

車車間通信による安全運転支援システムの アプリケーションレベル QoS 評価

伊藤 健二^{†1} 田所 幸浩^{†1} 鈴木 徳 祥^{†1}
今井 純 志^{†1} 牧 戸 知 史^{†1}

本論文は、交差点事故削減を目的とする安全運転支援システムを想定し、周期的に確実な通信を実現する高信頼な車車間通信のための MAC プロトコルの性能評価を行う。これまでの検討の多くは、CSMA/CA 方式を対象としており、パケットスループットやパケット誤り率などのパケットレベルの通信性能のみが評価されている。また、車車間通信環境では、隠れ端末問題によって、大きく通信品質が劣化することも懸念されている。そこで、本論文では、パケットレベルの通信品質評価だけでなく、アプリケーションレベル QoS の観点から安全運転支援システムの評価を行う。また、シミュレーション評価結果から、高信頼な車車間通信を実現するためには、隠れ端末問題への対策の重要性を明らかにする。さらに、その対策方式として、自律分散型 TDMA プロトコルが有望な方式の 1 つであることを示す。

An Application-level QoS Assessment of Driving Support System for Safety with Inter-vehicle Communications

KENJI ITO,^{†1} YUKIHIRO TADOKORO,^{†1}
NORIYOSHI SUZUKI,^{†1} JUNJI IMAI^{†1}
and SATOSHI MAKIDO^{†1}

This paper investigates Medium Access Control (MAC) protocol for periodic inter-vehicle communications (IVC) with high reliability in safe driving support system for reducing road traffic accidents. Many papers on performance evaluation of Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) protocol have been published. However, the great majority of them deal with only packet-level performance such as packet throughput and packet error rate. Also, the communication quality is degraded seriously by hidden terminal problem in IVC. In this paper, we try to assess the safety driving

support system by computer simulation from an application-level Quality-of-Service (QoS) point of view. The simulation results clarify the importance of countermeasure to hidden terminal problem in order to realize reliable IVC. In addition, we demonstrate the effectiveness of decentralized Time Division Multiple Access (TDMA) protocol as one of the countermeasure methods.

1. ま え が き

近年、自動車事故による死傷者数を減らすため、ASV (Advanced Safety Vehicle) をはじめ、衝突自体を事前に回避することを目的とする VSC (Vehicle Safety Communications) のような予防安全技術の研究がなされている¹⁾⁻⁷⁾。特に、車車間通信を用いた衝突回避警告システムが交差点や見通しの悪い道路などにおいて、交通事故削減を実現するシステムとして大きく期待されている⁴⁾⁻⁷⁾。

その中でも、ASV で検討されている安全運転支援システム (情報交換型運転支援システム) では、相手の存在有無が分からない状況下においても、すべての車両が自車両の位置・速度情報などを確実、かつ周期的に周辺車両に伝える必要がある。そのため、通信形態としては、通信可能なすべての周辺車両に対して周期的に固定長のデータパケットを送信し、そのパケットに対しては返信しないブロードキャスト通信を前提としている。本論文では、このシステム、および通信形態を検討対象とする。

このような安全運転支援システムのための MAC プロトコルの多くの研究は、CSMA/CA 方式を対象としている^{6),7)}。CSMA/CA は、周辺車両との同期をとる必要がないため、本論文で対象としている自律分散環境下においても、制御が容易に実現できるというメリットがある。しかし、CSMA/CA は、通信トラフィック量が増えてくると、キャリアセンスとバックオフ制御を行っているため、必ずしも一定の周期間隔でのパケット送信は保証されない。これにより、送信遅延が車両挙動の把握に悪影響を及ぼすことが考えられる。また、車車間通信環境では、隠れ端末問題による深刻な特性劣化が懸念されている⁸⁾。CSMA/CA は一般的に、RTS/CTS (Request-To-Send and Clear-To-Send)^{9),10)} を用いることにより、1 対 1 通信における隠れ端末問題を解決することができる通信方式としてよく知られている。さらに、本論文で対象としているような、1 対多のブロードキャスト通信への RTS/CTS の

^{†1} 株式会社豊田中央研究所

Toyota Central Research and Development Laboratories, Inc.

拡張に関する研究もなされている^{11),12)}。しかし、これらの方式では、数ノードから約 25 ノードでの環境を取り上げ、送信端末が増大すると通信特性が大きく劣化することが示されている。そのため、本論文で取り扱うような、通信エリア内に百台程度の車両が存在するような市街地道路環境には適していない。

そこで、車車間通信を用いた安全運転支援システムを実現するためには、周期間隔でのパケット送信を保証し、自律的に動作する隠れ端末問題への対策技術が必要である。

他の隠れ端末問題への対策方式としては、様々な検討結果が報告されている¹³⁾⁻¹⁶⁾。その中でも、文献 16) では、ブロードキャスト通信を対象とし、各車両が周辺車両の通信状態を示す情報 (FI: Frame Information) を交換することにより隠れ端末問題を回避し、低遅延で高信頼な無線アクセスを実現する自律分散型 TDMA プロトコル (以下、D-TDMA: Decentralized TDMA と呼ぶ) の有効性が報告されている。

TDMA 型のアクセスは、所定の長さのフレームをいくつかのスロットに分割して、スロット単位でのアクセスを行うため、スロットが確保できれば、周期的なパケット送信を保証することができる。また、隠れ端末が送信しているスロットを回避するようなタイミングで適切にスロットが確保できれば、パケット衝突が発生しないというメリットがある。ただし、自律的なスロット同期の実現方法や、適切なスロットを自律的に確保する手法が課題となる。

