

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研究

横森 崇宏^{1,a)} 藤井 雅弘^{1,b)} 羽多野 裕之^{1,c)} 伊藤 篤^{1,d)} 渡辺 裕^{1,e)}

受付日 2016年4月7日, 採録日 2016年10月4日

概要: 2012年に国内のITS無線通信システムの標準規格であるARIB STD-T109が策定され, 車車間通信のアクセス制御方式としてCSMA/CAが採用された。CSMA/CAでは乱数により定められる待ち時間の間, 他にフレームを送信している移動局が検出されないことを確認してからフレームを送信することで, フレーム衝突を低減させるアクセス制御方式である。しかしながら, この規定のフレーム衝突低減機構を導入することによる回線未使用時間とITS通信での小容量のフレーム伝送のための回線使用時間の比で眺めると, 回線利用効率の改善の余地があると考えられる。そこで, 本論文ではITS通信特有のフレーム生起の周期性に着目し, フレーム送信順序を制御することで回線利用効率を向上させる手法について検討する。提案手法は標準規格に対してわずかな機能を加えることで実現可能で, 提案手法に対応していない移動局が混在する環境でも互換性がある。本論文ではネットワークシミュレーションを用いて, 提案手法に非対応の移動局が混合している環境や移動局の参入・離脱が発生する環境においても, 提案手法の性能がARIB STD-T109に準拠した手法のそれをつねに上回ることを示す。

キーワード: 車車間通信, アクセス制御方式, CSMA/CA, ARIB STD-T109

Improvement of Access Control Method for Inter-Vehicle Communication based on ARIB STD-T109

TAKAHIRO YOKOMORI^{1,a)} MASAHIRO FUJII^{1,b)} HIROYUKI HATANO^{1,c)} ATSUSHI ITO^{1,d)}
YU WATANABE^{1,e)}

Received: April 7, 2016, Accepted: October 4, 2016

Abstract: In 2012, the Association of Radio Industries and Businesses (ARIB) standardized the ARIB STD-T109 for ITS radio communication systems. The ARIB STD-T109 adopts Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) as an access control protocol. The mobile station waits until the channel is judged as idle for the distributed space and the random waiting time in order to avoid collision in CSMA/CA. We focused on the periodic transmission of the ITS frame and proposed a new decentralized access scheme by modifying ARIB STD-T109 for the improvement of efficiency. Since the proposed scheme is compatible with ARIB STD-T109, it is possible to work well in several situations. In this paper, we show that the proposed scheme always outperforms the conventional one even if there are both supported and non-supported stations and the network topology which consists of the stations frequently changes.

Keywords: inter-vehicle communications, media access control scheme, carrier sense multiple access with collision avoidance, ARIB STD-T109

1. はじめに

国内におけるITS(Intelligent Transport Systems)への取り組みは1996年に関係省庁による「高度道路交通システム(ITS)推進に関する全体構想」が策定されたのを契機に本格化し, 今日まで様々な方面において研究開発が行われてきている。現在, ITSによる安全運転支援としては, 車線逸脱警報や自動ブレーキシステムのような車載センサによる自立検知型や, ETC2.0に含まれるITSスポットと

¹ 宇都宮大学大学院工学研究科情報システム科学専攻
Department of Information System Science, Graduate
School of Engineering, Utsunomiya University, Utsunomiya,
Tochigi 321-8585, Japan

a) yokomori@degas.is.utsunomiya-u.ac.jp

b) fujii@is.utsunomiya-u.ac.jp

c) hatano@is.utsunomiya-u.ac.jp

d) at.ito@is.utsunomiya-u.ac.jp

e) yu@is.utsunomiya-u.ac.jp

車両間の通信による路側情報利用型の安全運転支援システムが実用化されており、今後は車車間通信による情報を利用する情報交換型安全運転支援システムの実用化が期待されている [1]. 情報交換型の ITS 向け無線通信システムとして、米国においては 2010 年に IEEE802.11p [2] が策定されており、日本においても ITS 情報通信システム推進会議による実験用ガイドライン ITS FORUM RC-006 [3] を経て、2012 年に電波産業会により ITS 無線通信の標準規格である ARIB STD-T109 [4] が策定された。ARIB STD-T109 では、移動局間の通信である車車間通信と路肩に設置された基地局と移動局間の通信である路車間通信を 760 [MHz] を中心周波数とする 10 [MHz] 帯域の 1 チャネルを時分割によって共用し、100 [ms] の制御周期で運用する方式が採用されている。車車間通信においては移動局の位置や速度といった情報を周囲の移動局にブロードキャストすることで、路車間通信においては基地局から渋滞や交通規制といった情報を移動局へとブロードキャストすることで、運転者に対して安全運転支援を行い、交通事故低減に資することが期待されている [5].

ARIB STD-T109 では IEEE 802.11 [6] を準拠文書として参照しており、車車間通信におけるアクセス制御方式として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) とランダム待ち時間を採用している。CSMA/CA ではキャリアセンス機能によって他局のフレーム送信が検出されないことを確認してからフレームを送信することでフレーム衝突を低減させるアクセス制御方式であり、ネットワークへの参入および離脱が容易で高品質な通信が可能であるとされている。しかしながら、フレーム衝突を低減させるためのランダム待ち時間とフレーム伝送に要する時間に着目すると、ITS 通信では小容量データを頻繁にやりとりするため、フレーム伝送時間よりもランダム待ち時間のほうが長くなる傾向があり、また複数局におけるランダム待ち時間の一致のために発生するフレーム衝突の問題は依然として残る。

このような CSMA/CA を車車間通信向けに改良したアクセス制御方式として代表的なものに文献 [7], [8], [9], [10] がある。文献 [7] は移動局のフレーム送信タイミングを道路上の位置に対応して決定することでフレーム衝突を回避する方式である。文献 [8] では道路を 3 種のクラスゾーンに分けて、交差点に近い領域から順に TDMA (Time Division Multiple Access), Slotted ALOHA, CSMA を用いる方式で、事故の多い交差点を中心に通信成功率の精度を改善するための手法が検討されている。文献 [9] では交差点において、進行方向を基準として送信タイミングを制御することで異なる進行方向における移動局間でフレーム衝突を回避する手法が提案されている。文献 [10] は周囲の車両密度に応じて待ち時間を制御することで遅延を削減し、フレーム送信できる移動局を増加させることが可能である。これ

らの手法は原理的には CSMA/CA に基づいているものの、現行の ARIB STD-T109 の標準規格との互換性はない。

一方で、他のアクセス制御方式としては TDMA を ITS 通信システムに適用する検討も行われている。一般的に TDMA は ETC (Electronic Toll Collection System) で採用されている DSRC (Dedicated Short Range Communications) のように各移動局の送信タイミングを制御する中央制御局が必要であるが、自律分散型制御を前提とする ARIB STD-T109 における車車間通信ではこのような中央制御局が想定されていない。そのような中央制御局が不要な車車間通信向けの TDMA としては自律分散型 TDMA プロトコル [11], [12] が提案されている。自律分散型 TDMA プロトコルと ARIB STD-T109 に基づく車車間通信の比較 [13] によると、フレーム衝突率に関しては自律分散型 TDMA プロトコルのほうが低い一方で、送信遅延時間が CSMA/CA よりも大きいという結果が得られている。

他にはスペクトラム拡散 (Spread Spectrum : SS) 技術を用いた車車間通信の検討も多く行われている [14]. スペクトラム拡散は多元接続が可能でマルチパスフェージングに強いという車車間通信に適した特徴を有しているが、市街地環境下での伝搬環境を考慮した比較では ARIB STD-T109 が採用する CSMA/CA 方式のほうが優れた特性結果が得られたとする報告もある [15]. また、VANET (Vehicular Ad hoc NETwork) と呼ばれるアドホックネットワークの技術を車車間通信に応用した検討も行われている [16] が、このようなマルチホップ型の無線通信は ARIB STD-T109 で想定されているようなリアルタイムでの安全運転支援システムに適さない場合もある。

他にも ITS に応用可能なトークンリングを採用したプロトコル WTRP (Wireless Token Ring Protocol) [17] も提案されているが、トークンフレームが必要となりオーバヘッドが大きいという問題がある。

このように ITS 通信には様々なアプローチによる検討がなされているが、これらの方式は現在の国内標準規格である ARIB STD-T109 との互換性はなく、実用化例はない。これらの実用化のためには、現在、市場に投入されつつある ARIB STD-T109 規格に準拠したデバイスの置き換えが必要であり、移動局間での直接通信を想定する ITS 通信の実用化のためには、その実用展開に時間を要すると考えられる。

そこで我々は ITS 通信特有のフレーム送信の周期性に着目し、ARIB STD-T109 の MAC (Media Access Control) 副層にわずかな機能を加えることでフレーム送信順序を自律分散的に制御する手法について検討を行ってきた [18]. この検討から、上位層から送信要求 (以降、“フレーム生起” という) があってから実際にフレームの送信が開始されるまでの時間であるフレーム遅延時間や同時刻に複数の移動局がフレームを送信することで発生するフレーム衝突

