

修士論文

ITS 路車間・車車間周波数共用通信システム における車車間通信チャネルアクセス制御方式 に関する研究

平成 28 年度修了

三重大学大学院 工学研究科 博士前期課程

電気電子工学専攻 計算機工学研究室

高尾 英行

目次

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景..... | 1 |
| 1.2 本研究の目的..... | 3 |
| 1.3 本論文の構成..... | 3 |
| | |
| 第2章 ITS 無線通信システムの変遷と主要技術 | 4 |
| 2.1 ITS 用無線通信の変遷..... | 4 |
| 2.2 CSMA/CA..... | 6 |
| 2.3 ARIB STD-T109..... | 8 |
| 2.3.1 システム構成..... | 10 |
| 2.3.2 IVC-RVC 層..... | 11 |
| 2.3.3 レイヤ2 データリンク層..... | 12 |
| 2.4 制御方式の技術的課題..... | 14 |
| | |
| 第3章 チャネルアクセス集中に対する既存研究 | 15 |
| 3.1 チャネルアクセスの分散..... | 15 |
| 3.2 グループ間時分割多重方式..... | 16 |
| 3.3 送信禁止期間拡張方式..... | 18 |
| 3.4 従来の送信禁止期間拡張方式の問題点..... | 20 |
| | |
| 第4章 チャネルアクセス開始タイミング制御方式 | 22 |
| 4.1 チャネルアクセスの集中の要因..... | 22 |
| 4.2 チャネルアクセス開始タイミング制御..... | 23 |
| 4.2.1 生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御..... | 23 |
| 4.2.2 サブフレーム越え車車間通信パケットのランダム遅延制御..... | 25 |

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 第5章 特性評価モデル | 26 |
| 5.1 ネットワークモデル..... | 26 |
| 5.2 トラヒックモデル..... | 27 |
| 5.3 フレーム構造..... | 27 |
| | |
| 第6章 計算機シミュレーションによる特性評価 | 28 |
| 6.1 評価条件..... | 28 |
| 6.1.1 シミュレーション諸元..... | 28 |
| 6.1.2 評価指標..... | 29 |
| 6.2 特性評価..... | 30 |
| 6.2.1 生起時刻基準送信開始時刻制御の有効性評価..... | 31 |
| 6.2.2 サブフレーム越えランダム遅延制御の有効性評価..... | 35 |
| 6.2.3 フレーム構造変化時の提案手法の性能評価..... | 39 |
| | |
| 第7章 まとめ | 45 |
| | |
| 参考文献 | 46 |
| | |
| 謝辞 | 49 |
| | |
| 研究業績 | 50 |

第1章 序論

1.1 研究背景

ITS (Intelligent Transport System: 高度道路交通システム) では道路交通が抱える事故・渋滞や環境問題など様々な問題を解決するために、安全運転支援システムや自動運転などの高度 ITS サービスを実現することが目標とされている。この目標に対し、無線通信技術や電子制御技術の研究開発が盛んに行われている。ITS における無線通信では、既に商用システムで使用されている 5.8GHz 帯に加え、電波伝搬特性に優れた 700MHz 帯が使用周波数帯に割り当てられている。5.8GHz 帯は道路上に設置される路側機と車両をつなぐ路車間通信に使用されている。路車間通信はリアルタイムかつ確実に通信を実施可能なことから、VICS (道路交通情報通信システム) や ETC (自動料金収受システム) などで既に実サービス化されており、渋滞の緩和や最適ルートを選択など、快適、利便のための走行支援として活用されている[1]。今後さらなる ITS の高度化を目指して、700MHz 帯を用いた無線通信技術の研究開発は高度 ITS サービス実施に向けての重要な課題の 1 つとなっている[2]。

700MHz 帯を用いた高度 ITS サービス向け無線通信では、路車間通信に加え、車車間通信が要求されている[3]。700MHz 帯を用いた無線通信は 5.8GHz 帯に比べて、電波回折等によりカバーエリアが広い電波伝搬特性を持っているため、車両同士で車両の位置、速度等の走行情報をリアルタイムに共有する車車間通信に適している[4]。車車間通信は車両情報 (位置や速度等) を直接交換することで死角に存在する車両の位置を知らせることが可能となることなどから高度 ITS サービスの実用化のために必要不可欠な技術として特に注目されている[2][5]。しかし 700MHz 帯を用いた路車間・車車間通信が適用された実サービスは現時点では存在せず、試験研究段階である[6]。

路車間・車車間通信に割り当てられた 700MHz 帯の帯域幅は 10MHz と狭いため、両通信での帯域共用が必要であり、その実現が大きな技術課題となっている。この課題に対する解決方式の 1 つとして、時分割により両通信の帯域共用が可能な路車間・車車間周波数共用通信が 2012 年 2 月に一般社団法人電波産業会より ARIB STD-T109[7]として標準化されている。路車間・車車間共用通信では両通信に対し専用の通信期間をフレーム内で割り当てることで各通信間の干渉を回避している。車車間通信では CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)[8]によるアクセス制御方式を用いて、車両からその周辺車両に対してブロードキャストによる通信を行う[9]。

ARIB STD-T109 に準拠した路車間・車車間共用通信において車車間通信パケットに

着目した場合、路車間通信期間は送信禁止期間となり車車間通信パケットの送信ができない。そのため、車車間通信期間開始直後に送信待ち車両が一斉にチャンネルアクセスを試み、チャンネルアクセスが集中する。チャンネルアクセス集中が発生した場合、CSMA/CAによるバックオフ制御のみでは衝突回避が十分に機能せず同時送信によるパケット衝突が増加する。衝突が増えることによって受信成功率が低下し、ブロードキャスト車車間通信の性能が劣化する問題がある。

この問題に対し、車両位置や交差点から車両までの距離に応じてグループ化し、送信時間をグループ毎に割り当てる手法[10]や、各車両に対しランダムに送信禁止期間を拡張し送信開始時刻を遅延させる手法[11]など、様々な研究が行われている。しかし、これらの手法はチャンネルアクセス開始時刻に延長を加えているためパケット生起から送信までの伝送遅延時間が大きくなる問題がある。さらにパケット毎で異なるランダムな延長を付加しているため、パケット間で伝送遅延時間の差異が大きくなる問題がある。これらの問題は受信した車両情報と実際の車両位置や速度等との差異を発生させ、さらにその差異が車両情報の受信ごとに異なることになる。これらは誤ったシステム制御を引き起こす原因となり得るため、高度 ITS サービスを提供する ITS 無線通信への適用が厳しいと考えられる。

1.2 本研究の目的

本論文では ARIB STD-T109 に基づいた路車間・車車間共用通信における車車間通信を研究対象とし、車車間通信期間先頭付近で発生するチャンネルアクセス集中を緩和して良好な受信成功率特性を維持しながら、伝送遅延時間とその差異を短縮することを目的とする。

この目的を達成するため、全車車間通信パケットを対象とした生起時刻に基づいた送信開始時刻制御と、路車間通信期間開始時に送信待機中である車車間通信パケットを対象としたランダム遅延制御を合わせた新たなチャンネルアクセス方式を提案する。そして、計算機シミュレーションにより提案手法を用いた場合の車車間ブロードキャスト型通信について評価し、従来手法である送信禁止期間拡張手法との性能比較を実施する。

1.3 本論文の構成

本論文は次のように構成される。第2章において ITS 無線通信システムの変遷とその主要技術について述べる。第3章では従来手法である送信禁止期間拡張方式について述べ、第4章では提案手法である生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御とサブフレーム越え車車間通信パケットのランダム遅延制御の二つのチャンネルアクセス開始時刻制御方式について述べる。第5章では特性評価モデルについて記述し、第6章において計算機シミュレーションによる特性評価結果について述べる。第7章では本論文のまとめを述べる。

第2章 ITS 用無線通信の変遷と主要技術

第2章では、本研究で検討する ITS における無線通信の基本事項について記述する。2.1 節では ITS 用無線通信の変遷について、2.2 節では 700MHz 帯標準規格である ARIB STD-T109 について、2.3 節にこれらを踏まえた技術的課題を記述する。

2.1 ITS 用無線通信の変遷

ITS における無線通信として 5.8GHz 帯を使用した自動料金収受システム ETC や道路規制情報や娯楽情報を通信する VICS がこれまでに実現されてきた。これらの無線通信は道路上に存在する路側機と車両間で通信を行う路車間通信の形態をとっている。

ITS における無線通信では更なる発展が期待されており、これまで検討・実用化されてきた路車間通信の形態に加え、高度 ITS サービスの実現に向けた観点から車両間で車両の位置、速度、加速度等を互いに通信する車車間通信を行うことが考えられている。車車間通信によって互いに車両が認識し合うことで、運転手の不注意や見通し外からの人や自動車の飛び出しによる事故を未然に防ぐことが可能となると考えられている。

車車間通信では、携帯電話のような通信システムとは異なり、基地局に相当するネットワーク管理する局が存在しない自律分散制御型システムであるので、お互い勝手に情報を送信すると電波が衝突し情報交換効率の悪化を招いてしまう。しかし車車間通信に向けて割り当てられている周波数帯域は 10MHz と限られている。さらには走行距離 10m 毎には周辺車両と情報を交換しなければならず、実際の環境下では約 100 台以上の車両に対して 100[ms]以内で情報を交換しなければならないことになる。このような厳しい要求条件を満足することが可能となるアクセス方式についての研究開発が世界各国で行われている。

欧米では 5.8GHz 帯を使用周波数帯とした車車間通信が検討されており、IEEE によって無線 LAN の一規格である IEEE802.11a に類似した VANET(vehicle ad hoc network)用のプロトコルについて IEEE802.11p として規格化されている。その規格を更に改良したチャンネルアクセス方式[12]や 5.8GHz 帯で周波数多重方式を用いた際の車車間通信の伝送効率の推定[13]についてなどの更なる研究開発が行われている。また 5.8GHz 帯とは異なるセルラネットワークにおける LTE で使用される周波数帯域を用いた車車間通信についての研究[14]など研究開発もなされている。

日本ではアナログテレビに使用されていた周波数帯 700MHz 帯の内 10MHz の帯域幅が ITS 用の帯域として更に割り当てられた。そこで無線 LAN のアクセス方式を 700MHz

帯車車間通信向けに改良した CSMA/CA に基づいた MAC プロトコル[15]が研究開発された。さらに 700MHz 帯で路車間通信と車車間通信の両通信が共通の帯域を使用することが検討されている。その帯域共有手法の一手法として、電波産業会より路車間通信と車車間通信が 700MHz 帯の共通の 1 チャンネルを時分割共有する路車間・車車間周波数共有通信が ARIB STD-T109[7]として標準化されている。

近年 ARIB STD-T109 に基づいた無線通信に関する研究開発が盛んに行われている[16][17]。中でも通信性能の向上を目的としたチャンネルアクセス方式の改良や、新たな通信形態となる歩車間通信を加える検討がなされている[18]。これらの研究により道路交通システムの安全性の向上や高度 ITS サービスの実現の促進に繋がることが期待されている。

2.2 CSMA/CA チャンネルアクセス

無線通信システムにおいて複数の端末がデータ送信を試みた場合にパケット衝突が発生し、パケット衝突の検出ができない。そこで発生するパケット衝突を回避するために CSMA/CA は用いられる。

CSMA では、送信待機中の端末はチャンネル状態を監視し、チャンネルが一定時間以上継続して空いていること(アイドル)を確かめてからデータを送信する。この空きチャンネルを探す方法は、空きチャンネル判定(CCA: clear channel assessment)を用いている。CCAにより無線信号電力を検知することでチャンネル判断を行っている。

CSMA/CA の場合、CCA により一定時間チャンネルの空きを確認した後、さらにランダム時間待機してから CCA を行うことにより衝突を回避している。このランダムな待ち時間をバックオフ期間と呼んでいる。

通常このランダムな待ち時間の設定を行うバックオフ制御には主なパラメータとしてフレーム間隔(IFS: Inter Frame Space)とバックオフ指数(BE: Backoff Exponent)が用いられる。ここで IFS は MAC 層が物理層で受け取られるデータを処理するために必要とする処理時間を考慮に入れるために用いられ、他端末からの送信によって、IFS は伝送されるデータサイズに依存し、データサイズの小さい受信応答に用いられる ACK 信号には最短フレーム間隔 SIFS が用いられる。ランダムなバックオフ待機時間の最大値は以下の式(2-1)で BE の値によって与えられる。

$$\text{MAX}_{\text{backoff}} = 2^{\text{BE}} - 1 \quad (2-1)$$

BE はあらかじめ設定した最小値にし、式(2-1)によってランダムに決定したバックオフ時間を単位時間毎に減算し、0 になり次第パケットの送信を試みる。実際にデータが正しく送信されたかは、受信側からの ACK(Acknowledge)信号が送信されるかどうかで確認し、ACK 信号が送信されない場合は通信障害があったとみなし再送を行う。その再送を行う場合 BE の値を 1 増加させ、再びバックオフ時間の設定を行う。

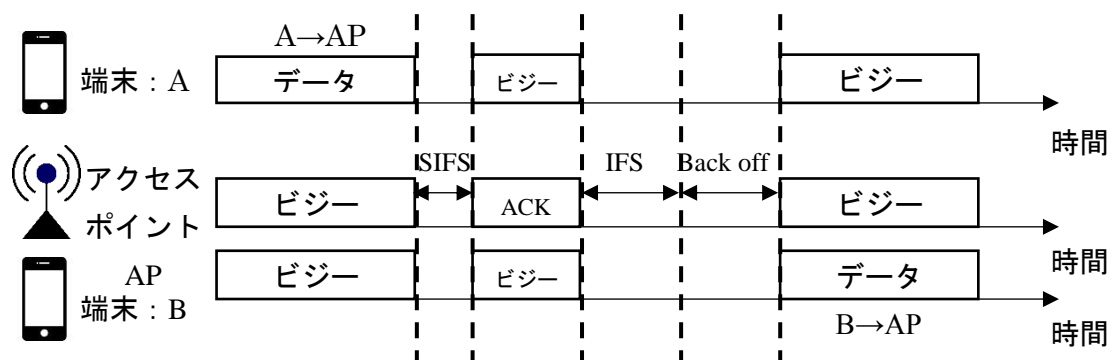


図 1 CSMA/CA 概要例：無線 LAN

しかし、CSMA/CA による衝突回避の制御を行った場合でもパケット衝突が発生する場合があります。それは端末間の距離があり互いの電波を検知できない場合に CCA によってチャンネルをビジー状態と判断できず、互いにパケット送信を開始してしまうことが原因である。この問題を隠れ端末問題という。

この隠れ端末問題を回避する為に CSMA/CA with RTS/CTS が存在する。CSMA/CA with RTS/CTS では、端末からのパケット送信が同時に発生しないように、パケットの送信の許可を求めて (Request To Send), データの送信を許可する (Clear to Send) という通信制御の方式である。

2.3 ARIB STD-T109

本標準規格では、700MHz帯高度道路交通システムの無線設備を搭載した車両と車両及び交差点等に設置される路側機との間の無線区間インターフェースについて規定されている。路車間通信によって交通管理者、道路管理者等からの精度の高い安全運転支援に関わる情報の提供が考えられている。また、車車間通信による低遅延かつ直接的な安全運転支援に関わる情報の提供が考えられている。

本システムでは、小ゾーン構成による周波数有効利用や情報の大容量・高速・低遅延伝送や路側機及び車両からの同報通信を特徴とし、主に安全運転支援アプリケーションを想定している。本システムにおける無線設備の要件は以下のとおりである。

- 路側機と車両間及び車両と車両間により構成され、この間の無線通信により実現されること。
- 700MHz帯の単一伝送チャンネルで路車間通信と車車間通信を共用すること。
- 車車間通信においては、車両間の相対速度として静止状態から140km/h程度まで通信が可能であること。
- 路車間通信においては、車両の速度として静止状態から70km/h程度まで通信が可能であること。