D-TDMA のような TDMA 型のアクセスの場合、スロット同期がとれていない状態では、通信品質が大きく劣化することが考えられる。しかし、文献 16) では、完全にスロット同期がとれている状態のみが評価されているため、スロット同期性能が通信品質に及ぼす影響が議論されていない。また、D-TDMA プロトコルの基本的な性能評価はなされているが、通信エリア外からの隠れ端末問題の影響を評価できるだけの十分な端末が存在していないため、CSMA/CA と比較した際の隠れ端末問題の影響の評価は必ずしも十分であるとはいえない。さらに、実際の交通環境のような車両の移動は考慮されていないため、文献 16) では、同じスロットを使用している車両が互いに移動して接近することによりパケット衝突が発生し、次のフレームで、適切にスロット変更が行われるという自律的なスロット獲得アルゴリズムの動作が評価されていない。これらの評価に関しては、実際の利用シーンを想定した評価がされておらず、通信の予約成功確率やパケット到達率などパケットレベルの通信品質のみが評価されている。安全運転支援システムでは、事故防止可能な地点で相手車両が存在するという情報を得ることができ、かつ、相手車両の挙動や、その挙動変化を確実に把握することが必要である。これらが満たされているか否かをアプリケーションレベル QoS (Quality of Service) の観点から評価する (安全運転支援システムの成立性の評価) ことが

必要である。

本論文では、安全運転支援システムとして、交差点右折待ち時において、対向車線を走行する車両 (対向車) の接近情報を右折待ち車両に提供する右折事故防止支援サービスを取り扱う。このサービスでは、対向車接近情報をどの地点で初めて右折待ち車両に提供できるのか (サービス開始タイミングの評価)、また、サービス開始後、右折待ち車両が、どれくらいの精度で対向車の挙動を把握し続けることが可能なのか (サービスの情報更新精度) ということが、安全運転支援システムの成立性の評価として重要となる。このような、アプリケーションレベル視点での通信品質特性をアプリケーションレベル QoS として定義し評価する。これにより、従来のパケット到達率などの指標では、平均的な通信特性しか把握できないのに対し、どの地点で初めて通信が成立し、対向車がどの程度移動する間に 1 回の通信が成立するかを評価することが可能となる。

そこで、本論文では、まずスロット同期という観点から最も通信品質劣化につながると考えられるシーンにおいて、文献 17) のような自律分散スロット同期アルゴリズムを用いた場合の通信品質への影響を明らかにする。次に、実際の交通環境のような車両の移動を考慮し、通信エリア外にも十分な車両が存在させ数千台規模の評価を行うことにより、隠れ端末問題の影響を評価する。その際、大規模なシミュレーションに適した電波伝搬モデルを提案する。また、実際の利用シーンを想定し、通信プロトコルの性能をパケットレベルの通信品質だけではなく、アプリケーションレベル QoS を評価するための評価指標を提案し、安全運転支援システムが成立するか否かを評価する。なお、本論文で評価対象とする MAC プロトコルとしては、ASV でも検討されている CSMA/CA と文献 16) で提案している D-TDMA の 2 方式を取り扱う。

以下では、2 章で、D-TDMA プロトコルの概要を述べ、3 章において、スロット同期の観点から最も通信品質劣化につながる車群すれ違い時というシーンを想定した場合の自律スロット同期アルゴリズムと通信性能の関係を明らかにする。また、4 章において、アプリケーションレベル QoS を評価するためのシミュレーションモデルを示す。さらに、5 章では、アプリケーションレベル QoS を評価するための評価指標を提案し、6 章において、シミュレーション評価結果を示す。

2. D-TDMA プロトコル概要

本章では、文献 16) で提案している D-TDMA プロトコルの動作概要を説明する。D-TDMA は、図 1 のように所定の周期で繰り返されるフレームを N スロットに分割し、ス

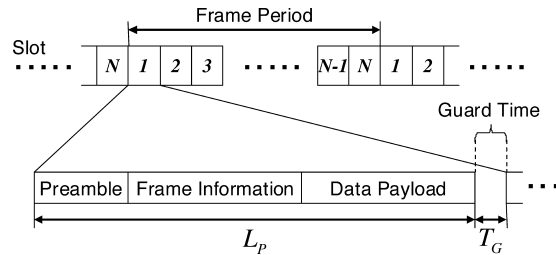


図 1 D-TDMA プロトコルのパケットフォーマット
Fig. 1 Packet format in D-TDMA protocol.

ロット単位のアクセスを行う。送信するパケットは、同期確立などに使用するプリアンブル、フレーム情報、位置情報などのデータペイロードからなる。

ここで、フレーム情報とは、送信端末が自身の送信タイミングから遡って過去 1 フレーム時間観測したスロットの使用状況（以下、スロット情報と呼ぶ）を示した情報である。このスロット情報には、4 値（2 ビット）を用いており、それぞれの値の示す意味を以下に記す。

- ACK：パケットが正しく受信できたスロット
- RTC：パケット衝突が検出されたスロット
- NACK：パケット受信に失敗したスロット
- FREE：上記以外のスロット

本論文のシミュレーションにおいて、スロット情報の決定方法は、図 2 のとおりである。受信車両で観測される受信信号レベルとパケットの到着タイミングを基にして、図 2 のようにスロット情報を判断する。

ここで、スロット情報の判断に用いる受信信号レベルを 2 つの閾値 (Th_1, Th_2) を用いて判定する。受信したパケットのプリアンブルを検出することができる受信レベルを Th_1 とし、パケットのプリアンブルを除く部分（フレーム情報とデータペイロード）を復調することが可能な受信レベルを Th_2 とする ($Th_1 < Th_2$)。

まず、1 つのスロット内において、受信信号レベルが閾値 Th_1 未満であった場合、スロット内でパケットがまったく存在していないものと判断する。このときのスロット情報は、FREE と決定する。

次に、受信信号レベルが閾値 Th_1 以上、かつ Th_2 未満であった場合、すなわち、プリアンブルは検出できるが、受信パケットの復調ができずに正常受信できない場合を想定している。この場合のスロット情報は、NACK と決定する。

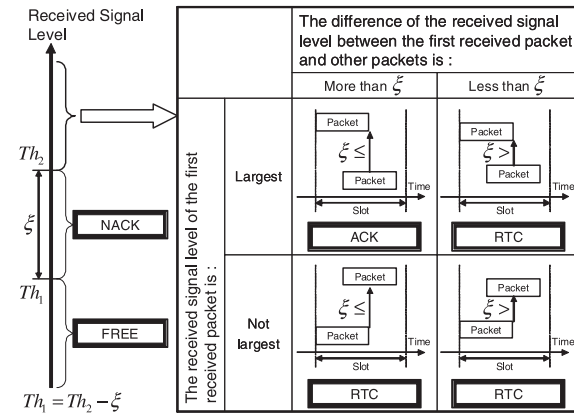


図 2 スロット情報の決定方法
Fig. 2 Decision method of slot information.

