンドウ (S_A) には含まれないため、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 が将来使用予定のリソース候補 (S_j) 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。

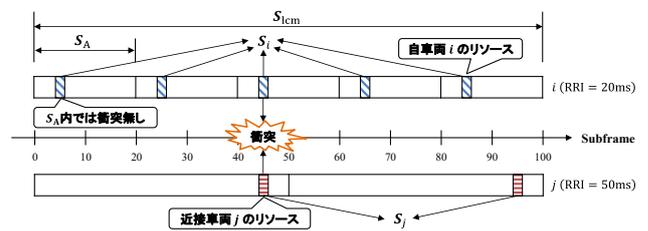


図 3. 相異なる送信周期の考慮

Figure 3. Consideration of multiple intervals

異なる送信周期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 、4.2 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、テーブル T が返される。 T とは、あるリソース $r \in S_{icm}$ を使用する自車両 i 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_{icm} は、自

車両と近接車両の送信周期の最小公倍数 (RRI_{lcm}) で考慮すべきリソースである。2 から 4 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 を生成する。ステップ 1 (5 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、7 から 12 行目では、使用予定のリソースを全て確認し、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 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考慮できる。ステップ 2 (14 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、将来発生するパケット衝突の状況を考慮した T に更新する。16 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を含めた集合である。17 から 21 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可能性があるため、 r のテーブルを m のテーブルに更新する。以上により、異なる送信周期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予定の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を生成できる。

ALGORITHM 2: EXTENSION OF MULTI-INTERVAL

```

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

```

4.4 IPMI アルゴリズム

提案手法である 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、4.2 節で示した Algorithm 1 に従い、 i と近接車両との干渉車両集合 I を推測する。3 行目では、4.3 節で示した Algorithm 2 に従い、 i の選択ウィンドウ内のリソースに対して将来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を持つテーブル T を取得する。4 から 6 行目では、選択ウィンドウ内のリソース集合 S_A に紐づく T 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 から 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、 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。以上の IPMI アルゴリズムにより、追加情報を利用せずに異なる送信周期が混在する環境を考慮した、無線リソースのスケジューリングが可能となる。

ALGORITHM 3: IPMI ALGORITHM

```

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

```

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[21] を C-V2X (3GPP Release 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。

5.1 比較方式

表 1 に比較方式である、SPS, Preclude, SPS-CA, IPMI (提案方式), IPMI+ との機能比較を示す (× は機能無し, ○ は機能有り)。IPMI+ とは、提案方式の理想的な状況における性能限界を確かめるために、全車両が基地局経由通信

により、自身の位置及び使用するリソース情報を共有できる方式とする。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 アルゴリズムを常に最新の情報を用いて実行できる。比較した機能は、1)リソース毎の干渉量の推測、2)異なる送信周期への考慮、3)追加情報及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 1. 比較方式における主要機能の比較

Table 1. Comparison of key functions among different methods

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

5.2 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 (PRR) とパケット衝突率 (PCR) を評価項目とする。

以下に、各評価項目の計算方法を示す。

- パケット受信率 (PRR) : PRR は、全車両が物理層で検知したシグナル数に対して、復号に成功したパケットの比率で計算する。ただし、結果は送受信車両の距離毎に計測する。
- パケット衝突率 (PCR) : PCR は、PRR と同じ分母を用いて、分子をパケット衝突が原因で復号に失敗したパケット数として計算する。パケット衝突とは、受信時に複数のシグナルを検知したときである。PRR と同様に、結果は送受信車両の距離毎に計測する。

5.3 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[22]を利用する。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、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)。車両はシナリオ毎に 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、全てのシナリオにおいて 1 チャネルとする。ヘッダ及び 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送信周期は 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送信周期を最後まで使用する。RC は送信周期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

インドウサイズは $(T_1, T_2) = (0, RRI)$ [ms] とする。パケット生成タイミングは、全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 2. 共通シミュレーション条件

Table 2. Common simulation parameters

項目	条件値
シミュレータ	Scenargie 機能拡張
通信方式	Sidelink Mode 4
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	128byte (without header)
送信周期	20, 50, 100ms
電波伝搬モデル	ITU-RP.1411
再選択カウンタ	$[RC_{min}, RC_{max}]$
再選択確率	1.0
選択ウィンドウ	$[0, \text{each RRI}]$
実行回数	20 回
シミュレーション時間	50s

5.3.1 Urban モデル

Urban モデルでは、[22]で規定された $1299m \times 750m$ ($433m \times 250m$ 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 (D) 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。図 4 に、Urban モデルのシミュレーション環境を示す。