の発生率が提案手法によって改善されることを示した。本論文で論じる提案手法は ARIB STD-T109 に準拠したアクセス制御方式の効率改善のために、その互換性を維持することを条件とし、それを継承する形式で設計されている。特に、ARIB STD-T109 に準拠した車両と、提案手法に準拠した車両が混在するネットワークでも動作し、そのシステム全体での性能の改善が可能である。文献 [18] では ITS のような移動体ネットワークで発生するネットワークへの参入と離脱の評価や、ARIB STD-T109 には対応しているが提案方式に対応していない移動局がネットワーク内に混在するような環境での評価が不十分であった。そこで、本論文では文献 [18] で提案した手法において、移動局のネットワーク参入・離脱がある状況や、提案手法に対応していない移動局とが混在している環境、フレームロスが発生する状況について評価を行い、提案手法の頑強性を示す。

2. ARIB STD-T109 に基づいた車車間通信

本章では国内標準規格である ARIB STD-T109 における車車間通信の送信手順について述べる。ARIB STD-T109 では車車間通信のアクセス制御方式に CSMA/CA を採用している。CSMA/CA はキャリアセンスによって通信路のアイドル状態が所定の期間継続してからフレームを送信することで、フレーム衝突の確率を低減させるアクセス制御方式である。このキャリアセンスの期間は分散スペースとランダム待ち時間で構成され、本論文ではこれら 2 つで構成されるキャリアセンス期間を“合計待ち時間”と呼ぶ。ARIB STD-T109 では分散スペースを $T_{DIFS} = 58 [\mu s]$ と、ランダム待ち時間を閉区間 $[R_{min} = 0, R_{max} = 63]$ の整数一様乱数値とスロットタイム $T_{slot} = 13 [\mu s]$ の積と定義している。なお、分散スペースは IEEE 802.11 の DCF (Distributed Coordination Function) で採用されている DIFS (DCF InterFrame Space) に相当する。ARIB STD-T109 では図 1 に簡略化したフローに示す手順に従ってフレーム送信を行う。なお、図中の“Random = (未定)”は変数 Random に値が設定されていない状態を意味する。詳細な手続きは文献 [4] の解説 3 SDL (Specification and Description Language) 図 (pp.111-158) に示されている。

2.1 CSMA/CA の問題点

ARIB STD-T109 の車車間通信における CSMA/CA の合計待ち時間およびフレーム伝送時間について考察する。合計待ち時間中に通信路がビジーにならないと仮定した場合、合計待ち時間の平均は $T_{DIFS} + 0.5 \times (R_{max} - R_{min}) \times T_{slot} = 467.5 [\mu s]$ となる。一方、車車間通信のアプリケーション層におけるメッセージ仕様を規定したガイドラインである ITS FORUM RC-013 [19] によると、アプリケーションからは最大 100 [Byte] のデータが送信可能とされており、6 [Mbps] 伝送時を仮定するとヘッダを含めたフレーム伝送

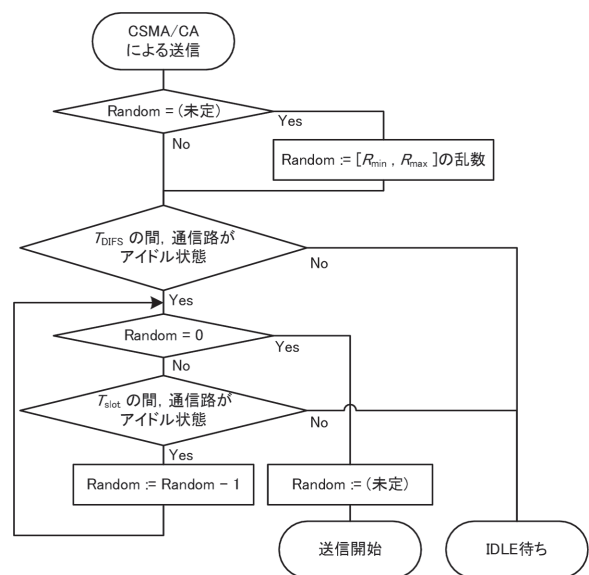


図 1 CSMA/CA による送信フロー
Fig. 1 Flow at CSMA/CA.

時間は $264 [\mu s]$ となる。この平均合計待ち時間とフレーム伝送時間を比べると、フレーム送信時間よりも平均合計待ち時間が約 1.8 倍長く、回線利用率が低く抑えられてしまう。そこで、このような短いフレームを周期的に伝送する必要のある車車間通信アプリケーションにおいて、ARIB STD-T109 に準拠する MAC 副層における手続きにわずかな修正を加えることでネットワーク内の移動局のフレーム送信順序を自律分散的に制御する手法を提案する。この提案手法により合計待ち時間を短縮し、かつフレーム衝突率を低減させることで、回線利用率を高めることが可能となると考えられる。

3. 提案手法

本提案手法では、各移動局において制御のための基地局を必要とせず自律分散的にフレーム送信順序を決定し (3.1 節参照)、その送信順序に従って短縮した合計待ち時間を用いてフレーム送信を行う。短縮した合計待ち時間としては分散スペース $T_{DIFS} = 58 [\mu s]$ と比べて短い ARIB STD-T109 において基地局で使用される最短スペース $T_{SIFS} = 32 [\mu s]$ のみを用い、ランダム待ち時間は 0 とする。すなわち、フレーム送信順序が決定された移動局では、定められた順序の 1 つ前の局のフレーム伝送が完了したら、 T_{SIFS} 待機後にただちにフレーム送信を開始する。最短スペースを用いることで、提案手法に非対応な移動局が CSMA/CA でフレームを送信した場合でも、CSMA/CA で用いられる分散スペースは最短スペースよりも長い ($T_{SIFS} < T_{DIFS}$) ので決定した送信順序に非対応の移動局が割り込む余地がなくなり、決定されたフレーム送信順序が崩れる恐れがない。また、少なくとも最短スペースを用いる理由は、送受信切替えの猶予のためである。なお、最短スペース T_{SIFS} は IEEE802.11 DCF で採用されて

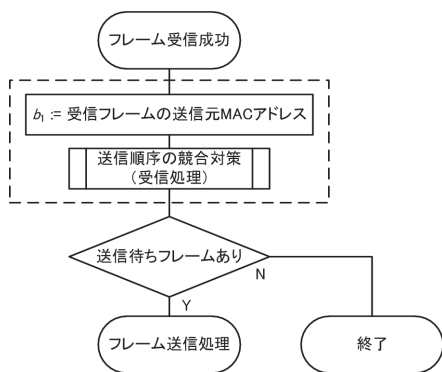


図 2 提案手法における受信フロー
Fig. 2 Flow at receiver.

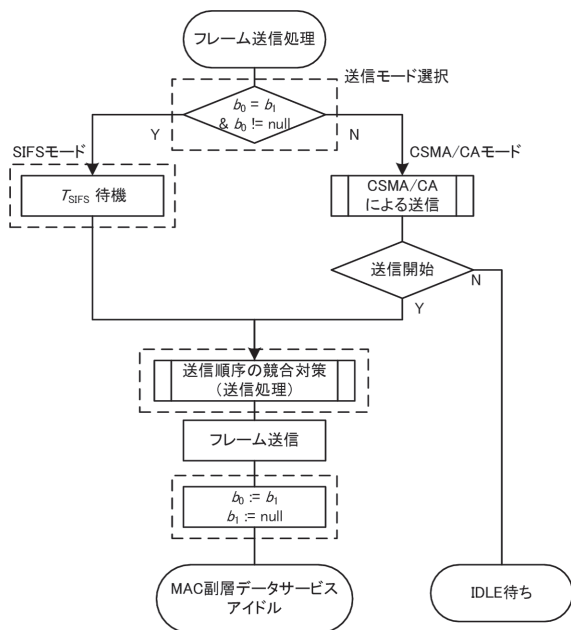


図 3 提案手法における送信フロー
Fig. 3 Flow at transmitter.

いる SIFS (Short InterFrame Space) に相当する。

3.1 フレーム送信順序の形成

本節では各移動局における自律分散的なフレーム送信順序決定手法について説明する。図 2 と図 3 に提案手法に対応した移動局がフレーム受信に成功した際と、フレーム送信する際のフローを示す。図中の定義済み処理ブロック“送信順序の競合対策 (受信処理)”と“送信順序の競合対策 (送信処理)”はそれぞれ図 7 と図 8 で示すフローに対応し、その詳細は 3.4 節で述べる。また、鎖線で囲まれたブロックは本提案手法を採用することで追加した処理であり、それ以外は ARIB STD-T109 と同一のフローである。図 2 はフレーム受信に成功したときに実行され、図 3 はフレーム生起し、ARIB STD-T109 で規定されるキャリアセンス機能において通信路がアイドルと判断されたときと、図 2 の内部処理から実行される。なお、これらの図は説明の簡単のために ARIB STD-T109 で規定される SDL [4] を

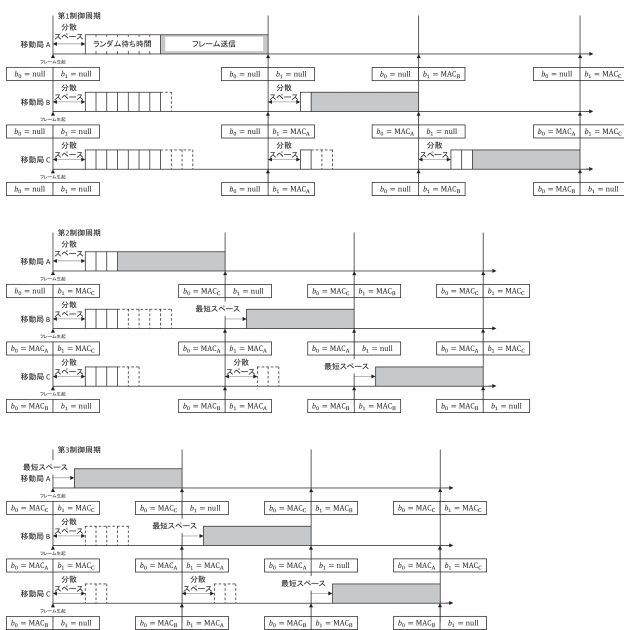


図 4 提案手法におけるフレーム送信のタイムライン
Fig. 4 Time line of frame transmission.

