

修士論文

サイドリンク通信を用いた
隊列走行リレー伝送における
半二重性問題低減リソース制御方式に関する研究

令和5年度修了

三重大学大学院工学研究科

電気電子工学専攻

通信工学研究室

大島 輝斗

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	3
1.3	論文構成	3
第2章	隊列走行リレー伝送を実現する技術	4
2.1	自動運転技術	4
2.1.1	隊列走行	4
2.2	リレー伝送	5
2.3	セルラーネットワーク	6
2.3.1	無線チャネル構造	6
2.3.2	アクセス方式：OFDMA	8
2.4	C-V2X	11
2.4.1	無線チャネル構造	14
2.4.2	サイドリンク通信におけるリソース制御	16
2.5	自律的リソース制御：SB-SPS方式	18
2.5.1	SB-SPS方式によるリソース制御	18
2.5.2	隊列走行リレー伝送におけるSB-SPS方式に起因した半二重性問題	20
第3章	隊列走行リレー伝送での半二重性問題低減方式	23
3.1	隊列走行リレー伝送における半二重性問題要因	23
3.2	半二重性問題軽減方式	24
3.2.1	隣接隊列車両間でのサブフレーム重複回避	24
3.2.2	隊列車両のリソース再選択タイミング制御	27
第4章	特性評価モデル	29
4.1	トポロジーモデル	29
4.2	トラヒックモデル	29
4.3	通信チャネルモデル	29
4.4	チャネルアクセスモデル	30
4.5	伝搬モデル	30
4.6	受信判定モデル	30
第5章	特性評価	32
5.1	シミュレーション諸元	32
5.2	評価指標	33
5.3	サブフレーム重複回避の特性評価	34

5.3.1 再選択確率変化時の特性評価	3 4
5.3.2 隊列車両台数変化時の特性評価	3 6
5.3.3 隊列外車両密度変化時の特性評価	3 8
5.4 リソース再選択タイミング制御の特性評価	4 0
5.4.1 再選択確率変化時の特性評価	4 0
5.4.2 隊列車両台数変化時の特性評価	4 3
5.4.3 隊列外車両密度変化時の特性評価	4 5
第 6 章 まとめ	4 7
参照文献	4 9
謝辞	5 2
研究業績	5 3

第1章 序論

1.1 研究背景

近年，ITS（Intelligent Transport Systems）の発展のため，車両と全てのものが通信を行う V2X（Vehicle-to-Everything）通信が注目を集めている [1]．V2X 通信では車両が，他車両の位置や急停止等の周囲の交通状況に関する情報を受信することで，道路交通の安全性や効率性を向上させることが期待されている [2]．中でも他車両と通信を行う車車間通信は通信インフラ設備等が周囲になくとも通信可能であるため，ITS の発展に重要な通信技術である．

車車間通信を実現する通信規格として初期に提案されたのが DSRC（Dedicated Short Range Communications）と呼ばれる IEEE802.11p 標準規格に基づいた通信規格である [3]．現在では ADAS（Advanced driver assistance systems）などのための通信規格として用いられている．しかし通信範囲が狭く，信頼性の高い通信が可能な範囲に限られるという課題がある [4]，[5]．DSRC に代わる通信規格として現在注目を集めているのが，3GPP（3rd Generation Partnership Project）により標準化されている C-V2X（Cellular V2X）である [6]．C-V2X とは LTE（Long Term Evolution）や 5G（5th Generation Mobile Communication System）に代表されるセルラーネットワークに基づいた通信規格であり，DSRC と比較して広い通信範囲，高い信頼性等の特長がある [7]．また一般的な携帯電話ネットワークでは基地局を介した通信が行われるが，C-V2X では基地局を介さずに車両同士が直接通信を行うサイドリンク通信が標準化されている．ADAS や自動運転ではあらゆる状況下で迅速な運転支援が要求されるが，サイドリンク通信により車両は通信インフラ設備に依存しない低遅延な通信が可能となる．

サイドリンク通信では送信に必要な無線リソースを車両へ割り当てる必要があるため，車両への無線リソース割り当ての方針としてモード 3 とモード 4 が標準化されている．モード 3 では車両への無線リソースの割り当てのみ基地局が行う．それに対してモード 4 では，基地局は無線リソースの割り当てを行わず，車両が自律的に無線リソースを送信に利用する．そのため基地局に依存しておらず，基地局通信範囲外でも動作するモード 4 が C-V2X における主要な通信方式であるといえる．

C-V2X のモード 4 では，車両が自律的に無線リソースを管理するために SB-SPS（Sensing Based Semi Persistent Scheduling）方式と呼ばれるリソース管理方式が標準化されている [8]．SB-SPS 方式では車両がチャネルセンシングにより無線リソースの干渉状況を把握し，その結果に基づいて選択した干渉の低い無線リソースを定期的を送信に利用する．この方式により車両は基地局を介さずに無線リソースを自律的に利用

することが可能となる。

ところで、V2X通信の応用例として、自動運転による隊列走行が挙げられる [9]。隊列走行とは一定の距離を保ちながら複数の車両が連なって自律走行する技術である。車両が短い車間距離を維持しながら追従して走行するため、燃料効率や道路交通の安全性の向上を可能とする [10]。そのため特に物流業界での貢献が期待されている。追従走行を実現するために隊列車両間での無線通信による情報共有が行われ、特に隊列先頭車両の位置や速度情報等を隊列内で定期的に共有する必要がある。この情報共有には隊列内での定期的なリレー伝送が適しており、SB-SPS方式を用いたサイドリンク通信による隊列走行リレー伝送の実施が考えられる。

しかし、SB-SPS方式はブロードキャスト伝送向けのリソース制御方式であり、リレー伝送への適用は想定されていない。そのため隊列内リレー伝送を単にSB-SPS方式を用いて行う場合、過干渉による伝送失敗 [11]や伝送遅延の増大 [12]、半二重性問題等の課題によりリレー伝送性能が劣化してしまうと考えられる。半二重性問題とは、車両が送信と受信を同時に行えないため、送信中の車両へ他車両から通信が行われたとしてもその通信は必ず受信失敗してしまうという課題である [13]。これらの課題はいずれもリレー伝送性能を劣化させる恐れがある。特にSB-SPS方式によるリソース制御では各無線リソースの全般的な干渉状況のみを考慮しており、他車両がどの無線リソースを送信に利用しているかまでは考慮されていない。そのためSB-SPS方式では車両間で同時に送信することで発生する半二重性問題への対処は全く行われていない。ブロードキャスト伝送は通信範囲内の車両への一斉送信を一度行うだけであるため半二重性問題の影響は殆ど考えられないが、リレー伝送では車両が受信したデータパケットをさらに後続の車両へ中継する必要があり、半二重性問題が発生すると以降のリレー伝送が行われない。そのためリレー伝送において、SB-SPS方式で半二重性問題が回避できないことは致命的な課題となる。

半二重性問題の発生を低減するためには、車両間で送信時刻の重複を回避することが重要であり、そのためには他車両が利用している無線リソースの時刻を考慮する必要がある。そこでSB-SPS方式を利用した通信の性能向上の一環として、無線リソースの時刻を考慮することで半二重性問題を低減するリソース制御方式がいくつか提案されている [15], [16]。文献 [15], [16] では低干渉な無線リソースが多い時間帯の無線リソースを送信に利用することで、周辺車両との送信時刻の重複を回避している。

しかしこれらの方式は隊列走行リレー伝送については考慮していない。隊列走行では車両が連なって走行しており、車両の隊列への合流や隊列からの離脱は頻繁には行われないと考えられる。従って隊列走行リレー伝送では、半二重性問題は特定の隣接した隊列車両間で発生する課題である。そのため文献 [15], [16] とは異なり、特定の車両が利用している無線リソースの時刻を考慮することで効果的に半二重性問題を低減できる。

1.2 研究目的

本研究では SB-SPS 方式によるサイドリンク通信を適用した隊列走行リレー伝送に着目し、隊列車両間で発生する半二重性問題がリレー伝送性能へ与える影響を軽減し、リレー伝送性能を向上させることを目的とする。

SB-SPS 方式を適用した隊列走行リレー伝送において発生する半二重性問題は、隣接隊列車両間で同時刻の無線リソースを送信に利用することが原因である。そのため半二重性問題の発生を軽減するためには、隣接隊列車両が送信を行う時刻を考慮したリソース制御が必要である。また、隊列車両が送信に利用する新たな無線リソースを選択する際に、他の隊列車両も無線リソースを選択した場合、互いに相手の送信時刻を正常に考慮できずに半二重性問題が発生する恐れがある。そのため同時期のリソース選択を避けるために、隊列車両のリソース選択タイミングを制御する必要もある。

そこで本研究では SB-SPS 方式を拡張し、隣接隊列車両間での送信時刻の重複および同時期のリソース選択タイミングを回避するためのリソース制御方式を提案する。提案方式では車両は自身の隣接隊列車両の送信時刻を記録しておき、記録した時刻と重複しないように無線リソースの選択を行うことで送信時刻の重複を回避する。さらに提案方式では、隊列先頭車両から順に無線リソースの選択を行うことにより同時期のリソース選択も回避する。

提案方式の有効性の確認のため、計算機シミュレーションにより従来 SB-SPS 方式と比較して E2E (End to End) のリレー伝送失敗率を評価する。

1.3 論文構成

第 2 章では自動運転技術とそれを実現する通信規格である C-V2X について記述する。第 3 章では隊列走行リレー伝送における半二重性問題発生要因とその軽減方式について記述する。第 4 章では特性評価に用いるシステムモデルについて記述する。第 5 章では計算機シミュレーションによる提案方式の特性評価を行い、その有効性についての考察を記述する。最後に第 6 章で本論文を総括する。

第2章 隊列走行リレー伝送を実現する技術

本章では自動運転技術およびそれを実現する通信規格である C-V2X について説明する。2.1 節では V2X 通信の応用例である自動運転技術および隊列走行について記述する。2.2 節では C-V2X の基となるセルラーネットワークについて記述する。2.3 節では C-V2X について記述する。2.4 節では C-V2X で使用されるリソース制御方式である SB-SPS 方式について記述する。

2.1 自動運転技術

ITS において自動運転は急速に発展している技術であり、道路交通の安全性向上や渋滞の緩和、燃費の最適化など様々な利点をもたらすとされている。自動運転の発展はレベル 0（手動運転）からレベル 5（完全自動運転）まで段階的に発展しており、最終的には運転者が制御することなく、車両が自律的に交通状況に対応することで安全かつ効率的に走行を実現することが可能となる。

周囲の交通状況を把握するために、自動運転では主に自車両に取り付けられたセンサーを利用する。しかしセンサーのみの利用では車両が収集できる交通情報に限界があるため、無線通信を用いた自動運転が注目を集めている。無線通信を用いることで、車両が他車両や交通インフラ等とリアルタイムで交通情報を共有し、より安全かつ効率的な交通の制御が可能となる。

2.1.1 隊列走行

隊列走行は無線通信を用いた自動運転の応用例の一種であり、トラックなどの複数の車両が一定の距離を保ちながら連なり、先頭車両に追従して走行する自動運転技術である。車両同士が短い車間距離を維持して走行するため、空気抵抗の軽減による燃費の改善が期待され、エネルギーの効率的な利用が可能となる。また車両同士が協調して走行するため、急加速や急ブレーキが減少して円滑で事故の少ない交通が実現できる。

隊列走行では追従走行を実現するために、隊列車両間での無線通信が利用される。車両の速度や位置等の情報を無線通信により共有することで、隊列車両の移動に対して周囲の隊列車両が同期して走行する。そして隊列を維持するためには、特に先頭車

両の走行情報を隊列内で定期的に共有することが重要である。そのため隊列走行の運用には隊列の先頭車両から最後尾車両までのリレー伝送を用いた走行情報の共有が適しており、隊列内リレー伝送を実現するための通信方式が必要である。

2.2 リレー伝送

リレー伝送とは、信号を送信するために中継装置を使用する通信技術である。図 2.1 のように中継機能を持った各無線端末が信号の転送を繰り返すことで、単一のリンクであれば電波が届かないような広範囲な通信が可能になる。また通信の信頼性を高めることで、通信品質の向上にも繋がる。中継装置は信号を転送する際に雑音やエラーを除去して送信するため、リレー伝送中の情報の信頼性が確保される。その結果リレー伝送では信号が劣化することなく目的地まで届けられるため、通信の安定性が向上し、高品質な通信サービスを提供することが可能になる。

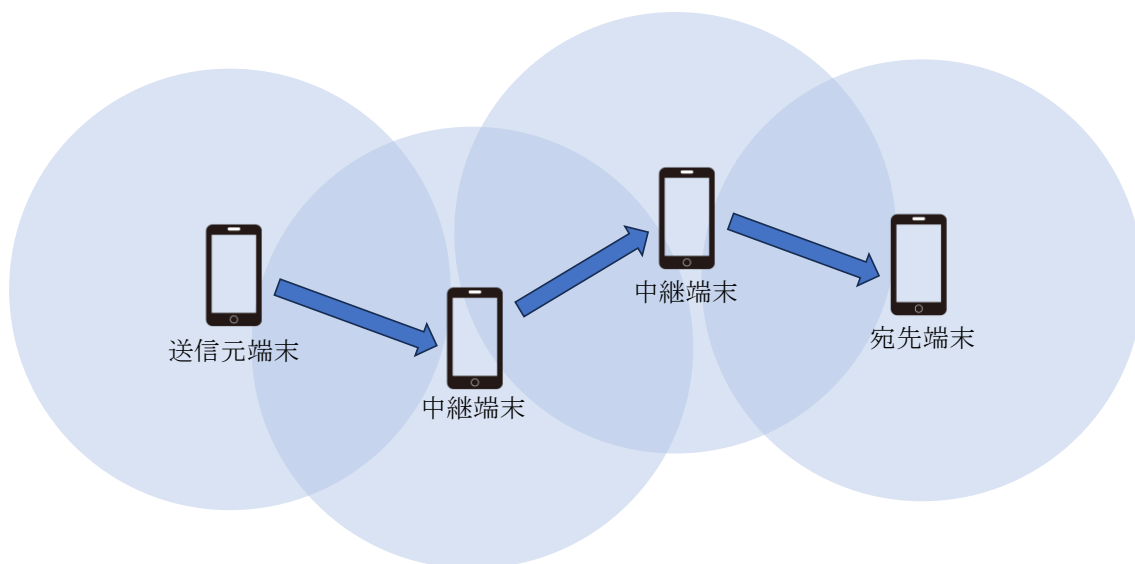


図 2.1 リレー伝送

2.3 セルラーネットワーク

セルラーネットワークとは、携帯電話やスマートフォン等の移動体通信端末が通信するための通信網である。セルラーネットワークでは、地域を複数のセルと呼ばれる一定の広さの区間で分割し、各セルに端末の通信を管理する基地局を設置することで広範囲での通信を可能にしている。

セルラーネットワークの基盤となる技術としてアクセス方式が挙げられる。セルラーネットワークでは基地局に多数の端末が接続されている。そのため各端末に対して高速で効率的な同時に通信を提供する必要がある、それを可能とする主な技術が端末と基地局間の接続を管理するアクセス方式である。本節ではセルラーネットワークのアクセス方式およびその関連技術について説明する。2.1.1 節ではセルラーネットワークの無線チャネル構造について記述する。2.1.2 節ではセルラーネットワークで使用される主要なアクセス方式について記述する。

2.3.1 無線チャネル構造

セルラーネットワークにおける無線チャネルは、時間領域と周波数領域でそれぞれ構造が定義されている。

時間領域において定義されている無線フレーム構造を図 2.2 に示す。1つの無線フレームは 10 個のサブフレームから構成されている。またサブフレームは 2つのスロットから構成されており、スロットは 7個のシンボルから構成されている。

またセルラーネットワークでは図 2.3 に示すチャネル構造が定義されている。無線リソース割り当ての最小単位は RB (リソースブロック) であり、1つの RB は時間領域で 7個のスロット、周波数領域で 12 個のサブキャリアから構成されている。またスケジューリングの時間間隔は TTI (送信時間間隔) であり、これはサブフレーム長と等しい。そのためサブフレームごとにスケジューリングが行われ、選択された端末はサブフレーム内の 2つの RB が割り当てられる。