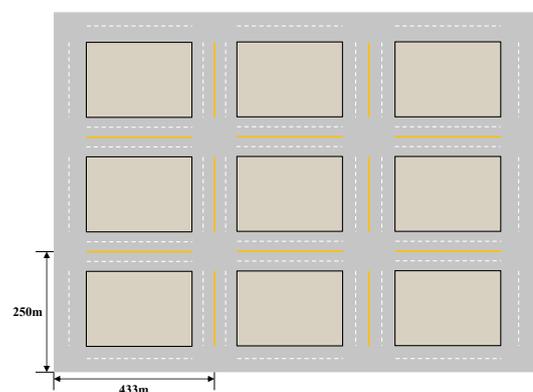


図 4. シミュレーション環境 (Urban モデル)

Figure 4. Simulation area (Urban model)

5.3.2 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、道路上及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が受信するパケット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。図 5 に、Freeway モデルのシミュレーション環境を示す。

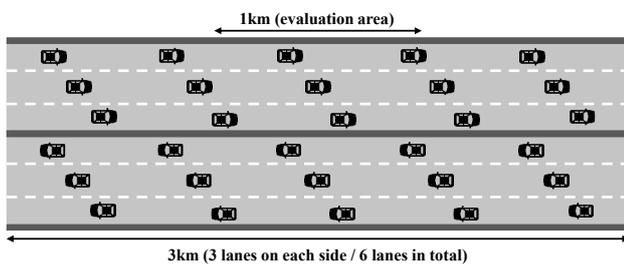


図 5. シミュレーション環境 (Freeway モデル)

Figure 5. Simulation area (Freeway model)

5.4 シミュレーション結果・考察

5.4.1 信頼性の評価

(1) Urban モデル

Urban モデルにおいて、提案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 及び PCR の結果を図 6(a), (b)に示す。図 6(a)より、Urban モデルの各シナリオにおいて通信距離に依らず、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。また図 6(b)より、確かに PRR の改善要因が PCR の低減であることが分かった。15km/h のシナリオ (高密度環境)において、逆方向に進む車両の 4 秒車間距離 (33.3m) では、SPS と比較して、PRR を約 3.1% 向上、PCR を約 47% 削減できることを確認した。この結果より、近距離でも十分に性能を向上できることが示せた。

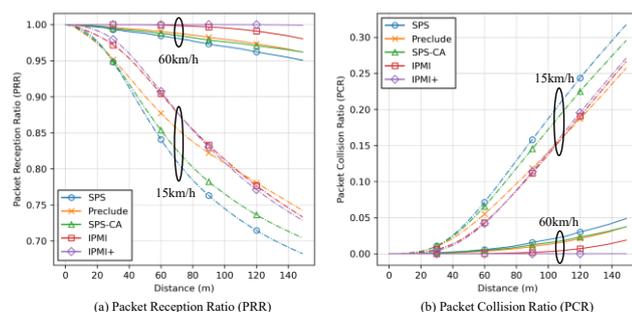


図 6. PRR と PCR (Urban モデル)

Figure 6. PRR and PCR (Urban model)

(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、PRR と PCR の結果をそれぞれ図 7(a), (b)に示す。図 7(a)より、どちらのシナリオにおいても通信距離に依らず IPMI が SPS, Preclude, SPS-CA よりも優れた結果となった。図 7(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る。IPMI では、近距離でのトレードオフを優先するため、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。SPS と比較して、70km/h シナリオ (155.6m) において、PRR を約 11% 向上、PCR を約 40% 削減できることを確認した。

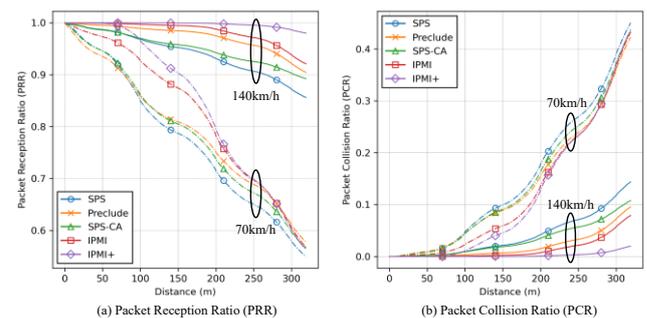


図 7. PRR と PCR (Freeway モデル)

Figure 7. PRR and PCR (Freeway model)

5.4.2 可用性の評価

次に、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。凡例において、例えば IPMI を 75% 適用した時の IPMI を利用する車両からの受信パケットから計算した PRR は IPMI (75%)、SPS 方式を利用する車両からの PRR を SPS (25%) と表す。