抽象化して表しており、詳細は付録 A.1 の図 A-1 に示す。

本提案手法では、各移動局が自局のフレーム送信の直前にフレームを送信した局の MAC アドレスを記憶することで自律分散的にフレーム送信順序を形成する。各移動局はフレーム送信順序の形成のために 2 つの記憶バッファ b_0 , b_1 を有する。 b_1 は自局が受信したフレームに含まれる送信元 MAC アドレスを保持するための一時的なバッファであり、 b_0 は自局のフレーム送信の直前にフレームを送信した移動局の MAC アドレスを記憶するためのバッファで、自局のフレーム送信が完了した直後に $b_0 := b_1$ とすることで更新する。この 2 つのバッファは $b_0 := null$, $b_1 := null$ として初期化される。図 2 に示すように移動局はフレーム受信に成功すると、受信フレーム内に含まれている送信元 MAC アドレスを b_1 に代入・更新する。その後、送信待ちフレームがあれば図 3 のフレーム送信処理に移行する。図 3 に示すようにフレーム送信処理の初めにバッファ値に依存して、提案手法によるフレーム送信もしくは従来の CSMA/CA によるフレーム送信のいずれかの“送信モード”に移行する。フレーム送信処理時にバッファが $b_0 = b_1$ かつ $b_1 \neq null$ ならば T_{SIFS} だけ待機後にフレーム送信 (以降、“SIFS モード”と呼ぶ) し、それ以外の場合は図 1 で示した ARIB STD-T109 に準拠した CSMA/CA プロセスに従い (以降、“CSMA/CA モード”と呼ぶ)、アクセス制御を開始する。また、フレーム送信の完了後に、 $b_0 := b_1$ とすることで自局の直前に送信した移動局の MAC アドレスを保持し、その後、一時バッファを $b_1 := null$ と初期化する。

図 4 に示すタイムライン例を用いてフレーム送信順序形成手順を説明する。図中の MAC_X は移動局 X の MAC アドレスを示す。図はフレーム送信順序形成前の第 1 制御

周期から、形成後の第3制御周期までのフレーム送信状況の例である。この例では簡単のために、移動局数を移動局 A, B, C で示す3台とする。なお、各移動局において、制御周期の長さである 100 [ms] ごとにフレーム生起することが前提条件となっており、この例では全移動局が各制御周期の先頭でいっせいにフレーム生起することとする。第1制御周期では、全移動局のバッファ b_0, b_1 はともに null であるので、すべての移動局が CSMA/CA モードでフレーム送信を行い、その際の送受信処理である図 2, 図 3 の手順に従い 2 つのバッファを更新する。第2制御周期では、移動局 A は図 3 の手順に従い CSMA/CA モードでアクセス制御を行うが、移動局 B, C はフレーム送信順序が形成可能であるので、提案する短縮方式である SIFS モードでフレーム送信を行う。第3制御周期開始時点では、全移動局の順序が決定しているため、 $b_0 = b_1$ となった移動局から順番に SIFS モードでフレーム送信が行われる。送信順序が形成されていない移動局は、CSMA/CA モードによるフレーム送信を試みるが、CSMA/CA で用いられる分散スペースは最短スペースよりも長い ($T_{SIFS} < T_{DIFS}$) ので、 $b_0 = b_1$ となった移動局がつねに優先的にフレーム送信を開始し、形成された送信順序に他の移動局が割り込む余地はない。これは、IEEE 802.11 DCF において確認応答フレーム伝送のために SIFS が用いられるのと同じ理由である。この例のような手順に従うことで、フレーム送信順序を各移動局で自律分散的に決定し、合計待ち時間を一定の T_{SIFS} まで短縮することが可能となる。

この手続きにより、決定された順序に基づきフレーム送信するためフレーム衝突を低減させることができ、さらに合計待ち時間を短縮することで回線利用率を高めることができる。なお、本手法における送信順序の決定は周期的にフレーム生起がなされるといふ移動局の情報を定期的に同報通信する ITS アプリケーション特有の特徴を利用しており、無線 LAN のようなオンデマンド型のフレーム生起過程においては適用できない。この特徴により、ある制御周期で決定した送信順序は、伝搬環境を含むネットワークポロジが変化しない限り、以降の制御周期で繰り返し適用することが可能となる。

3.2 移動局の新規参入

本節では、すでにフレーム送信順序が決定しているネットワークに新たな移動局が参入する場合について議論する。ここでは、新たな移動局 C が参入する場合を例として図 5 を用いて説明する。第 n 制御周期において、移動局 A および B はすでに送信順序が決定しており、SIFS モードでフレームを送信している。第 $(n+1)$ 制御周期で、新たに参入する移動局 C は CSMA/CA モードでフレーム送信を試みるが、前節で示したとおり、CSMA/CA の待ち時間である分散スペースは最短スペースよりも長い ($T_{SIFS} < T_{DIFS}$)

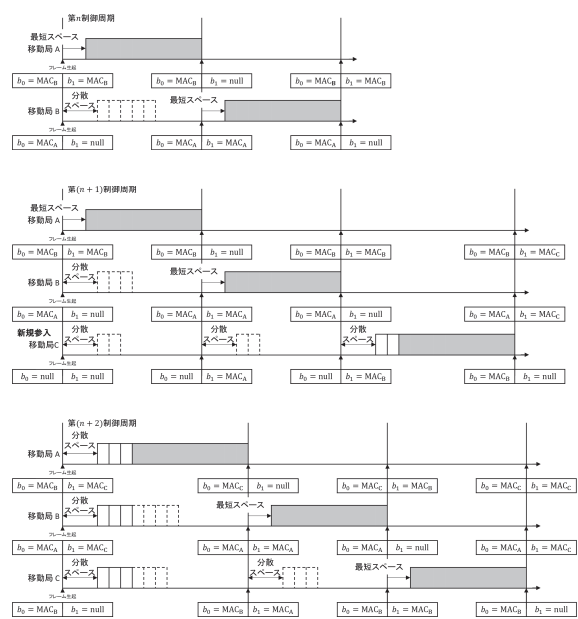


図 5 新規参入時のタイムライン

Fig. 5 Time line of station inflow.

ため、移動局 A および B が移動局 C より優先的にフレーム送信を行う。結果として、移動局 C はフレーム送信順序が決まっているすべての移動局が送信を終えた後にアクセス制御を開始できる。この時点で移動局 C のバッファは $b_0 = MAC_B$ と更新されるので、フレーム送信順の最後尾につくことになる。このとき、第 $(n+2)$ 制御周期では移動局 A が一時的に CSMA/CA モードに移行することに注意が必要である。図 5 の例では移動局 A のランダム待ち時間が最も短かったため、送信順序に変化がなかったが、このような場合以外では送信順序が変化する。しかし、送信順序が変化するような場合でも、十分に時間が経過すれば送信順序は形成され、すべての移動局が SIFS モードでフレーム送信を行うようになる。

3.3 移動局の離脱

本節では、ネットワーク内の一部の移動局が離脱した場合について議論する。ここでは、図 6 での例において、第 n 制御周期で 3 台の移動局 A, B, C がフレーム送信順序を $A \rightarrow B \rightarrow C$ のように形成しているときに、第 $(n+1)$ 制御周期で移動局 B がネットワークから離脱した場合を例として説明する。移動局 B がネットワークから離脱すると、移動局 A がフレーム送信した後、移動局 C のバッファは $b_0 = MAC_B, b_1 = MAC_A$ となり、 $b_0 \neq b_1$ であるため CSMA/CA モードでフレーム送信権を獲得することができる。ただし、もしフレーム送信順序において移動局 C が以降に複数の移動局が存在する場合、それらの移動局はすべて同一条件であるため、CSMA/CA モードによるフレーム衝突の可能性が発生することに注意する。フレーム伝送が完了すると移動局 C はバッファを更新し $b_0 = MAC_A$ となるため、これ以降の制御周期では $A \rightarrow C$ のようなフレーム送

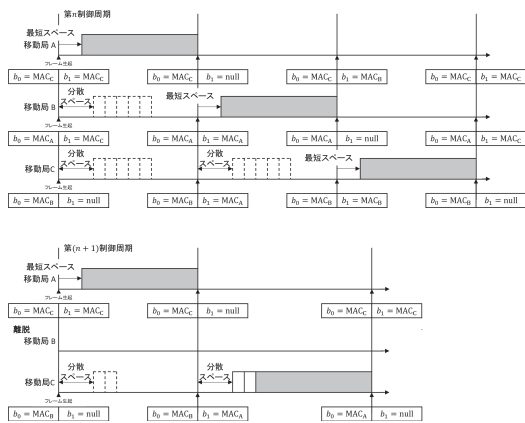


図 6 離脱時のタイムライン

Fig. 6 Time line of station outflow.