これらの要件が規定されている。

路車間・車車間共用通信制御の使用概要を図2に示す。図2では路側機が生成した路車間通信パケットを車両が受信することで路車間・車車間共用通信制御ネットワークが形成され、車車間通信と路車間通信が行われる。両通信の無線通信方式としてOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)変調方式を用いる伝送方式としている。

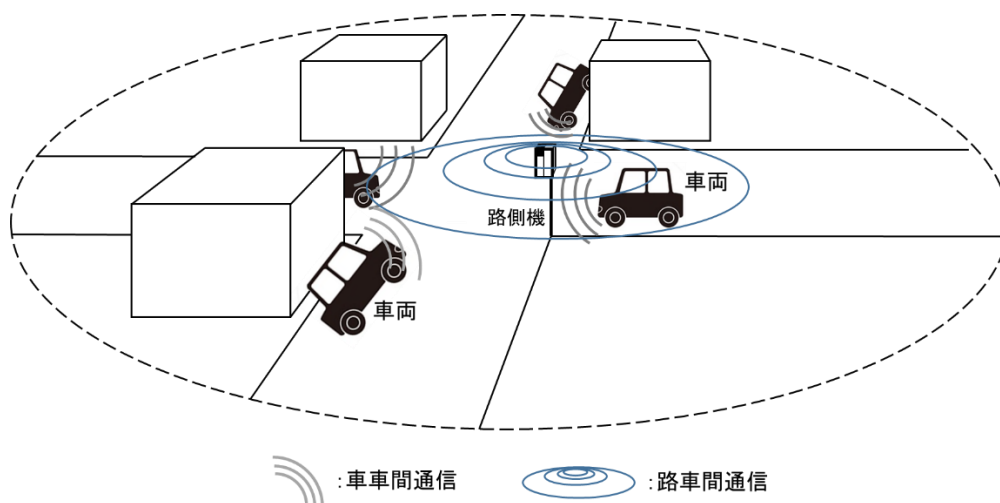


図2 路車間車車間共用通信制御

路車間・車車間共用通信制御ネットワーク内で図3のように一つのフレーム内で車車間通信と路車間通信が一つのチャンネルを時分割によって共用する無線アクセス方式を基本としている。路車間・車車間共用通信制御では、車両が車車間通信を行う場合、路車間通信期間は送信禁止期間となり、また路側機が路車間通信を行う場合、車車間通信期間は送信禁止期間となる。路側機からの通信においてはその路側機に設定された路車間通信期間内に同報通信を行う。車両からの通信においては、車車間通信期間内にCSMA/CA方式の通信制御手順を基本とした同報通信を行うとしている。

2.2.1 項以下において ARIB STD-T109 に規定されている 700MHz 帯での路車間・車車間共用通信制御手法について詳しく説明する。

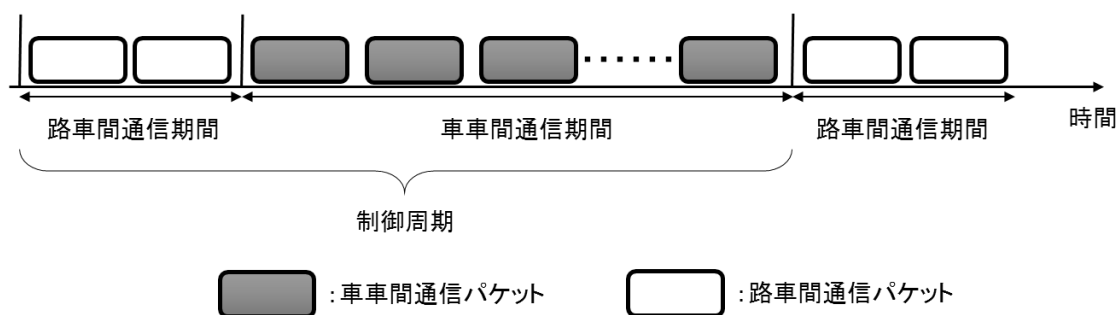


図 3 両通信の時分割共用

2.3.1 システム構成

路車間・車車間共用通信制御システムは図4に示すように、レイヤ1（物理層）、レイヤ2（データリンク層）、車車間・路車間共用通信制御情報層（IVC-RVC層）及びレイヤ7（アプリケーション層）の4層からなる。

レイヤ1では、路側機と車両間の無線通信を、OFDM変調方式を用いて行うための物理プロトコルデータ単位を規定する物理媒体依存副層と物理媒体依存副層とMAC副層間でフレームフォーマット変換を行う物理層コンバージェンス手順副層からなる。レイヤ1における各層の構成やサービス内容はIEEE802.11-2007[19]に従う。ただし、路側機から車両へ送信する際にキャリアセンス機能を用いないため、物理コンバージェンス手順副層でのパケット送信処理手順としてチャネル状態がアイドルであるという情報を受領していなくても、送信開始することができるとしている。この点のみ、IEEE802.11-2007の規定と異なる点である。

レイヤ7は、アプリケーションに対して通信制御手段及びサービスを提供するとともに、IVC-RVC層を介してデータの送受信を行う方法を規定している。

本研究において、IVC-RVC層とレイヤ2が重要となるため、より詳しく以下に記述する。IVC-RVC層の詳細について2.3.2節に記述する。レイヤ2は2.3.3節で詳しく記述する。

| |
|---|
| アプリケーション層 (L7) : 安全運転支援通信のアプリケーションとのやり取りをするプロトコル |
| IVC-RVC層 : L2とL7のインターフェースで路車間通信と車車間通信を共用制御するプロトコル |
| データリンク層 (L2) CSMA/CA方式とTDMA方式のMACプロトコル |
| 物理層 : IEEE802.11規格[19]/レイヤ1/ OFDM/10MHzシステムを参照 |

図4 ARIB STD-T109におけるプロトコルスタック

2.3.2 IVC-RVC 層

IVC-RVC 層は，路車間通信と車車間通信の干渉を低減するための制御情報の生成および管理を行い，送信制御に必要なパラメータをレイヤ 2 へ受け渡す役割がある．それぞれの通信が時分割されることによって干渉を低減しているが，時分割するための送信禁止期間情報の生成を行っている．フレーム内における路車間通信期間の開始時刻と終了時刻が含まれる路車間通信期間情報を路側機からエリア内の車両に通知することによって，路側機自身の送信時間を確保する．車両では，路側機から受け取った路車間通信期間情報に基づいて，送信禁止期間を設定し，送信禁止期間外に送信する．

路車間通信と車車間通信ともに 100[ms]のフレーム長を基本に動作しており，フレーム長と同一の制御周期でパケットが各路側機・車両から生起されるとしており，路車間通信期間は制御単位時間 16[μ s]を基本に設定される．1 フレームは 6.25[ms]毎に 16 個のサブフレームに分割される．図 5 に示すように，サブフレーム毎に先頭から最大 3.024[ms]を路車間通信期間として設定することが可能である．1 つの路側機からの路車間通信送信時間の総和は 1 フレーム中に 10.5[ms]以下でなければならず，それ以上の路車間通信送信時間は設定不可である．また，1 つの車両からの車車間通信送信時間の総和は 0.66[ms]以下でなければならず，送信バースト長は 0.33[ms]以下でなければならない．

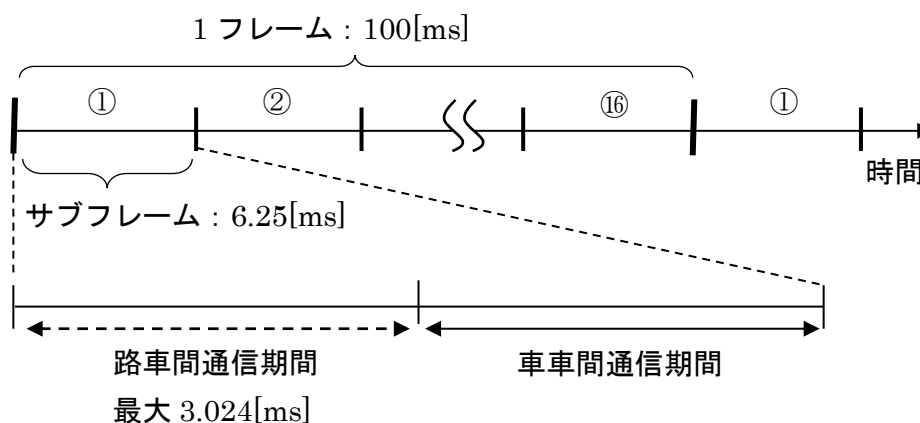


図 5 路車間通信期間の設置

2.3.3 レイヤ 2 (データリンク層)

データリンク層は LLC と MAC の二つの副層からなる。LLC 層はレイヤ 2 内でのデータ伝送と IVC-RVC 層にデータ転送サービスを提供している。IVC-RVC 層とデータ転送を行うことで送信禁止期間情報の生成も行う。

MAC 副層の主な機能として、送信禁止期間制御 (仮想的キャリアセンス)、CSMA 制御 (物理的キャリアセンス・バックオフ制御) がある。

送信禁止期間制御として、仮想的キャリアセンスがある。両通信が同一の周波数帯を時分割共用するため、一方の通信期間ではもう一方の通信は送信禁止期間となる。仮想的キャリアセンスは路側機から配信される路車間通信期間情報を参照し、車車間通信を行う場合、車両はその物理的キャリアセンスの結果に関わらず、路車間通信期間の間はチャンネルをビジーと判断し、路車間通信を行う場合は車車間通信期間の間のチャンネルをビジーと判断する機能である。

CSMA 制御機能として、物理的キャリアセンス機能がある。ここで物理的キャリアセンスとは受信電力に基づきチャンネルがアイドルかビジーかの判断を行う機能である。これは 2.2 節に記述した無線 LAN などでの CSMA/CA における空きチャンネル判定 CCA に相当する。

パケット送信間の時間間隔として最短スペース時間 T_{IFS} と分散スペース時間 T_{DIFS} の 2 種類の時間間隔がある。路車間通信パケット間の時間間隔に用いられる最短スペース T_{IFS} は $32[\mu\text{s}]$ 、車車間通信パケット受信後待機する分散スペース時間は式 (2-2) で示される。

$$T_{DIFS} = T_{IFS} + 2 \times T_{slottime} \quad (2-2)$$

スロットタイム $T_{slottime}$ は $13[\mu\text{s}]$ である [19]。

サブフレームの先頭に可変長で通信期間が設定される路車間通信とその他の期間内において車両間で情報共有する車車間通信では、それぞれ異なる送信手順をとる。以下にそれぞれの送信手順を示す。

路車間通信では、隣接する路側機間で予め異なるサブフレームにおいて路車間通信期間を設定することで、周囲の路側機と競合が発生せず干渉なしに 1 フレーム内で複数の路車間通信を行うことが可能となっている。そのため物理的キャリアセンスは行わず、仮想的キャリアセンス機能のみによってチャンネルがアイドルと判断され、更に最短スペース T_{IFS} 時間経過した後にデータ送信が許可される。仮想的キャリアセンス機能による路車間通信の概要を図 6 に示す。

次に本制御における車車間通信では、各車両は個別の送信期間はもたず、車両間で競合が発生する。そのため仮想的キャリアセンス機能及び物理的キャリアセンス機能によって分散スペース期間、チャンネルがアイドルと判断された後、ランダムな待ち時間 T_{RW}

(式 2-3) を待った後に送信が可能となる。

$$T_{RW} = \text{Random} \times T_{\text{slottime}} \quad (2-3)$$

ここで、*Random* は 0 から 63 の範囲内で一様分布する整数値の擬似乱数によって決定される。仮想的キャリアセンス及び物理的キャリアセンス機能による車車間通信の概要を図 7 に示す。物理的キャリアセンス機能によってチャンネルがアイドルと判断された場合、待ち時間をスロットタイム毎に減算を行うが、分散スペース時間及び待ち時間中にチャンネルがビジーと判断されると、減算を行わない。再度物理的キャリアセンスによってチャンネルがアイドルと判断され、分散スペース時間アイドルと判断し続けた後に、その時点での待ち時間からスロットタイム毎の減算を再開する。

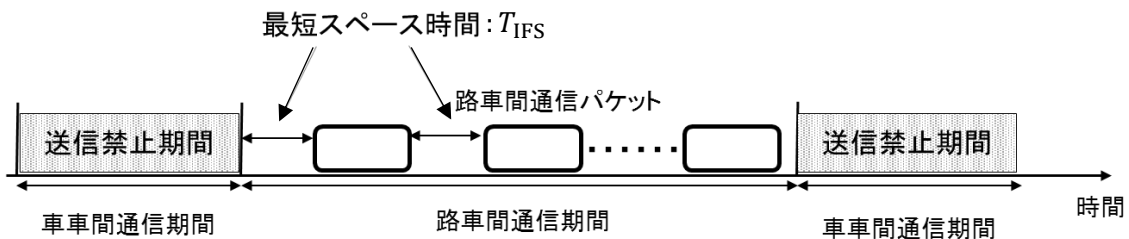


図 6 路車間通信を対象とした仮想的キャリアセンス機能

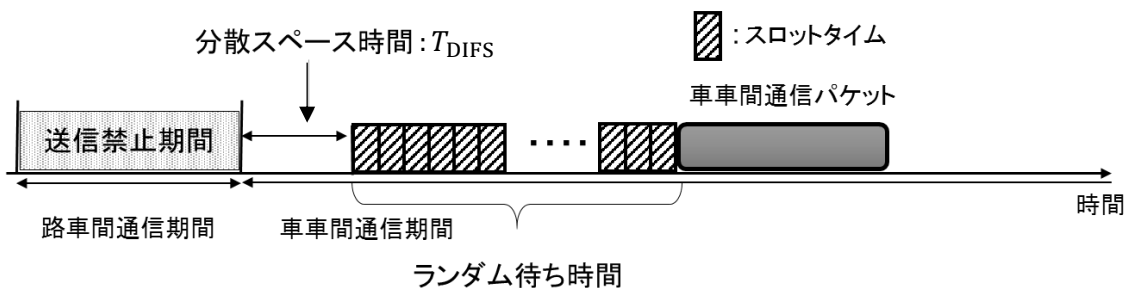


図 7 車車間通信を対象とした仮想的・物理的キャリアセンス機能

2.4 制御方式の技術的課題

安全運転支援に関する通信システムでは事故の発生を防止することを目的としているため、情報の遅延伝送は事故回避を不可能としかねない。そのため、700MHz 帯 ITS 無線通信の中でも車車間通信にはより低遅延かつより高い信頼度が要求される[20]。路車・車車共用通信制御における車車間通信に着目すると、ネットワーク内に多数の車両が存在する場合や路車間通信期間が長い場合などで次のような問題が発生する。

路車間通信期間内に生起する車車間通信パケットと前サブフレームにおいて送信されず路車間通信期間内に持ち越してきた車車間通信パケットが、車車間通信期間開始直後に一斉に送信動作を開始するため車車間通信期間先頭でチャンネルアクセスが集中してしまう。車車間通信では CSMA/CA のキャリアセンス機能によって他車の車車間通信を検出し、バックオフ制御によってパケット衝突の発生は軽減される。しかし、過度なチャンネルアクセス集中により、CSMA/CA 制御を行ったとしても複数台の車両が同一時刻に送信機会を得てしまい、同時に車車間通信を開始する。その結果パケット衝突につながる。

通信端末が比較的広い範囲に分布しており、また遮蔽物が存在するようなネットワークを想定する場合、一般的にキャリアセンスを行う際に隠れ端末問題が懸念される。隠れ端末問題は距離による電波の減衰や遮蔽物による減衰によって他の端末が送信しているにも拘らずチャンネルをアイドルと誤って判断し送信開始することによりパケット衝突が発生する問題である[21]。この問題はチャンネルアクセスが集中していない場合においても発生する可能性がある。しかしチャンネルアクセス集中が発生している場合、隠れ端末の関係にある車両が存在する可能性がより高くなるため、パケット衝突の発生がより増加する。車車間通信性能が劣化する問題があると考えられる。