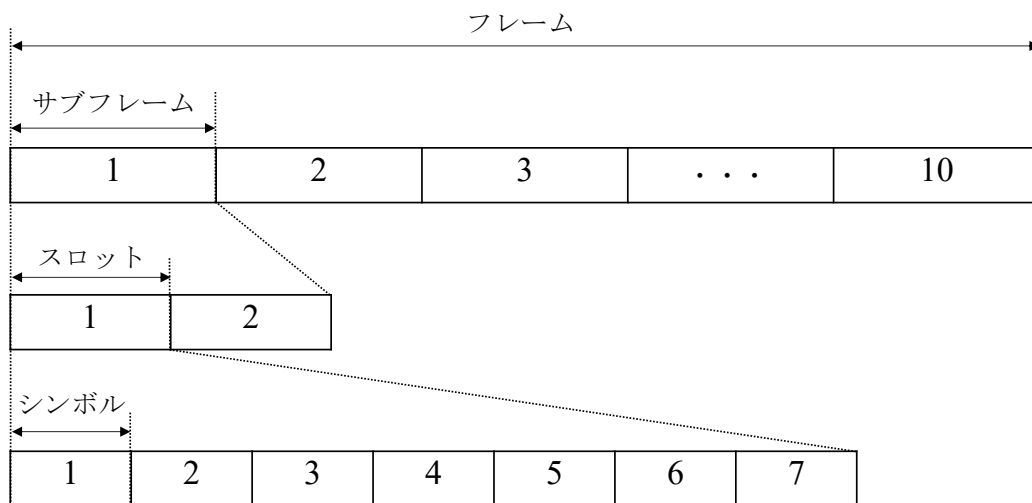


図 2.2 セルラーネットワークフレーム構造

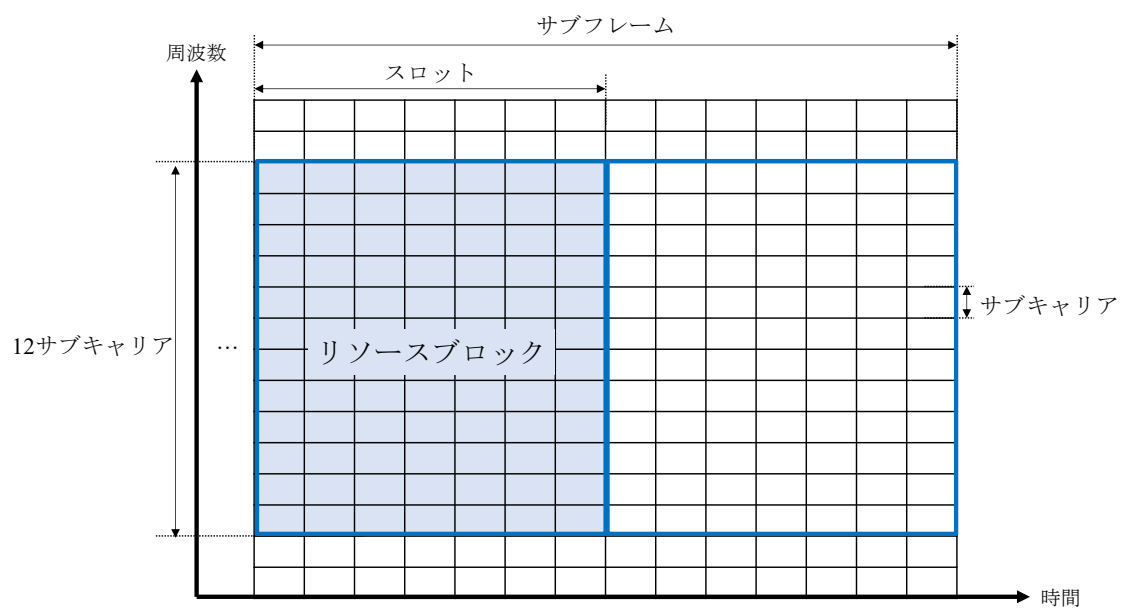


図 2.3 セルラーネットワークのRB構造

2.3.2 アクセス方式：OFDMA

OFDMA（直交周波数分割多元接続）はセルラーネットワーク下り通信で使用されるアクセス方式であり、周波数帯域を複数の直交するサブキャリアに分割し同時に多くのデータの伝送を可能にする OFDM（直交周波数分割多重）を発展させた方式である。

OFDM はセルラーネットワークで使用される多重化方式であり、周波数帯域を複数の狭帯域（サブキャリア）に分割し各サブキャリアにデータを割り当てて変列伝送を行う方式である。OFDM は周波数を分割して利用することから、FDM（周波数分割多重）の一種と捉えることが出来る。しかし FDM では図 2.4 のように周波数軸上で各サブキャリアが干渉しないようにガードバンドと呼ばれる一定の間隔を空けてサブキャリアを配置するのに対し、OFDM では図 2.5 のように直交関係となるように各サブキャリアを配置する。周波数帯域当たりのサブキャリア数を多く確保することが出来るため、OFDM は周波数利用効率の高い方式である。

OFDMA では図 2.6 のように複数の端末に対して各 RB 内の各サブキャリアが別々に割り当てられ、1つの RB を複数の端末が共有しながら通信を行う。サブキャリアの割り当ては基地局が行っており、各端末の伝送効率が最も高くなるように割り当てる。そのため OFDMA は端末毎の通信要求に柔軟に対応でき、スループットや効率を向上させながら多元接続を可能にしている。また OFDMA では信号を構成するサブキャリア数を調整することで、様々な周波数帯域幅に対応することが可能である。

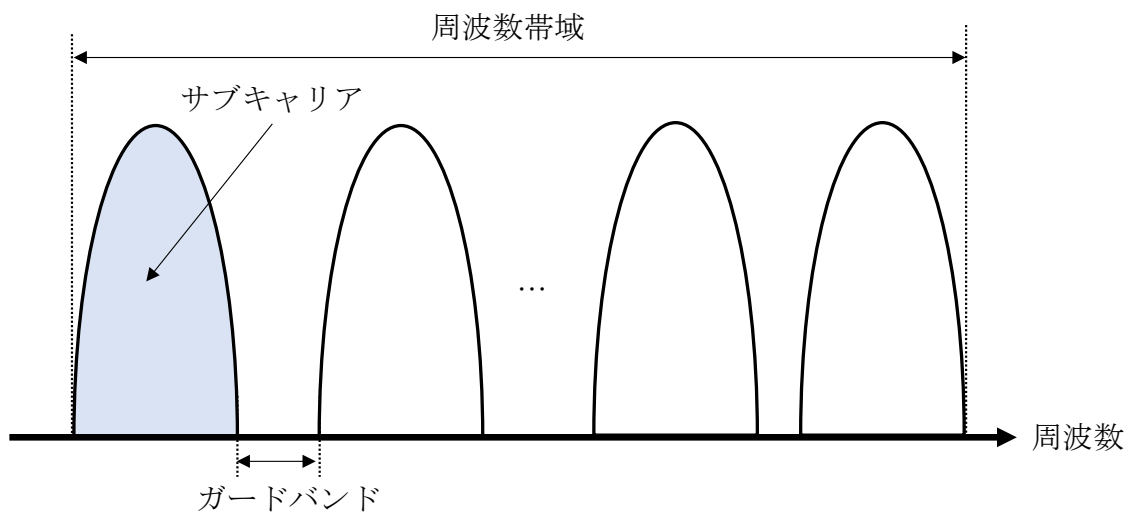


図 2.4 FDM の周波数軸上のサブキャリア配置

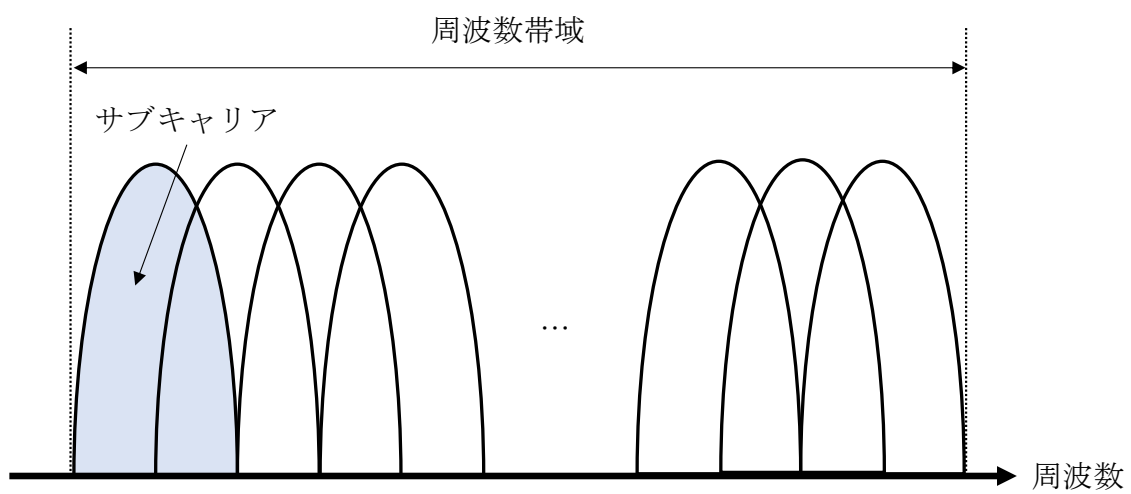


図 2.5 OFDM の周波数軸上のサブキャリア配置

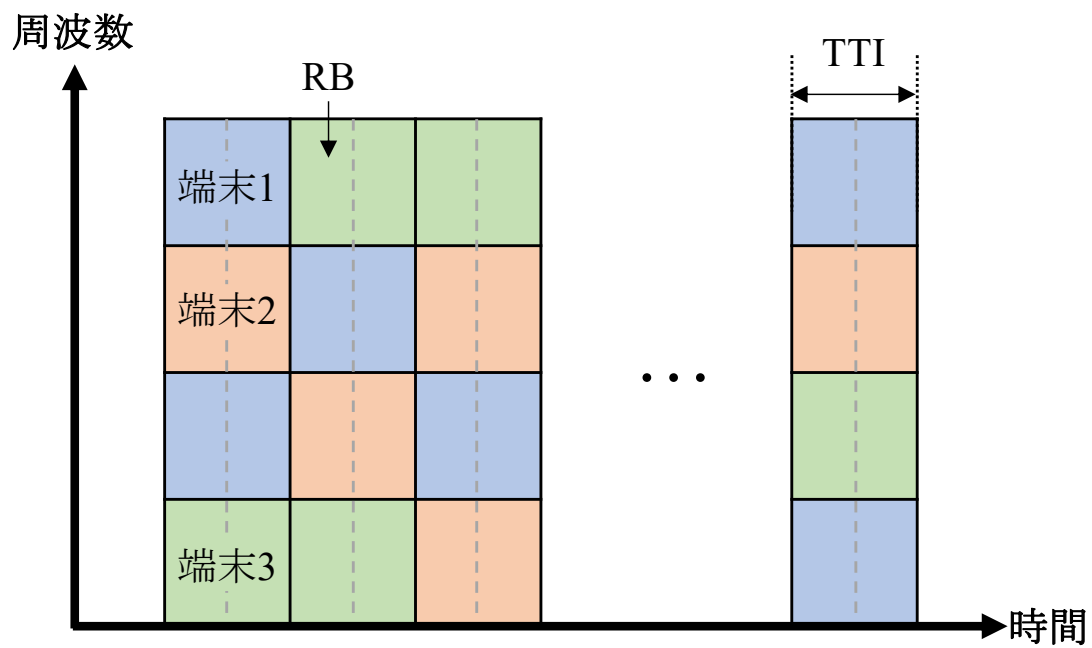


図 2.6 OFDMA による端末への RB 割り当て

2.4 C-V2X

C-V2Xは3GPPにより標準化されており、LTEや5Gなどのセルラーネットワーク技術を用いて車両とあらゆるものとの間で通信を可能にする通信規格である。C-V2Xでは図2.7に示すように、V2V（車車間）通信やV2I（車両-交通インフラ設備間）通信、V2P（車両-歩行者間）通信、V2N（車両-インターネット間）通信がサポートされている。C-V2Xを用いたITSでは、他車両や路側機との交通情報の共有や、ネットワーク上のサーバーから情報を収集することが可能となる。その結果、車両が個別にデータを収集する事と比較して、自車両から見通し外となる領域の交通情報の獲得や、情報処理にネットワーク上のサーバーを使用することが可能となるため、C-V2Xによるさらなる道路交通の効率や安全性の向上が見込まれている。

C-V2Xでサポートされている通信の中でも、特にV2N通信とV2V通信が重要であるとされている。V2N通信は図2.8に示すように車両と基地局が接続される通信であり、従来の携帯電話ネットワークと同様に、車両から基地局への上り通信と基地局から車両への下り通信による基地局を経由した通信を行う。V2N通信では基地局による集中的な通信制御が行われるため、車両は適切に管理された通信を広範囲で行うことが可能である。しかし基地局のカバレッジ外の車両は通信不可となってしまう。また基地局のカバレッジ内に車両が存在したとしても、上り通信と下り通信の往復により伝送遅延が増大してしまう。そのため山間部や災害時などで通信インフラ設備への接続が困難な状況や、迅速な運転支援が必要な状況ではV2N通信による道路交通の効率や安全性の向上は期待できない。

通信インフラ設備に依存せずに、低遅延な通信が可能となる通信形態として注目されているのがV2V通信である。特にC-V2XにおけるV2V通信はサイドリンク通信と呼ばれている。サイドリンク通信によりV2N通信では困難であった状況下でも適切な運転支援を行い、道路交通の効率や安全性をさらに向上させることが期待されている。

サイドリンク通信では図2.9のように上り通信や下り通信による基地局を経由した通信は行われず、近隣の車両同士が接続されて直接通信を行う。そのため通信範囲は狭くなるが、伝送遅延が抑えられて迅速な交通情報の取得が可能となる。また基地局のカバレッジに制限されない独立した通信が可能であるため、山間部や災害時などの基地局と通信ができない環境下であっても運転支援を可能にする通信として注目を集めている。サイドリンク通信ではセルラーネットワークとほとんど同様の通信システムを使用しているが、無線チャネル構造やリソース制御に関してはサイドリンク通信用の仕様が適用されている。