最後に、受信信号レベルが Th_2 以上の場合について述べる。この場合は、パケットの到着タイミングと受信信号レベルによって判断する。1 つのスロット内に、1 つのパケットしか受信しなかった場合は、正常受信と見なし、ACK と判断する。しかし、1 つのスロット内で、複数のパケットを受信した場合は、最初に受信したパケットの受信信号レベルが、それ以降受信したすべてのパケットの受信信号レベルと比較して最も大きく、かつ、閾値 ξ 以上のときのみ、捕捉効果（キャプチャ効果）が発生し、最初に受信したパケットが正常に受信できると仮定する。ここで、捕捉効果とは、同一のタイミングでパケットを受信し、パケット衝突が発生した場合においても、受信信号電力に十分な差があれば、最大の受信電力を持つパケットの受信が成功する可能性がある効果をいう。したがって、このときのスロット情報は、ACK と判断する。一方、これ以外の条件の場合は、パケットの衝突が発生したと判断し、図 2 のように、スロット情報を RTC と決定する。また、これらの閾値 (Th_1, Th_2, ξ) の関係は、

$$Th_1 = Th_2 - \xi \tag{1}$$

である。このような捕捉効果が発生した場合、自端末が送信したパケットが捕捉効果によって、受信に成功した端末からは ACK が返信されるため、隠れ端末のパケットとの衝突を検出することはできない。しかし、本論文で検討している通信形態は、周辺車両に対してブロードキャストパケットを送信する 1 対多通信のため、別の端末でパケットの衝突が検出で

きる可能性がある。したがって、捕捉効果が発生した場合でも、必ずしも隠れ端末の検出ができないというわけではなく、周辺にいくつか端末が存在していれば、それぞれの受信端末での受信状況が異なるため、隠れ端末の検出が可能であると考えられる。このことについては、後述の付録 A.1 で考察する。

また、別の方法として、文献 13) で提案されているように、フレーム情報に正しく受信したパケットの送信元 ID を含ませることによって、ある特定の車両間で正しくパケットが受信できない状態が続くデッドロックの発生を防ぐことも可能であると考えられる。

また、実際の通信機におけるスロット情報決定方法は、文献 18) で検討されている。ここでは、プリアンブル検出タイミングにおける受信信号強度を示す RSSI (Received Signal Strength Indicator) とパケット受信結果である FCS (Frame Check Sequence) のエラーの有無を用いることによって、ACK, RTC, NACK, FREE を判断している。パケット衝突が発生した場合、最初に受信したパケットの受信信号レベルが最も大きい場合でなければ、FCS エラーが発生するため、シミュレーション上で実現したスロット情報決定方法と同様な動作となる。

各端末の送信スロット決定方法は以下のとおりである。

(制御 1) 自端末が観測したフレーム情報、および、周辺車両から受信したすべてのフレーム情報から、スロット情報が FREE となっている任意の 1 スロットを選択する。ただし、FREE を示すスロットが存在しない場合には、周辺車両から受信したフレーム情報を使用せず、自端末が観測したフレーム情報のみを使用して、FREE となっている任意の 1 スロットを選択する。この場合でも、さらに FREE となっているスロットが存在しない場合は、フレーム情報を使用せずに、1 フレーム中のすべてのスロットの中から任意の 1 スロットを選択する。

(制御 2) 自端末が送信したスロットに対して、周辺車両から RTC を受信しなかった場合、スロットが予約されたものと判断し、次のフレームでも同じスロットで送信を行う。一方、1 つでも RTC を受信した場合は、パケット衝突が発生したと判断し、制御 1 に従い、次のフレームで空きスロットを選択して、送信を試みる。

これにより、隠れ端末とのパケット衝突を回避し、確実に通信可能な送信タイミング (スロット) の予約機構が実現できる。すなわち、高信頼で、かつ、周期的な送信を保證することが可能である。

3. 自律分散スロット同期制御による車群すれ違い時における性能評価

D-TDMA のような TDMA 型のアクセスの場合、スロット同期がとれていない状態では、通信品質が大きく劣化することが考えられる。そこで、本章では、文献 17), 19) において、検討している自律分散スロット同期制御を用いた場合について、同期アルゴリズムと通信性能との関係を明らかにする。評価環境として、自律分散のスロット同期の観点から通信性能劣化に最もつながらずと考えられる車群すれ違い時を取り扱う。

3.1 自律分散スロット同期アルゴリズム

文献 19) では、周辺端末の通信タイミングを観測することにより、自身の通信タイミングを調整し、周辺端末の通信タイミングとのずれの平均が最小になるようにする手法を用いている。また、文献 17) では、車群すれ違い時のようにスロット同期の観点で最も特性劣化が考えられる場合にも対応できるように拡張し、高速にスロット同期を収束させることを実現している。この手法のフローチャートを図 3 に示す。

この方法では、まず、プリアンブル検出タイミングから推定される周辺端末の通信タイミングを観測し、自端末の通信タイミングとのずれの平均 (τ) を算出する。この値 τ がガード時間 (T_G) に収まっていない場合 ($|\tau| \geq T_G/2$)、自端末の通信タイミングを τ だけ調整

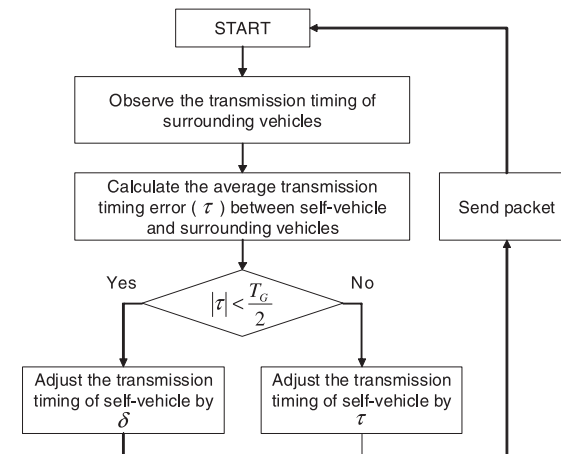


図 3 自律分散スロット同期アルゴリズム

Fig. 3 Self-adaptive timing synchronization algorithm.