パケット衝突の増加による車車間通信性能劣化は安全運転支援向けのメッセージを伝送する上で、正常な車両情報を伝送することができず、周辺車両の存在と位置を正しく把握することが出来ないなどの問題に繋がる。そのためパケット衝突を軽減することが大きな課題となっている。

以上に挙げたパケット衝突の要因として路車間通信期間内に送信待ちであるパケットによるチャンネルアクセス集中と隠れ端末問題がある。本論文では前者の要因に着目し、集中するチャンネルアクセスの分散化を行うことでパケット衝突の軽減に取り組んだ。

第3章 チャネルアクセス集中に対する既存研究

第3章では、チャネルアクセス集中の問題の対策として研究されているチャネルアクセス方式について記述する。3.1節では、問題に対しどのような対策がなされているかについて、3.2節では車両位置によってグループ分けを行うグループ間時分割多重方式について、3.3節ではパケット毎にランダムな送信禁止期間の拡張を行う送信禁止期間拡張方式について述べる。そして3.4節では、送信禁止期間拡張方式によって発生する問題について述べ、本研究における比較対象とする送信禁止期間拡張方式について具体的に記述する。

3.1 チャネルアクセスの分散

前章で記述した路車間・車車間共用通信制御において発生するチャネルアクセス集中に対しては、パケット毎に送信動作開始時刻を異なる時刻に改めて割り当てることでチャネルアクセスが分散され、パケット衝突率の軽減が達成されると考えられる。

チャネルアクセス集中の問題を解決するための対策法として、路車間通信エリア内に存在する車両の位置によって車両をグループ化し、車車間通信期間を車両グループ毎に分割するグループ間時分割多重方式[10]や、車車間通信パケットに対し送信禁止期間拡張期間を各車車間通信パケット毎にランダムに設定する送信禁止期間拡張方式[11]などが検討されている。

3.2 グループ間時分割多重方式

グループ間時分割多重方式では、路車間通信エリア内に存在する車両の位置によって車両をグループ化し、図8に示すように車車間通信期間を車両グループ毎に分割して割り当てることでパケット衝突の発生を軽減させる。車車間通信期間先頭付近でチャネルアクセス集中していた車車間通信パケットは各車両の属するグループに割り当てられた通信期間まで送信待機する。その結果、それぞれの通信期間に分散されチャネルアクセスの集中を軽減することができる。グループ化には図9に示すように交差点を中心とした方位別と交差点中心から車両までの距離別の二種が検討されている。

しかし、この検討では各車両においてパケット生起時刻からその車両が属するグループに割り当てられた車車間通信期間まで送信待機しなければならず、伝送遅延時間が大幅に増大する問題がある。また、実環境において車両は高速度で移動しており、車両の位置に基づいて厳密にグループ化を行うことは困難である。また、分割に伴う性能劣化が発生する問題もある。さらに複数の路車間通信期間が設定される環境においてそれぞれの路側機が管理する路車間通信ネットワークエリアが重複する可能性があり、属するネットワークエリアを複数持つ車両に複数の車車間通信期間が割り当てられてしまうなど、各車両に対しグループ化が適切に設定できない問題もある。これらの問題は実システムへの適用に大きな障害となり得る。

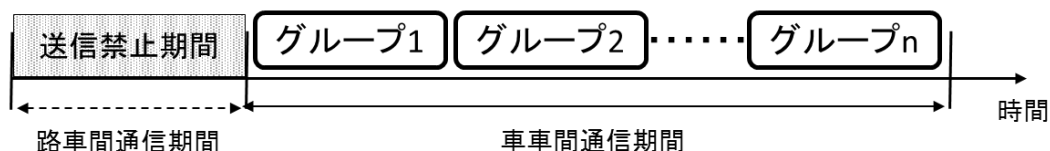


図8 グループ間時分割多重方式

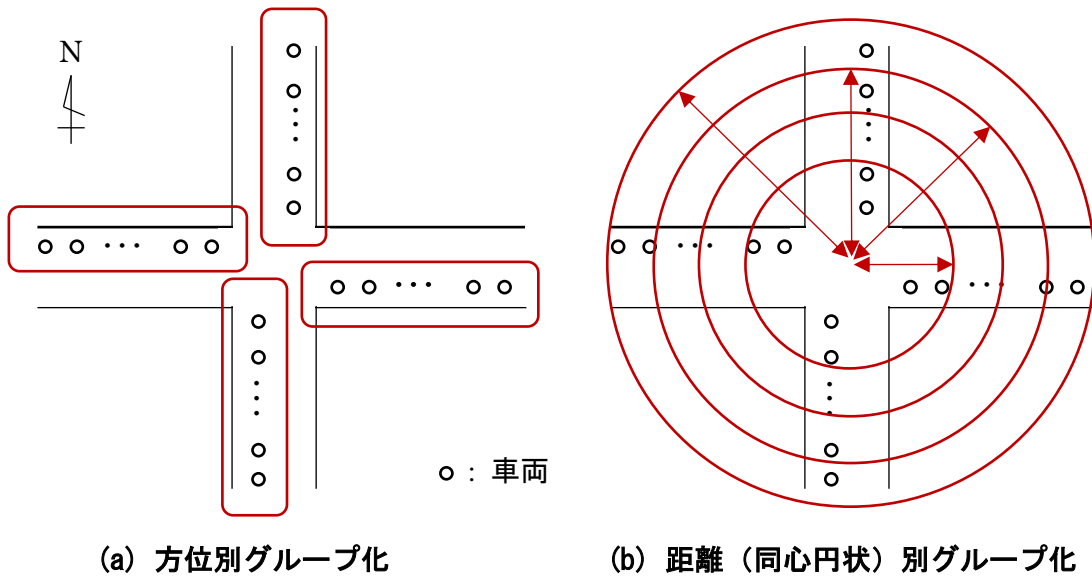


図 9 グループ化例

3.3 送信禁止期間拡張方式

送信禁止期間拡張方式では、送信禁止期間の終了時刻を車車間通信 packets 毎にランダムに延期するための送信禁止拡張期間を設定することによってチャンネルアクセスの分散をはかっている。

図 10 に示すように、ARIB STD-T109 を拡張する形で、車車間通信 packets 送信手順に送信禁止期間拡張スロット (スロット長:16[μ s]) を設定することで車車間通信開始直後のチャンネルアクセスを分散することをねらいとしている。この手法では、送信禁止期間拡張スロットの最大数 S をパラメータとし、 $[0, S-1]$ の範囲でランダムに送信禁止期間の拡張を行っている。路車間通信によって路側機から車両が受け取った S から、各車両が $0 \sim S-1$ の範囲で一様分布する整数値乱数分だけ送信禁止期間拡張期間を車車間通信期間開始直後に設定する。これにより車両は (生成した乱数値) $\times 16[\mu\text{s}]$ の時間だけ送信を延期する。この延長された送信禁止期間終了後に通常の車車間通信の送信プロセスを開始する。ここで S は、路車間通信期間の長さ、路側機の管理する路車間通信エリア内に存在する車両台数に基づいて決定される。車両台数が少ない場合や、路車間通信期間が短い場合はチャンネルアクセスがあまり集中しないことが予想されるため、 S を小さく設定することが可能である。また、車両台数が多い場合や、路車間通信期間が長い場合はチャンネルアクセスが集中すると予想されるため、 S を大きく設定するべきである。路側機は管理するネットワークエリアの接続端末数を知ることができるため、状況に合わせて適切な S を柔軟に設定できる。

この手法では、車車間通信 packets が生じた時刻によって送信手順が異なる。車車間通信 packets の生じた時刻が拡張後の送信禁止期間内か拡張後の送信禁止期間終了後かによって異なるため以下でそれぞれの場合について解説を加える。

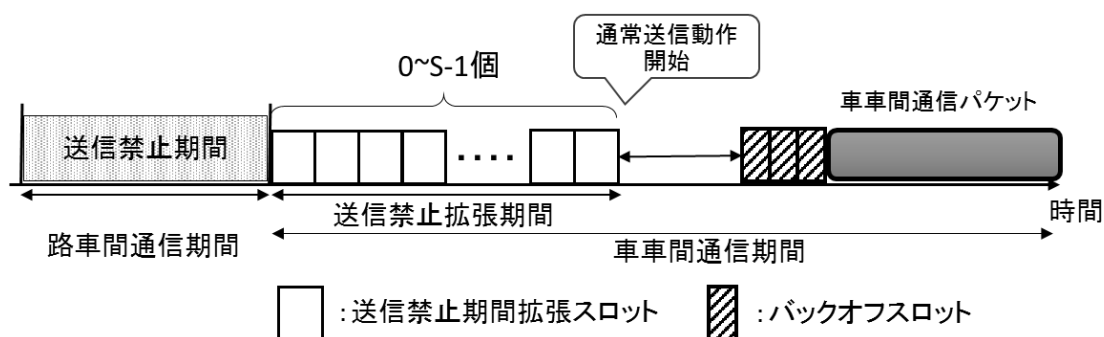


図 10 送信禁止期間拡張手法

ランダムに拡張された期間を含む送信禁止期間内に車車間通信パケットが生起した場合、拡張後の送信禁止期間終了時刻まで送信動作を待機した後、通常のパケット送信動作を開始する。その場合の車車間通信パケット送信手順例について図 11 に示した。割り当てられた拡張スロット数分の送信禁止期間終了まで待機した後、物理的キャリアセンスによって分散スペース時間チャンネルがアイドルであると判断された後、ランダム待ち時間設定し、スロット毎に減算を行う。ランダム待ち時間が 0 になるとパケット送信を開始する。

次に、ランダムに拡張された送信禁止期間終了後に車車間通信パケットが生起した場合、即座に通常の送信動作を開始する。その場合の車車間通信パケット送信手順例について図 12 に示した。車車間通信パケットは生起直後から ARIB STD-T109 の送信手順に従って送信される。

この方式はグループ間時分割共用方式に比べ ARIB STD-T109 から簡単に拡張することができる。また路車間通信によって送信禁止期間拡張スロットの最大値 S を受け取りさえすれば、車両が自律的に送信禁止期間の拡張を行え、チャンネルアクセスを分散することができる。これらの点から、実システムへの適用が比較的容易であると考えられる。

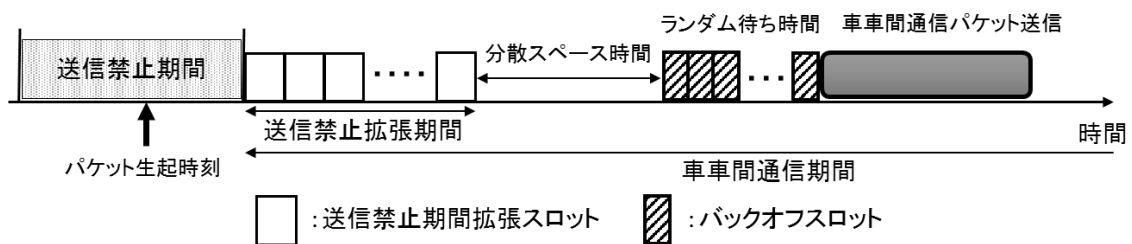


図 11 送信禁止期間内に生起した場合

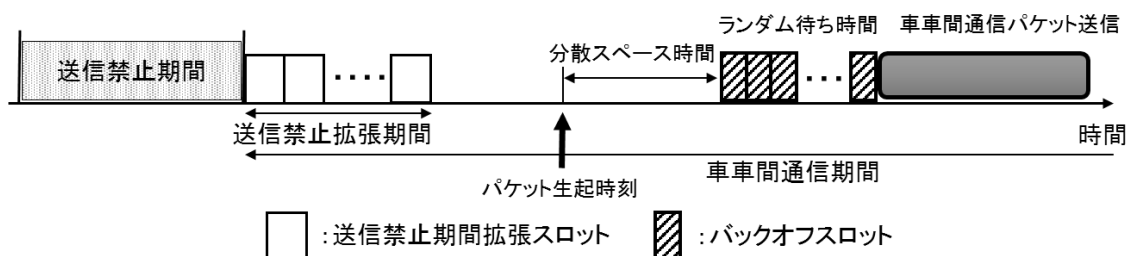


図 12 送信禁止期間外に生起した場合

3.4 従来の送信禁止期間拡張方式の問題点

送信禁止期間拡張方式の適用により車車間通信期間開始直後のチャネルアクセス集中は解消されるが、車車間通信性能において問題が大きく2つ発生する。まず、伝送遅延時間が非常に長くなるパケットが発生すること、および車車間通信期間の後方においてチャネルアクセスが集中することでパケット衝突、廃棄が発生することである。

1つ目の問題の発生原因は、路車間通信期間終了時刻からランダムに送信動作が延期され、各パケットは生起時刻からパケット送信が完了する時刻までの伝送遅延時間に大きく差異が生じるからである。具体的には路車間通信期間先頭もしくはそれ以前に生起した車車間通信パケットが送信禁止期間拡張スロットの最大 S が与えられた場合に伝送遅延時間が非常に長い場合となる。

2つ目の問題の発生原因は、車車間通信パケットの生起時刻が車車間通信期間後方になればなるほど、送信禁止期間拡張対象となりにくくなるからである。送信禁止期間拡張スロットは一様乱数で与えられるので、仮に車車間通信パケットが路車間通信期間内にのみ生起する場合は車車間通信期間内で一様にチャネルアクセスが試みられる。しかし実際の車車間通信パケット生起時刻はフレーム内に一様であるため、フレームの後方において送信動作を開始するパケットが増加する。その結果車車間通信期間先頭におけるチャネルアクセス集中は軽減されるが、新たに車車間通信期間後方でチャネルアクセス集中が発生し、パケット衝突が発生している。また、CSMA/CA 動作により送信が更に延期され、生起時刻から 100[ms]経過し廃棄される車車間通信パケットも発生する。

また ARIB STD-T109 におけるフレーム構造では 1 フレーム内に最大 16 の路車間通信期間が設定できるため、車車間通信期間内に送信できず、路車間通信期間に持ち越してきた車車間通信パケットが車車間通信期間開始直後にチャネルアクセスが集中する問題に対してこの手法では検討されていない。以上のように送信禁止期間拡張方式には問題点が多く存在する。そのため、本研究における比較対象には本方式を改良した送信禁止期間拡張方式について検討する。

送信禁止期間拡張方式では、送信禁止期間拡張対象を全車車間通信パケットの生起時としていたが、改良した送信禁止期間拡張方式では、車車間通信期間開始時に車車間通信パケットを保持している車両のみを送信禁止期間拡張対象とする。その結果、車車間通信期間後方にチャネルアクセス集中が発生する問題と 1 フレーム内に複数路車間通信期間が設定される場合についても対処することができる。また、送信禁止期間拡張スロット数は路車間通信期間持ち越し度に更新するものとし、最大 $S \times$ スロット時間は車車間通信期間長と等しいものとする。

しかし、改良した送信禁止期間拡張方式において次のような問題が発生する。路車間通信期間を迎える毎にランダムな送信禁止期間の拡張を行うが、送信禁止期間拡張スロット数に連続して大きい乱数が割り振られた場合に伝送遅延時間が長くなってしまふ。

また車車間通信パケットの生起時刻が路車間通信期間内である車両については、生起と共にランダムに遅延が加えられるため、同一車両からの車車間通信パケット送信ごとに伝送遅延時間の差異が大きくなり発生する。これらの問題はどちらも伝送遅延時間に関する問題であり、車車間通信における伝送遅延時間の増大は、例えば受信した車両情報が示す車両位置と実際の車両位置が大きく異なることにつながり、安全運転支援や自動運転のサービス性に多大な影響を及ぼす。またパケット間での伝送遅延時間の差異はパケット毎に車両位置精度が異なることを意味し、この状況もサービス性能上大きな問題となる。

以降本論文における従来方式と記載するものは改良した送信禁止期間拡張方式を指すものとする。

第4章 チャネルアクセス開始タイミング制御方式

第4章では、従来手法における問題の改善を目的として、チャネルアクセス開始タイミング制御方式を提案する。4.1節では、提案手法における着眼点とチャネルアクセス集中の要因について、4.2節では提案手法の制御方式について詳細に記述する。4.2.1項に車車間通信パケット生起時を対象とした生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御を、4.2.2項に路車間通信期間開始時にパケットを保持している車両を対象としたサブフレーム越え車車間通信パケットのランダム遅延制御について記述する。