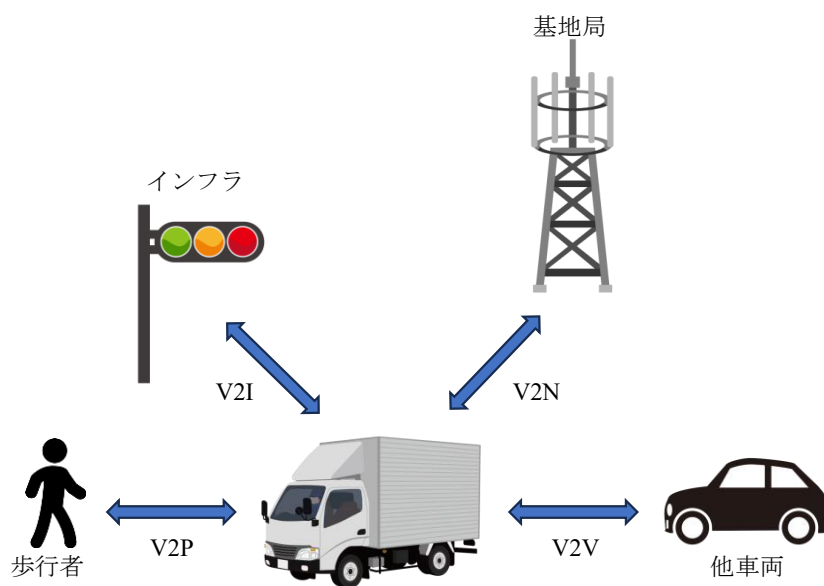


図 2.7 C-V2X によりサポートされる各種通信

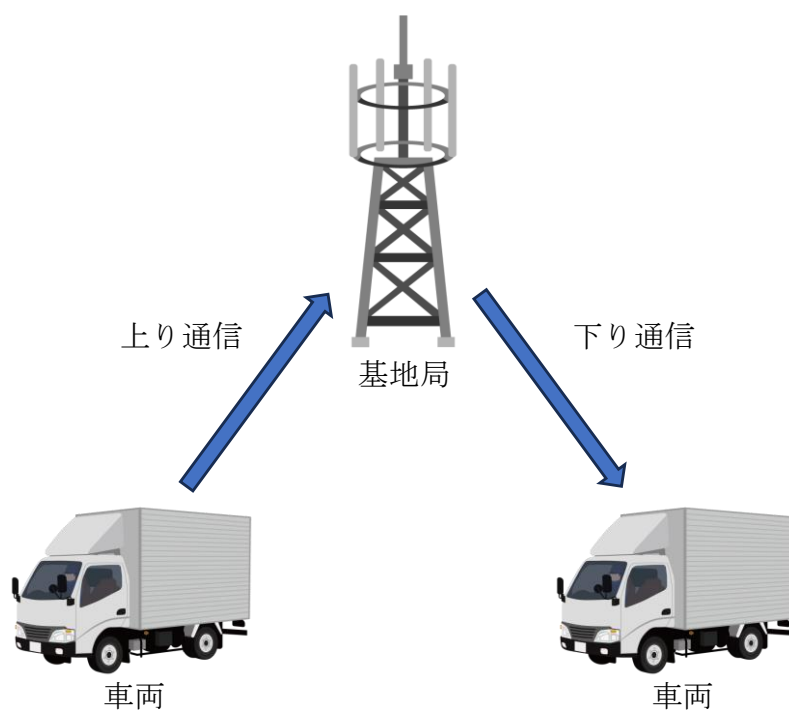


図 2.8 基地局経由の通信

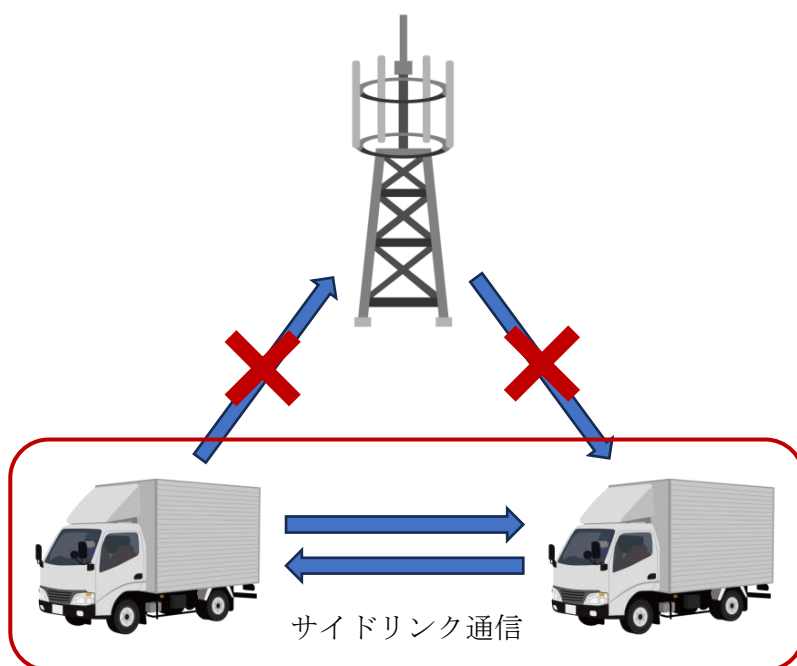


図 2.9 サイドリンク通信による V2V 通信

2.4.1 無線チャネル構造

サイドリンク通信では，セルラーネットワークと同様に時間領域と周波数領域が分割された無線チャネル構造を使用して無線リソースを管理している．サイドリンク通信における無線チャネル構造を図に示す．ただし無線リソース割り当ての最小単位がセルラーネットワークとは異なっており，サイドリンク通信では図 2.10 に示すように複数の RB の集合を割り当ての最小単位として扱っている．時間領域での割り当ての最小単位はセルラーネットワークと同様にサブフレームであり，周波数領域での割り当ての最小単位はサブチャネルと呼ばれている．以降，断りがない限りサイドリンク通信における割り当て最小単位を本論文では無線リソースと呼ぶ．無線リソースを構成する RB 数は可変であり，パケットサイズや MCS (Modulation and Coding Scheme) 等により決定される．

無線リソースはさらに PSCCH (Physical Sidelink Control Channel) と PSCCH に隣接する PSSCH (Physical Sidelink Shared channel) という 2 種類のチャネルから構成される．PSCCH は優先順位や MCS, 周波数リソース位置等の SCI (Sidelink Control Information) メッセージの伝送に使用するチャネルである．PSSCH はデータパケットの伝送に使用するチャネルである．データパケットは 1 つのサブフレームと 1 つ以上のサブチャネルに割り当てられる．データパケットに複数サブチャネルを割り当ててる場合，SCI は 1 つの PSCCH のみを使用して送信される．

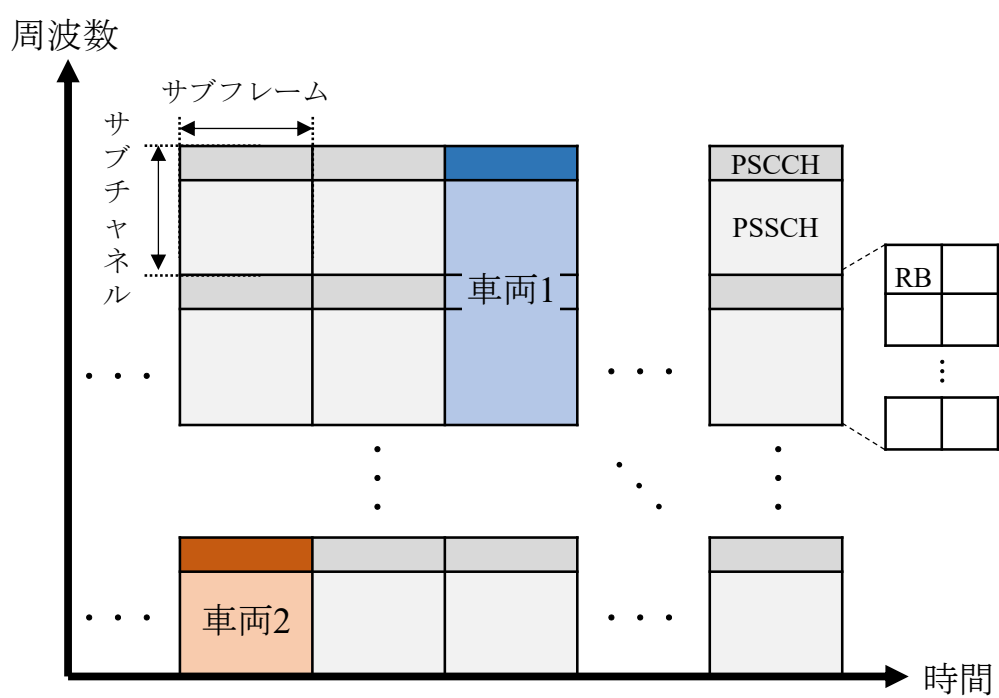


図 2.10 C-V2X サイドリンク通信の無線チャネル構造

2.4.2 サイドリンク通信におけるリソース制御

サイドリンク通信では、送信に利用する無線リソースを車両へ割り当てる必要がある。そしてこの割り当てには基地局が集中的に割り当てを行うモード 3 と各車両が分散的に割り当てを行うモード 4 が標準化されている。

サイドリンク通信モード 3 では、図 2.11 のように車両への無線リソースの割り当てを基地局が行う。基地局が集中的に無線リソースを管理するため、効率的な通信が可能であるが、基地局のカバレッジ内でしか機能しない。またリソース制御方式としては、動的な割り当て方式と定期的な割り当て方式が想定されている。動的な割り当て方式では車両は送信毎に基地局に新たな無線リソースの割り当てを要求する。定期的な割り当て方式では車両は割り当てられた無線リソースを使用して一定回数送信すると基地局に新たな無線リソースの割り当てを要求する。ただし、モード 3 で利用するリソース制御方式は事業者に委ねられており、具体的な方式は定められていない。

サイドリンク通信モード 4 では分散的な無線リソース制御が行われており、図 2.12 のように各車両は基地局に頼らずに、自律的に無線リソースの割り当てを行う。モード 3 とは異なり、基地局のカバレッジ範囲に制限を受けず、山間部や災害時等の通信インフラを扱えない環境下でも通信が可能である。そのため C-V2X におけるサイドリンク通信では、モード 4 によるリソース制御が最も基本的であると言える。モード 4 において車両は通信を行う上で基地局に全く依存しないため、車両自身が無線リソースを適切に管理する必要がある。そのためモード 4 では車両が無線リソースを自律的に管理する方式として、SB-SPS 方式と呼ばれるリソース制御方式が使用されている。

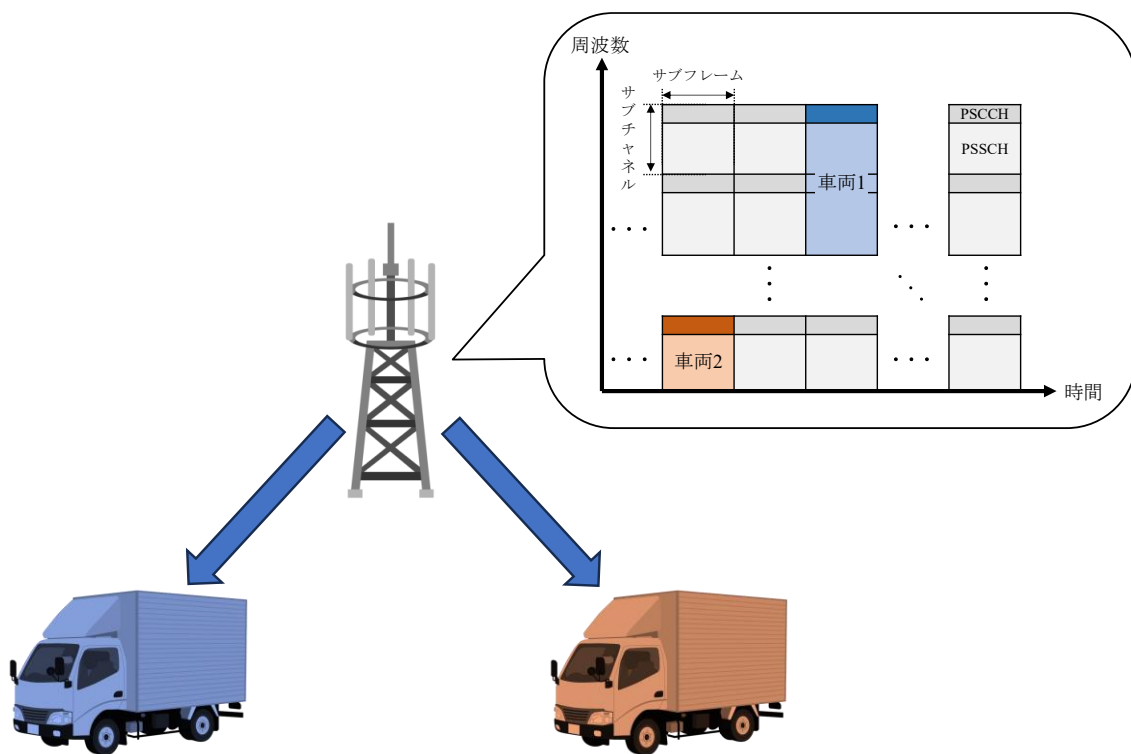


図 2.11 サイドリンク通信モード 3 による無線リソース割り当て

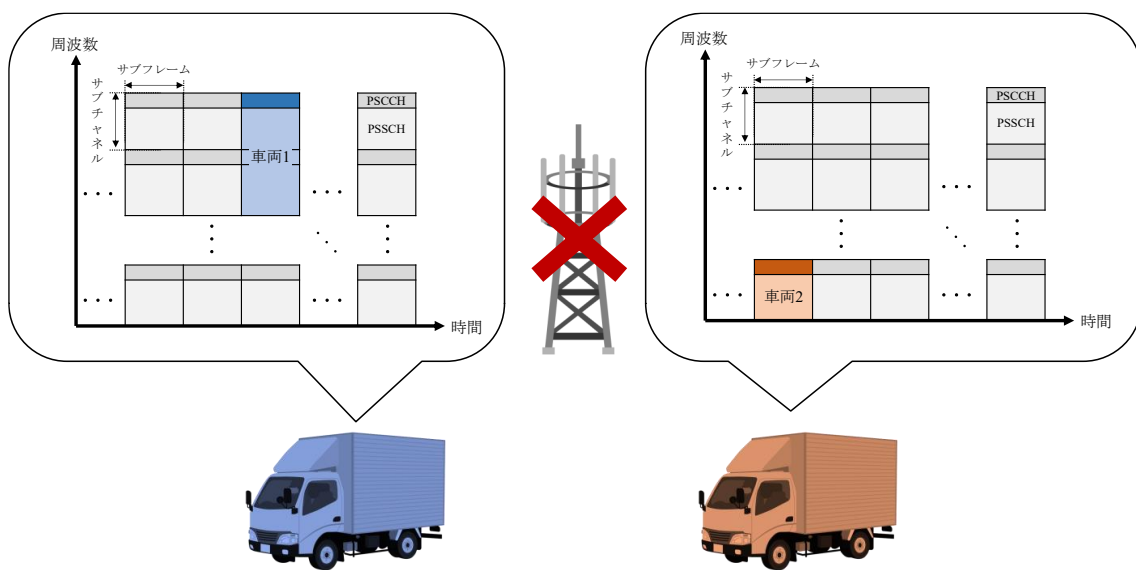


図 2.12 サイドリンク通信モード 4 による無線リソース割り当て

2.5 自律的リソース制御：SB-SPS 方式

C-V2X サイドリンク通信のモード4では基地局に依存しない通信を行うため、車両が自律的に無線リソースを制御する必要がある。そこで標準化されているのが SB-SPS 方式である。そこで本節では SB-SPS 方式について説明する。2.4.1 節では SB-SPS 方式によるリソース制御について記述する。2.4.2 節では SB-SPS 方式における課題について記述する。

2.5.1 SB-SPS 方式によるリソース制御

SB-SPS 方式では、車両はチャネルセンシングに基づいて送信に利用する無線リソースを自律的に選択し、その無線リソースを定期的に利用することで近隣車両との通信干渉を回避する。基地局に依存せず無線リソースを定期的に確保できるため、隊列走行リレー伝送の実現において SB-SPS 方式は有効なリソース制御方式である。

図 2.13 に示すように、SB-SPS 方式では無線リソースの選択、定期予約、再選択により車両の自律的なリソース制御を可能としている [14]。まず初めに、車両は送信に使用する無線リソースを選択する。このとき通信を成功させるため、他車両が送信に利用しておらず干渉電力量の少ないリソースを選択する必要がある。そのために車両はチャネルセンシングにより各無線リソースの RSRP (Reference Signal Received Power) および RSSI (Received Signal Strength Indicator) を常に測定している。時刻 T にて無線リソースを選択する際、車両はチャネルセンシング結果をもとに、 $[T - T_{\text{RRI}}, T]$ の期間に含まれる無線リソースの中から、RSRP が閾値以下となる無線リソースを選択候補リソースとして定義する。この時、選択候補リソース数が期間内に含まれる全リソース数の 20% に満たない場合には、20% 以上の候補数が得られるまで RSRP 閾値を 3 [dBm] ずつ増加させながら選択候補リソースの定義を繰り返す。その後、 $[T - T_{\text{sns}}, T]$ の期間内の各選択候補リソースの平均 RSSI を計算する。この期間を監視ウィンドウと呼ぶ。そして選択候補リソースの中から平均 RSSI が低い順に、 $[T - T_{\text{RRI}}, T]$ 期間内に含まれる全リソース数の 20% と同数だけ選択し、最終的な選択候補リソースを定義する。その後、 $[T + T_1, T + T_2]$ の期間内で選択候補リソースからランダムに無線リソースを選択する。この期間を選択ウィンドウと呼ぶ。最後にリソースの使用回数である RC (Reselection Counter) を設定することで車両は無線リソースの選択を完了する。RC は $[RC_{\text{min}}, RC_{\text{max}}]$ の範囲内の整数値から一様ランダムに選択される。