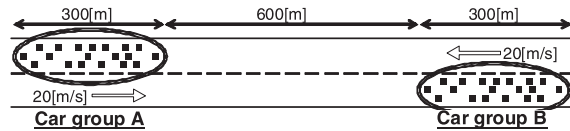


図 4 シミュレーションモデル
Fig. 4 Simulation model.

し、周辺車両のタイミングに合わせるように処理を行う。一方、 τ が T_G に収まっている場合 ($|\tau| < T_G/2$)、自身の通信タイミングを最も大きくずれている通信タイミングの方へ微小時間 (δ) だけ近づける。これは、すでにスロット同期が確立されている端末群が、大きく同期外れを起こしている端末の通信タイミングを観測した場合に、その端末のタイミングの方へ、端末群が少しだけタイミングを近づけることにより、スロット同期の高速化を実現している。 δ は、以下のように算出される。

$$\delta = \text{sgn}(\Delta + \tau) \times \min\left(\frac{\Delta + \tau}{2}, \frac{T_G}{4}\right) \quad (2)$$

ここで、 $\text{sgn}(x)$ は、 x の符号を示す整数値であり、 Δ は、周辺端末の通信タイミングのうち、最もタイミングがずれている端末とのタイミングずれ量である。また、 δ の最大値は、スロット同期が確立された端末群が、同期外れを起こさないように、ガード時間の $1/4$ ($T_G/4$) としている。

3.2 車群すれ違い時のシミュレーションモデル

片側 3 車線道路における車群すれ違い時を想定したシミュレーションモデルを図 4 に示す。これは、2 つの車群 (135 台/車群) が速度 20 m/sec. ですれ違う状況を示している。車群内の各車両は、完全に相対速度 0 で移動するものとし、平均車間距離を 7 m で、3 車線上にランダムに配置した。また、2 つの車群の車両台数比を等しくし、車両密度を高くすることによって、スロット同期の観点から通信品質劣化につながる厳しい状況を設定している。この理由は以下のとおりである。検討対象とした 2 つの同期アルゴリズム^{17),19)} は、ともに周辺端末の送信タイミングを観測し、自端末の送信タイミングとのずれの平均を算出することで、タイミングをそろえる動作としている。したがって、図 4 の 2 つの車群間のどこかで、両方の車群の先頭車両の送信パケットのプリアンブルが検出できる箇所に 1 台でも車両が存在する場合は、その車両と 2 つの車群が互いに送信タイミングのずれを検出し、同期アルゴリズムに従って、すべての車両の送信タイミングの同期がとれることになる。つまり、2 つの車群間に車両が存在しないような状況が、タイミング同期を確立するのに困難

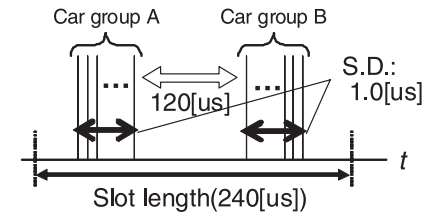


図 5 スロット同期タイミングの初期状態
Fig. 5 Initial states of slot timing.

な状況であると考えられる。また、これらの同期アルゴリズムでは、2 つの車群の台数比が大きく異なるほど、多い台数の車群の送信タイミングに、より早く近づいていく動作となるため、2 つの車群のタイミング同期を確立する時間が短くなる。したがって、両方の車群の台数比を等しくし、ともに台数が多い場合を想定した環境が、2 つの車群のタイミング同期を確立するのに時間のかかる環境であると考えたためである。このとき、各車群でのスロット同期タイミングの初期状態を図 5 に示す。車群間では $1/2$ スロット時間の同期ずれ (同期ずれの最大量) があり、車群内ではガード時間に収まる範囲で一様に同期ずれが存在するように設定している (標準偏差を $1.0 \mu\text{sec.}$ と設定)。

通信シミュレーションは、ネットワークシミュレータである ns-2²⁰⁾ を用いて構築した。評価におけるシミュレーション諸元、D-TDMA プロトコルパラメータをそれぞれ表 1 と表 2 に示す。本論文では、物理レイヤは、文献 21) の 700 MHz 帯を用いた実験用ガイドラインを参考にした。また、変調方式は、プリアンブル部は BPSK、データ部については 16 QAM とし、最低受信感度は文献 22) を参考にして決定した。今回は、MAC プロトコルの性能比較という観点から、物理レイヤにおけるパケット誤りはないものとした。

さらに、検討対象とするアプリケーションでは、各車両が周期的に情報を送信することを想定しており、この送信周期を 99.84 msec. と固定した。

シミュレーション内のすべての車両は乗用車を想定し、送受信のアンテナ高はすべて 1.5 m とした。電波伝搬モデルとしては、低いアンテナ高を想定し交差点での電波伝搬をモデル化した市坪モデル²³⁾ の見通し内の式を使用する。文献 23) では、送受信点の見通し内距離 (d) が、ある距離を境に、伝搬損失が距離の 2 乗から距離の 4 乗で増加し傾斜が変わる位置が存在することが示されている。この伝搬損失の傾斜が変わる位置をブレイクポイント (b_p) と呼ぶ。受信電力は、800 MHz での電力損失 (L) の近似式である式 (3) と式 (4) を用いて算出する。

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation conditions.

items	values
Bandwidth	10 MHz
Data rate	12 Mbps
Modulation	16 QAM / OFDM
Coding rate	1/2
Data bits per OFDM symbol	96 bits
PLCP preamble duration	32 μ sec.
Symbol interval	8 μ sec.
Radio frequency	800 MHz
Transmission power	20 dBm (100 mW)
Receive threshold (16 QAM; Th_2)	-77.0 dBm
Receive threshold (BPSK; Th_1)	-85.0 dBm
Capture threshold (ξ)	8 dB
Data size	100 bytes
Transmission period	99.84 msec.
Antenna height	$h_t = h_r = 1.5$ m

表 2 D-TDMA プロトコルパラメータ
Table 2 Parameters in D-TDMA protocol.