4.1 チャネルアクセス集中の要因

従来方式では、路車間通信期間終了直後に発生するチャネルアクセス集中に対しランダム分散化によりパケット衝突の軽減を達成しているが、3.4節に記載した問題が生じる結果となった。

本研究では、車車間通信期間開始直後に発生するチャネルアクセス集中の要因を以下の二つに分類する。

- 送信禁止期間内に生じた車車間通信パケットの集中
路車間通信期間内に生じた車車間通信パケットは路車間通信期間終了まで待機した後にチャネルアクセスを試みるため。
- サブフレーム越え車車間通信パケットの集中
前车車間通信期間内にすでに車両が保持していた車車間通信パケットが送信されずに次サブフレームの路車間通信期間へ持ち越され、路車間通信期間終了まで待機した後にチャネルアクセスを試みるため(サブフレーム越えチャネルアクセス)。
本論文では、これら二種のチャネルアクセス集中の要因に対しそれぞれ以下に示すチャネルアクセス開始時刻設定手法を提案する。
- 生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御
一つ目の要因に対する対応策で、パケット生起時に同一車両内では固定長かつ車両間では異なる長さの延期を車車間通信パケットの生起時刻に基づいて加える。
- サブフレーム越えランダム送信延期制御
二つ目の要因に対する対応策で、サブフレーム越え車車間通信パケットを対象に車車間通信期間開始時刻から車両毎にランダムな遅延を与える。

これら二つの制御を合わせたチャネルアクセス開始タイミング制御方式の提案により、

チャンネルアクセス集中の分散化と伝送遅延特性の改善を狙う。

4.2 チャンネルアクセス開始タイミング制御

4.2.1 生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御

本制御では、同一サブフレームの路車間通信期間内に生起した車車間通信パケットによるチャンネルアクセス集中の緩和、パケット毎の伝送遅延時間の短縮と同一車両内での伝送遅延時間の差異の縮小を目的としている。

全車車間通信パケットを対象にチャンネルアクセス開始時刻がパケット生起時刻順かつ車車間通信期間内に一様に配置するために、本制御によるチャンネルアクセス開始時刻を車両毎で独自となる生起時刻に基づいて決定する。これにより同一車両におけるパケット間の送信延期時間長を固定長にすることが可能であり、チャンネルアクセス順序をパケット生起順とすることで、車両間の延期時間とその差異が最大でも路車間通信期間長に抑えることができる。本制御は各車両から生起する車車間通信パケットの生起時刻のランダム性を維持し、チャンネルアクセス開始時刻を車車間通信期間内に圧縮する。その概要を図 13 に示す。

図 14 に具体的なチャンネルアクセス開始時刻設定手法を示す。車車間通信パケットの生起時に、そのパケットのチャンネルアクセス開始時刻 t_C が生起時刻 t_g を基準に式(4-1)で設定する。

$$t_C = L_{V2V} \cdot R_g + t_{V2V} \quad (4-1)$$

ここで、 L_{V2V} は当該サブフレームでの車車間通信期間長、 t_{V2V} は車車間通信期間開始時刻を示している。 R_g はサブフレーム開始時刻 t_{SF} を起点にした当該パケット生起時刻 t_g のサブフレーム長 L_{SF} に対する時間割合を示しており式(4-2)で与えられる。

$$R_g = \frac{t_g - t_{SF}}{L_{SF}} \quad (4-2)$$

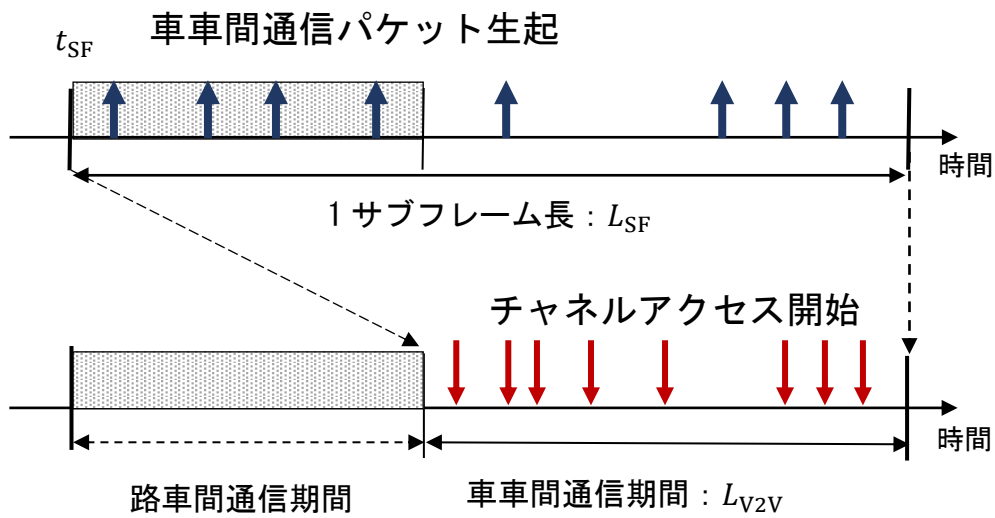


図 13 生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御概要図

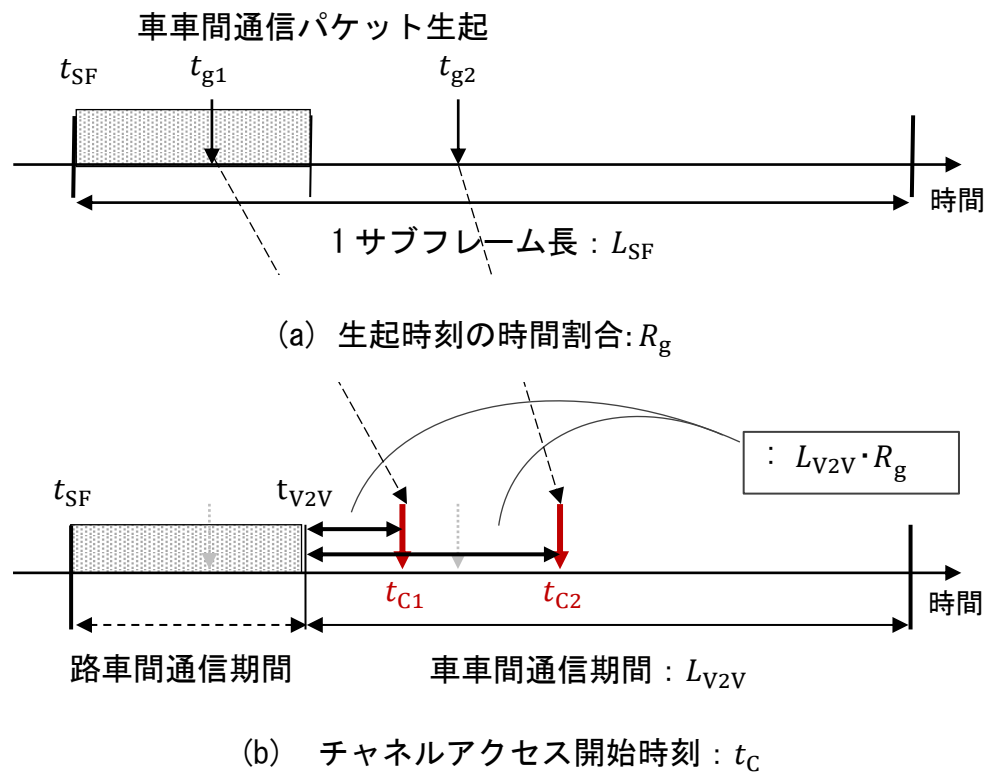


図 14 生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御

4.2.2 サブフレーム越え車車間通信パケットのランダム遅延制御

前項の制御手法において、生起時刻が一様分布に従うならばチャネルアクセス集中は発生しないが、4.1 節に述べた 2 つ目の要因（サブフレーム越え車車間通信パケット）によるチャネルアクセス集中に対しては効果がない。

本制御では、車車間通信パケットを保持している車両が前サブフレームの車車間通信期間内にパケットが送信開始されず、当該サブフレームの路車間通信期間に持ち越した場合を対象にランダムな遅延を与えることで次の車車間通信期間開始時にチャネルアクセスが集中しないようにする。

図 15 に示すようにサブフレーム越えパケットを対象に車車間通信期間先頭から設定される延長範囲内でランダムに次チャネルアクセス開始時刻を設定する。その設定手法を以下に記す。式(4-3)に示されるように、車車間通信パケットの次チャネルアクセス開始時刻 t_c は車車間通信期間開始時刻から $[0, D_{\max}]$ の範囲で与えられる ARIB STD-T109 における制御単位時間 $16[\mu\text{s}]$ 単位のランダムな遅延時間を加えた時刻となる。ここで、ランダム遅延の最大時間 D_{\max} は式(4-4)により車車間通信期間長 L_{V2V} と最大延長期間割合 R_d の乗算によって決定される。

$$t_c = t_{V2V} + \text{rand}(0, D_{\max}) \quad (4-3)$$

$$D_{\max} = L_{V2V} \cdot R_d \quad (4-4)$$

ここで、関数 $\text{rand}(x,y)$ は x から y の範囲内でランダムに与えられる整数値を返す関数を示す。

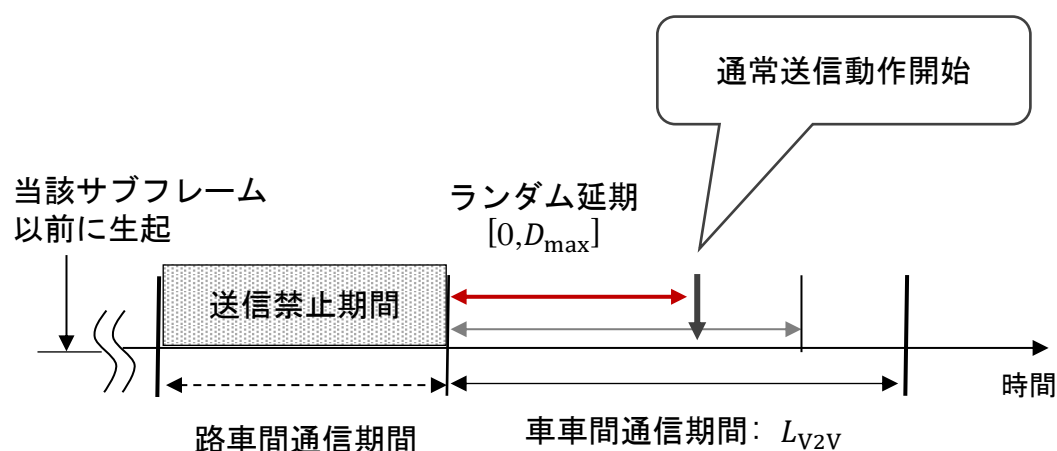


図 15 サブフレーム越え車車間通信パケットランダム遅延制御

第5章 特性評価モデル

提案法の特性評価を，計算機シミュレーションを用いて行う．本章では，5.1 節に本研究のシミュレーション評価で用いたネットワークトポロジーモデルを，5.2 節にトラヒックモデルを，5.3 節に伝搬モデルを記述する．

5.1 ネットワークモデル

ネットワーク接続車両台数は N_V 台とし，車車間通信は車両1台から周囲の車両へのブロードキャスト通信とする．評価環境は図16に示すような十字路交差点を含む道路 $1\text{km} \times 1\text{km}$ として，道路上に車両位置が一様分布し，評価対象受信専用端末を1台ランダムに配置し，その他の車両を送信車両とする．

本研究において，車車間通信期間先頭におけるチャンネルアクセス集中の緩和効果と車車間通信伝送遅延特性を評価することが目的であるため，車両の移動は考慮せず全ての車両が停止しているもので評価した．

また伝搬路は理想的であり伝搬減衰がなく，隠れ端末も存在しない条件を用いた．同時送信によるパケット衝突以外での伝送誤りは発生しないものとした．

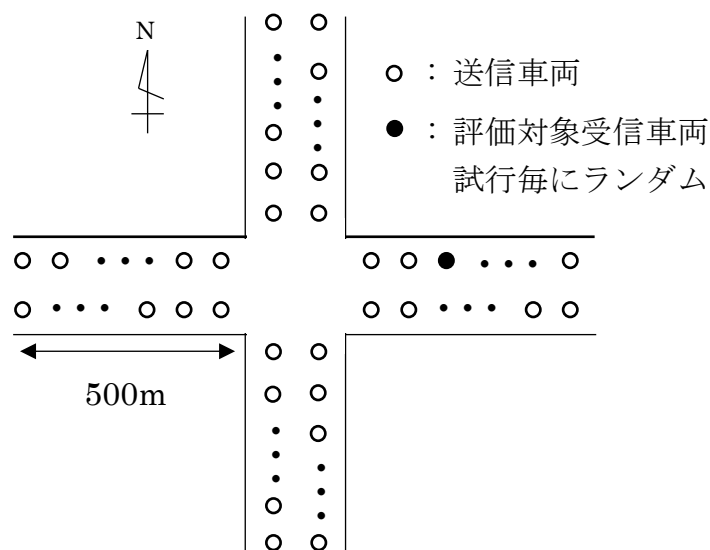


図16 トポロジーモデル

5.2 トラヒックモデル

全送信車両での車車間通信パケット生起時刻は1フレーム(100[ms])内に一様分布し、同一車両内ではパケット生起間隔がフレーム長と等しい固定長である。ただし、車車間通信パケット生起時に前生起パケットが送信されず保持していた場合はそのパケットを廃棄する。

5.3 フレーム構造

フレーム構造は2章図5に示した ARIB STD-T109 におけるフレーム構造に準拠するものとし、1フレーム長 100[ms]、1フレームは16サブフレームに分割され、各サブフレーム先頭を路車間通信期間とし、1サブフレーム中の路車間通信期間長 L_{R2V} と路車間通信期間を設定するサブフレーム数 N_{R2V} を変化させた。

第6章 計算機シミュレーションによる特性評価

6.1 評価条件

6.1.1 シミュレーション諸元

物理層及び MAC 副層パラメータは ARIB STD-T109[7], IEEE802.11 標準規格[19]及び ITS FORUM RC-006 1.0 版[22]に準拠するものとし, 主なシミュレーション諸元を表 2 に示す. 計算機シミュレーションを最大延長期間割合 R_d と接続車両台数 N_V の 2 つのパラメータを変化させて評価を行う.

表 1: シミュレーション諸元

| | | |
|--------------|-----------|------------------|
| 使用周波数帯 | | 700 [MHz] |
| 車両台数 | N_V | 20~180 [台] |
| 伝送レート | | 6 [Mbps] |
| パケット長 | | 0.264 [ms] |
| 路車間通信期間長 | L_{R2V} | 0.192~3.024 [ms] |
| 路車間通信期間数 | N_{R2V} | 4~16 |
| 最大延長期間割合 | R_d | 0~1.0 |
| 最大バックオフスロット数 | | 63 |
| 評価パケット数 | | 1000000 [pkt] |

6.1.2 評価項目

評価項目は車車間通信におけるネットワーク全体の平均パケット受信成功率 P_s 、平均パケット伝送遅延時間 D_{ave} 、全パケットを対象とした伝送遅延時間の標準偏差 σ_D 、同一車両内における伝送遅延時間の標準偏差の平均 σ_{D_V} である。ここで伝送遅延時間とはネットワーク内の車車間通信パケットが生起してから送信が完了するまでの時間とした。評価項目はそれぞれ式 (6-1)、式 (6-2)、式(6-3)及び式(6-4)で与えられる。

$$P_s = \frac{N_s}{N_o} \quad (6-1)$$

$$D_{ave} = \frac{1}{N_s} \sum_i^{N_s} D_i \quad (6-2)$$

ここで、 N_s は送信パケットのうち衝突せず受信車両において受信成功した車車間通信パケット数、 N_o はネットワーク内の車両で生起した全車車間通信パケット数である。

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_i^{N_s} (D_i - D_{ave})^2} \quad (6-3)$$

ここで、 D_i は各送信成功パケットでの伝送遅延時間である。

$$\sigma_{D_V} = \frac{1}{N-1} \sum_t^{N-1} \sqrt{\frac{1}{N_s^t} \sum_k^{N_s^t} (D_k^t - D_{ave}^t)^2} \quad (6-4)$$

同一車両内における伝送遅延時間の標準偏差の平均 σ_{D_V} は送信車両の台数 $N-1$ 台の平均である。車両 $ID:t$ において、 N_s^t 、 D_k^t と D_{ave}^t はそれぞれ車両 $ID:t$ における送信成功パケット数、各送信成功パケットでの伝送遅延時間と平均伝送遅延時間である。

6.2 特性評価

まず初めに, ARIB STD-T109 によって規定される車車間通信期間が最短となる条件での車車間通信性能を評価するために, 全てのサブフレームに路車間通信期間が割り当て ($N_{R2V} = 16$) られ, 1 サブフレームあたりの路車間通信期間長 L_{R2V} を最大の 3.024[ms] とした場合の従来手法と提案手法をそれぞれ用いた車車間通信性能及び ARIB STD-T109 での車車間通信性能について計算機シミュレーションを行った.