信順序が形成され SIFS モードに移行する. このように離脱した移動局以降にフレームを送信する局の送信モードが一時的に CSMA/CA モードに切り替わるが, たちまちフレーム送信順序が再構成されて SIFS モードに移行できる.

3.4 フレーム送信順序の競合

3.1 節で説明した提案手法の問題点として, CSMA/CA モードでのフレーム送信順序形成時にランダム待ち時間が一致することでフレーム衝突が発生すると, フレーム送信順序の確定以降も毎制御周期でフレーム衝突が発生し続けるという問題がある. この問題は, ITS 通信の確認応答を用いない同報性に起因する. ITS 通信は半二重通信であるのでフレーム送信局は自局が送信したフレームの衝突を検知することは不可能であり, フレーム送信順序形成時に衝突が起こった場合でも b_0 の更新規則に基づき $b_0 := b_1$ を満たし, それを検知することはできない. 結果的に, 以降の制御周期においてフレーム衝突が発生し続けてしまう. 本論文ではこの問題を“フレーム送信順序の競合”と呼ぶ.

このようなフレーム送信順序の競合への対策として本論文では 1 bit のフレーム衝突通知用フラグを用いることを提案する. このフレーム衝突通知用フラグは送信フレームのヘッダ内で送信され, そのフレームの直前にフレームを送信した移動局に対してフレーム衝突を通知する役割を果たす. なお, この 1 bit の衝突通知用フラグは ARIB STD-T109 で定義されているヘッダのうち, 将来の拡張のために予約されている領域を用いることで, フレーム送信時間を増加させることなく実装することが可能である.

次に衝突通知用フラグの処理について示す. 各移動局は, 図 3 で示した送信処理の際に定義済み処理ブロック“送信順序の競合対策 (送信処理)” (図 8) で, 直前の受信フレームが正しく受信できた場合に衝突通知用フラグを False に, 正しく受信できなかった場合はフラグを True とする. また, フレームの受信に成功した移動局は, 図 2 の送信処理の際に定義済み処理ブロック“送信順序の競合対

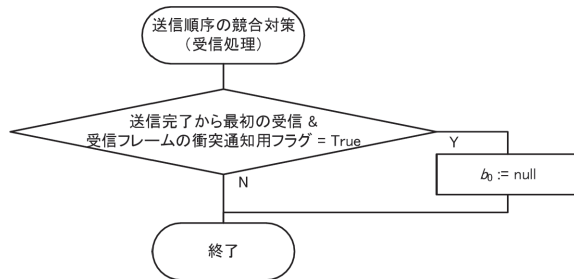


図 7 送信順序の競合対策 (受信処理)

Fig. 7 Prevention of collision for transmission order at receiver.

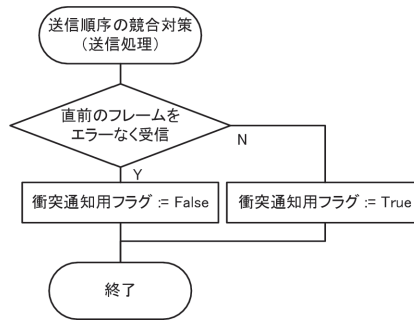


図 8 送信順序の競合対策 (送信処理)

Fig. 8 Prevention of collision for transmission order at transmitter.

策 (受信処理)” (図 7) で受信したフレーム内の衝突通知用フラグと, 自局の送信完了から最初の受信であるかを確認する. 自局の送信完了から最初の受信でかつ, 衝突通知用フラグが True である場合, 自局が送信したフレームが衝突したと判断し, バッファを $b_0 := null$ と初期化することで, 送信モードが CSMA/CA モードに切り替わる. このようにして, フレーム衝突が発生した場合にはフレーム送信順序の再構築が行われ, 以降の制御周期でフレーム衝突が発生することを回避可能となる.

3.5 提案手法に非対応な移動局の共存

本提案手法の大きな利点として, ARIB STD-T109 を拡張した本手法に対応した“対応局”と, ARIB STD-T109 のみ準拠した“非対応局”が共存できることがあげられる. 図 4 の移動局 A, B, C によって構成されるネットワークにおいて, 第 3 制御周期以降に非対応局 α が参入する場合を考える. 移動局 α は従来手法である CSMA/CA モードにしか対応していないので, 最短スペースを用いる移動局 A, B, C の後にフレームを送信することになるが, 移動局 α はネットワーク内のすべての移動局のフレームが正しく受信でき, 逆に移動局 A および B は移動局 α のフレームを受信できる. このように非対応局は送信順序の優先順位が低くなるものの, 対応局と混在できる. すなわち, 提案手法は ARIB STD-T109 との互換性を保ちつつ待ち時間を短縮し, フレーム衝突率を低減させることができる.

3.6 隠れ端末問題

本節では提案手法を採用した際の隠れ端末問題の影響について議論する。CSMA/CA をアクセス制御に採用したシステムにおいて、隠れ端末現象が問題となるといわれている。CSMA/CA において隠れ端末問題を回避する方法としては IEEE802.11 で採用されている RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send) 機能に基づく NAV (Network Allocation Vector) を用いる手法がある。この手法はアクセスポイントのような中央制御局の存在が必要であり、無線 LAN では採用されている。しかしながら、ARIB STD-T109 は中央制御局に依存する RTS/CTS 機能を具備しておらず、車車間通信を CSMA/CA で運用するため、隠れ端末問題は本質的に不可避の課題となっている。本提案手法は ARIB STD-T109 との互換性を維持することを前提とし、それを継承して実現されるため、隠れ端末現象に関しては ARIB STD-T109 と同様に問題となる。ARIB STD-T109 互換の方式で、隠れ端末問題を抜本的に解決する手法はいまだなく、今後の検討が必要である。

4. 数値計算例

本章では従来手法である ARIB STD-T109 に準拠した車車間通信と提案手法を採用した車車間通信について、それらが混合した環境である混合環境と、移動局のネットワーク参入・離脱がある環境において、ネットワークシミュレータを用いて評価を行う。

表 1 にネットワークシミュレータの諸元を示す。アプリケーションデータ長は ITS FORUM RC-013 で定められた最大データ長である 100 [Byte] とし、フレーム継続時間はフレームプリアンブルと送信レートによって決定される。分散スペース、最短スペース、ランダム待ち時間および制御周期は ARIB STD-T109 に準拠する。フレーム生起間隔は ARIB STD-T109 で定められた最短の生起間隔である 100 [ms] とし、各移動局のフレーム生起時刻は制御周期内で一様に分布するものとする。なお、各移動局はすべての移動局と通信でき、隠れ端末は発生しないものとする。隠れ端末現象が発生している場合の本提案手法の検証は今後進める予定である。

本論文では評価指標として以下を用いる。

$$\text{平均フレーム衝突率 } P_c = N_{col}/N_c$$

$$\text{平均フレーム遅延時間 } T_d = T_{sum}/N_s$$

ここで、各変数は以下のとおりとする。

N_s 受信成功フレーム数 (送信されたフレームが、衝突せずに受信完了したフレーム数)

N_c 生起フレーム数 (上位層から送信要求があったフレーム数)

N_{col} 衝突フレーム数 (2 局以上の移動局が同時にフレーム送信し、衝突したフレーム数)

T_{sum} 受信成功フレームの累積遅延時間 ((フレーム送

表 1 シミュレーション諸元

Table 1 Simulation parameters.