parameters	values
Packet length (L_P)	208 μ sec.
Guard time (T_G)	32 μ sec.
Slot length ($L_P + T_G$)	240 μ sec.
Frame period	99.84 msec.
Number of slot (N)	416
Frame information ($2N$)	832 bits

$$L = \begin{cases} 20 \log d + 54.3 - 15.5 \log W & (d < b_p) \\ 20 \log b_p + 43.3 \log \frac{d}{b_p} + 54.3 - 15.5 \log W & (d \geq b_p) \end{cases} \quad (3)$$

$$b_p = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (4)$$

ここで、 λ は波長を示し、 h_t 、 h_r は、それぞれ送受信のアンテナ高である。また、 W は道路幅であり、片側 3 車線道路を想定しているため 27 m とした。これらの条件から、通信可能距離は約 210 m、プリアンブル検出可能距離は約 350 m となる。シミュレーションでは、車群が移動し、車群の先頭車両どうしがプリアンブル検出可能となった時刻からスロット同

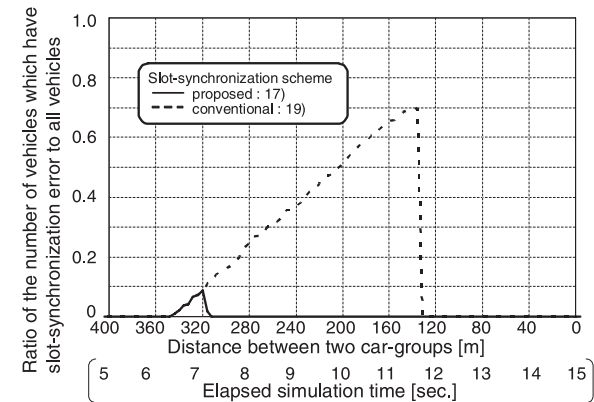


図 6 スロット同期が確立できていない車両の割合

Fig. 6 Ratio of the number of vehicles which have slot-synchronization error to all vehicles.

期タイミングの調整を開始するため、2つの車群間の距離が約 350 m の地点からタイミング調整を行うこととなる。したがって、スロット同期ずれが発生する状態から同期収束までの状態を考慮した D-TDMA 方式の通信品質評価を行う。

3.3 スロット同期処理を考慮したシミュレーション結果

図 6 および図 7 は、それぞれ、車群間の距離に対して、スロット同期が確立できていない車両の割合、および、D-TDMA の全車両に関する平均パケット誤り率を示したものである。図における提案手法は、文献 17) の車群すれ違い時に対応させた手法である。一方、従来手法は、文献 19) のタイミング平均化手法を示している。ここで、スロット同期が確立しているか否かの判定は、車両ごとに行っており、各車両自身の通信タイミング、および、それぞれの周辺車両の通信タイミングがガード時間 ($T_G = 32 \mu$ sec.) に収まっているとき、その車両はスロット同期が成立しているものと見なしている。

これらの図において、提案のスロット同期手法では、約 1 秒程度で全車両のスロット同期が完了し、D-TDMA の通信品質の劣化が短時間に抑えられていることが確認できる。また、平均的な特性だけでなく、車両ごとの連続的なパケット誤りを評価するため、図 8 と図 9 に、提案のスロット同期手法に関して、車両ごとのパケット誤り発生の有無、および、連続パケット誤りに関する車両台数分布を示す。図 8 は、シミュレーション時間 6 秒～8 秒において、シミュレーション内の車両 270 台の車両ごとにパケット誤りが発生したタイミングを 1 フレーム刻みでプロットしている。なお、シミュレーション結果から、各プロット

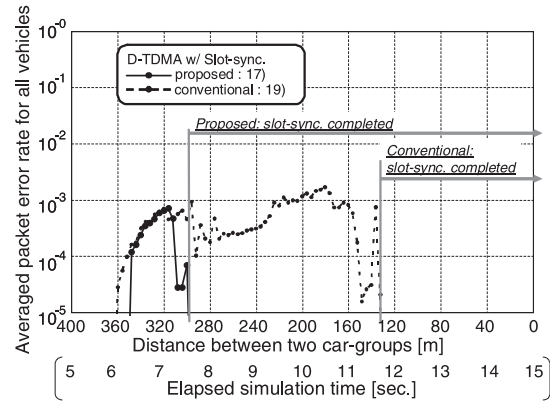


図 7 平均パケット誤り率

Fig. 7 Average packet error rate for all vehicles.

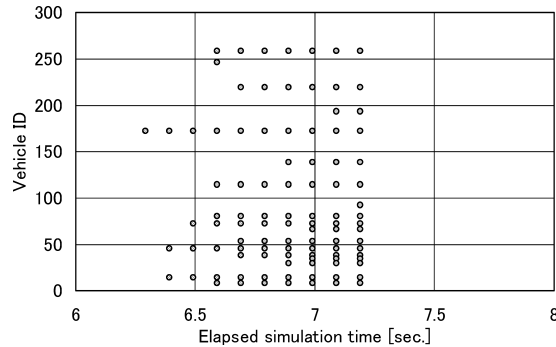


図 8 車両ごとのパケットエラー発生タイミング

Fig. 8 Packet error timing on each vehicle.

には、1つのパケット誤りのみが発生していることを確認した。また、図9は、各車両において発生した連続誤りの数に関する車両台数分布を示している。これらによると、観測された連続誤りは、最大10フレーム（約1秒間）発生していることが分かる。

以上の結果より、最大で約1秒間のパケット誤りが発生するが、パケット誤りの発生する車群間の距離を確認すると、通信可能エリアである約210mよりも離れた地点でスロット同期が確立できることが分かり、通信品質に大きな影響を及ぼさないといえる。

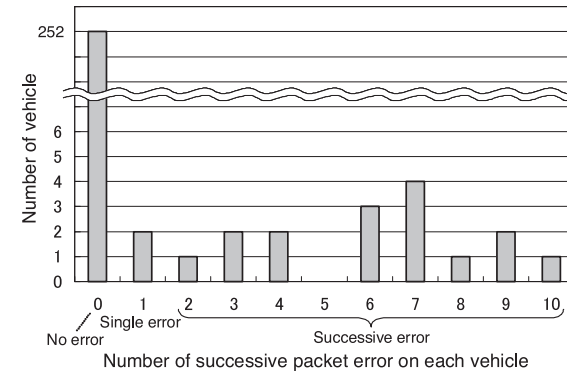


図 9 車両ごとの連続パケット誤りに関する車両台数分布

Fig. 9 Histogram of number of successive packet error on each vehicle.