6.2.1 項では提案手法における生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御のみを適用した場合の車車間通信性能についての評価した. 次に 6.2.2 項では提案手法におけるサブフレーム越え車車間通信パケットランダム遅延制御を適用した場合の車車間通信性能について評価した. さらにサブフレーム越えランダム遅延制御における最大延長期間割合 R_d の最適値について検討を行った.

6.2.3 項では最大延長期間割合 R_d の最適値に影響するパラメータについて検討するため, 路車間通信期間数と路車間通信期間長を変化させた場合の提案手法適用時の車車間通信性能について評価を行った.

すべてのシミュレーション評価において比較対象の従来手法は 3.4 節に示した送信禁止拡張を行う対象パケットを路車間通信期間終了時に車両が保持している車車間通信パケットのみとした送信禁止期間拡張方式である.

6.2.1 生起時刻基準パケット送信開始時刻制御の有効性評価

提案手法における生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御のみ（最大延長期間割合 $R_d = 0.0$ に相当）と従来手法と ARIB STD-T109 について性能比較を行った結果を以下に示した。図 17 に平均伝送遅延時間 D_{ave} ，図 18 に伝送遅延時間の標準偏差 σ_D ，図 19 に伝送遅延時間の同一車両内での標準偏差の平均値 σ_{D_V} ，図 20 に平均パケット受信成功率 P_s を示した。結果から提案手法の生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御の有効性について論ずる。

提案手法における生起時刻基準パケット送信開始時刻制御のみを用いた場合（ $R_d = 0.0$ に相当），図 17 から平均伝送遅延時間は提案手法を用いることで従来手法よりも大きく改善していることが分かる。しかし図 20 から従来手法と比較した場合に平均パケット受信成功率について提案手法による性能は劣化していることが分かる。これらの理由について以下に示した。

平均受信成功率特性の劣化については，提案手法がサブフレーム越え車車間通信パケットによるチャネルアクセス集中によるパケット衝突が軽減できないためである。ARIB STD-T109 に比較するとサブフレーム越えパケットの発生が少ない車両台数が少ない範囲では大きく平均パケット受信成功率が改善されている。これは車車間通信における送信禁止期間内に生起した車車間通信パケットによる車車間通信期間先頭付近で発生するチャネルアクセス集中を分散化出来ているからであると考えられる。しかし，サブフレーム越えパケットは車両台数の増加と共に増加するため，車両台数が多い範囲では改善率が悪い結果となっている。

伝送遅延時間に関する結果について評価する。図 17 において平均伝送遅延時間が従来手法に対し十分短い。提案手法では車車間通信パケット生起時に最大で 1 サブフレームあたりの路車間通信期間長分の延期を加えているため，1 車車間通信パケットあたりの延期が従来手法に比べ十分に小さいからである。また同様の理由により ARIB STD-T109 と比較すると車両台数に関わらず平均伝送遅延時間が増加している。図 18 においても従来法に比べ十分短く，ARIB STD-T109 と同等の標準偏差が現れている。これは提案手法（ $R_d = 0.0$ ）において，すべての車車間通信パケット生起時に生起時刻に基づいて最大で路車間通信期間長分の延期を加えており，延期長にランダム性を与えていないことが理由である。図 18，図 19 において車両台数が少ない場合に ARIB STD-T109 のチャネルアクセス手法よりも同一車両内での伝送遅延時間の差異が小さいことがわかる。これは ARIB STD-T109 では最大で路車間通信期間長の伝送遅延があきらかに発生し，車車間通信期間内に生起した場合には遅延を与えていないことが理由である。車両台数が少ない場合では 1 フレーム当たりの送信車車間通信パケット数が少ないため伝送遅延時間にばらつきが発生し，また車車間通信期間先頭付近においてチャネルアクセ

ス集中が発生し車車間通信パケット送信順序がフレームごとに異なるためばらつきが発生する。しかし提案手法ではすべての車車間通信パケットに対し延期を与えており、どのフレームにおいても同一車両内では固定長の延期を加えることで伝送遅延時間のばらつきを抑制することができている。車車間通信パケットが車車間通信期間先頭付近においてチャンネルアクセス集中を軽減できているからであると考えられる。

提案手法における生起時刻基準パケット送信開始時刻制御のみを用いた場合、従来手法よりも受信成功率特性は劣化する。しかし伝送遅延時間特性においては ARIB STD-T109 と同等にまで改善が得られる。

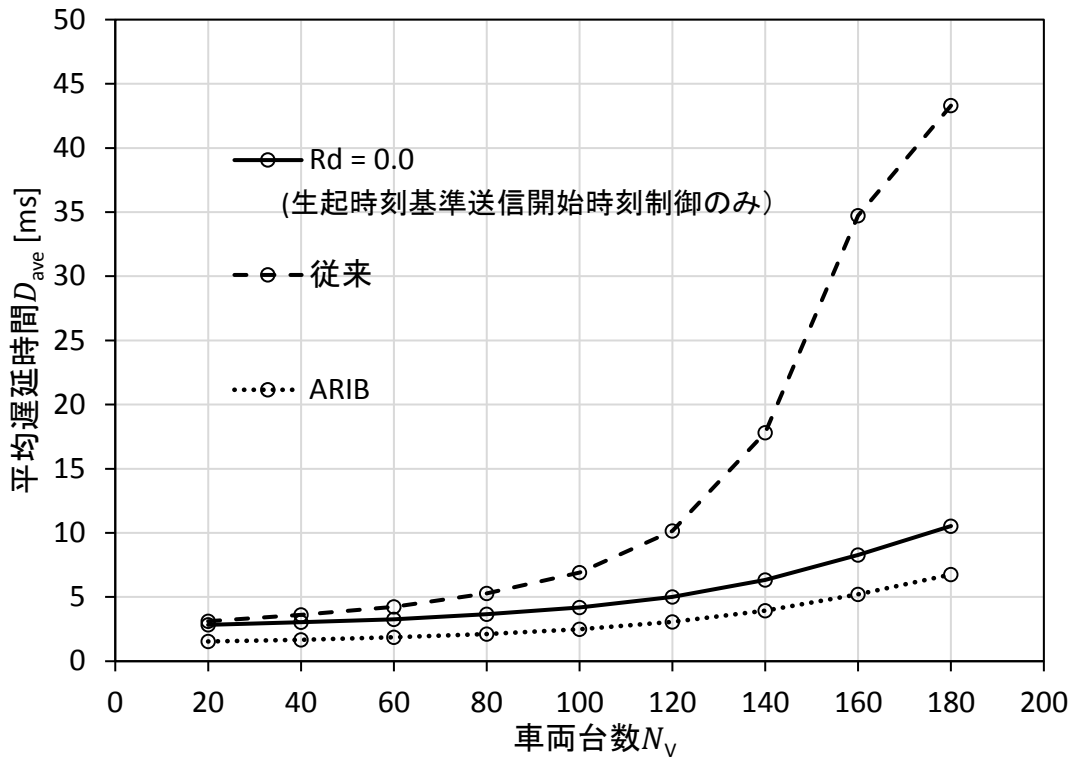


図 17 平均伝送遅延時間特性 ($R_d=0.0$)

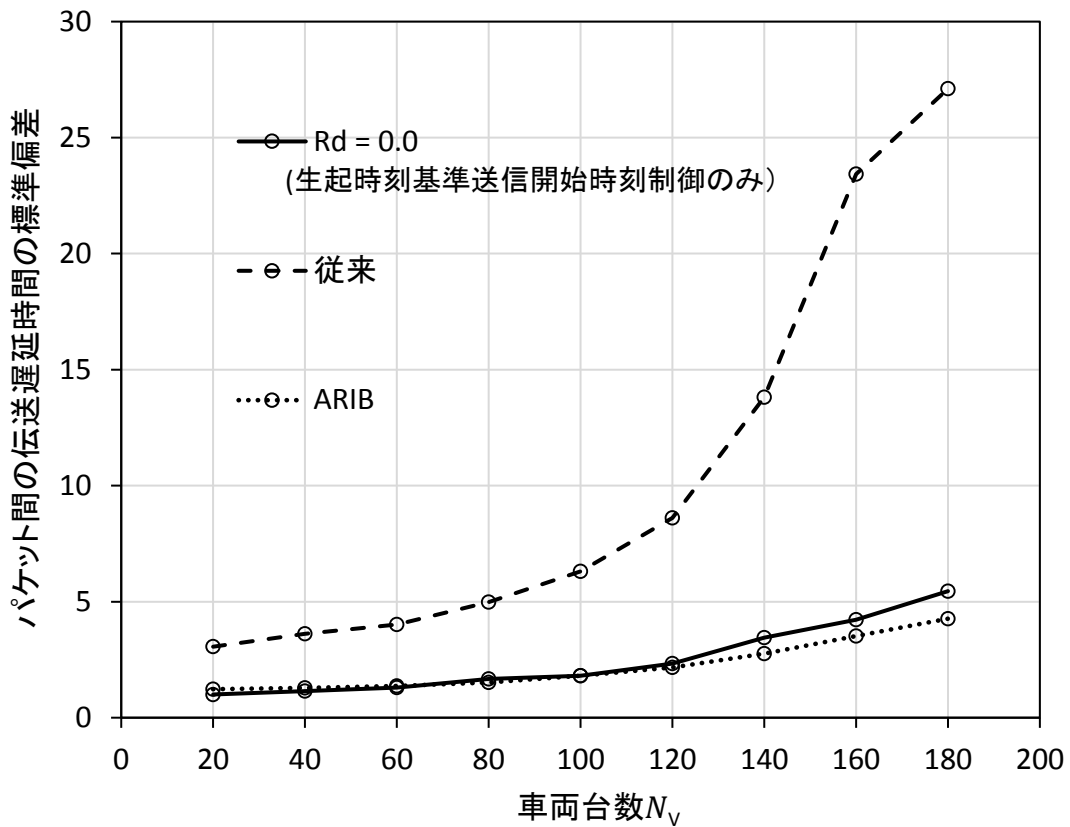


図 18 パケット間の伝送遅延時間の標準偏差 ($R_d=0.0$)

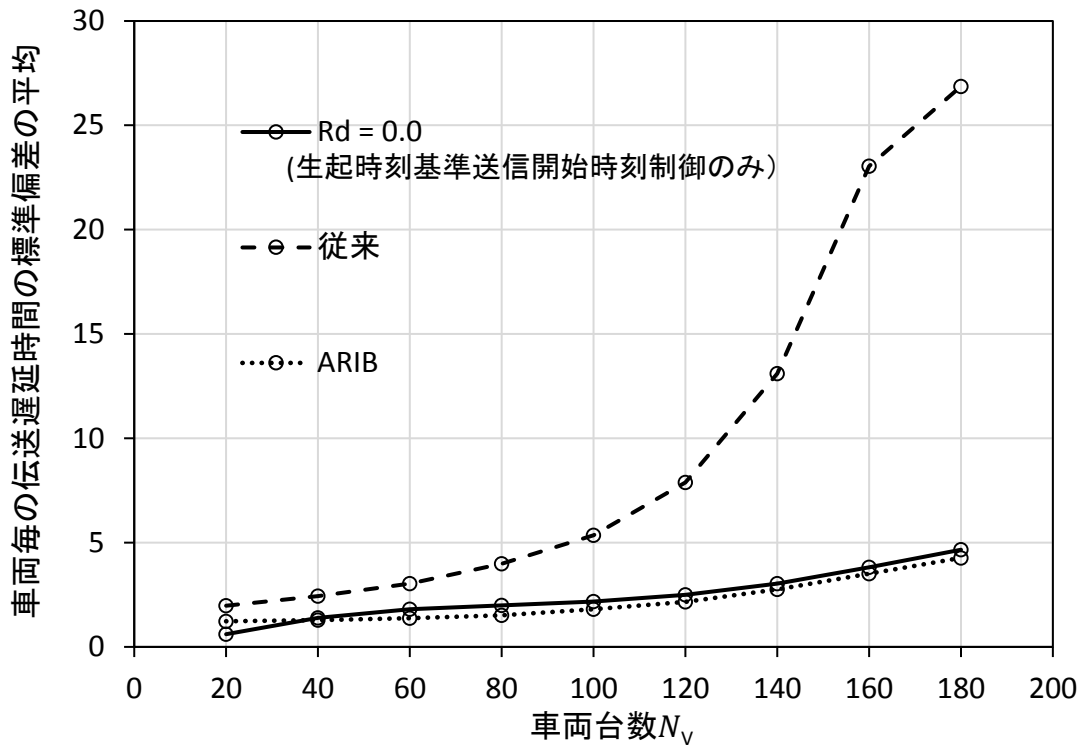


図 19 同一車両における伝送遅延時間の標準偏差 ($R_d=0.0$)

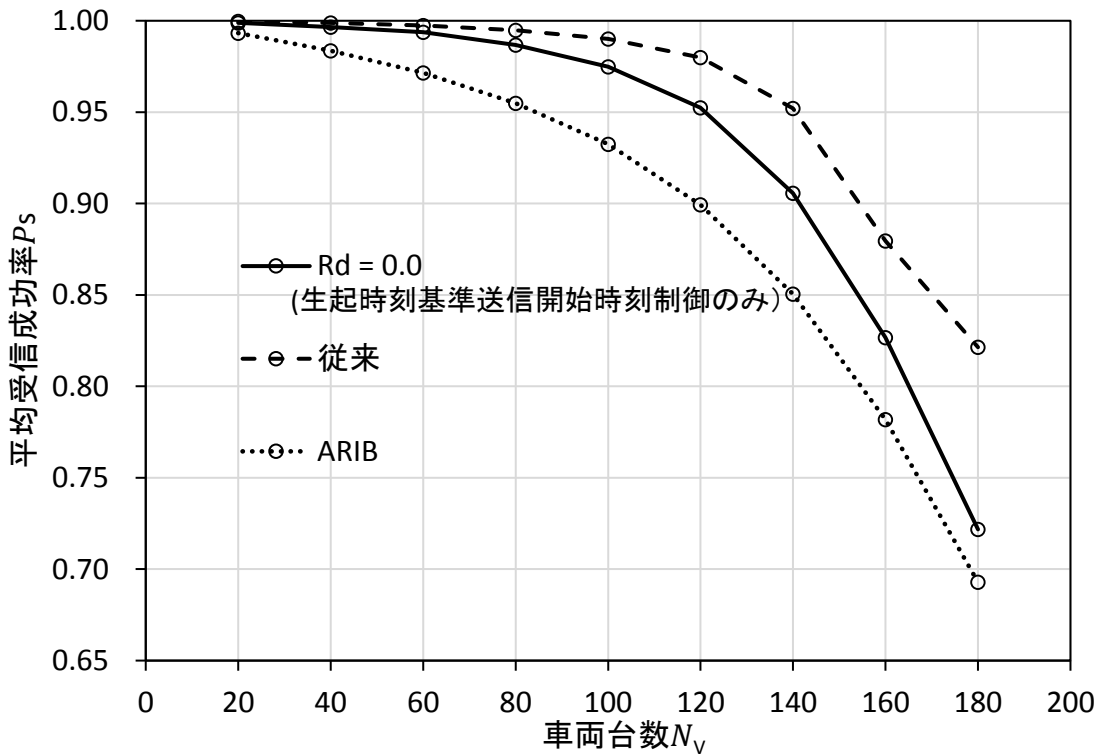


図 20 平均パケット受信成功率特性 ($R_d=0.0$)