リソース選択完了後、車両は選択した無線リソースを予約リソースとして一定の時間間隔で予約する。この時間間隔を RRI (Rsource Reservation Interval) と呼び、 T_{RRI} と同等の間隔である。予約リソースを利用して送信を行う毎に RC を減算し、送信後に RC が 0 であれば再選択確率 $1 - P_{\text{cu}}$ に従い予約リソースの再選択を行う。リソース再選

択では、リソース選択と同様の手順で新たなリソースを選択し、新たなRCを設定して再びリソースを定期予約する。新たなリソースを選択しない場合にはRCの再設定のみを実施し、同一リソースの予約を継続する。

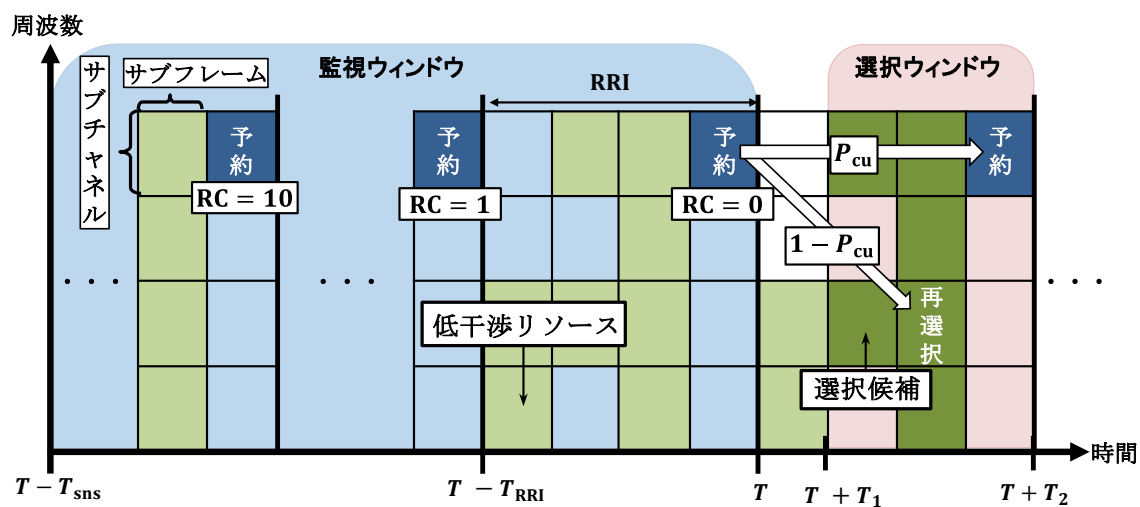


図 2.13 SB-SPS 方式による無線リソース制御

2.5.2 隊列走行リレー伝送における SB-SPS 方式に起因した半二重性問題

SB-SPS 方式では送信に利用する無線リソースを選択する際に、各リソースの RSRP や平均 RSSI のみを比較するリソース単位の制御しか行っておらず、他車両がどのサブフレーム内の無線リソースを利用して送信しているかは考慮していない。そのため車両間で予約リソースのサブフレームが重複することで発生する半二重性問題に対して SB-SPS 方式では対処することが出来ない。その結果、SB-SPS 方式によるサイドリンク通信を適用した車車間通信では、半二重性問題により伝送性能が劣化してしまう恐れがある。さらに SB-SPS 方式では同一リソースを定期的に利用しているため、一度半二重性問題が発生すると連続して通信に失敗してしまう。

SB-SPS 方式を利用した車車間通信に対して、半二重性問題の発生を抑制するためのリソース制御方式がいくつか提案されている [15]-[18]。文献[15],[16]では使用率の低いサブフレームからランダムに無線リソースを選択する制御方式が提案されている。車両はリソース再選択時に、従来の SB-SPS 方式と同様に選択候補を定義した後、各サブフレームに含まれる選択候補リソース数に着目し、含まれる選択候補リソース数が少ないサブフレーム内の低干渉なリソースを選択候補として再定義し、その中からランダムに無線リソースを選択する。文献[15]では図 2.14 のように、使用率の低い複数のサブフレーム内の無線リソースを選択候補として再定義する。文献[16]では各サブフレームの使用率を均一にするために、図 2.15 のように最も使用率の低いサブフレーム内のリソースのみを選択候補として再定義する。文献 [17]では車両間で予約リソースのサブフレームを共有し、2 ホップ以内の車両の予約リソースのサブフレームを避けてリソース再選択を行う。これらの方式により、車両は周辺車両との予約リソースのサブフレームの重複を低減することが出来る。

文献 [18]では図 2.16 に示すように、予約リソースのサブフレーム位置を変更することで半二重性問題を回避する制御方式が提案されている。車両はリソース再選択により新たな予約リソースを選んだ後、RRI 内の無線リソースにそれぞれ対応した新しいサブフレーム位置を示すリソースオフセットと呼ばれる対応表に従い、予約リソースのサブフレーム位置を変更して送信を行う。この方式によりリソース再選択時に発生する半二重性問題が回避でき、さらにリソースオフセットを定期的に更新することで、半二重性問題による連続失敗も回避する。

しかしいずれの方式も、本研究で着目する隊列走行リレー伝送については考慮していない。隊列走行リレー伝送において半二重性問題が発生すると、連続してリレー伝送が失敗し、情報共有が長期間途絶えてしまい隊列の運用に支障をきたすことになる。そのため隊列走行リレー伝送において、SB-SPS 方式の使用により生じる半二重性問題

は特に回避すべき課題である。文献[15]-[18]で提案されているリソース制御方式でも一定の半二重性問題の低減効果は見込めるが、これらの方式では周囲の未知の車両との間に発生する半二重性問題について対処している。一方で、隊列走行リレー伝送では中継車両が既知の後続車両と通信を行うため、半二重性問題によるリレー伝送性能の劣化は特定の隊列車両間で発生する課題であり、重複回避すべきサブフレームも明確である。そのため隊列走行リレー伝送を考慮する場合には、従来研究よりも効果的なリソース制御が可能である。

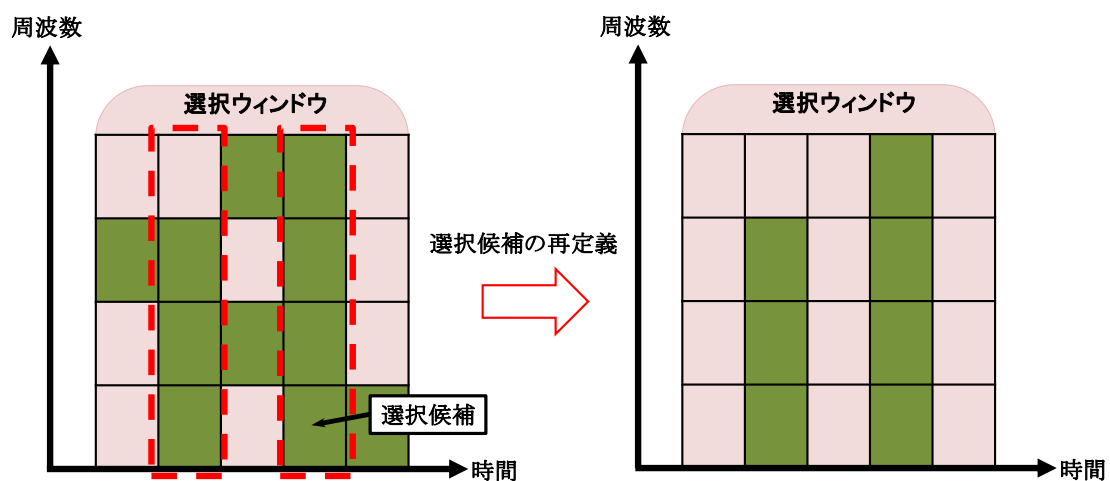


図 2.14 使用率の低いサブフレーム内のリソースを選択候補と定義[15]

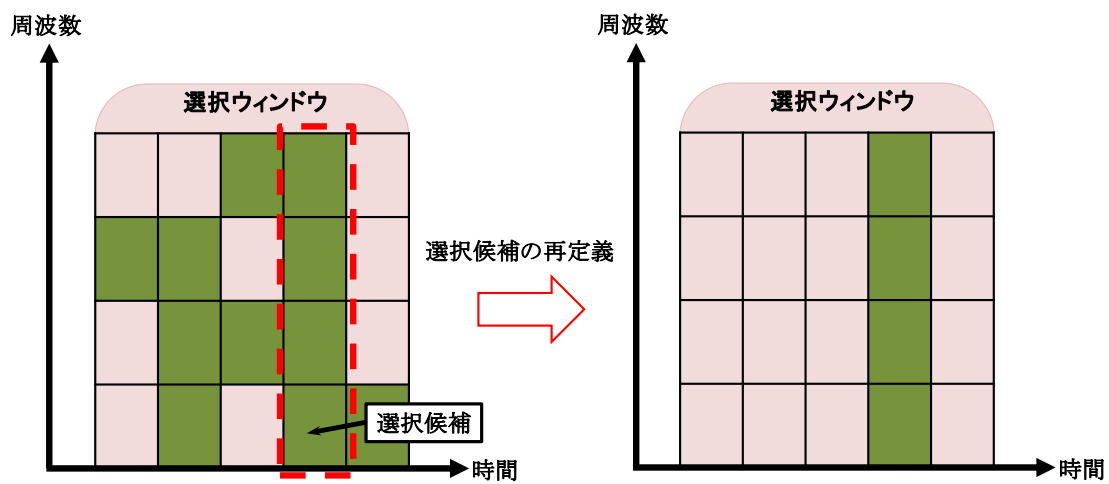


図 2.15 最も使用率の低いサブフレーム内のリソースを選択候補と定義[16]

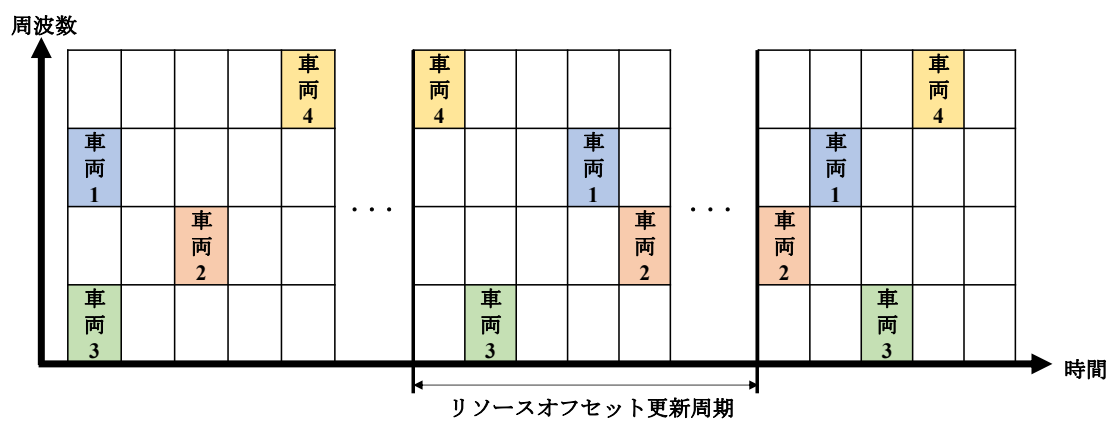


図 2.16 サブフレーム位置の変更による半二重性問題回避

第3章 隊列走行リレー伝送での半二重性問題低減方式

本章では SB-SPS 方式によるサイドリンク通信を利用した隊列走行リレー伝送で発生する半二重性問題を軽減する方式について記述する。3.1 節では隊列走行リレー伝送で発生する半二重性問題の要因について記述する。3.2 節では半二重性問題を軽減するリソース制御方式について記述する。

3.1 隊列走行リレー伝送における半二重性問題要因

SB-SPS 方式を利用した隊列走行リレー伝送では、中継車両と先行車両あるいは後続車両との間で予約リソースのサブフレームが重複することにより半二重性問題が発生する。また車両が隊列を形成しながら走行しており、車両の隊列への合流や隊列からの離脱は頻繁には行われないと考えられるため、中継車両は常に特定の先行車両や後続車両と通信を行う。そのため文献 [15]-[18]が想定するようなネットワークとは異なり、隊列走行リレー伝送において半二重性問題は特定の既知の車両との間に発生する課題であるといえる。この性質を利用し、先行車両や後続車両の予約リソースのサブフレームを考慮したりリソース制御を行うことで半二重性問題の発生を抑制することができると考えられる。

また SB-SPS 方式を用いた場合に伝送性能が劣化する要因の一つに、車両間での同時期のリソース再選択が挙げられる [19], [20]。従来の SB-SPS 方式ではチャンネルセンシング結果に基づいて各無線リソースの干渉状況を予測して無線リソースを選択するが、車両間で同時期にリソース再選択が行われるとリソース再選択時の干渉状況がチャンネルセンシング結果と異なってしまうため、送信に適した無線リソースを選択することが困難となり伝送性能が劣化してしまう。半二重性問題軽減のために隣接隊列車両の予約リソースのサブフレームを考慮する制御方式を提案したとしても、隣接隊列車両間の同時期のリソース再選択により提案方式が正常に機能しない恐れがある。そのため隣接隊列車両間の同時期のリソース再選択を抑制するようなリソース制御も必要である。

3.2 半二重性問題軽減方式

本研究では SB-SPS 方式を拡張し，隊列走行リレー伝送において発生する半二重性問題を軽減するためのリソース制御方式を提案する．提案方式では隊列車両間の予約リソースのサブフレーム重複を回避するために，隣接隊列車両の予約リソースのサブフレームを記録し，記録したサブフレーム内の無線リソースを選択候補から除外して再選択を行う．また隊列の先頭車両から順にリソース再選択を行うことで，隣接隊列車両間で同時期のリソース再選択も回避する．

3.2.1 隣接隊列車両間でのサブフレーム重複回避

サイドリンク通信を利用した隊列走行リレー伝送において半二重性問題の発生を軽減するためには，隣接する隊列車両間でそれらの予約リソースのサブフレームの重複を避けることが有効である．そして隊列走行リレー伝送では，中継車両は互いに既知である特定の隊列車両と隣接しているため，その隊列車両の予約リソースのサブフレームを記録しておけばサブフレーム重複の回避は可能である．そこで本研究では SB-SPS 方式を拡張し，隊列走行リレー伝送の中継車両がリソース再選択を行う際に，その先行車両と後続車両の予約リソースのサブフレームと同一のサブフレームに含まれる無線リソースを避けて再選択を行うリソース制御方式を提案する．

中継車両は従来の SB-SPS 方式におけるチャンネルセンシング時に，自身の先行車両と後続車両の予約リソースのサブフレームも記録する．その後リソース再選択で選択候補を作成する際に，中継車両は記録したサブフレームに含まれる無線リソースを選択候補から除外する．そしてリソース除外後の選択候補からランダムに無線リソースを選択する．これにより先行車両や後続車両の予約リソースとサブフレームが重複しない無線リソースが再選択されるため，半二重性問題を回避することができる．

具体的には，図 3.1 に示すように中継車両はチャンネルセンシングにより各リソースで受信した信号の RSRP を測定する際に，その信号が自身の先行車両や後続車両からのリレー伝送信号あるいはブロードキャスト伝送信号であったならば，その信号の送信に使用されていた予約リソースのサブフレームを各々記録しておく．この記録は信号をセンシングする度に更新される．このとき中継車両は後続車両のリレー伝送の宛先ではないが，本研究では無指向性の通信によりリレー伝送を行うため後続車両のリレー伝送も中継車両はセンシング可能であり，他の伝送と同様に RSRP 測定時に後続車両のリレー伝送も検出することが出来る．

そして，中継車両はリソース再選択により従来の SB-SPS 方式と同様に選択候補を定義した後，記録されているサブフレームに含まれている無線リソースを RSRP や平均 RSSI の値に関わらず選択候補から除外する．ただし除外対象のサブフレームは再選択