3.4 スロット同期性能と通信品質に関する考察

これまでのシミュレーション結果より、車群の台数（密度）や移動速度などにもよるが、スロット同期という観点では、最も厳しいと考えられる車群すれ違い時においても、文献17)で提案されている自律分散スロット同期アルゴリズムを適用することによって、高速にスロット同期が確立され、通信品質に大きな影響を与えないことが確認できた。

また、本論文で対象としているシステムにおいては、GPS受信機から取得できる位置情報を交換するため、すべての車両がGPS受信機を搭載していることを想定している。文献24)によると、時刻同期用のGPS受信機では、協定世界時（UTC：Coordinated Universal Time）に $1\mu\text{sec}$ の精度で同期した1秒パルス信号（1PPS：1 Pulse Per Second）が取得できる。このようなGPS受信機を用い、すべての端末が1PPSを利用することにより、衛星が確認できる環境下では、完全にスロット同期をとることが可能である。それ以外の環境、すなわち、トンネル出入口付近など限られた環境においては、文献17)で提案されている同期アルゴリズムによって、タイミング同期を確立することを想定している。したがって、このような限られた場所において、同期タイミングがずれた車群がすれ違うという環境は、まれな状況であると考えられる。

さらに、文献25)では、地上デジタル放送のガードインターバルのタイミングを検出することによって、平均CNR（Carrier-to-Noise Ratio）が0dB程度というワンセグ放送ですら受信不可能な環境下においても約 $10\mu\text{sec}$ 以内の精度で、1.134msec. 間隔のタイミング

パルスを取得することができる。

スロット同期が確立されるまでの過渡状態時の通信品質劣化については、このような GPS や地上デジタル放送などの外部信号から得られるタイミングパルスと、文献 17) で提案されている自律分散スロット同期アルゴリズムとを併用することによって、影響が軽減されることが考えられる。

したがって、以後、本論文では、スロット同期が確立された状態で、車車間通信が継続されている場合を想定し、各車両が移動している状況において、隠れ端末問題の影響を評価することを目的とする。

4. アプリケーションレベル QoS を評価するためのシミュレーションモデル

本論文では、安全運転支援システムとして、右折待ち時において、対向車の接近情報を右折待ち車両に提供する右折事故防止支援サービスを取り扱う。そして、アプリケーションレベル視点での通信品質特性をアプリケーションレベル QoS として定義し、サービス開始タイミングやサービスの情報更新精度を評価する。そこで、本章では、数千台規模の評価シミュレーションで用いる道路、交通流、電波伝搬モデルについて概説する。

4.1 道路および交通流モデル

道路モデルは、ASV において検討されている東京都銀座市街地の道路配置と車線数を参考にしたモデル⁵⁾を用いた。この道路モデルは、図 10 に示すように、1,500m 四方で 50m 方形メッシュの道路配置となっており、片側 3 車線の幹線道路 (図 10 右側の実線) と片側 2 車線の主要道路 (図 10 右側の二重線) を 200m ごとに配置している。また、片側 1 車線

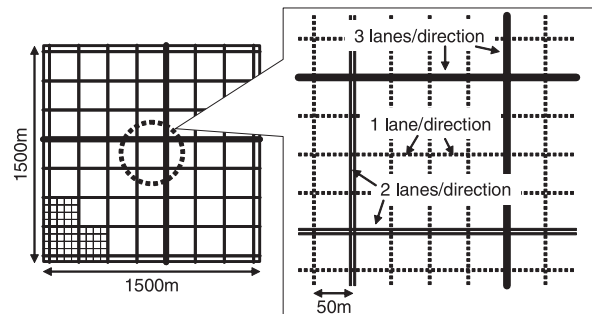


図 10 シミュレーションにおける道路モデル
Fig. 10 Road models in computer simulation.

の細街路は図 10 右側の点線である。

実際の交通環境を想定した評価を実現するため、文献 26) の交通流シミュレーション (NETSTREAM) と通信シミュレーションとを連携させた。NETSTREAM には、道路ネットワーク、信号データ、車両の出発地 (Origin)/目的地 (Destination) を表す OD 交通量データを入力する。道路ネットワークは、前述した道路モデルである。信号データは、幹線道路および主要道路の交差点に信号を配置し、サイクル長は 2 分と設定した。また、車両の出発地、目的地は、道路モデルの外周に存在していると仮定している。

さらに、通信シミュレーションについては、3.2 節と同一の ns-2 を用いているため、物理レイヤにおけるパケット誤りはないものとしている。これは、本論文では、MAC プロトコルの通信性能を、アプリケーション視点での QoS 評価指標を用いて評価することを目的としているため、物理レイヤでの誤りを考慮していないシミュレーションを用いることで、MAC プロトコル性能と物理レイヤの性能とを切り分けて議論する。したがって、アプリケーションそのものの有効性などを評価する場合には、物理レイヤでの誤りを考慮して評価することが必要であり、今後の課題として考えている。

4.2 電波伝搬モデル

3.2 節同様、電波伝搬モデルとしては、低いアンテナ高を想定し交差点での電波伝搬をモデル化した市坪モデルを用いる²³⁾。市坪モデルは、実際の市街地 (茅場兜地区: 7 階建て程度の建物が均一に並び、10~30m の道路幅の道路が碁盤目状に配置されている) において 800 MHz と 1,400 MHz で測定した結果を基に重回帰分析によって求められた近似式である。これは、電波伝搬における電力の距離減衰をブレイクポイント (b_p) の前後で 2 つに分けて直線 (対数) で近似している。今回検討対象としている道路モデル (銀座市街地の道路配置) に合致しているため、このモデルを使用する。

しかし、市坪モデルは見通し内/外の境界で不連続となり、送受の位置関係を把握するための計算も必要となるため、大規模な通信シミュレーションにそのまま適用することは、現実的ではない。そこで、このような問題を解決するために等電力線を簡易関数で近似する。