送信レート	6 [Mbps]
符号化率	1/2
アプリケーションデータ長	100 [Byte]
フレーム継続時間 T_{frame}	264 [μ s]
制御周期	100 [ms]
フレーム生起間隔	100 [ms]
フレーム生起範囲	制御周期内で一様分布
移動局数	50~400 台
シミュレーション時間	10 [s]
シミュレーション回数	1000 回
通信範囲	全移動局が互いにキャリアセンス可能な単一ネットワーク

信開始時刻 – フレーム生起時刻) の累積)

4.1 移動局のネットワーク参入・離脱がない場合

本節では対応局と非対応局が混在している環境下で、ネットワークへの移動局の参入・離脱は発生せず、ネットワークトポロジが変化しない場合について検討する。

図 9 に移動局数に対する平均フレーム衝突率 P_c 特性を示す。図中の“混合率”が 1 のときはネットワーク内の全移動局が従来の ARIB STD-T109 のプロトコルのみに対応している (全局が非対応局) 場合を、0 のときは全移動局が提案手法のプロトコルに対応している (全局が対応局) 場合を意味する。この結果から、混合率が小さくなるにつれて移動局数によらず平均フレーム衝突率 P_c が提案手法により改善できることが分かる。混合率が 1 の従来手法では、1 局あたりのフレーム送信に要する平均時間は平均合計待ち時間とフレーム伝送時間の和であるので、 $T_{DIFS} + 0.5 \times (R_{max} - R_{min}) \times T_{slot} + T_{frame} = 467.5 + T_{frame}$ となる。よって、表 1 に従う諸元の下では、 $467.5 + 264 = 731.5 [\mu$ s] となり、100 [ms] の制御周期内に平均的に 136 局収容可能である。一方で、混合率が 0 の提案手法の場合では、1 局あたりのフレーム送信に要する時間は $T_{SIFS} + T_{frame} = 32 + 264 = 296 [\mu$ s] となり、同じく 100 [ms] の制御周期内に最大で 337 局収容可能となる。これらの収容可能局数は目安であり、ランダム待ち時間の一致によるフレーム衝突が発生するために、これらより少ない局数でもフレーム衝突が発生することに注意する。対応局は CSMA/CA モードで開始され、フレーム送信順序が確定した後の制御周期で SIFS モードに移行するので、以降の制御周期ではフレーム衝突は発生しない。ただし、移動局数が多くなると、フレーム送信順序形成前の CSMA/CA モードでの多数のフレーム衝突が要因となり順序形成がなされず、つねに CSMA/CA モードで運用されている混合率 1 の特性に漸近していくことが分かる。また、CSMA/CA モードで運用される非対応局が対応局よりも先にフレーム

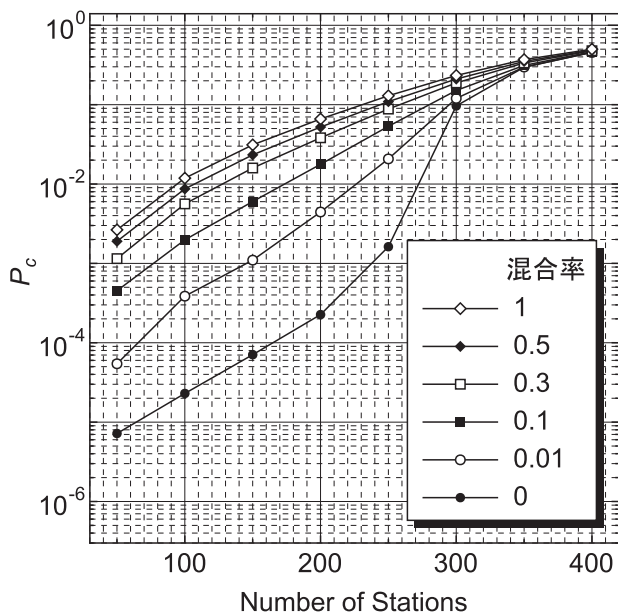


図 9 混合率を変化させたときの平均フレーム衝突率

Fig. 9 Average frame collision rate varying mixing rate.

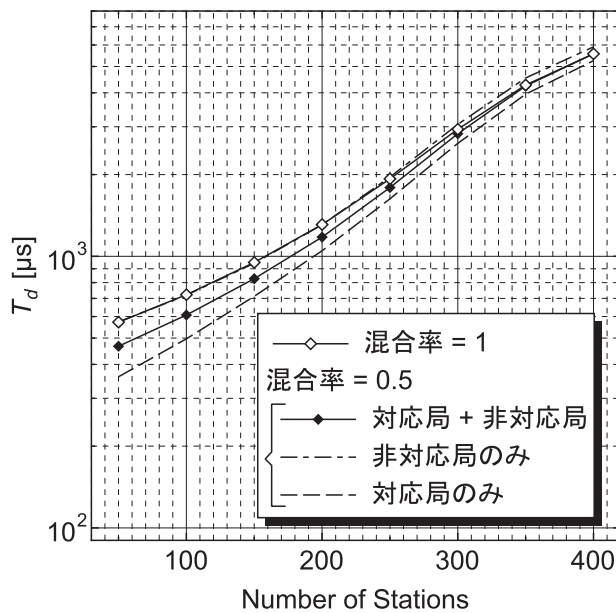


図 11 混合率 0.5 のときの各方式における平均フレーム遅延時間

Fig. 11 Average frame latency when mixing rate = 0.5.

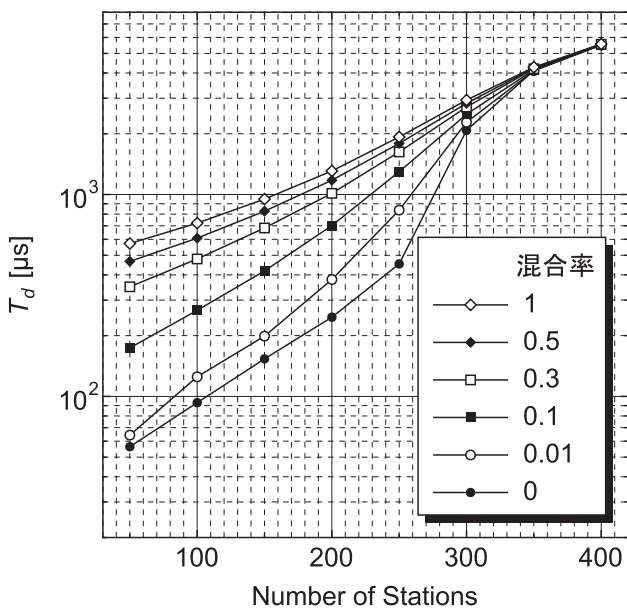


図 10 混合率を変化させたときの平均フレーム遅延時間

Fig. 10 Average frame latency varying mixing rate.

送信権を獲得すると、その非対応局は以降の制御周期でも CSMA/CA モードで運用されるので、その直後の対応局ではバッファ b_0 と b_1 の整合が保持できず、再度 CSMA/CA モードに移行することも混在環境におけるフレーム衝突率を押し上げる要因となっている。

対応局は SIFS モードで優先的にフレーム送信される確率が上がり、非対応局は対応局のフレーム送信完了後に CSMA/CA モードでフレーム送信する傾向となるため、本提案手法の導入によってネットワーク内の平均的なフレーム遅延時間の上昇が懸念される。図 10 に移動局数に対する平均フレーム遅延時間 T_d 特性を示す。結果から、混合

率が小さくなるにつれて平均フレーム遅延時間 T_d も改善できることが分かる。つまり、従来手法である混合率 1 の場合と比べて、提案手法の導入による平均フレーム遅延時間の延長の懸念は解消され、むしろ遅延時間削減の効果があることが分かる。これは、そもそも提案手法による図 9 で示した平均フレーム衝突率 P_c の低減のおかげでフレーム送信が円滑に行われ、非対応局においても結果的にフレーム遅延時間の削減が可能となったためであると考えられる。ただし、図 9 での議論と同様に移動局数が多くなるにつれて、混合率 0 の場合であっても SIFS モードに移行できる局が少なくなるため、遅延時間もまた混合率 1 の特性に漸近する。

4.1.1 非対応局が対応局から受ける影響

対応局と非対応局が混合した環境では、対応局が SIFS モードにより優先的にフレーム送信可能なため、非対応局のみがネットワークに存在する混合率 1 の場合と比べると、非対応局の平均フレーム遅延時間特性が悪化することが懸念される。そこで本項では、対応局と非対応局が混在する環境において、非対応局の平均フレーム遅延時間特性について評価する。図 11 に混合率 0.5 のときの非対応局、対応局それぞれの集合内での平均フレーム遅延時間特性を示す。なお、図 11 にはこれらを合算した平均特性と、混合率 1 の場合の特性も参考のために示す。対応局の集合は SIFS モードでフレーム伝送できるので、当然、最も低い平均フレーム遅延特性を達成できる。これに対して、非対応局の集合の平均フレーム遅延特性は大きくなるが、移動局数が少ない場合は混合率 1 のときとほぼ一致し、移動局が多い場合であっても混合率 1 の特性から若干悪化するが、ほぼ同程度の平均フレーム遅延特性に抑えることができる。対

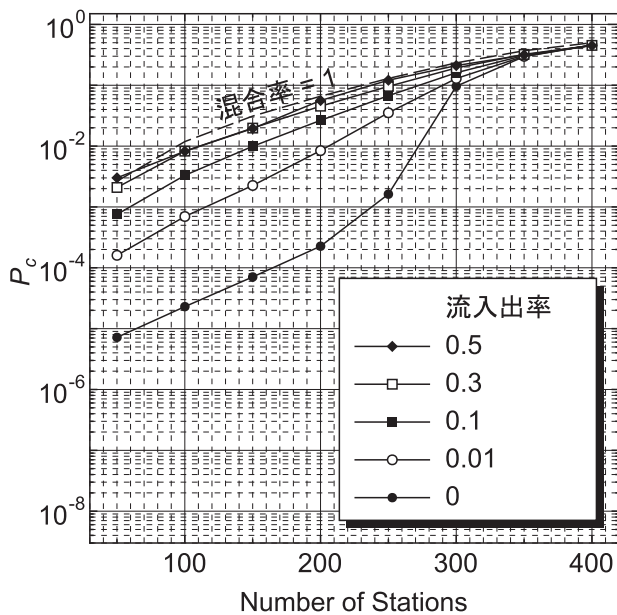


図 12 流入出率を変化させたときの平均フレーム衝突率

Fig. 12 Average frame collision rate varying inflow and outflow rate.