する伝送用リソースの種類 (リレー伝送用リソースまたはブロードキャスト伝送用リソース) により異なる。リレー伝送用リソースを再選択する場合には、先行車両のリレー伝送用リソース、後続車柳雄のリレー伝送用リソースおよびブロードキャスト伝送用リソースと同一のサブフレーム内の無線リソースを除外する。ブロードキャスト伝送用リソースを再選択する場合には、先行車両のリレー伝送用リソースと同一のサブフレーム内の無線リソースを除外する。最後に無線リソースを除外した選択候補から無線リソースをランダムに選択することで、リソース選択を完了する。

無線リソースを除外する際、伝送用リソースの種類に関わらず記録された全サブフレームを除外対象とすることも半二重性問題を回避するリソース選択が可能である。しかし本研究では隊列走行リレー伝送において発生する半二重性問題に着目しているため、除外対象のサブフレームを限定し、隊列車両間のリレー伝送が半二重性問題で失敗しないような無線リソースの除外を行っている。

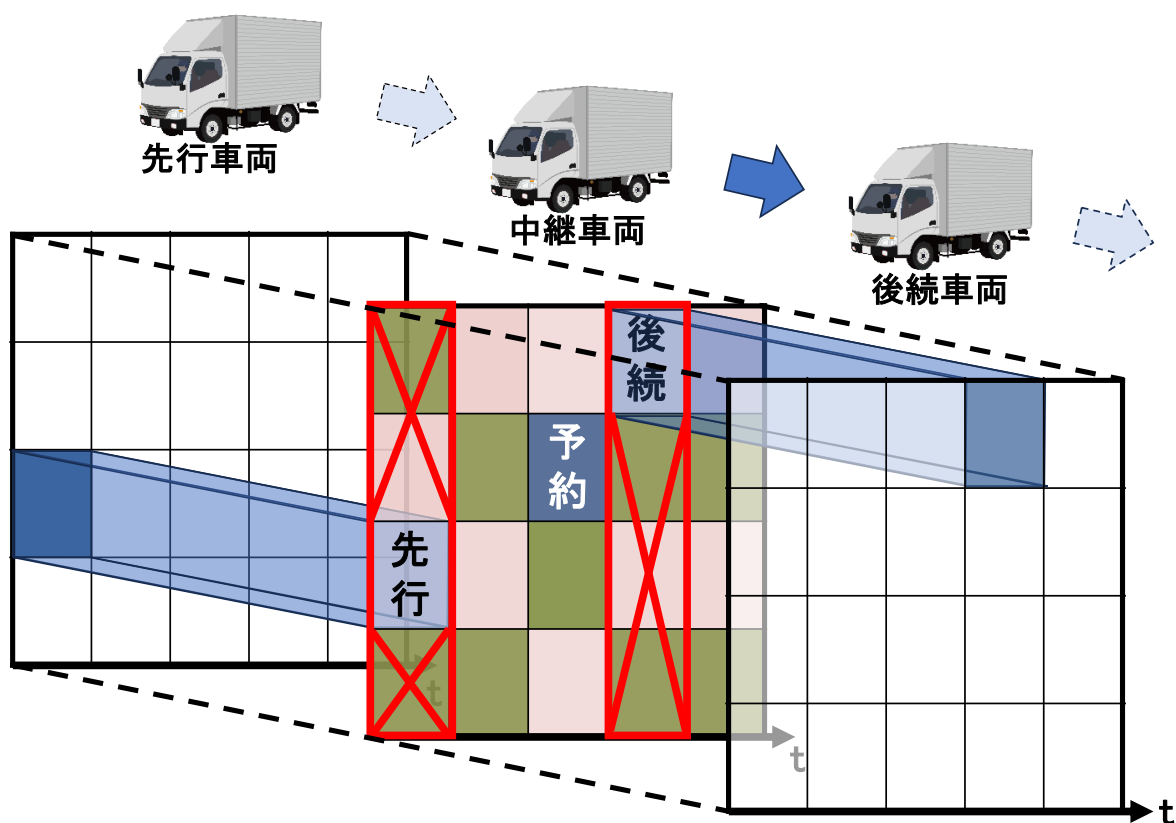


図 3.1 隣接隊列車両間でのサブフレーム重複回避

3.2.2 隊列車両のリソース再選択タイミング制御

隣接隊列車両間でサブフレーム重複を回避する場合、隣接隊列車両間で同時にリソース再選択が行われた場合に半二重性問題が発生する恐れがある。そこで本研究では隣接隊列車両間でサブフレーム重複を回避する制御に加えて、隣接隊列車両間での同時期のリソース再選択を避けるため、隊列先頭車両から順にリソース再選択を行う制御も提案する。

従来の SB-SPS 方式では、各車両で個別に設定されている RC によりリソース再選択タイミングを制御している。この車両毎の自律的な制御が隊列車両間の同時期のリソース再選択の原因であるため、提案方式では各隊列車両での固有 RC による自律的なリソース再選択制御は行わず、隊列先頭車両の RC を基準にして各隊列車両のリソース再選択タイミングを制御する。そのため隊列先頭車両のみ RC によりリソース再選択を行い、それを通知あるいは検出によりリソース再選択を後続車両へ伝達していくことで後続車両におけるリソース再選択を実行する。

リソース再選択の通知を用いる制御（再選択通知方式）では、図 3.2 に示すように隊列先頭車両は RC が 0 になると、次のリレー伝送時に再選択通知を合わせて後続車両へ送信する。この際、新しい無線リソースを予約したか否かに関わらず再選択通知を送信する。この通知の受信に成功した後続車両は、次の自身のリレー伝送後およびブロードキャスト伝送後に各伝送用リソースのリソース再選択判定を行う。その後、さらに後続の車両へ再選択通知を転送する。

一方、リソース再選択の検出を用いる制御（再選択検出方式）では、中継車両はサブフレーム重複回避制御のために先行車両のサブフレームを記録する度に、新たに記録されたサブフレームと前回の記録したサブフレームを比較する。そして図 3.3 に示すようにサブフレームが異なっていた場合、先行車両がリソース再選択を実施したと認識し、自身のリソース再選択判定を実施する。この方式でも隊列先頭車両のみ RC によるリソース再選択を行う。また、再選択通知方式とは異なり、先行車両がリソース再選択により新たな予約リソースを選択した場合にのみ検出が行われ、中継車両がリソース再選択判定を行う。これらの方式により隊列内では先頭車両から後続に向かって順にリソース再選択が行われ、前後車両間での同時リソース再選択が回避できる。

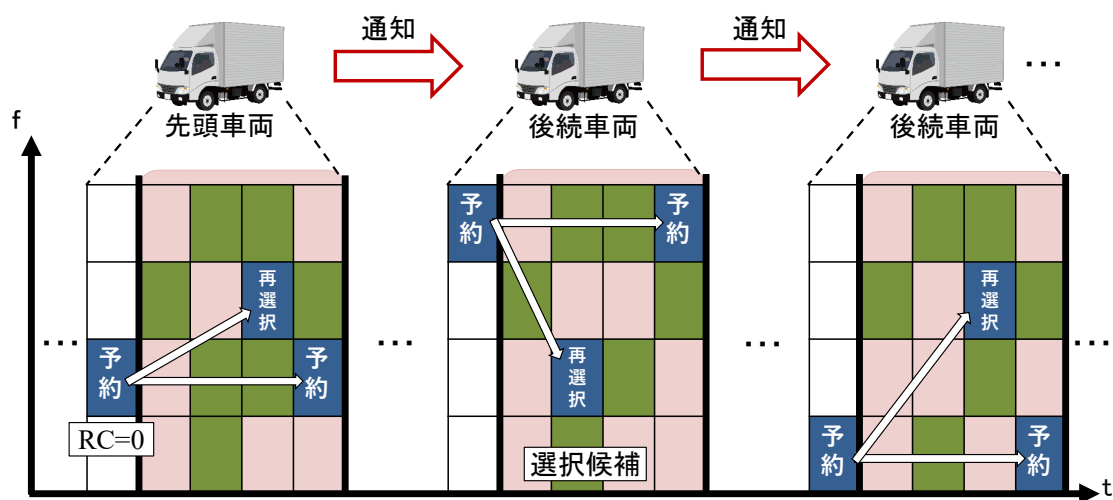


図 3.2 再選択通知による制御

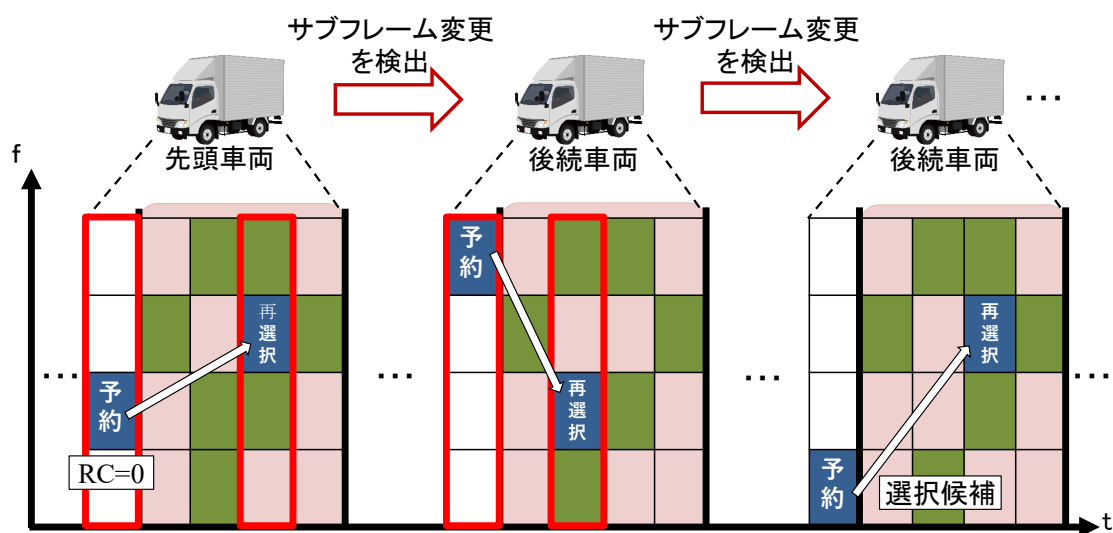


図 3.3 再選択検出による制御

第4章 特性評価モデル

本章では隊列走行リレー伝送において提案方式の有効性を確認するための特性評価に使用したシステムモデルについて記述する。4.1 節にトポロジーモデルについて記述する。4.2 節にトラヒックモデルについて記述する。4.3 節に通信チャンネルモデルについて記述する。4.4 節にチャンネルアクセスモデルについて記述する。4.5 節に伝搬モデルについて記述する。最後に、4.6 節に受信判定モデルについて記述する。

4.1 トポロジーモデル

図 4.1 に示すように、3 車線から構成される長さ L [m] の道路を想定する。中央車線の中央には N_{pl} [台] の車両で構成される隊列を 1 つ配置し、上下車線には車両密度 d_{ve} [台/m] に従って隊列外車両が配置されている。また隊列車両間の距離は D [m] である。隊列車両間距離 D は $[D_{pl}/2, 3D_{pl}/2]$ の範囲で一様ランダムに与えられる。

また車両の移動に関して、隊列車両は静止しており、隊列外車両は隊列車両に対して相対速度 V [km/s] で移動している。相対速度 V は $[-V_{ve}, V_{ve}]$ の範囲で一様ランダムに与えられる。道路端に到達した隊列外車両は同一車線の反対端から速度を維持したまま再進入する。

4.2 トラヒックモデル

トラヒックはリレー伝送用パケットとブロードキャスト伝送用パケットの 2 種類を想定する。リレー伝送用パケットは隊列の先頭車両でのみ生起し、その生起間隔は T_{RRI} [ms]、パケットサイズは L_{pckt} [bytes] である。ブロードキャスト伝送用パケットは全車両で生起し、生起間隔とパケットサイズはリレー伝送用パケットと同様である。

4.3 通信チャンネルモデル

全ての車両は周波数 f [GHz]、帯域幅 B_f [MHz] の搬送波を用いて、送信電力 P_{Tx} [dBm] で通信を行う。また通信に用いるフレーム構造はサブフレーム長が T_{sf} [ms]、サブチャンネル数が N_{sc} [個] となっている。また 1 つの無線リソースは N_{RB} [個] の RB から構成される。

4.4 チャンネルアクセスモデル

通信チャンネルは時間領域では T_{sf} [ms] のサブフレームに分割され、周波数領域では N_{sc} [個]のサブチャンネルに分割されており、無線リソースはサブフレームとサブチャンネルの組み合わせにより識別されている。各車両はこのフレーム構造を用いて、SB-SPS方式によりリレー伝送用およびブロードキャスト伝送用の無線リソースを予約する。隊列車両はリレー伝送とブロードキャスト伝送用にそれぞれ2つの無線リソースを予約するが、隊列の最後尾車両はブロードキャスト伝送用のリソースのみを予約する。また隊列外車両はブロードキャスト伝送用リソースのみを予約する。

4.5 伝搬モデル

伝搬モデルとして、距離減衰である WINNER+B1 モデルを使用する [21]。WINNER+B1 での電力減衰量 $PL(d)$ [dB] は次式で表される。

$$PL(d) = \begin{cases} 22.7 \log_{10} d + 41 + 20 \log_{10} \frac{f}{5} & (d \leq d_{BP}) \\ 40 \log_{10} d + 9.45 - 34.6 \log_{10} H_{ms} + 2.7 \log_{10} \frac{f}{5} & (d > d_{BP}) \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで、 d は送信車両と受信車両間の距離 [m]、 f は搬送波周波数 [GHz]、 d_{BP} はブレイクポイント[m]、 H_{ms} はアンテナ高 [m] である。またシャドウイングとフェージングは考慮しない。

4.6 受信判定モデル

各車両では所望 SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) 値 γ_{req} [dB] と復調可能電力閾値 P_{dem} [dBm] に基づいて通信の受信判定を行う。

各無線リソースの雑音電力 N [mW] は帯域当たりの雑音電力密度 N_0 [mW/Hz] と無線リソース1つあたりの帯域幅 B [Hz] を用いて次式で表される。

$$N = N_0 B \quad (4.2)$$

また干渉電力を P_{intf} [mW] とすると、干渉雑音電力 $P_{N,I}$ [dB] は次式で表される。

$$P_{N,I} = 10 \log_{10}(N + P_{intf}) \quad (4.3)$$

したがって通信の SINR 値 γ [dB] は送信車両の送信電力 P_{Tx} [dBm] と干渉雑音電力 $P_{N,I}$ [dBm], (4.1) 式に示す距離減衰による電力減衰量 $PL(d)$ [dB] を用いて次式で表される.

$$\gamma = P_{Tx} - PL(d) - P_{N,I} \quad (4.4)$$

信号受信時に SINR 値 γ が所望 SINR 値 γ_{req} 以上であった場合, その通信は受信成功とみなす. その後, 受信信号電力 $P_{Rx} = P_{Tx} - PL(d)$ [dBm] が復調可能電力閾値 P_{dem} 以上であった場合, その通信は復調可能であるとみなす.