一般的な 2 次元空間での電波伝搬を考える場合、等電力線は送信点を中心とした同心円を考えることが多い。しかしながら、車車間通信のように、低アンテナ高での伝搬では道路に沿った建物による遮蔽が発生するため、同心円状ではなく星型状に広がることが知られている²⁷⁾。

星型の形状を持つ関数は多数考えられるが、式 (5) の関数を用いて等電力線を近似する。

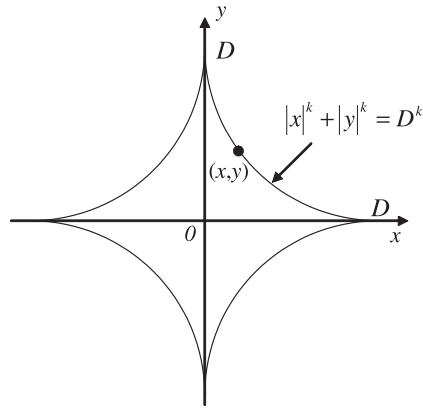


図 11 電波伝搬モデルの等電力線モデル
Fig. 11 Propagation model.

$$|x|^k + |y|^k = D^k \quad (k < 1) \quad (5)$$

ここで、 x, y は、送信点に対する受信点の相対座標 (x, y) を示し、 D は見通し内相当距離であり、送信点から星型の頂点までの距離を表す。また、ASV で対象としている距離（約半径 300 m 以内）において市坪モデルとの良い近似特性を得るためには、 $k = 0.6$ 程度と設定すると良いことを確認した。図 11 に、原点を送信点とした場合の受信点 (x, y) の等電力線モデルを示す。

受信電力は、送受信点の各座標から、星型モデルの頂点座標（見通し内相当距離： D ）を求め、前述した式 (3) と式 (4) の見通し内距離 d を見通し内相当距離 D に置き換えて電力損失 (L) を算出する。

ここで、前述した道路ネットワークモデルを用いて、伝搬モデルの検証を行う。図 12 と図 13 に、それぞれ、市坪モデルを基に算出した伝搬損失値と提案する等電力星型近似モデル ($k = 0.6$) を用いた伝搬損失値を示す。また、アンテナ高は、送受信ともに 1.5 m と設定した。

これらの図より、市坪モデルで見られる不連続性が星型近似モデルでは解消されていることが分かる。また、送信点からの距離が 300 m 程度までのエリアでは両モデルはおおむね同様な値となる。一方、さらに送信点から離れると市坪モデルと星型モデルの計算値に違い

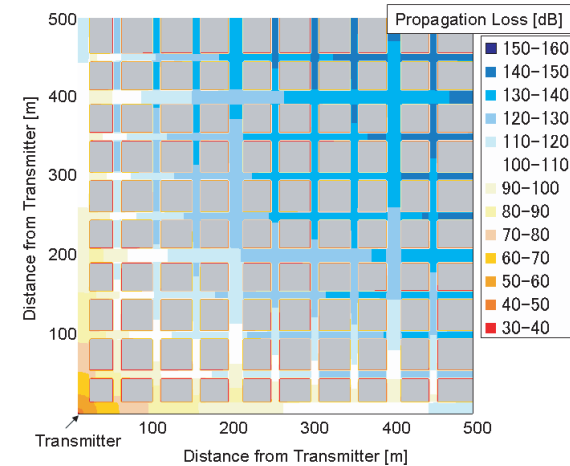


図 12 市坪モデルで算出した伝搬損失
Fig. 12 Propagation loss using Ichitsuho model.

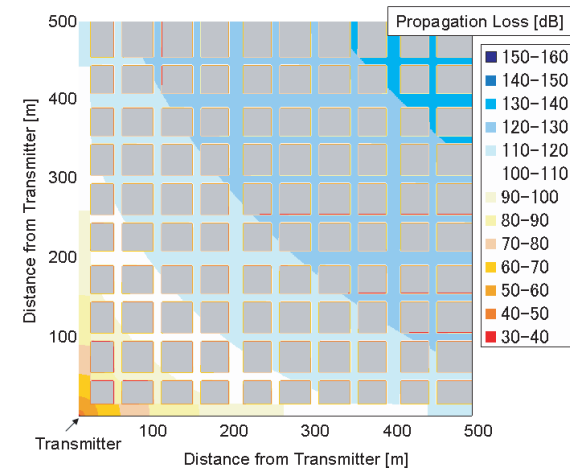


図 13 簡易等電力星型近似モデル ($k = 0.6$) を用いた伝搬損失
Fig. 13 Propagation loss using proposed model.

が生じるが、損失量が大きいため、シミュレーション結果に与える影響は少ないと考える。

以上より、本論文で提案した伝搬モデルは、任意の2つの端末（たとえば、以下、端末Aと端末Bで説明する）に着目した場合、車両の移動がなければ、端末Aがパケットを送信したときの端末Bにおける受信電力と、端末Bがパケットを送信したときの端末Aにおける受信電力が等しくなる（対称）環境を想定している。しかし、シミュレーションでは、交通シミュレーションと連携しているため、各車両は移動し、ブロードキャストパケットを送信するタイミングも2つの端末間で異なる。つまり、端末Aが送信したパケットが端末Bで受信に成功したとしても、端末Bがパケットを送信するまでに、これらの端末は移動しているため、端末Aでは受信できないことが発生する可能性がある。したがって、端末の移動にともない、受信電力の関係は時間経過によって非対称となることをシミュレーションでは実現して、MACプロトコルの特性を評価している。

5. アプリケーションレベル QoS のための性能評価指標の提案

まず、パケットレベルの通信品質を評価するための評価指標としては、パケット到達率を取り扱う。本章では、さらにアプリケーションレベル QoS（安全運転支援システムの成立性）を評価するための評価指標を提案する。安全運転支援システムでは、事故防止可能な地点で相手車両が存在することの情報を得ることができ、かつ、相手車両の挙動やその挙動変化を確実に把握することが必要である。これを基にし、図14に示すコンセプトで、2つの評価指標を提案する。ここで、評価指標コンセプトとしては、対向車接近情報をどの地点で初めて右折待ち車両に提供できるのか（サービス開始タイミングの評価）、また、サービス開始後、右折待ち車両が、どれくらいの精度で対向車の挙動を把握し続けることが可能な

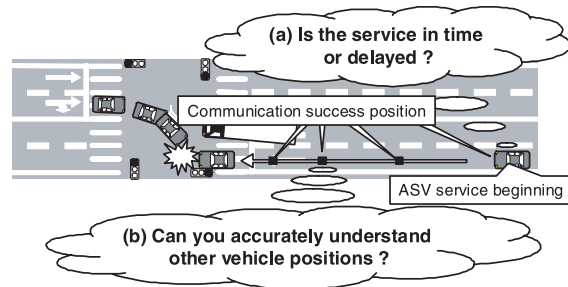


図14 予防安全サービスのための評価指標コンセプト
Fig. 14 Concept of performance measures for safety service.