応局のフレーム送信順は非対応局のその順番より優先されるが、対応局が高い時間的密度でフレーム伝送を行うことができるので、非対応局へのフレーム遅延の悪影響は低く抑えることができる。

4.2 移動局のネットワーク参入・離脱がある場合

本節では対応局のみで構成されるネットワークにおいて、移動局の参入・離脱がある場合について検討する。本シミュレーションではネットワークへの参入・離脱を評価するために“流入出率”を導入する。ここでは、簡単のためネットワーク参入のパラメータである流入率と離脱のパラメータである流出率が等しいと仮定し、流入出率の1つのパラメータとして扱う。また、制御周期内では移動局数は一定とし、制御周期の先頭でのみ移動局の参入・離脱が発生し、下記の参入・離脱モデルを想定する。

離脱 各制御周期で存在する全移動局は独立試行で流出率で規定される確率でネットワークから離脱する。

参入 (初期移動局数 + (初期移動局数 - 現移動局数)) 回の独立試行で流入率で規定される確率でネットワークに参入する (ただし、試行数が0以下である制御周期においては参入は行われない)。

ここで、初期移動局数はネットワークシミュレータでの計測開始時の移動局数を表す。このモデルでは、各制御周期ごとに移動局数は変化するが、平均値として初期移動局数に一致する。

図 12, 図 13 に流入出率を変化させたときの平均フレーム衝突率 P_c と平均フレーム遅延時間 T_d 特性を示す。図中の流入出率が0の場合、参入・離脱が発生せずネットワークトポロジが変化しない図9と図10の混合率0の場合

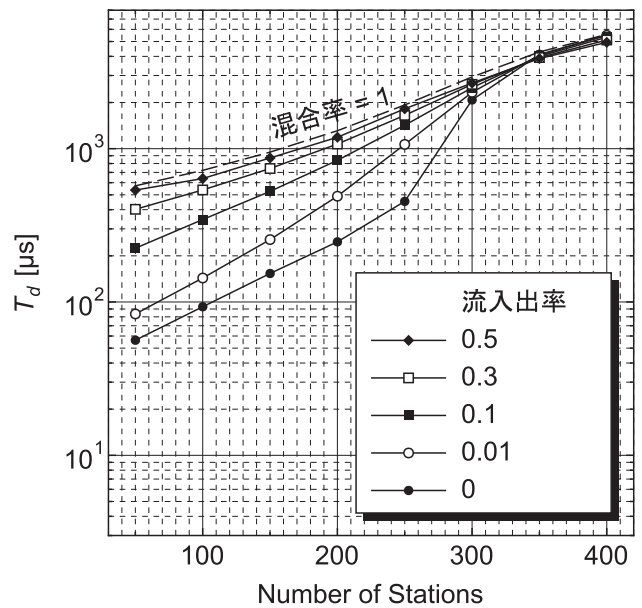


図 13 流入出率を変化させたときの平均フレーム遅延時間

Fig. 13 Average frame latency varying inflow and outflow rate.

合の特性と一致し、流入出率が大きくなるにつれて参入・離脱が頻繁に発生することを意味する。たとえば、流入出率0.5の場合、100 [ms] の制御周期ごとに平均的に半数の移動局が入り替わることを意味する。また、参考のために非対応局のみでネットワークが構成されている場合の図9と図10の混合率1のときの特性も合わせて示す。非対応局のみでネットワークが構成されている場合、すべての移動局はつねにCSMA/CAモードで運用されているため、その特性は流入出率に依存しないことに注意する。新たにネットワーク参入した対応局はまずCSMA/CAモードでフレーム送信順序形成を試みるので、流入率が上昇するにつれて平均フレーム衝突率 P_c および平均フレーム遅延時間 T_d は上昇する。また、ある対応局のネットワーク離脱により一度形成されたフレーム送信順序の整合性が保持できなくなり、その影響を受ける対応局ではSIFSモードからCSMA/CAモードに戻り再度フレーム送信順序形成を行うので、やはりこれらの特性を押し上げる。これらの検証から、提案手法はネットワーク参入・離脱が発生するような環境においても、非対応局のみで構成されるネットワークにおける性能をつねに上回ることが確認された。

4.3 フレームロスが発生する場合

本提案手法は自局の直前にフレームを送信した局のMACアドレスを記憶することで、送信順序を形成するため、フェージングや雑音の影響によりフレームロスが発生すると、フレーム送信順序の整合性が保てなくなり、性能が低下すると考えられる。そこで、本節ではフレームを送信した移動局から各受信局間のフレームロス率 (Frame Error Rate: FER) を定義し、フレームロスが発生した場合について評価する。

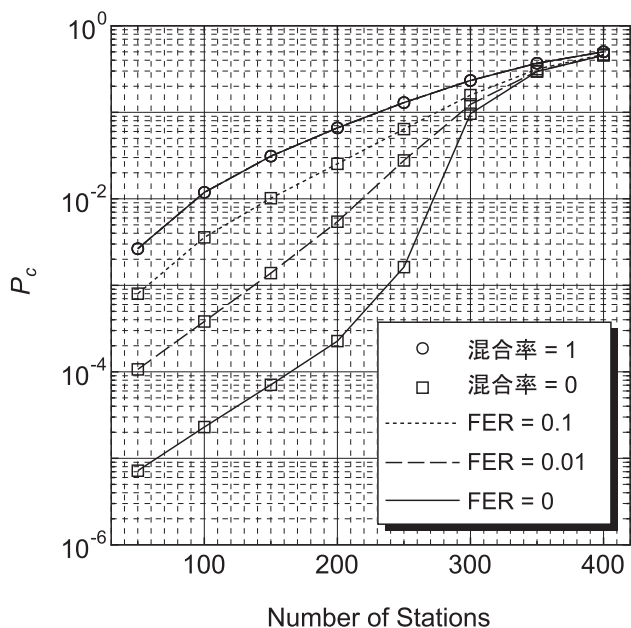


図 14 フレームロス率を変化させたときの平均フレーム衝突率
Fig. 14 Average frame collision rate varying frame error rate.

図 14 に FER が 0, 0.01, 0.1 のときの移動局数に対する平均フレーム衝突率 P_c 特性を示す。図中の混合率 1 は全移動局が非対応局の場合の特性であり、混合率 0 が全移動局が対応局の場合の特性である。CSMA/CA ではフレーム衝突に FER は無関係であるので、混合率 1 の場合は FER に依存しない。一方、対応局は FER の増加とともに平均フレーム衝突率は劣化するが、つねに混合率 1 の従来手法の性能を上回ることが確認できる。これは提案手法が CSMA/CA に、SIFS モードによるフレーム送信機能を追加することで性能向上を図っているため、最悪性能が全移動局が CSMA/CA モードによるフレーム送信をした場合の性能に一致するためである。すなわち、提案手法の性能は原理的に従来手法をつねに上回ることがいえる。また、提案手法は FER の増加とともに従来手法のそれに漸近するが、これは提案手法の特徴から、フレームロスが発生することでフレーム送信順序の整合性が保てなくなり、SIFS モードから CSMA/CA モードに移行することによってフレーム衝突が発生する可能性が上昇するからである。

図 15 に移動局数に対する平均フレーム遅延時間 T_d 特性を示す。全局が非対応局である混合率 1 では遅延時間特性は FER に依存せず、移動局数の増加とともに指数関数的に遅延時間が増加する。平均フレーム衝突率 P_c 特性の議論と同様に、混合率 0 の場合の遅延時間 T_d 性能は混合率 1 の場合よりも改善されているが、FER の増加とともに従来手法に漸近する。

このようにフレームロスの発生によって提案手法の特性は低下するが、非対応局のみで構成されるネットワークにおける性能をつねに上回ることが確認された。

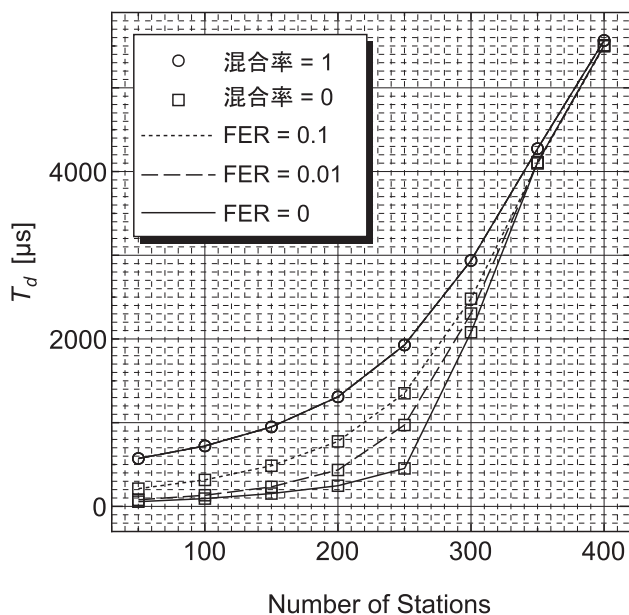


図 15 フレームロス率を変化させたときの平均フレーム遅延時間
Fig. 15 Average frame latency varying frame error rate.