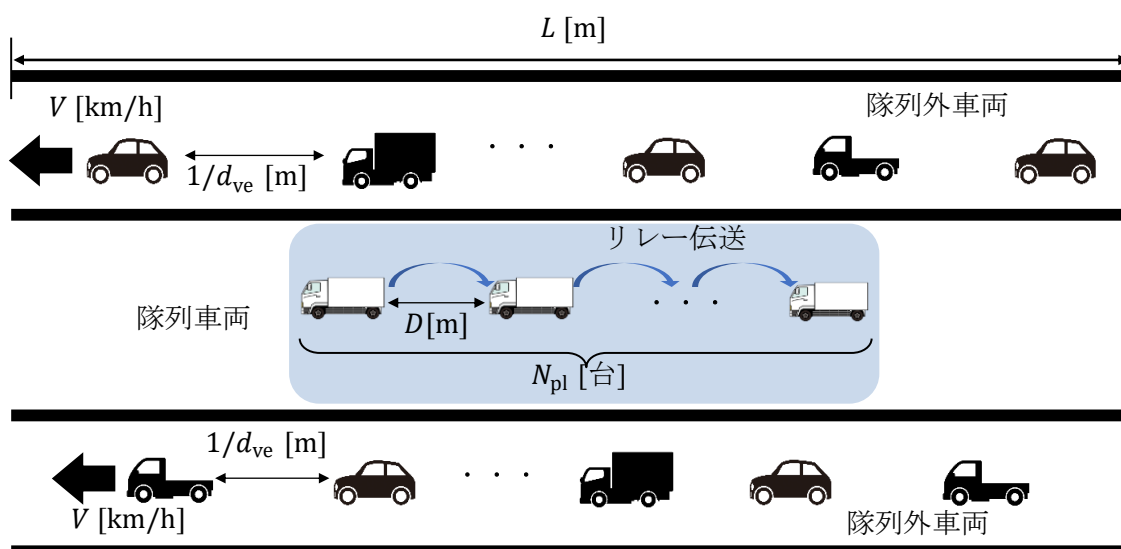


図 4.1 トポロジーモデル

第5章 特性評価

本章では隊列走行リレー伝送において、提案方式が半二重性問題の発生軽減に対して有効であることを計算機シミュレーションにより確認する。5.1 節にシミュレーション諸元を示す。5.2 節に特性評価に用いる評価指標について記述する。5.3 節にサブフレーム重複回避のみを行った場合の評価結果を記述する。5.4 節にリソース再選択タイミングを制御した場合の評価結果を記述する。

5.1 シミュレーション諸元

特性評価に使用したシミュレーション諸元を表 5.1 に示す。

表 5.1 シミュレーション諸元

道路長	L	2000	[m]
平均隊列車両間距離	D_{pl}	20	[m]
隊列外車両相対速度	V_{ve}	0, 20, 40, 80	[km/h]
リソース予約間隔	T_{RRI}	100	[ms]
再選択カウンタ範囲	N_{RC}	[5, 15]	
監視ウィンドウ長	T_{sns}	1000	[ms]
選択ウィンドウ範囲	T_1	4	[ms]
	T_2	100	[ms]
サブフレーム長	T_{sf}	1	[ms]
サブチャネル数	N_{sc}	2	[個]
搬送波周波数	f	5.9	[GHz]
搬送波帯域幅	B_f	10	[MHz]
送信電力	P_{Tx}	23	[dBm]
RB 数	N_{RB}	25	[個]
データパケット長	L_{pkt}	300	[bytes]
アンテナ長	H_{ms}	1.5	[m]
ブレークポイント	d_{BP}	19.7	[m]
RSRP 閾値	P_{RSRP}	-109	[dBm]
雑音電力密度	N_0	-174	[dB/Hz]
無線リソース帯域幅	B	180	[kHz]
所望 SINR	γ_{req}	12.4	[dB]
復調可能電力閾値	P_{dem}	-109	[dBm]

5.2 評価指標

評価指標は E2E (End to End) のリレー伝送失敗率 R_{E2E} であり, 半二重性問題 (半二重性要因) による伝送失敗率 R_{HD} と半二重性問題および干渉過多 (全要因) による伝送失敗率 R_{ALL} をそれぞれ評価した. R_{HD} と R_{ALL} は次式で算出される.

$$R_{HD} = \frac{N_{HD}}{N_{Tx}} \quad (5.1)$$

$$R_{ALL} = 1 - \frac{N_{Rx}}{N_{Tx}} \quad (5.2)$$

N_{Tx} は隊列の先頭車両が送信したリレーパケット数, N_{HD} は半二重性問題により隊列車両が受信に失敗したリレーパケット数, N_{Rx} は隊列の最後尾車両が受信成功したリレーパケット数である.

5.3 サブフレーム重複回避の特性評価

本節では提案方式においてサブフレーム重複回避のみを行った場合の E2E リレー伝送性能を、従来の SB-SPS 方式と比較することで評価する。5.3.1 節では再選択確率を変化させた場合の特性を評価する。5.3.2 節では隊列車両台数を変化させた場合の特性を評価する。5.3.3 節では隊列外車両密度を変化させた場合の特性を評価する。

5.3.1 再選択確率変化時の特性評価

再選択確率を変化させた場合の半二重性要因による E2E リレー伝送失敗率および全要因による E2E リレー伝送失敗率をそれぞれ図 5.1, 図 5.2 に示す。隊列車両台数 N_{pl} は 8 [台]、隊列外車両密度は 0.05 [台/m] とした。図 5.1 より従来 SB-SPS 方式と比較して提案方式の E2E 伝送失敗率は減少しており、伝送性能が改善している。特に半二重性問題による E2E 伝送失敗が著しく減少しているため、提案方式は半二重性問題の軽減に有効であるといえる。再選択確率が増加するに従い提案方式の E2E リレー伝送失敗率も増加しているが、これは頻繁に隊列車両間で同時期にリソース再選択が行われることが原因である。提案方式では隊列車両はチャネルセンシングにより先行車両と後続車両が直前まで送信に利用していた無線リソースのサブフレームを記録しているが、自身と先行車両あるいは後続車両のリソース再選択が同時期に発生すると互いに新しく選択したリソースを検知する前に再選択処理を行うことになる。その結果、記録されているリソースのサブフレームと実際の予約リソースのサブフレームが異なる状態でリソースの除外が行われてしまうため、先行車両や後続車両の予約リソースと同一サブフレームのリソースを選択して半二重性問題が発生してしまう。再選択確率が高い場合には頻繁にリソース再選択が行われ、同時期のリソース再選択も頻繁に発生するため、提案方式の有効性はあまり見られない。

一方、半二重性要因による E2E 伝送失敗率は隊列外車両速度の影響を殆ど受けないことも確認できる。これは隊列走行リレー伝送における半二重性問題は隣接隊列車両間で発生する課題であるため、隊列外の状況変化の影響を受けにくいためである。

また半二重性問題要因による E2E 伝送失敗率は再選択確率が低いほど減少しているが、図 5.2 では全要因による E2E 伝送失敗率は再選択確率 $P = 0.05, 0.01$ 付近で最も良くなる。このことから、全体の伝送性能を最善にするような再選択確率が存在することがわかる。隊列外車両相対速度 $V_{ve} = 0$ [km/h] の場合には再選択確率が低下するにつれて伝送失敗率も減少している。これは隊列外車両移動による干渉状況の変化が $V_{ve} = 0$ [km/h] の場合には発生しないため送信に適したリソースを選択することが容易となり、さらに再選択確率が低いほど一度選択したリソースを使用する期間が長くなるためである。

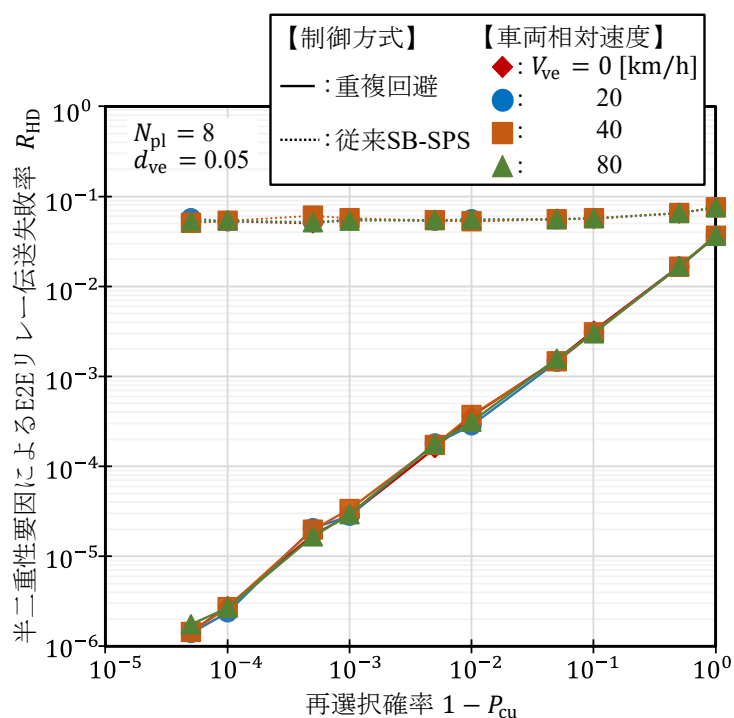


図 5.1 サブフレーム重複回避による再選択確率変化時の半二重性要因伝送失敗率

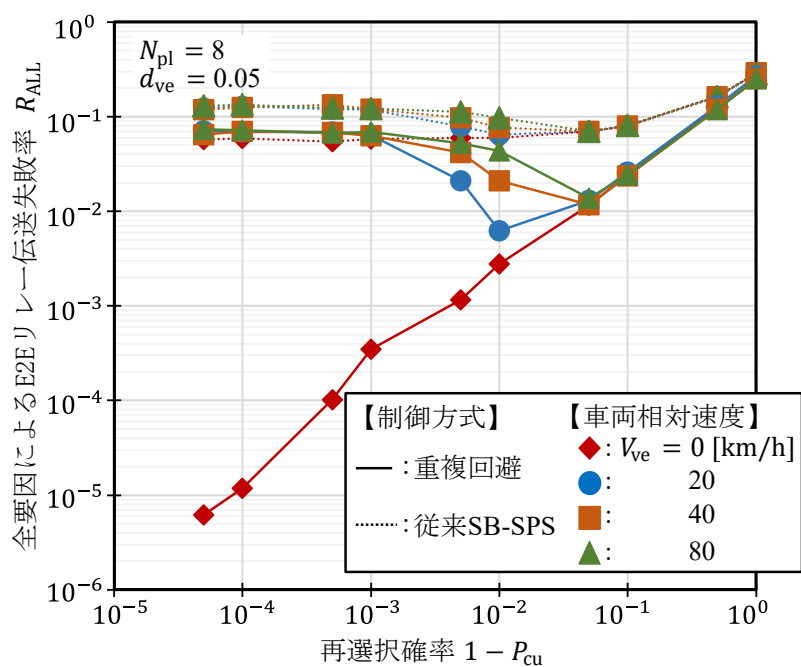


図 5.2 サブフレーム重複回避による再選択確率変化時の全要因伝送失敗率

5.3.2 隊列車両台数変化時の特性評価

隊列車両台数を変化させた場合の半二重性要因による E2E リレー伝送失敗率および全要因による E2E リレー伝送失敗率をそれぞれ図 5.3, 図 5.4 に示す. 再選択確率 $1 - P_{cu}$ は 0.01, 隊列外車両密度は 0.05 [台/m] とした. 図 5.3 にて列車両台数を変化させた場合においても提案方式による半二重性要因による E2E 伝送失敗率の減少は確認できるが, その有効性は隊列車両台数に関わらずほぼ一定である. これは半二重性問題が隣接隊列車間で発生する課題であり, 隊列車両台数が増加してもその影響は受けにくいいためである. また隊列車両台数変化時においても, 半二重性問題の発生は車両速度の影響を受けないことが確認できる.

図 5.4 では, 全要因による E2E 伝送失敗率は隊列外車両相対速度の影響を強く受けており, 車両速度が速い程伝送失敗率が劣化している. SB-SPS 方式ではチャンネルセンシングにより各無線リソースでの平均干渉電力量を測定し, その測定結果から選択ウィンドウ内での干渉量を予測してリソースを予約している. しかし車両速度が大きいほど, 干渉量の変化が激しくなり干渉量予測の精度が劣化してしまう. その結果, 干渉過多なリソースを選択し伝送が失敗してしまう. 提案方式により隊列外車両速度の影響を殆ど受けない半二重性問題の発生が大きく抑制されたことにより, この干渉量予測の精度劣化による伝送総失敗が支配的になるためこのような結果になると考えられる.

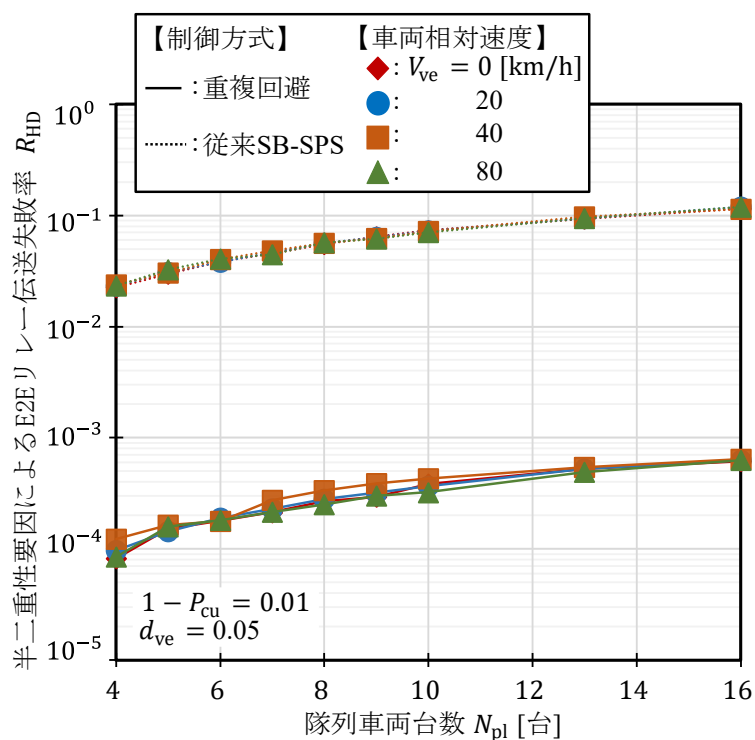


図 5.3 サブフレーム重複回避による隊列車両台数変化時の半二重性要因伝送失敗率

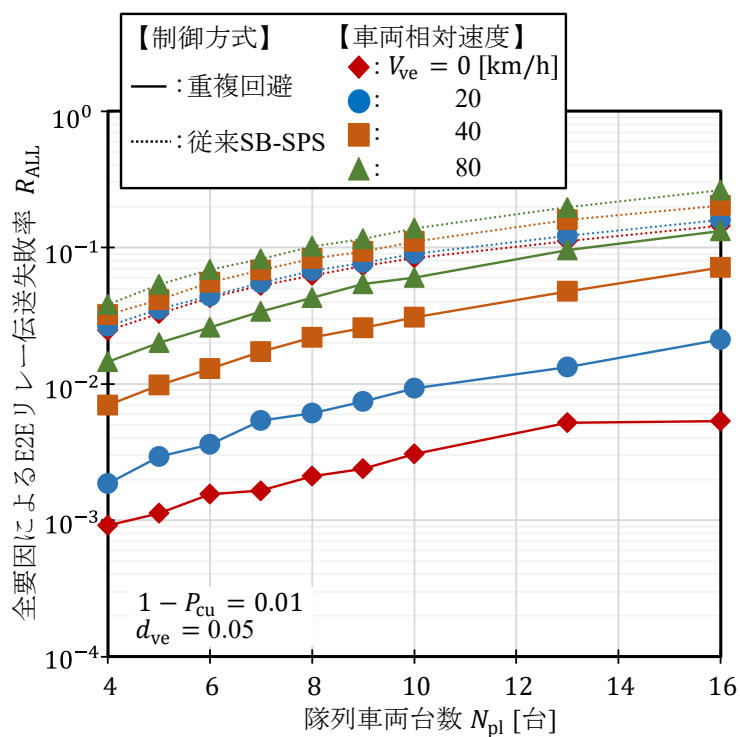


図 5.4 サブフレーム重複回避による隊列車両台数変化時の全要因伝送失敗率

5.3.3 隊列外車両密度変化時の特性評価

隊列外車両密度を変化させた場合の半二重性要因による E2E リレー伝送失敗率および全要因による E2E リレー伝送失敗率をそれぞれ図 5.5, 図 5.6 に示す. 再選択確率 $1 - P_{cu}$ は 0.01, 隊列車両台数 N_{pl} は 8 [台] とした. 図 5.5 より, 隊列外車両密度を変化させた場合においても, 従来 SB-SPS 方式と比較して提案方式は半二重性問題による E2E 伝送失敗率を改善している. しかしその有効性は隊列外車両密度に関わらずほぼ一定である. これは 5.3.2 節の図 5.3 と同様, 半二重性問題が隣接隊列車間の課題であり, その発生は周辺環境の変化の影響は受けにくいいためである.