(1) Urban モデル

図 8(a), (b)に、Urban モデルにおいて、IPMI の適用割合を変化させたときの PRR を示す。図 8(a), (b)より、距離に関係無く IPMI がどの適用割合でも SPS より高いことが分かった。60km/h では、IPMI の適用割合が高いほど、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 は、60km/h では、SPS を 100% 適用する場合よりも距離に依らず優れた結果となった。

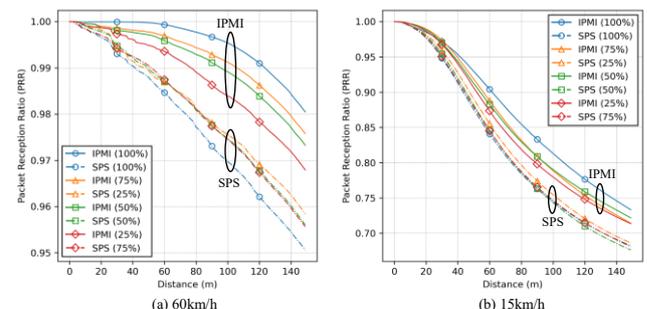


図 8. 部分適用時の PRR (Urban モデル)

Figure 8. PRR of partial deployment (Urban model)

(2) Freeway モデル

図 9(a), (b)に, Freeway モデルにおいて, IPMI の適用割合を変化させたときの PRR を示す. 図 9(a), (b)より, シナリオに依らず, IPMI の方がどの適用割合でも SPS より高い PRR となった. また IPMI の適用割合が高い程, 近距離において SPS 方式を利用する車両の PRR が改善されている. また, 70km/h の近距離では, IPMI の適用割合が低いときに 100%適用よりもわずかに優れた結果となっているため, 提案方式の更なる性能向上の余地がある. 本結果より, 提案手法の適用割合が低いときにも十分な可用性があることを確認できた.

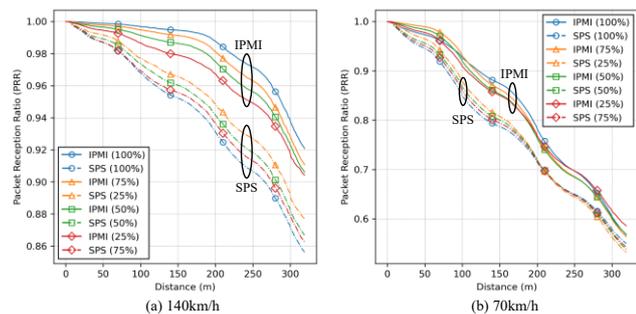


図 9. 部分適用時の PRR (Freeway モデル)

Figure 9. PRR of partial deployment (Freeway model)

6. 終わりに

本稿では, C-V2X (LTE-V2X) において, 追加情報を利用せずにパケット衝突を低減し, 異なる送信周期を持つ車両との共存を考慮した無線リソースのスケジューリング手法を提案した. 提案手法では, PSSCH への追加情報や従来の PSCCH のフォーマット変更無しに, 受信パケットのみから近接車両との干渉車両を推測する手法を考案した. さらに, 異なる送信周期の混在環境に適したスケジューリング手法である IPMI アルゴリズムを提案した. シミュレーション評価により, SPS と比較して IPMI では, 都市環境 (15km/h, 33.3m) で PRR を約 3.1%向上, PCR を約 47%削減できた. 高速道路環境 (70km/h, 155.6m) では, PRR を約 11%向上, PCR を約 40%削減できることを確認した. さらに, IPMI ではシナリオに依らず, 部分的な運用をした場合でも, 十分な可用性が保証できることを確認した.

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 (Release 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挙げられる.

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 3GPP TR 21.914 (V14.0.0), "The 3GPP Summary of Rel-14 Work Items," May 2018.

[5] 3GPP TR 21.916 (V0.5.0), "The 3GPP Summary of Rel-16 Work Items," July 2020.

[6] 3GPP TS 36.321 (V14.4.0), "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification," September 2017.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] T. H. Lee and C. F. Lin, "Reducing Collision Probability in Sensing-Based SPS Algorithm for V2X Sidelink Communications," *IEEE REGION 10 CONFERENCE (TENCON)*, pp. 303-308, November 2020.

[12] 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.

[13] M. Gonzalez-Martin, M. Sepulcre, R. Molina-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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] K. Whitehouse, A. Woo, F. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, "Exploiting the capture effect for collision detection and recovery," in *Proc. EmNetS-II*, pp. 45-52, 2005.

[20] 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.

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

[22] 3GPP, TR 36.885 (V14.0.0), "Study on LTE-based V2X Services (Release 14)," June 2016.