6.2.2 サブフレーム越えランダム遅延制御の有効性評価

前項において提案手法における生起時刻基準パケット送信開始時刻制御のみではサブフレーム越え車車間通信パケットによるチャネルアクセス集中によるパケット衝突が軽減できないため、従来手法に比べ平均受信成功率において十分な改善が得られなかった。そこで提案手法におけるサブフレーム越えランダム遅延制御を適用し、最大延長期間割合 R_d を変化させた場合の車車間通信性能について評価した。その評価結果として図 21 に平均パケット受信成功率 P_s 、図 23 に平均伝送遅延時間 D_{ave} 、図 24 に伝送遅延時間の標準偏差 σ_D 、図 25 に伝送遅延時間の同一車両内での標準偏差の平均値 σ_{DV} を示した。さらに提案手法における最大延長期間割合 R_d を変化させた場合の車両台数毎の平均受信成功率特性を図 22 に示す。

提案手法におけるサブフレーム越え車車間通信パケットランダム遅延制御を加えた場合、平均パケット受信成功率は改善することが図 21 から分かる。大きい値の R_d を用いるほど改善するが、しかし図 21 からは 0.05 以上に設定してもさらなる改善はみられず、 $R_d=0.1$ において従来手法と同程度の特性が得られている。これは $R_d=0.05$ においてサブフレーム越えパケット数に対して十分な延期範囲が得られるからであると考えられる。

ここで図 22 からサブフレーム越えパケットを対象としたランダム延期制御における最大延長期間割合 R_d の値が増加するにつれて、平均受信成功率特性は改善する。しかし車両台数に関わらず $R_d=0.05$ で特性は頭打ちとなりそれ以上大きくすると特性は劣化する。これは最大延長期間割合を増加することでサブフレーム越えパケット同士のパケット衝突の発生を軽減できるが、十分な軽減を得られる R_d 以上の値を設定すると余分な遅延を与えてしまう。余分な遅延はさらなるサブフレーム越えにつながる要因であるため、 R_d の値を 0.05 以上に与えた場合にパケット衝突は $R_d=0.05$ の場合に比べ劣化する。これらの結果から車両台数の変化が最適な最大延長期間割合に影響せず、 $R_d=0.05$ が最適値であると言える。

遅延時間については、図 23 から提案手法を用いることで R_d の値に関わらず従来手法に比べ伝送遅延時間について大幅な改善が得られていることがわかる。 R_d の値を大きくすると改善度が縮小するが、その場合でも従来手法から明確な改善がある。 $R_d=0.05$ を用いた場合、約 30%～約 66%程度の改善が得られ車両台数の増加と共に改善率は悪化する。車両台数 100 台辺りから R_d の値に応じて平均伝送遅延時間が増加している。これはサブフレーム越え車車間通信パケット数が増加しており、ランダム遅延制御による延期によるものであると考えられる。ただし、サブフレーム越え車車間通信パケットに対してランダム遅延を与えているため、ARIB STD-T109 に比べると遅延時間は増大する。

サブフレーム越えパケットランダム遅延制御を用いることで従来手法と同等の平均

受信成功率を満たすことができ、かつ平均遅延時間を大幅に短縮することができる。

また図 24 からパケット間における遅延時間の差異と同一車両におけるその差異については十分な改善が得られている。これは提案手法における生起時刻基準車車間通信パケット送信開始時刻制御の効果が大きくでているからであり、提案手法におけるサブフレーム越えランダム遅延制御の最大延長期間割合 R_d を大きくすると、最大ランダム延期長が長くなるため、伝送遅延時間の標準偏差は増加する。しかし、最適値である $R_d=0.05$ では従来手法に比べ十分な改善が得られている。

以上から全てのサブフレームに対し、路車間通信期間が最大の $3.024[\mu\text{s}]$ が設定された場合のブロードキャスト型車車間通信において、提案手法を用いることで従来手法と同等の高い平均受信成功率を維持しながら、伝送遅延時間をより短縮できていることがわかる。

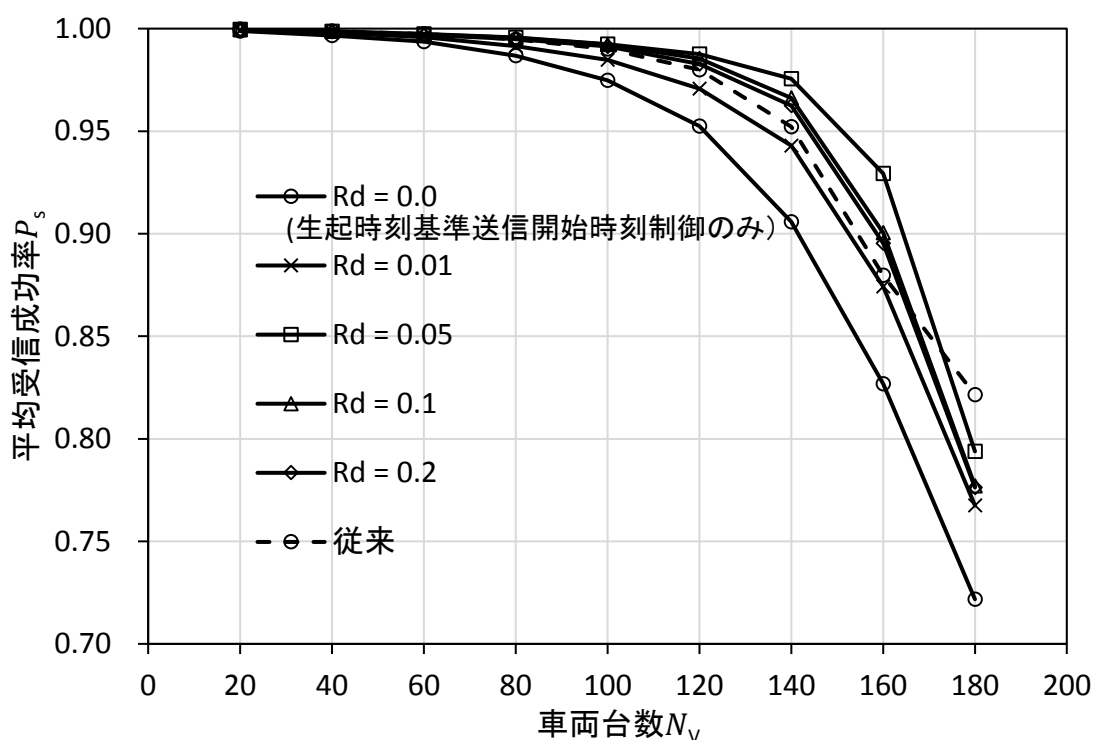


図 21 平均受信成功率特性 (最大延長割合 R_d 変化時)

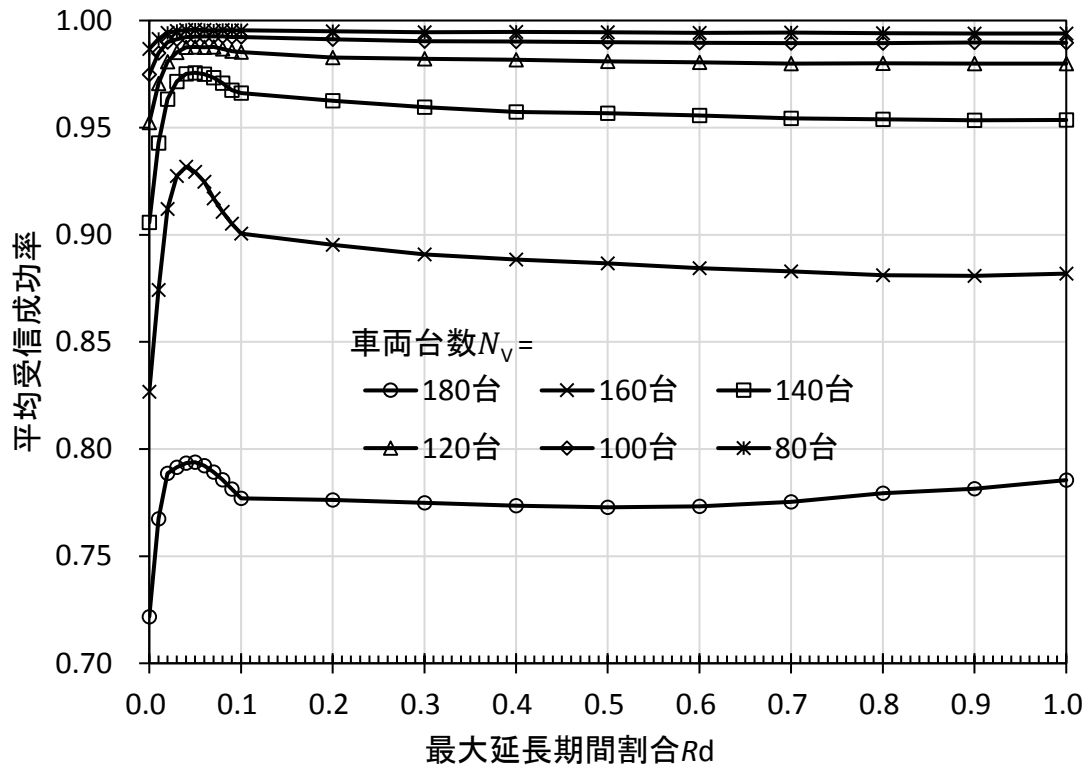


図 22 最大延長期間割合に対する平均受信成功率特性

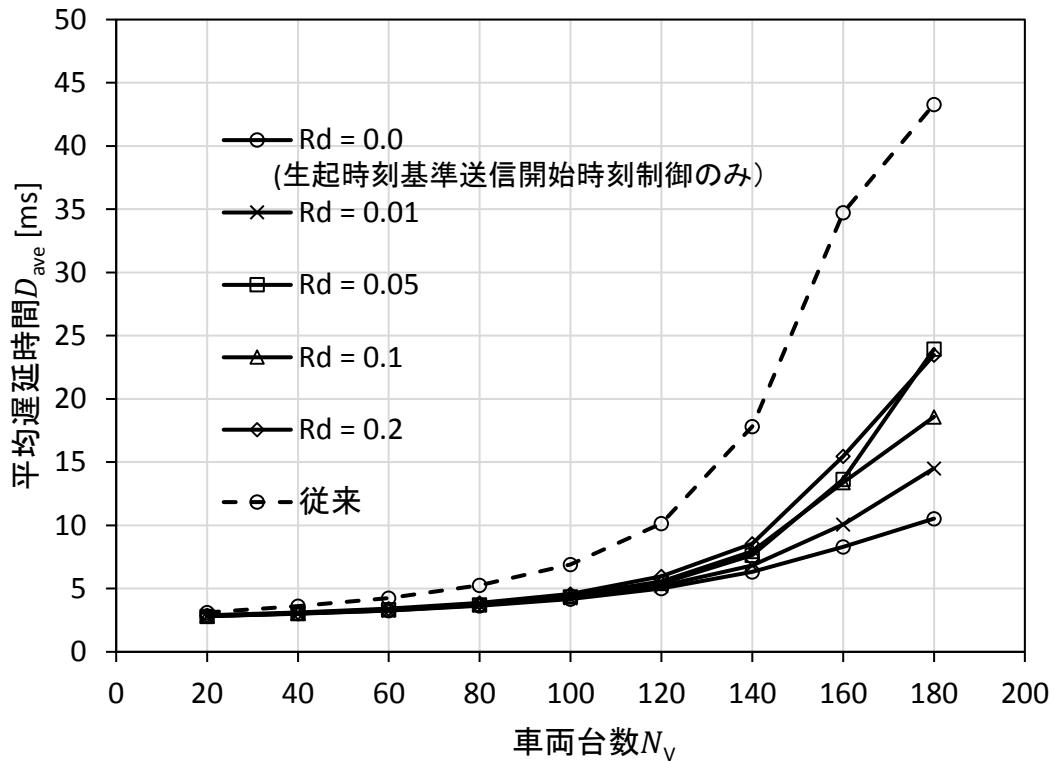


図 23 平均遅延時間特性 (最大延長割合 R_d 変化時)

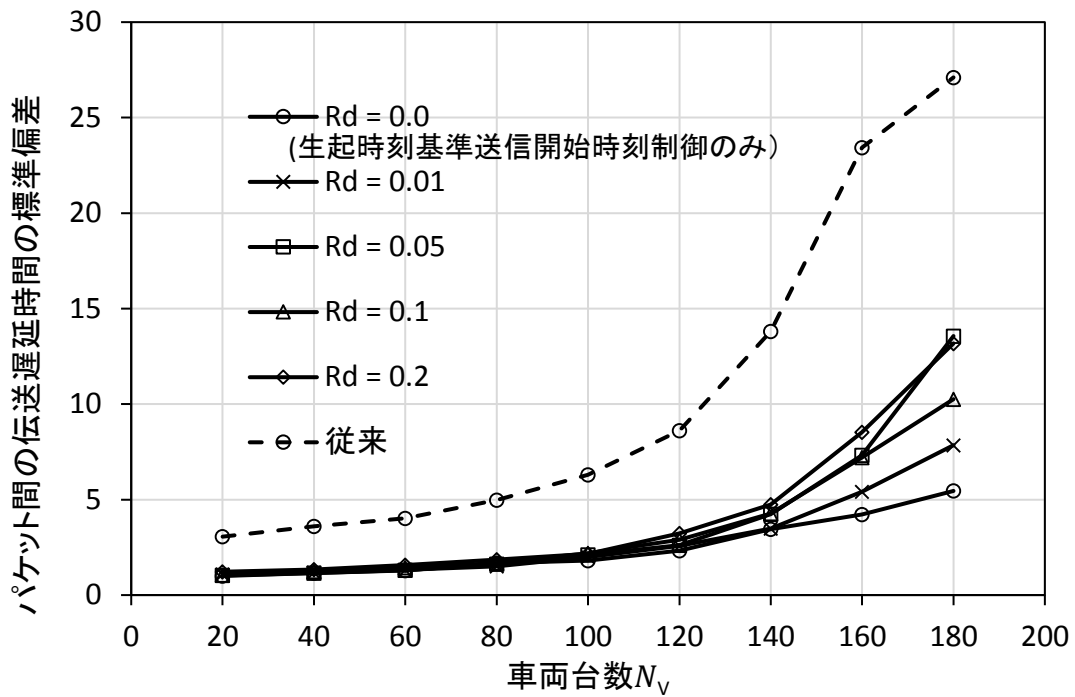


図 24 パケット間の伝送遅延時間の標準偏差 (最大延長割合 R_d 変化時)