図 5.6 では提案方式により全要因による失敗率が改善されていることが確認でき, 隊列外車両密度が低いほど有効的である. また図 5.5 と比較して提案方式では, 全要因による E2E 伝送失敗率は隊列外車両密度や隊列外車両速度の影響を強く受けている. これは 5.3.2 節の図 5.4 と同様, 提案方式により周囲の環境変化の影響を受けにくい半二重性問題が回避された結果, チャネルセンシングによる干渉量予測の精度劣化による伝送失敗の影響が表れるためである.

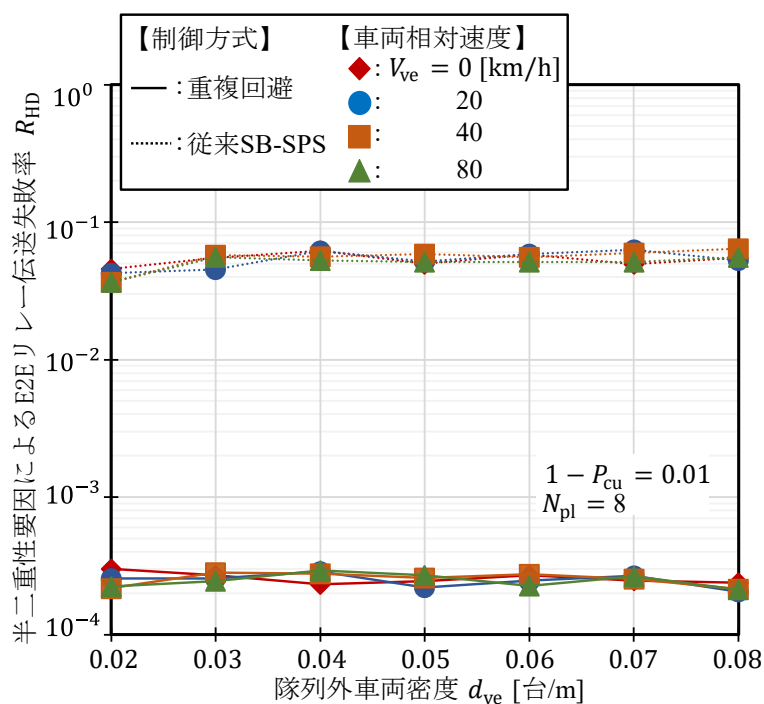


図 5.5 サブフレーム重複回避による隊列外車両密度変化時の半二重性要因伝送失敗率

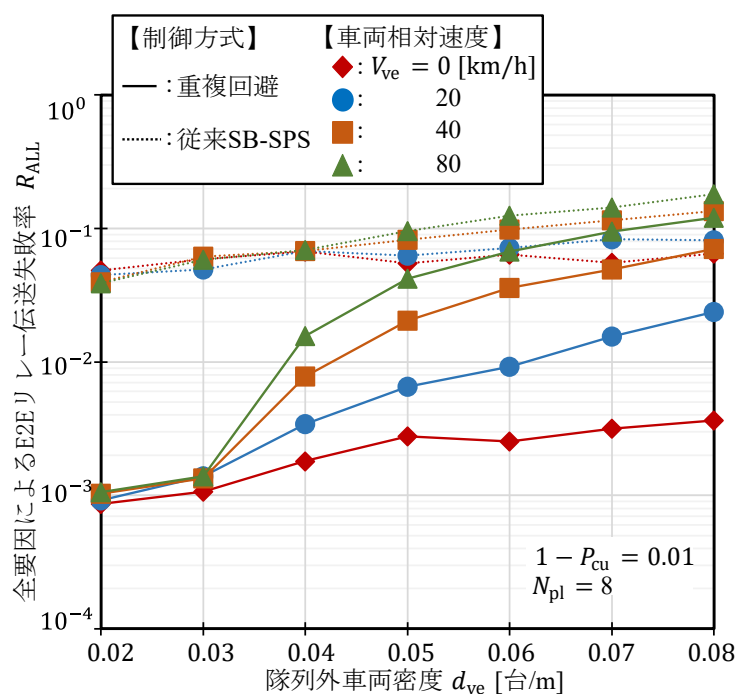


図 5.6 サブフレーム重複回避による隊列外車両密度変化時の全要因伝送失敗率

5.4 リソース再選択タイミング制御の特性評価

本節ではリソース再選択タイミングの制御を行った場合の E2E リレー伝送性能を評価する。5.4.1 節では再選択確率を変化させた場合の特性を評価する。5.4.2 節では隊列車両台数を変化させた場合の特性を評価する。5.4.3 節では隊列外車両密度を変化させた場合の特性を評価する。

5.4.1 再選択確率変化時の特性評価

リソース再選択タイミング制御の有無による性能比較をそれぞれ図 5.7, 図 5.8 に示す。隊列車両台数 N_{pl} は 8 [台], 隊列外車両密度は 0.05 [台/m] とした。図 5.7 より, サブフレーム重複回避のみの結果と比較して再選択通知による制御, 再選択検出による制御のどちらの制御でも半二重性問題の発生が軽減されていることがわかる。しかし未だに半二重性問題は発生している。これは通知あるいは検出の遅れにより, 中継車両が短期間でリソース再選択を繰り返し実施することが原因である。リソース再選択タイミングを制御する場合にはリソース再選択の通知送信あるいは検出により, 隊列の先頭車両から最後尾車両までリソース再選択が連続的に行われるが, 過干渉により通知や検出が失敗した場合, 連続的なリソース再選択が一時的に途絶えてしまう。干渉過多による失敗が解消されればリソース再選択は再開されるが, 既に次の新しい通知や検出が先頭車両から順に行われている場合がある。その結果いずれかの隊列車両で, 以前の通知や検出と新しい通知や検出が同時期に発生し, 当該車両は連続してリソース再選択を行ってしまう。これにより隣接隊列車両間で同時期のリソース再選択が行われるため半二重性問題が発生する。

また両方式の性能を比較すると, 再選択確率が低いほど再選択検出による制御の有効性が大きくなっている。リソース再選択タイミングを制御する場合, 再選択の後続車両への通知, あるいは先行車両の再選択の検出というそれぞれ似た手法により再選択を制御している。しかし再選択通知方式では車両が新しいリソースを予約したかに関わらず通知が送信され, 後続車両がリソース再選択を実施するのに対して, 再選択検出方式では先行車両が新たなリソースを予約しない限り後続車両はリソース再選択を実施することが出来ない。そのため再選択検出方式では再選択通知方式に比べて, 実際の隊列車両のリソース再選択頻度は再選択確率よりも低くなる。その結果, 先行車両のリソース再選択を連続して把握する機会が少なくなり, 当該車両で連続リソース再選択が行われる頻度が低下するため半二重性問題の発生も軽減されている。再選択確率 $1 - P_{cu}$ が 1 の場合には先行車両がリソース再選択を行えば後続車両も必ずリソース再選択により新しいリソースを選択するため, どちらの方式も同等の性能を示している。

図 5.8 ではサブフレーム重複回避のみの制御と再選択通知による制御はほぼ同等の性能を示しており、再選択検出方式のみ全要因に対してもより良い伝送性能を示している。これは再選択検出方式では隊列車両のリソース再選択頻度が低下するため、送信に適したリソースを一度予約すると、その予約リソースを他方式よりも長期間利用し続けるためである。また隊列外車両速度の影響については、図 5.7, 5.8 とともにサブフレーム重複回避のみの結果と同様の傾向を示している。

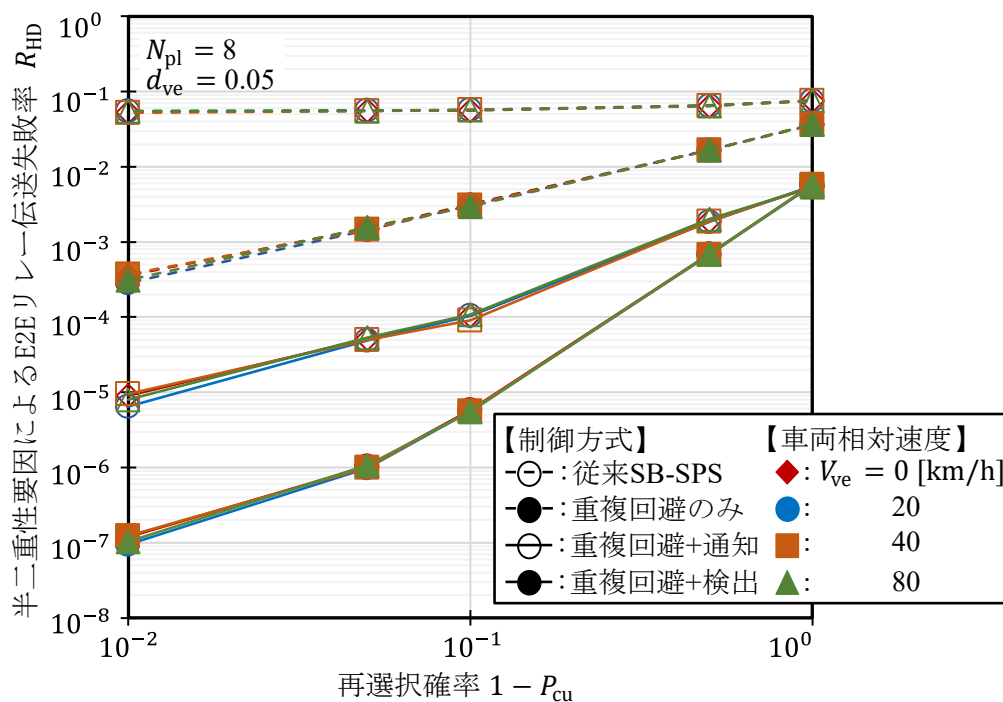


図 5.7 リソース再選択タイミング制御による再選択確率変化時の半二重性要因伝送失敗率

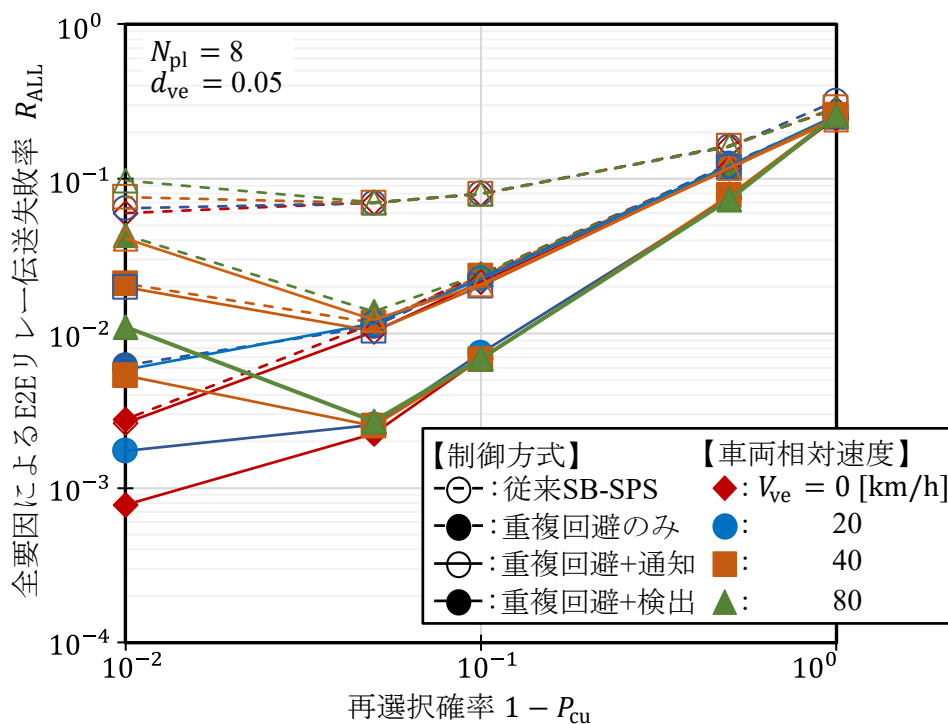


図 5.8 リソース再選択タイミング制御による再選択確率変化時の全要因伝送失敗率

5.4.2 隊列車両台数変化時の特性評価

リソース再選択タイミング制御の有無による性能比較をそれぞれ図 5.9, 図 5.10 に示す。隊列外車両密度 d_{ve} は 0.05 [台/m], 再選択確率 $1 - P_{cu}$ は 0.5 とした。

図 5.9 において従来方式と提案方式を比較すると, 隊列車両台数を変化させた場合でも提案方式が半二重性問題の軽減に有効であることがわかる。また隊列車両台数が増加するほど, 再選択通知方式と再選択検出方式間の伝送性能差が明確になっている。再選択検出方式では先行車両がリソース再選択により新たなリソースを選択しない限り後続車両はリソース再選択を行わないため, 隊列の後方車両ほどリソース再選択の機会は少なくなる。その結果, 後方車両では一度選択した送信に適したリソースを長期間使用し続けるため, 再選択検出方式は隊列車両台数が増加するほど再選択通知方式よりも優れた性能を示すようになる。

図 5.10 でも同様に, 隊列車両台数の増加に伴い, 再選択通知方式と再選択検出方式間の伝送性能差が明確となっている。また従来方式と再選択通知方式の全要因による E2E 伝送失敗率はほぼ同程度の性能であるが, 再選択検出方式では失敗率の改善がみられる。このことより隊列車両台数変化に対しても, 予約リソースの長期的な維持による過干渉に起因する伝送失敗の回避が確認できる。

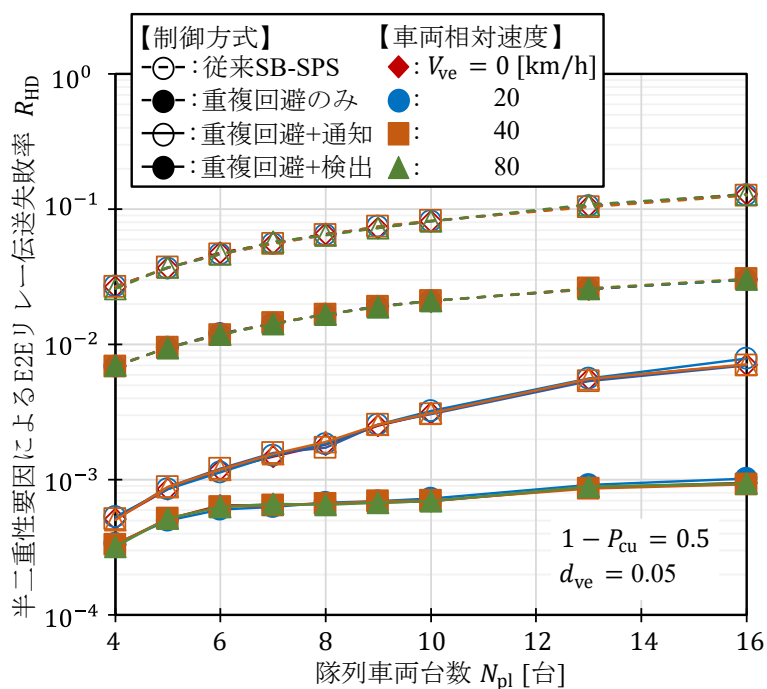


図 5.9 リソース再選択タイミング制御による隊列車両台数変化時の半二重性要因伝送失敗率

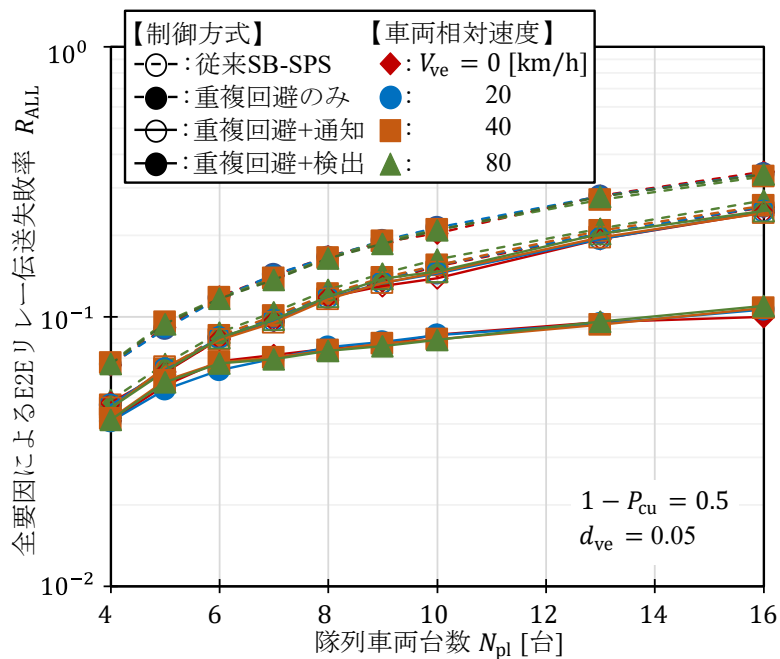


図 5.10 リソース再選択タイミング制御による隊列車両台数変化時の全要因伝送失敗率

5.4.3 隊列外車両密度変化時の特性評価

隊列外車両密度を変化させた場合の半二重性要因による E2E リレー伝送失敗率および全要因による E2E リレー伝送失敗率をそれぞれ図 5.11, 図 5.12 に示す. 再選択確率 $1 - P_{cu}$ は 0.5, 隊列車両台数 N_{pl} は 8 [台] とした.