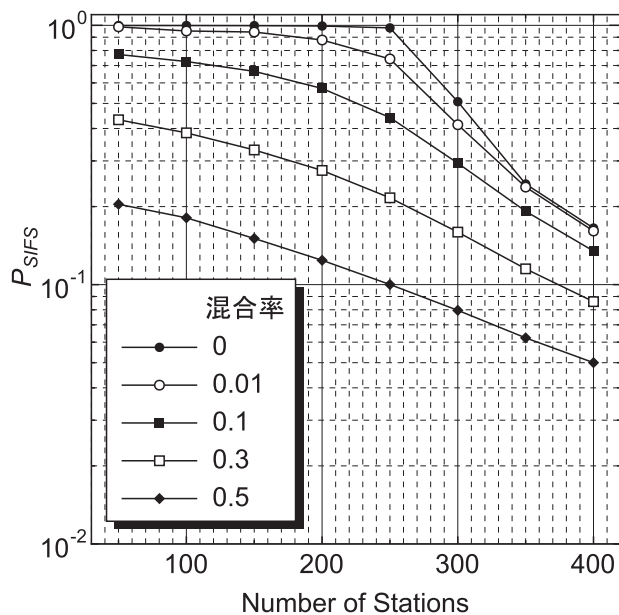


図 16 混合率を変化させたときの SIFS モード送信率
Fig. 16 SIFS mode transmission probability varying mixing rate.

4.4 SIFS 送信率

本節ではネットワーク内での送信フレームのうち、提案手法による SIFS モードで送信されたフレームの割合について議論する。ここでは以下のように定義される SIFS 送信率 P_{SIFS} により評価を行う。

$$\text{SIFS 送信率 } P_{SIFS} = N_{SIFS} / N_t$$

ここで、

N_t 送信フレーム数 (図 3 で定義された送信フローに基づき、送信されたフレーム数)

N_{SIFS} SIFS 送信フレーム数 (SIFS モードで送信され

たフレーム数)

とする. 図 16 に移動局数に対する SIFS 送信率 P_{SIFS} 特性を示す. 非対応局はつねに CSMA/CA モードでフレームを送信するので, 混合率の増加によって SIFS 送信率の最大値が低下することに注意が必要である. たとえば, 混合率が 0.1 の場合は SIFS 送信率の最大値は 0.9 となる. すべての移動局が提案手法の対応車両である混合率が 0 の場合, 移動局数が少ないとき, ほぼすべてのフレームは SIFS モードで送信され, 提案手法によりフレーム送信順序が適切に構成されることが分かる. 移動局数が多くなるにつれて, CSMA/CA モードで開始された移動局のフレーム送信順序が定まらず, SIFS モードに移行できないため, その割合は徐々に減少することになる.

5. おわりに

本論文では ARIB STD-T109 の車車間通信で採用されている CSMA/CA に自局の直前に送信した移動局の MAC アドレスを保持するバッファを追加することで, 送信順序を自律分散的に形成しフレーム衝突を低減させ, 待ち時間を短縮することで回線利用効率を向上させる手法を提案した. 提案手法に対応した移動局と非対応の移動局が混在する混合環境において, ネットワークシミュレータを用いて評価した結果, 平均フレーム衝突率, 平均フレーム遅延時間の観点から提案手法はつねに従来手法を上回ることが可能であることを示した. また, 移動局のネットワーク参入・離脱が発生する環境においても提案手法は適切に動作し, 非対応局のみの状況と比べて提案手法により性能が改善されることが確認できた. また, フレームロスが発生したとしても従来手法の性能は原理的に従来手法のそれをつねに上回ることを示した. したがって, 本提案手法は ARIB STD-T109 における車車間通信のためのアクセス制御方式の効率化に有効であると考えられる.

今後の課題として, 隠れ端末が発生する環境における提案手法の有効性を評価する予定である.

謝辞 本研究の一部は公益財団法人 KDDI 財団の助成によって行われたものである.

参考文献

- [1] ITS Japan : ITS による未来創造の提言 (2013).
- [2] IEEE: 802.11p-2010 – IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments (2010).
- [3] ITS 情報通信システム推進会議 : 700 MHz 帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン ITS FORUM RC-006 1.0 版 (2011).
- [4] 電波産業会 : 700 MHz 帯高度道路交通システム 標準規格 ARIB STD-T109 1.2 版 (2013).
- [5] 総務省 : ITS 無線システムの高度化に関する研究会 報告

- 書 (2009).
- [6] IEEE Computer Society: IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007).
- [7] 小林晋尚, 永良知孝, 森香澄夫, 小林英雄 : 車両位置により発信タイミングを制御する改良型 CSMA 車々間通信, 電子情報通信学会技術報告, Vol.103, No.86, pp.11–16 (2003).
- [8] 横山達也, 倉本圭太, 長谷川孝明, 麻生敏正, 石其俊明 : マルチクラスゾーン ITS 情報通信方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J95-A, No.8, pp.683–693 (2012).
- [9] 新井国充, 浅見重幸 : 見通し外の車群間で送信タイミング制御を行う車両安全通信のための CSMA MAC プロトコル, 電子情報通信学会技術報告, Vol.107, No.556, pp.11–16 (2008).
- [10] 田代裕和, 土橋健太郎, 高橋健志, 浅谷耕一, 富永英義 : 車車間通信における非持続型 CSMA プロトコルの提案, 電子情報通信学会技術報告, Vol.105, No.80, pp.43–46 (2005).
- [11] 牧戸知史, 鈴木徳祥, 原田知育, 村松潤哉 : リアルタイム車車間通信のための自律分散型 TDMA プロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.7, pp.2257–2266 (2007).
- [12] Borgonovo, F., Capone, A., Cesana, M. and Fratta, L.: ADHOC MAC: New MAC Architecture for Ad Hoc Networks Providing Efficient and Reliable Point-to-Point and Broadcast Services, *ACM Wireless Networks*, Vol.10, No.4, pp.359–366 (2004).
- [13] Yokomori, T., Fujii, M., Hatano, H., Ito, A. and Watanabe, Y.: A Comparative Study on Access Control Methods for ITS Radio Communications Systems, *2015 IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics*, pp.156–159 (2015).
- [14] 羽瀨裕真 : SS 技術を用いた車車間通信について, 電子情報通信学会技術報告, Vol.109, No.446, pp.167–174 (2010).
- [15] 榊原 翔, 大野光平, 伊丹 誠 : 市街地環境下での車車間通信におけるブロードキャスト型 DS-CDMA 方式と CSMA/OFDM 方式の比較, 電子情報通信学会技術報告, Vol.113, No.337, pp.13–18 (2013).
- [16] 間瀬憲一 : 車々間通信とアドホックネットワーク, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B, No.6, pp.824–835 (2006).
- [17] Ergen, M., Lee, D., Sengupta, R. and Varaiya, P.: WTRP – Wireless Token Ring Protocol, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.53, No.6, pp.1863–1881 (2004).
- [18] 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, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.115, No.365, pp.7–12 (2015).
- [19] ITS 情報通信システム推進会議 : 700 MHz 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 (2014).