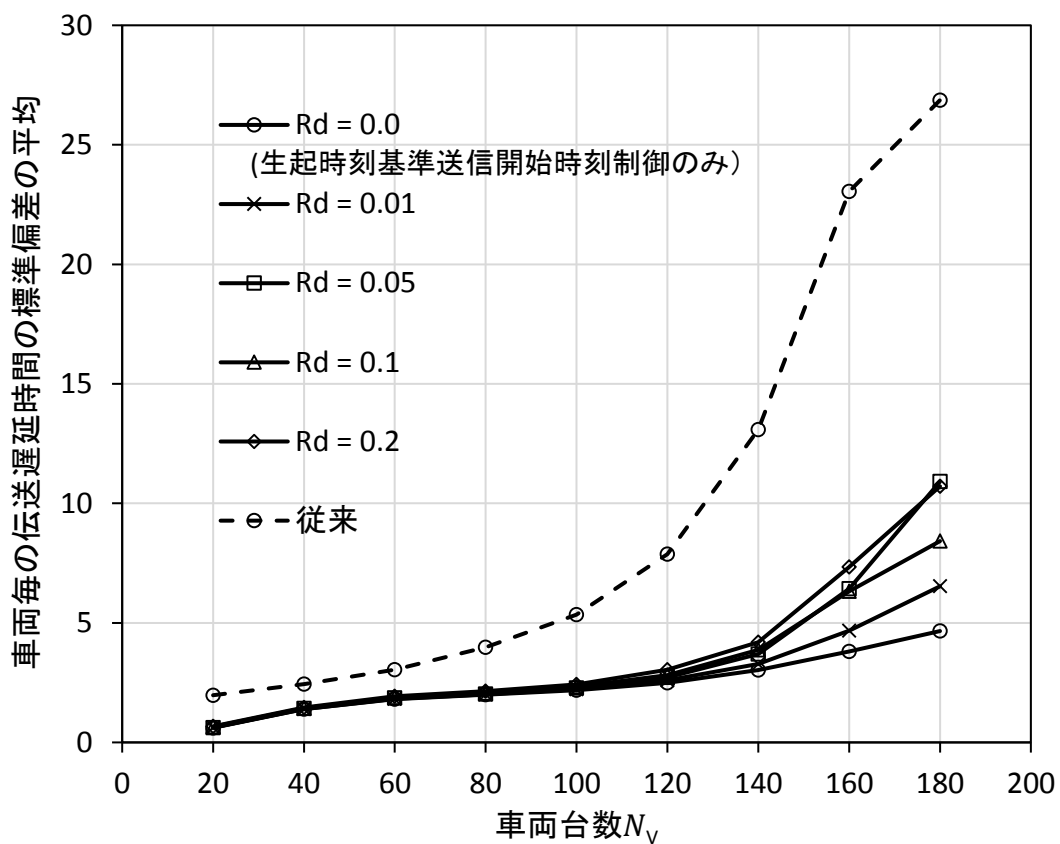


図 25 同一車両における伝送遅延時間の標準偏差 (最大延長割合 R_d 変化時)

6.2.3 フレーム構造変化時の提案手法の性能評価

次に最適な最大延長期間割合に影響するパラメータについて調査を行った。1 サブフレームあたりの路車間通信期間長 L_{R2V} と路車間通信期間設定サブフレーム数 N_{R2V} が変化した場合について性能評価を計算機シミュレーションにより行った。

まず全てのサブフレームに対し路車間通信期間が設定され、1 サブフレームあたりの路車間通信期間長を変化させた場合の結果を以下に示す。図 26 は 1 サブフレームあたりの路車間通信期間長を 1.568[ms], 0.768[ms], 0.192[ms]の 3 通りのフレーム構造における提案手法 ($R_d = 0.05, 0.1$) と従来手法と ARIB STD-T109 の平均受信成功率特性を示している。図 27, 図 28 は車両台数を 160 台に固定した場合の結果を示している。図 29, 図 30 は車車間通信期間長に対する車車間通信パケット生起トラヒックが 0.8 で一定となるように車両台数を設定した時の結果を示している。

図 26 から提案手法では $R_d = 0.1$ の場合に比べ $R_d=0.05$ の場合がどのフレーム構造においても良い結果を示している。1 サブフレームあたりの路車間通信期間長が小さくなればなるほど従来手法と平均受信成功率特性においては性能差が小さくなっている。これは路車間通信期間長すなわち送信禁止期間が短くなることで従来手法や提案手法が適用対象となるパケットが少なくなるからである。

図 27 から同一車両台数の場合路車間通信期間長が短くなるほど最適な最大延長期間割合 R_d も小さい値(路車間通信期間長:0.192 の場合, 最適な最大延長期間割合 R_d は 0.03)となる。これは路車間通信期間長が短い分車車間通信期間長が長く、車車間通信期間に対する車車間通信トラヒックが小さくなるためである。トラヒックが小さいと競合するパケットが存在する可能性が低く、サブフレーム越えとなる可能性も軽減することができる。これらの要因は図 28 から分かるようにトラヒックが小さくなると平均伝送遅延時間の減少に繋がる。

図 29, 図 30 は路車間通信期間長が変化した場合にその変化量に合わせてトラヒックが 0.8 となる車両台数(例: 路車間通信期間長 $L_{R2V} = 3.024$ の時, 車両台数 $N_V=128$.)に設定した場合の結果である。図 29 から同一トラヒックでの平均受信成功率特性はほぼ同じ特性を示しており、最適な最大延長期間割合 R_d も同一であることが分かる。しかし、図 30 は同一トラヒックにも関わらず平均遅延時間に差が生じている。これは路車間通信期間長が短ければサブフレーム越えとなるパケットの割合が低いことが原因として考えられる。