図 5.11 では従来方式と比較して, 隊列外車両密度を変化させた場合でも提案方式により半二重性問題の発生が更に軽減されていることがわかる. しかし従来方式と同様にその有効性は隊列外車両密度の影響をほとんど受けていない. また再選択検出方式が再選択通知方式よりも優れた半二重性問題軽減効果を示しているが, その有効性も隊列外車両密度に関わらず殆ど一定である.

また図 5.12 では 5.4.2 節の図 5.10 と同様に, 再選択検出方式の全要因による E2E 伝送失敗率のみ従来方式からの改善がみられる. このことより隊列外車両密度変化に対しても, 予約リソースの長期的な維持による過干渉に起因する伝送失敗の回避が確認できる. そのため半二重性問題の発生軽減や過干渉による伝送失敗の回避の観点では再選択通知方式よりも再選択検出方式の方が有効であるといえる.

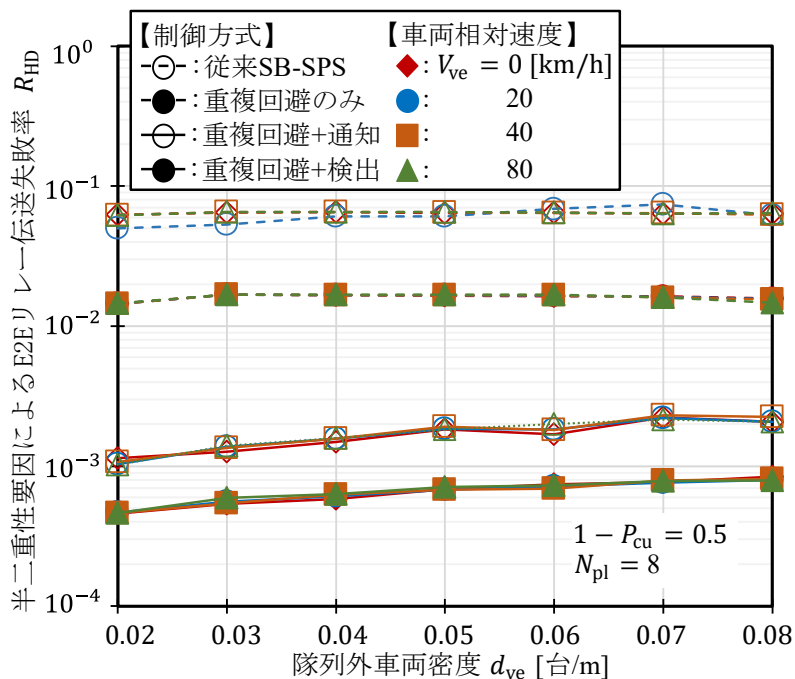


図 5.11 リソース再選択タイミング制御による隊列外車両密度変化時の半二重性要因
伝送失敗率

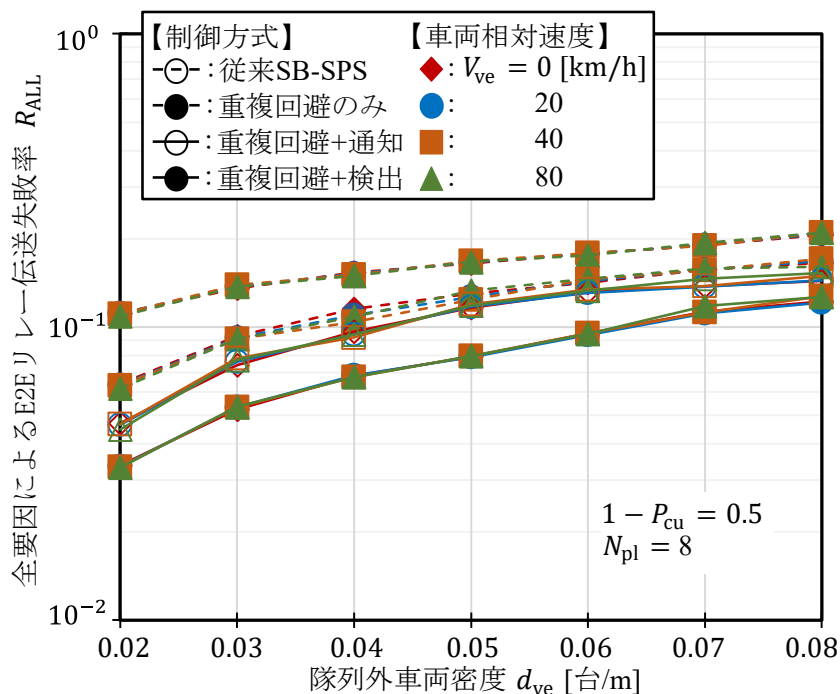


図 5.12 リソース再選択タイミング制御による隊列外車両密度変化時の全要因伝送失
敗率

第6章 まとめ

本研究では SB-SPS 方式を用いたサイドリンク通信による隊列走行リレー伝送に着目し、半二重性問題によるリレー伝送性能の劣化を抑制するため、隣接隊列車両間で予約リソースのサブフレームの重複を避けるリソース制御方式および隊列先頭車両から順にリソース再選択を実施するリソース制御方式を提案し、その性能評価を行った。

SB-SPS 方式ではリソース単位の制御しか行われておらず、無線リソースのサブフレームは考慮されていない。そのため車両間で予約リソースのサブフレームが重複することにより発生する半二重性問題に SB-SPS 方式では対処することが出来ない。また SB-SPS 方式は同一無線リソースを定期利用しているため、半二重性問題が発生すると連続して通信が失敗する。隊列走行では先頭車両の位置や速度情報等を隊列内で共有するために後続車両を介したリレー伝送が必要であるが、半二重性問題によりリレー伝送が途絶えると情報共有が最後尾車両まで行われず隊列の運用が困難となってしまう。この半二重性問題を軽減するためのリソース制御方式がいくつか研究されているが、それらは隊列走行リレー伝送を想定していない。そのため隊列走行リレー伝送を考慮した半二重性問題抑制方式が必要である。

車両が受信したデータパケットをさらに後続の車両へ中継する必要があり、半二重性問題が発生すると以降のリレー伝送が行われない。そのためリレー伝送において、SB-SPS 方式で半二重性問題が回避できないことは致命的な課題となる。

そこで本研究では SB-SPS 方式を拡張し、隊列走行リレー伝送において半二重性問題の発生を抑制するリソース制御方式を提案した。提案方式では隊列車両は自身の先行車両と後続車両の予約リソースのサブフレームを記録し、リソース再選択時に同一サブフレーム内の無線リソースを選択候補から除外することで、リソースのサブフレームを考慮した制御を可能とし、半二重性問題の発生を軽減する。また隣接隊列車両間で同時期にリソース再選択が実施された場合、互いに新しい予約リソースのサブフレームを把握することが出来ずに、以前の予約リソースのサブフレームのみを認識した状態でリソースを除外するため半二重性問題が発生してしまう。そこで提案方式ではさらに、隊列車両のリソース再選択タイミングを制御するために隊列の先頭車両から最後尾車両にかけて順にリソース再選択を行う。リソース再選択タイミングの制御は先行車両から後続車両へのリソース再選択の通知、あるいは先行車両のリソース再選択の検出により実施される。

提案方式の有効性を評価するために、半二重性要因および全要因による E2E のリレー伝送失敗率を計算機シミュレーションにより評価した。その結果、各パラメータを変化させた場合でもサブフレーム重複を回避することにより、従来の SB-SPS 方式と比較して半二重性問題が軽減されることが確認できた。またリソース再選択タイミングを制御することで、半二重性問題の発生をより軽減できることが確認でき、さらにリ

ソース再選択の検出による制御により大きな軽減効果が期待できることも確認できた。以上より、提案した各方式は隊列走行リレー伝送において半二重性問題の発生を軽減に有効であると結論付けられる。

今後の課題として、本研究で提案したリソース制御方式では過干渉によりリレー伝送が失敗し再選択通知や再選択検出が一時的に途絶えてしまうと、短時間で連続的なリソース再選択が行われ、提案方式による先頭車両から最後尾車両への順次リソース再選択行われずに車両間の同時リソース再選択が発生し半二重性問題が起きる恐れがある。そのため、短期間での連続的なリソース再選択に対処する必要があると考えられる。また、本研究では隊列リレー伝送のみに着目して半二重性問題軽減方式の提案および特性評価を行っており、提案方式の適用による隊列外車両のブロードキャスト伝送の伝送性能への影響等の可能性が明らかにされていない。そのため提案方式の隊列走行リレー伝送以外の伝送への影響を調査し、システム全体で伝送性能を向上させるリソース制御方式の開発が課題として挙げられる。

参考文献

- [1] A. Bazzi, A. O. Berthet, C. Campolo, B. M. Masini, A. Zanella, "On the Design of Sidelink for Cellular V2X: A Literature Review and Outlook for Future," *IEEE Access*, vol. 9, pp.97953-97980, July 2021.
- [2] K. Sehla, T. M. T. Nguyen, G. Pujolle and P. B. Velloso, "Resource Allocation Modes in C-V2X: From LTE-V2X to 5G-V2X," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 11, pp. 8291-8314, March 2022.
- [3] J. B. Kenney, "Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States," *Proceedings of IEEE*, vol. 99, no. 7, pp 1162-1182, June 2011.
- [4] V. Vukadinovic, K. Bakowski, P. Marsch, I. D. Garcia, H. Xu, M. Sybis, P. Sroka, K. Wesolowski, D. Lister, I. Thibault, "3GPP C-V2X and IEEE 802.11 p for Vehicle-to-Vehicle Communications in Highway Platooning Scenarios," *Ad Hoc Networks*, vol.74, pp.17-29, May 2018.
- [5] T. V. Nguyen, P. Shailesh, B. Sudhir, G. Kapil, L. Jiang, Z. Wu, D. Malladi, J. Li, "A comparison of cellular vehicle-to-everything and dedicated short range communication," *Proc. of IEEE Vehicular Networking Conference*, pp. 101-108, November 2017.
- [6] 3GPP, TR 36.885(V14.0.0), "Study on LTE-based V2X Services," June 2016.
- [7] R. M. Masegosa, J. Gozalvez and M. Sepulcre, "Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation With Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121526-121548, July 2020.
- [8] Z. Pei, W. Chen, C. Li, L. Du, H. Liu and X. Wang, "Analysis and Optimization of Multihop Broadcast Communication in the Internet of Vehicles Based on C-V2X Mode 4," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 12, pp.12428-12443, May 2022.

- [9] V. Lesch, M. Breitbach, M. Segata, C. Becker, S. Kounev and C. Krupitzer, "An Overview on Approaches for Coordination of Platoons," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 10049-10065, August 2022.
- [10] C. Campolo, A. Molinaro, G. Araniti, A. O. Berthet, "Better Platooning Control Toward Autonomous Driving: An LTE Device-to-Device Communications Strategy that Meets Ultralow Latency Requirements," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.12, no.1, pp.30-38, March 2017.
- [11] Y. Jeon and H. Kim, "An Explicit Reservation-Augmented Resource Allocation Scheme for C-V2X Sidelink Mode 4," *IEEE Access*, vol.8, pp. 147241-147255, August 2020.
- [12] K. Li, W. Ni, E. Tovar and M. Guizani, "Optimal Rate-Adaptive Data Dissemination in Vehicular Platoons," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 10, pp. 4241-4251, October 2020.
- [13] C. Compolo, A. Bazzi, V. Todisco, S. Bartoletti, N. Decarli, A. Molinaro, A. O. Berthet and R. A. S. Gallacher, "Enhancing the 5G-V2X Sidelink Autonomous Mode through Full-Duplex Capabilities," *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, June 2022.
- [14] 3GPP, TR 36.321(V14.3.0), "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification," June 2017.
- [15] T. Park, K. G. Shin, "SNB: Reduction of Consecutive Message Reception Failures in C-V2X Communications," *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, December 2020.
- [16] M. Ali, H. Hwang, Y. T. Kim, "Performance Enhancement of C-V2X Mode 4 with Balanced Resource Allocation," *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, May 2022.
- [17] J. Wu, Y. Guo, S. Zhou, "A Reliable Self-Adaptive Scheduling Control Protocol for Cellular V2X Mode 4," *IEEE Access*, vol.10, pp.63991-64003, 15 June 2022.

- [18] F. Peng, Z. Jiang, S. Zhang and S. Xu, "Age of Information Optimized MAC in V2X Sidelink via Piggyback-Based Collaboration," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, Issue. 1, pp. 607-622 , January 2021.
- [19] L. Cao, S. Roy , H. Yin, "Resource Allocation in 5G Platoon Communication: Modeling, Analysis and Optimization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 5035-5048, April 2023.
- [20] X. Gu, J. Peng, L. Cai and Y. Cheng, "Performance Analysis and Optimization for Semi-Persistent Scheduling in C-V2X," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 4628-4642, April 2023.
- [21] IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2, "WINNER II hannel Models," Tech. Rep., February 2008.

謝辞

本研究の遂行にあたって、ご多忙な中ご指導いただいた眞田耕輔助教、羽多野裕之准教授、森香津夫教授に深く感謝申し上げます。また、研究室の整備等でご協力くださいました山本好弘技術職員、北島巧海技術職員、本研究のためにご助力を注いでくださいました大学院生、学部生の皆様に深く感謝申し上げます。

最後に、本研究の一部は三菱電機(株)からの受託研究により実施されたものであり、ここに深謝致します。

研究業績

1. 大島 輝斗, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫, “隊列走行での SB-SPS を用いたリレー伝送における半二重性の伝送性能への影響,” 電子情報通信学会大会講演論文集, B-5-76, p.321, 2023 年 3 月.
2. 大島 輝斗, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫, “サイドリンク通信を用いた隊列走行リレー伝送における半二重性問題を低減する SB-SPS リソース制御方式,” 信学技報, vol. 123, no. 76, RCS2023-75, pp. 276-281, 2023 年 6 月.
3. A. Ohshima, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Enhanced Resource Management Scheme to Mitigate Half Duplex Problem for Sidelink Relay Transmission in Platooning,” Proc. of 13th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C), September 2023.
4. A. Ohshima, K. Sanada, H. Hatano, K. Mori, “Enhanced SB-SPS Scheme to Mitigate Half Duplex Problem for Relay Transmission in Vehicle Platooning,” Proc. of IEEE Consumer Communications & Networking Conference, January 2024.
5. 大島 輝斗, 眞田 耕輔, 羽多野 裕之, 森 香津夫, “隊列走行リレー伝送のための半二重性問題低減 SB-SPS 方式の改良,” 電子情報通信学会大会講演論文集, B-5A-98, 2024 年 3 月.