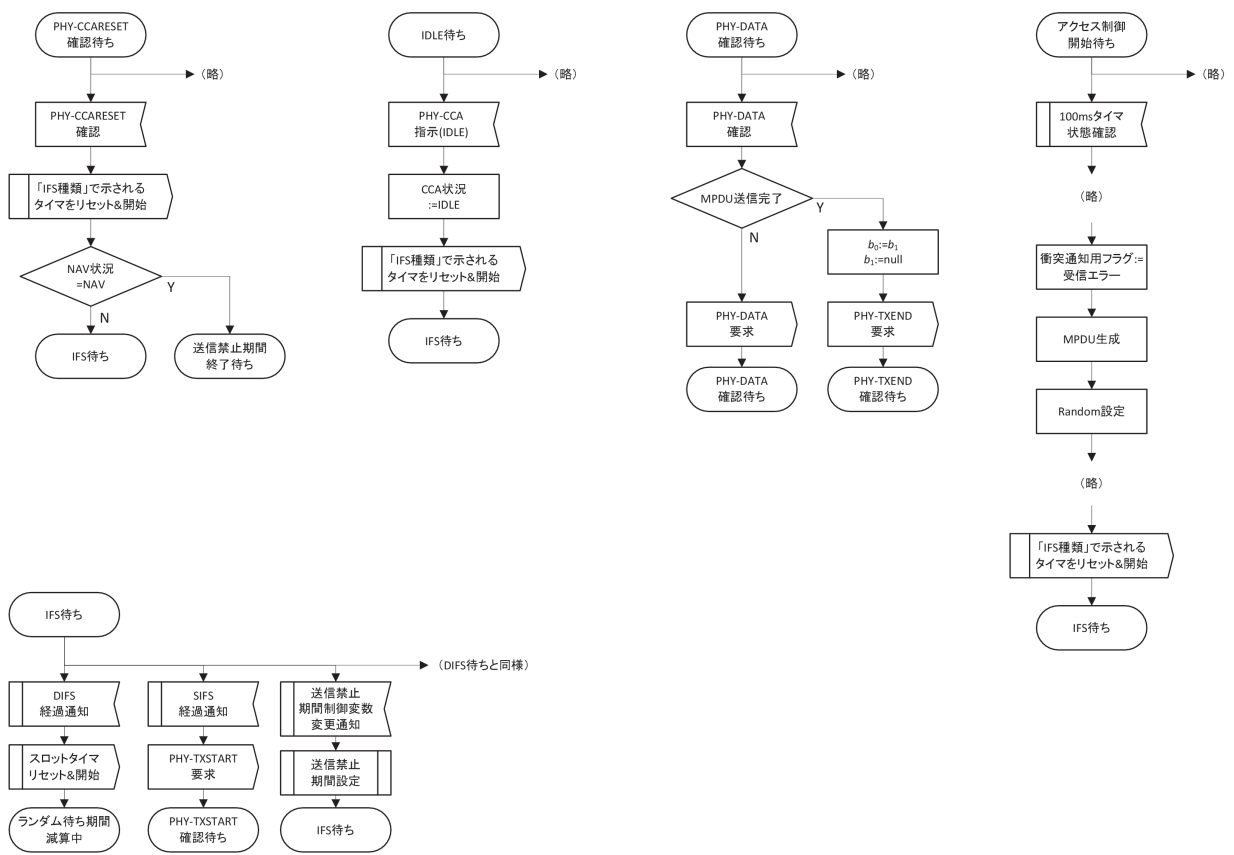
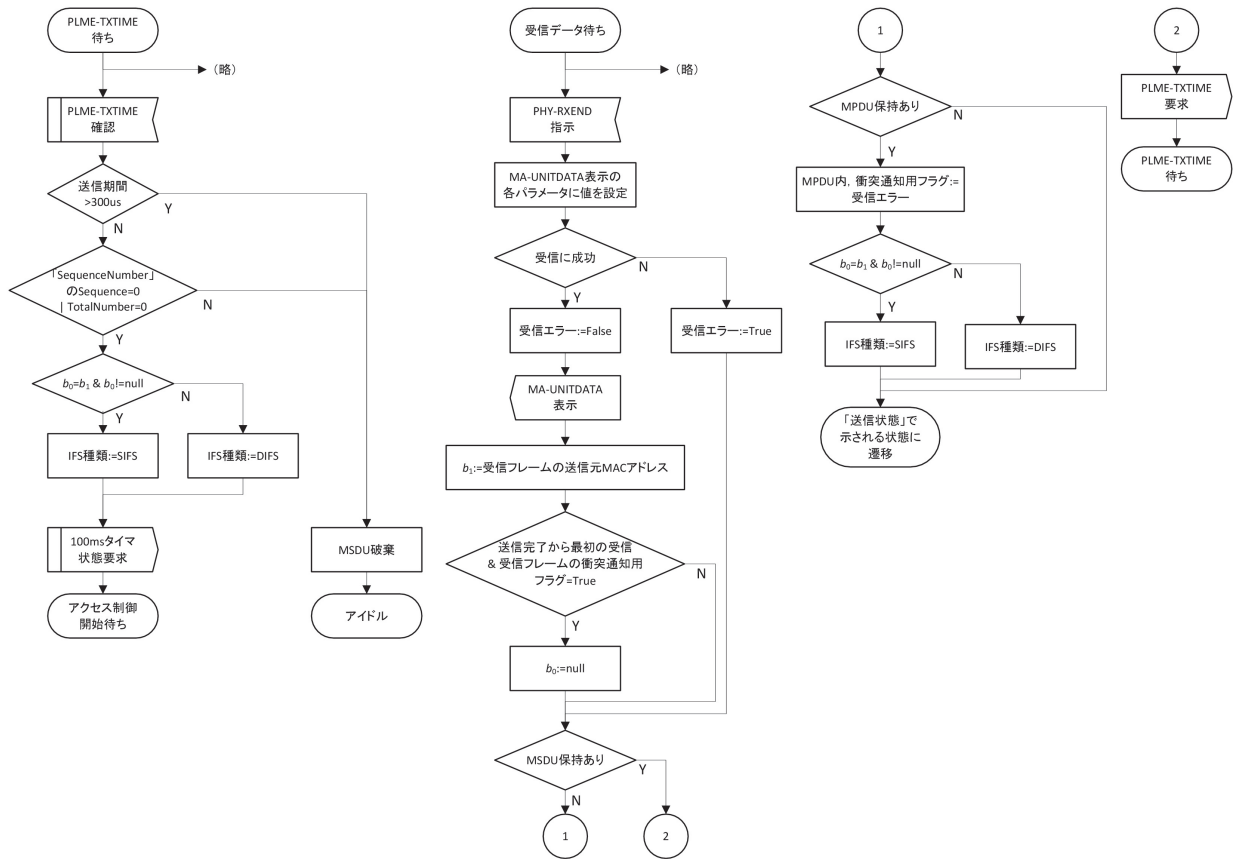


図 A.1 提案方式により修正された SDL 図
 Fig. A.1 Modified SDL by proposed scheme.

付 録

A.1 SDL 図

ARIB STD-T109 の付録資料である解説 3 の 3.3 節 (1) データ送受信 (pp.111-158) には、標準規格の処理手順を ITU-T Z.101 に従う形式の SDL 図が示されている。本論文で使用したネットワークシミュレータはこれに基づき構成されている。また、本論文の提案方式は ARIB STD-T109 の付録資料の SDL 図を追加拡張することで構成されており、その追加部分を図 A-1 に示す。なお、標準規格の SDL 図から変更がない部分については省略した。



横森 崇宏

1993 年生。2015 年宇都宮大学工学部情報工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科博士前期課程入学、現在に至る。2015 年電子情報通信学会 ITS 研究会若手奨励賞受賞。ITS のアクセス制御方式に関する研究に従事。



藤井 雅弘 (正会員)

1975 年生。1998 年東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒業。2000 年同大学大学院修士課程修了。2003 年同大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。2003 年同大学基礎工学部助手。2006 年宇都宮大学工学部助手。2010 年宇都宮大学大学院工学研究科准教授、現在に至る。無線通信システム、ITS 等の研究に従事。電子情報通信学会 ITS 研究専門委員会副委員長、東京支部運営委員、基礎・境界ソサイエティ英文論文誌編集委員。IEEE ITS Society Tokyo Chapter Secretary。2002 年 IEEE VTS Japan Researcher's Encouragement Award。2005 年情報理論とその応用学会研究奨励賞。2009 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ編集活動感謝状。2012 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞。2014 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞。2014 年同学会通信ソサイエティ活動功労賞。電子情報通信学会シニア会員。IEEE 会員。



羽多野 裕之 (正会員)

1980 年生。2003 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2005 年同大学大学院博士課程前期課程修了。2008 年同大学院博士課程後期課程修了。博士 (工学)。2008 年静岡大学大学院工学研究科助教。2013 年宇都宮大学大学院工学研究科助教。2015 年同大学院工学研究科准教授、現在に至る。無線通信・レーダ、GPS 測位等無線技術の応用に従事。電子情報通信学会 ITS 研究専門委員会幹事、通信ソサイエティマガジン編集委員。2004 年電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞。2007 年 IEEE VTS JAPAN Chapter VTC 2007-Spring Student Paper Award。2014 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞。電子情報通信学会シニア会員。IEEE、自動車技術会各会員。



伊藤 篤 (正会員)

1959 年生。1981 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。1983 年同大学大学院情報工学専攻修了。同年国際電信電話株式会社 (現、KDDI) 入社。1985 年より研究所にて仕様記述言語、IN、インターネット、アドホックネットワーク、Android 応用等の研究に従事。1991~1992 年スタンフォード大学 CSLI 客員研究員。2014 年宇都宮大学大学院工学研究科教授、現在に至る。博士 (情報工学) (広島市立大学)。電子情報通信学会、ACM 各会員。



渡辺 裕

1950 年生。1973 年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。1979 年同大学大学院理工学研究科物理及び応答物理学専攻博士課程修了。工学博士。同年国際電信電話株式会社 (現、KDDI) 入社。1979 年より研究所にて情報通信トラヒック、国際通信網の設計運用技術の研究に従事。1999 年 KDD 米国研究所所長・最高経営責任者。2001 年 KDDI 株式会社開発統括部長。2005 年宇都宮大学工学部教授、現在に至る。1986 年 (社) 電子通信学会論文賞受賞。1986 年 (財) 電気通信普及財団テレコム自然科学賞受賞。1998 年科学技術庁長官賞研究功績者表彰。2008 年情報化促進貢献個人表彰総務情報通信国際戦略局長表彰。電子情報通信学会会員。