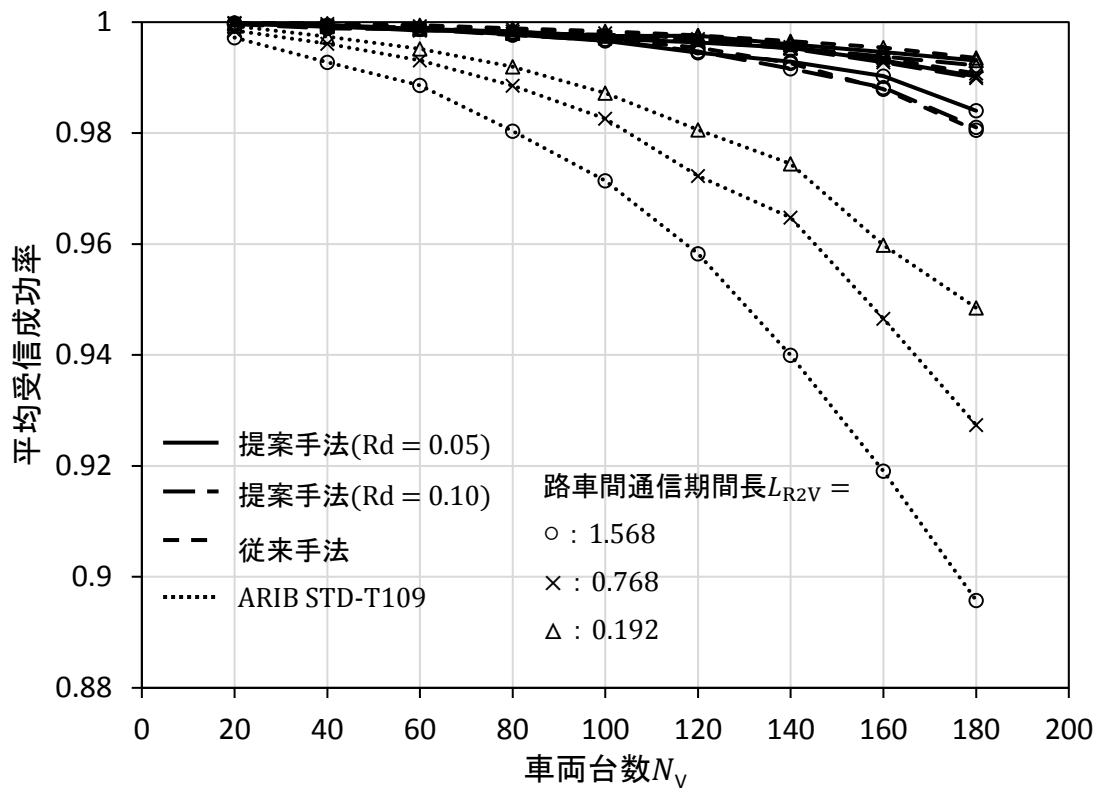


図 26 車両台数変化時の平均受信成功率特性

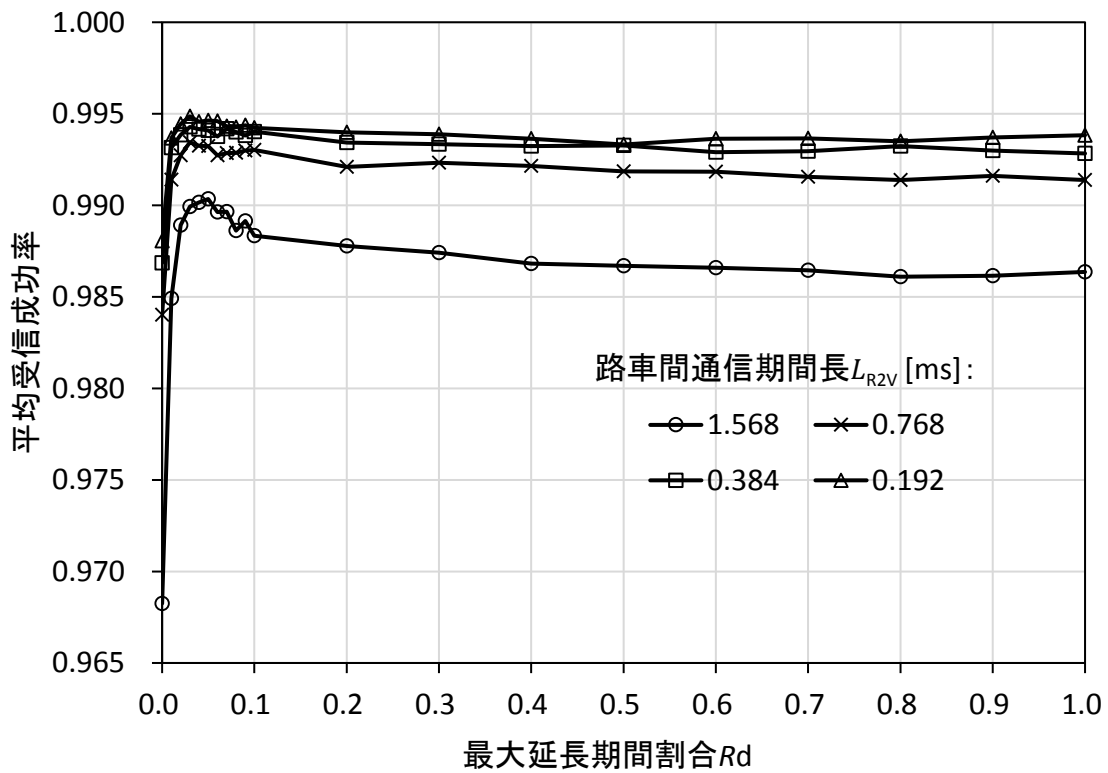


図 27 車両台数 160 台固定時の平均受信成功率特性

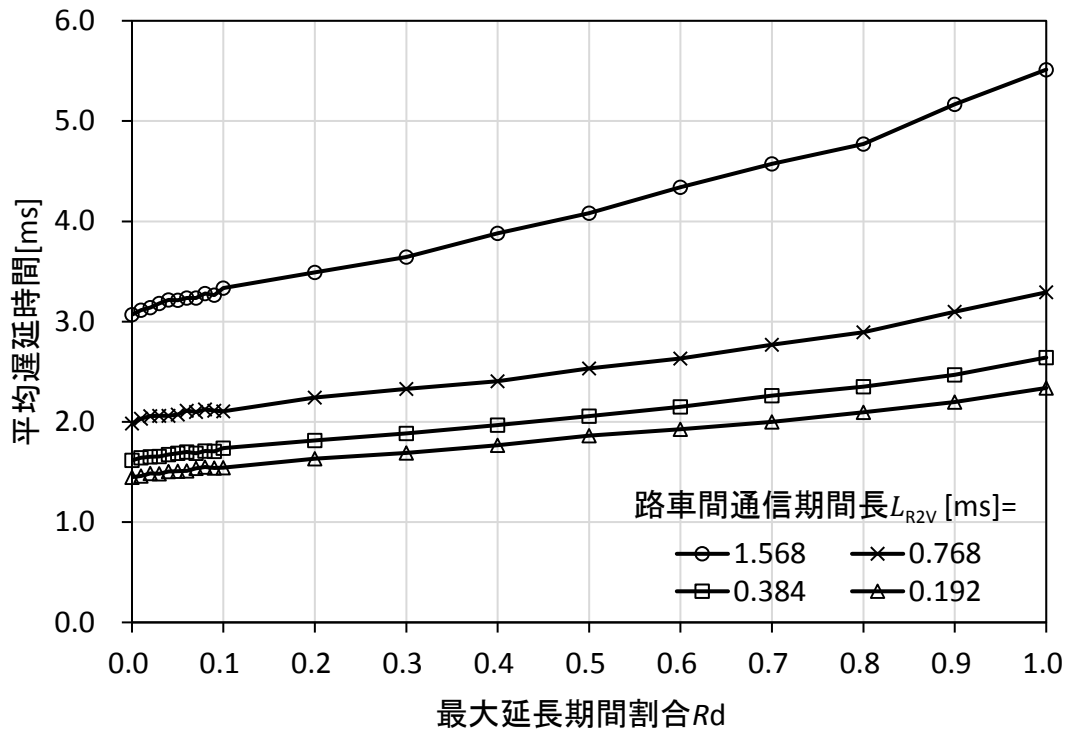


図 28 車両台数 160 台固定時の平均遅延時間特性

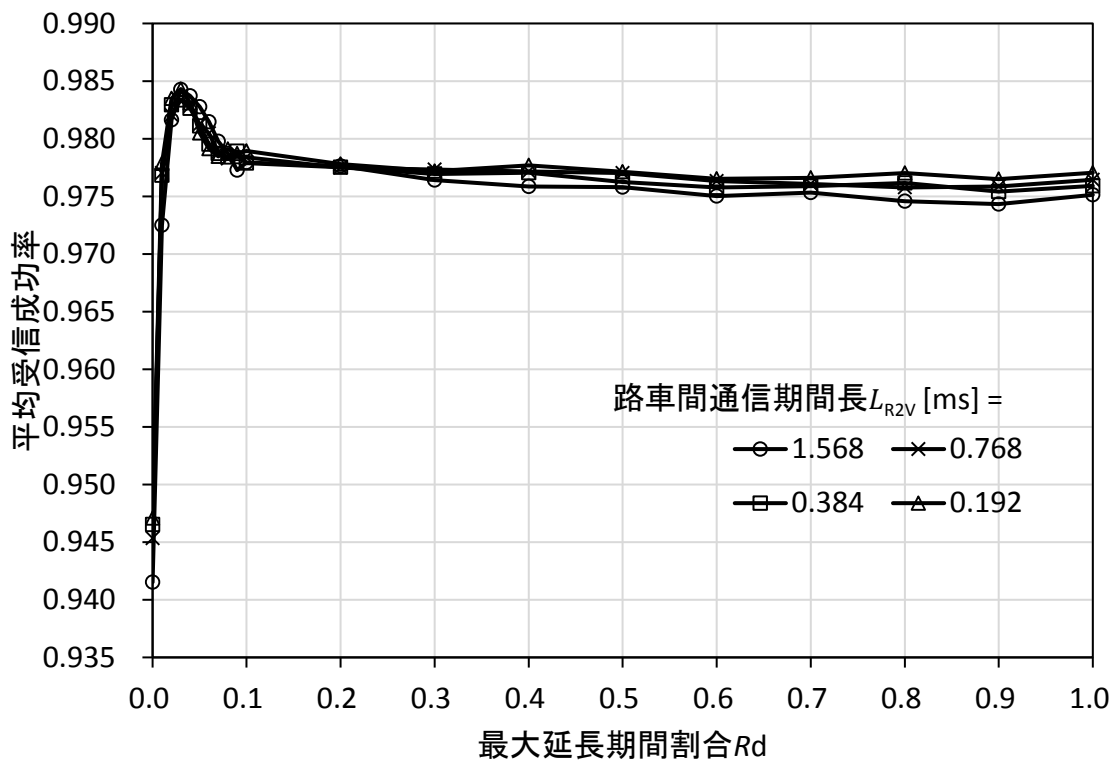


図 29 トラヒック量 0.8 固定時の平均受信成功率特性

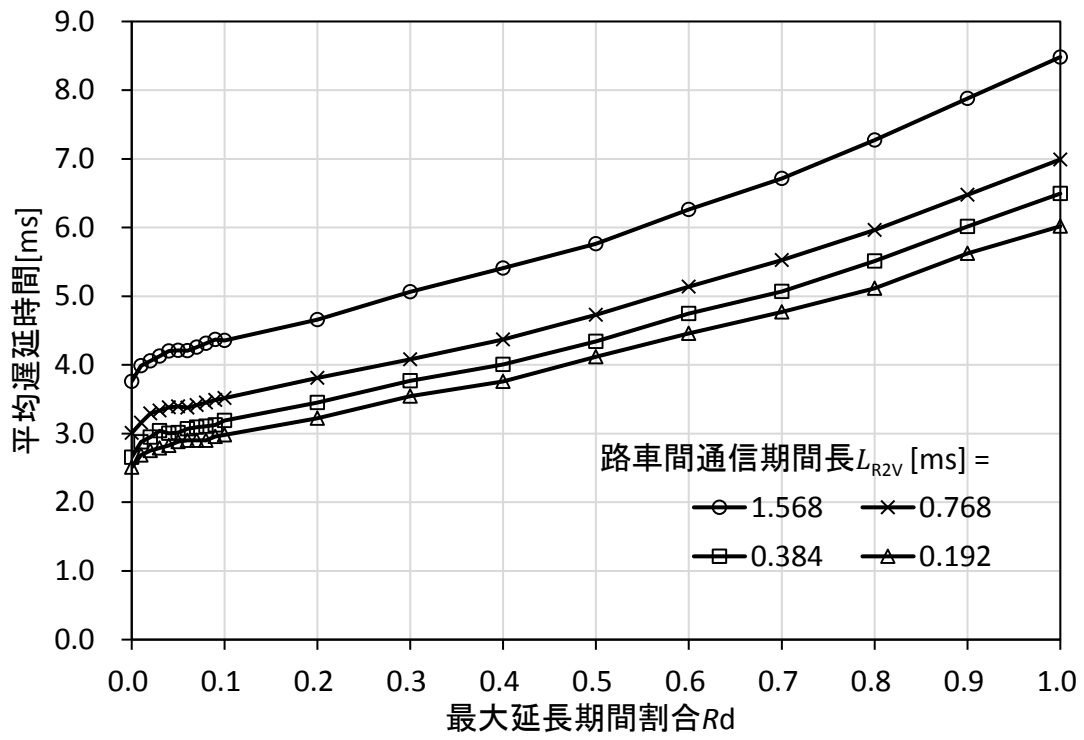


図 30 トラヒック量 0.8 固定時の平均遅延時間特性

さらに路車間通信期間が設定されるサブフレーム数を変化させた場合について同一車両台数で評価を行った。その結果を図 31, 32 に示す。ただし路車間通信期間が設定されるサブフレーム数が増えた場合でも 1 フレームに対する路車間通信期間長は 6144[ms]で一定であるものとした。

図 31 から路車間通信期間数の変化は特性の変化には現れず、1 フレームに対する路車間通信期間長が同一であれば路車間通信期間数は最適な最大延長期間割合に影響を与えないことがわかる。また路車間通信期間数が増えた場合においても車車間通信期間長に対する車両台数が同一であるため、トラヒックも同一である。よって図 32 に示されているように平均遅延時間の特性にも影響を与えない。

以上から最適な最大延長期間割合 R_d は 1 フレームに対する路車間通信期間長と車車間通信期間に対するトラヒックによって決まることが分かった。

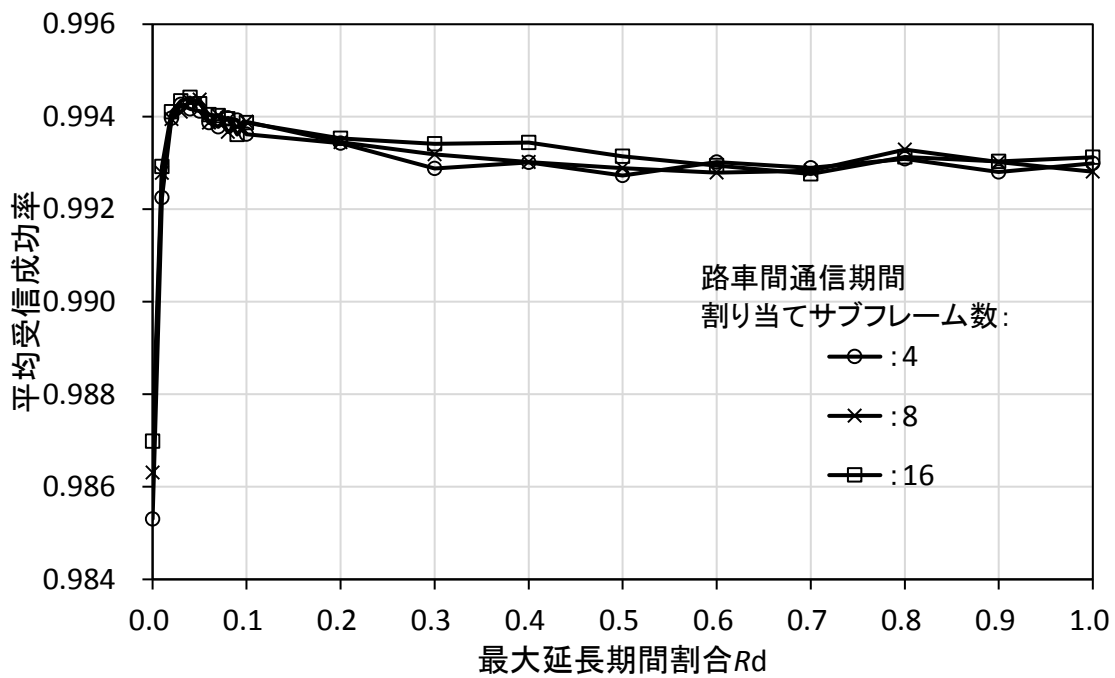


図 31 路車間通信期間数変化時の平均受信成功率特性

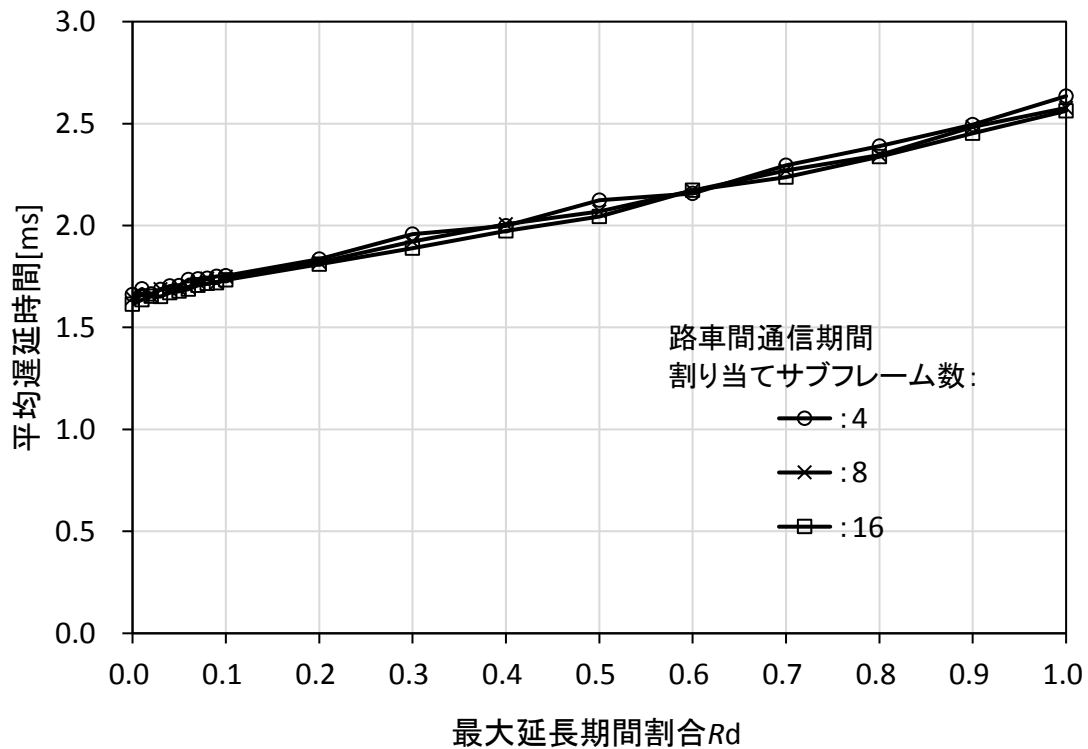


図 32 路車間通信期間数変化時の平均遅延時間特性

第7章 まとめ

路車間・車車間共用通信制御について実用化に向けてより低遅延かつ正確に交通情報や車両情報を伝送する路車間・車車間共用通信の標準規格として電波産業会より ARIBSTD-T109 が規定されている。標準規格において車車間通信期間開始直後に発生するチャンネルアクセス集中によって車車間通信性能が劣化する問題があり、この問題に対して従来研究では送信禁止期間を拡張することによるチャンネルアクセスを分散させる研究がされている。しかし、送信禁止期間の拡張により伝送遅延時間が増加し、さらにランダムに送信禁止期間を拡張するため、各パケットの伝送遅延時間の差異が大きい問題が生じる。

本研究では、各車車間通信パケットにおける遅延時間の差異を抑え、平均遅延時間の短縮を目的とし、上記の問題を解消するために新たなチャンネルアクセス方式を提案した。提案手法は同一車両内では固定長で車両間では異なる長さの延期を車車間通信パケットの生起時刻に基づいて加えるチャンネルアクセス開始時刻設定手法と路車間通信期間開始時に送信待機中である車車間通信パケットを対象としたランダム遅延制御を合わせた新たなチャンネルアクセス方式である。

計算機シミュレーションにより提案手法を用いた車車間通信において従来手法と同等のパケット伝送成功率を維持しつつ、伝送遅延時間の短縮とその差異を抑えることが可能であることを示した。

この結果から提案手法を適用した ITS 路車間・車車間周波数共用通信システムは高度 ITS サービスの実現に貢献できる技術であると言える。今後、車両の移動に対して優先度を付加したチャンネルアクセス方式などの検討を行い、さらなる改善を得ることでより事故の少ない安全な自動車社会の実現に繋がる。

参考文献

- [1] 川嶋 弘尚, "ITS 無線システムの高度化に関する研究会-報告書," 総務省, pp.1-94, 2009年6月.
- [2] 山尾 泰, 小花 貞夫, "ITS 通信技術の動向～自動運転に向けて～," 信学技報, vol.115, no.2, RCS2015-3, pp.13-18, 2015年4月.
- [3] 服部 有里子, 下田 智一, 伊藤 政義, "電気自動車(EV)向け ITS 情報通信システムの開発と評価", 情報処理学会論文誌, Vol.53, no.7, pp.1721-1731, 2012年7月.
- [4] 浜口雅春, "ITS 通信の最新動向～車車間通信を代表とする ITS の現状と展望～", ITU ジャーナル, Vol.43, No.12, pp.3-7, 2013年12月.
- [5] Yuriko Hattori, Tomokazu Shimoda, and Masayoshi Ito, "Development and Evaluation of ITS Information Communication System for Electric Vehicle," Proc. IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC2012-Spring), vol.12, pp.14-23, May 2012.
- [6] 牧戸 知史, "車両単独の ITS からつながる ITS へ: ITS における研究開発の動向," 電子情報通信学会技術研究報告, vol.112, no.148, pp. 13-18, 2012年7月.
- [7] 一般社団法人電波産業会, "700MHz 帯高度道路交通システム ARIB STD-T109 1.2 版," 2013年12月.
- [8] 一般社団法人電波産業会 "広帯域移動アクセスシステム ARIB STD-T71 5.2 版", 2012年7月.
- [9] 栗林 晋平, 作元 雄輔, 長谷川 聡, 大崎 博之, 今瀬 真, "VANET のための遅延耐性を有するブロードキャスト通信方式の特性分析" 信学技報, vol.109, no.37, pp.19-24, 2009年5月.
- [10] 菅原 英紀, 湊 和也, 山尾 泰, "車車・路車共用 ITS 通信システムでのトラヒック集中によるパケット衝突の軽減法", 信学技報, vol.111, no.94, RCS2011-48, pp. 79-84, 2011年6月.

- [11] 丹羽 勇太, 羽多野 裕之, 藤井 雅弘, 渡辺 裕, ”車車間・路車間共用通信制御におけるトラヒック分散手法に関する一検討”, 信学技報, vol.113, no.337, ITS2013-17, pp.1-6, 2013 年 11 月.
- [12] Salvador Gonzalez, Victor Ramos, ”Preset delay broadcast: a protocol for fast information dissemination in vehicular ad hoc networks (VANETs)”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2016, no.117, pp.1-13, April 2016.
- [13] Quincy Tse, Weisheng Si, Javid Taheri, ”Estimating Contention of IEEE 802.11 Broadcasts Based on Inter-Frame Idle Slots”, IEEE 38th Conference LCN Workshops, pp.120-127, Oct 2013.
- [14] Wenjie Hu, Chiu Ngo, ”LMAC: LTE-assisted MAC Protocol to Reduce Delay for Vehicle-to-Vehicle Communications” IEEE International Conference on Communications, pp.3634-3639, June 2015.
- [15] 唐沢 好男, ”ITS 車車間通信の研究開発動向と課題~安全運転を支援する電波カーブミラー~”, 目黒会 CHOFU Network, vol.21, no.2, pp.11-13, 2009 年 11 月
- [16] 小山 敏, ”高度道路交通システム” ITU ジャーナル, Vol.43, No.6, pp.33-35, 2013 年 6 月
- [17] 横森 崇宏, 藤井 雅弘, 羽多野 裕之, 伊藤 篤, 渡辺 裕, ”ARIB STD-T109 に基づいた車車間通信のためのアクセス制御方式の効率化に関する一検討”, 信学技報, vol.115, no.365, ITS2015-12, pp.7-12, 2015 年 12 月.
- [18] 永井 真琴, 樋口 啓介, 中岡 謙, 土居 義晴, ”700MHz 帯歩車間通信方式の検討及びフィールド試験結果”, 信学技報, vol.112, no.202, ITS2012-16, pp.19-24, 2012 年 9 月.
- [19] IEEE standard 802.11, ”Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical layer Specifications” IEEE802-2007.
- [20] ITS 情報通信システム推進会議, ”700MHz 帯を用いた運転支援システムの実験用ガイドライン ITS FORUM RC-006 1.0 版”, 総務省, 2009 年 9 月.
- [21] 片山 正昭 著, ”新インターユニバーシティ 無線通信工学”, 片山 正昭 編, pp.144-145, オーム社, 2009 年.

[22] ITS 情報通信システム推進会議, ”700MHz 帯高度道路交通システム実験用車車間通信メッセージガイドライン ITS FORUM RC-013 1.0 版”, 電波産業会, 2014 年 3 月.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多忙な時間を割いてご指導を賜った森香津夫教授、小林英雄教授、眞田耕輔助教、山本好弘技術員、黒田陽一郎技術員に深く感謝し御礼申し上げます。また、様々な助言を下さいました計算機研究室および通信工学研究室の皆様に深く感謝いたします。

研究業績

- Hideyuki Takao, Kazuo Mori, Kosuke Sanada, Hideo Kobayashi, ” Performance Evaluation of V2V Broadcast Communication on Frequency Sharing V2V/R2V Communication systems” Proceedings of the 6th International Symposium for Sustainability by Engineering at Mie University (Research Area C) (IS²EMU2016-C), pp.7-8, A-4, Sept, 2016.
- 高尾 英行, 森 香津夫, 眞田 耕輔, 小林 英雄, “車車間・路車間共用通信 ITS システムにおける車車間通信性能向上のためのチャンネルアクセス制御方式,”信学技報, ITS2016-65, pp.355-360, 2017 年 2 月