か（サービスの情報更新精度）について評価する。

1つは、図14(a)のように、運転者に対してASVで想定している予防安全サービスを提供開始する地点が間に合っているか否かを示す初回相手車両把握地点である。もう1つは、図14(b)に示すように、通信によって相手車両が正確に把握できるか否かを示す、相手車両の挙動把握頻度を評価するための最大情報更新距離である。図の場合は、右折待ち車両が第1当事者の車両、対向直進車両が第2当事者の車両である右折事故を想定している。ここで、車両および運転者に限定した場合（歩行者や構造物を除く）、第1当事者とは、交通事故に関与した車両の運転者であり、事故における過失の重いもの、すなわち、交通事故の主たる原因を作った側を指す。一方、第2当事者とは、事故に関与した車両の運転者のうち、第1当事者以外のもの、すなわち、事故に巻き込まれる側（対向直進車両の運転者）を示す。そこで、本論文で対象とする右折事故防止支援サービスは、この事故を防止するため、交通事故の主たる原因を作った側である右折待ち車両の運転者に対して、対向直進車両の接近情報を伝えるというサービスを考えている。したがって、対向直進車両が送信したパケットについて、右折待ち車両での受信品質を評価することになる。以下、本論文で評価する右折事故シーンは、すべて同じ当事者の関係とする。

これら2つの評価指標について、定義を以下に述べる。

5.1 初回相手車両把握地点

ASVでは、想定事故シーンごとの適用上限車両速度、車両の減速度、情報提供・運転者反応時間などを基にして、事故シーンごとにサービス提供を開始する地点を定めている。車両の減速度は、普通車の場合は $0.2g$ 、大型車の場合は $0.1g$ としている。ここで、 g は重力加速度 (m/s^2) を表している。また、情報提供・運転者反応時間は、システムが運転者に対して情報提供を開始する時刻から運転者が反応を開始するまでにかかる時間を表したものであり、ASVでは4秒と設定されている²⁸⁾。

これらの数値を用いて以下の式により、サービス提供開始地点を算出している。

$$L_s = \frac{V^2 - V_t^2}{2\alpha} + (V - V_t)T \quad (6)$$

ここで、 L_s はサービス提供開始地点 (m) であり、 V および V_t は、それぞれ適用上限車両速度 (m/s)、目標車両速度 (m/s) を示している。また、 α は車両の減速度 (m/s^2) である。さらに、 T は、情報提供・運転者反応時間 (s) を表している。

具体的な数値例として、乗用車の右折事故シーンを取り上げる。右折事故の場合、適用上限車両速度は、直進側は70km/hと設定しており、事故発生地点までに停止することを前

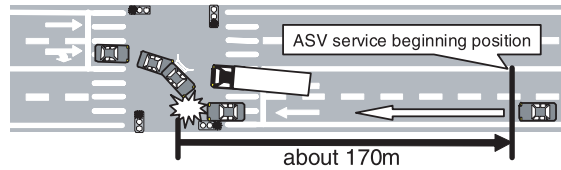


図 15 右折事故シーンにおける ASV サービス提供開始地点
Fig. 15 ASV service beginning position in right turn collisions.

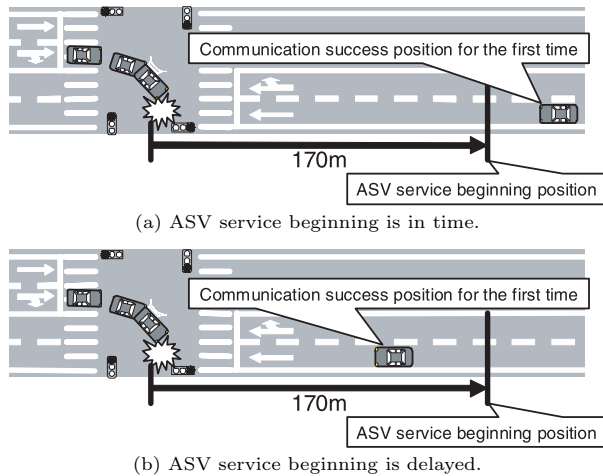


図 16 初回相手車両把握地点とサービス提供開始地点との関係

Fig. 16 Communication success position for the first time and ASV service beginning position.

提としている．すなわち，目標車両速度 $V_t = 0$ であり，式 (6) から算出すると，サービス提供開始地点は 172 m となる．しかし，実際の事故発生地点は正確には定義できないため，ASV では，図 15 に示すように，交差点中央付近から約 170 m 地点をサービス提供開始地点と定義している．

このサービス提供開始地点に到達するまでに，最低限 1 回は通信が成立しなければ，システムが運転者に情報を提供することはできない．そこで，右折待ち車両が，初めて直進車両を通信によって把握できた相対位置（初めて通信が成功した相対位置）をアプリケーションレベル QoS 評価指標の 1 つとして提案する．これを初回相手車両把握地点と定義する．図 16(a) のように，この値がサービス提供開始地点よりも遠方の位置であれば，右折事故

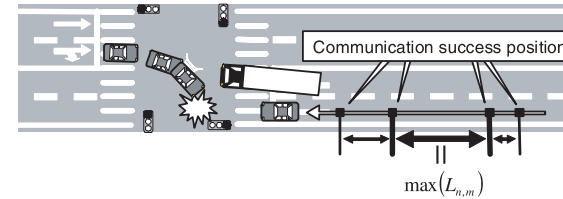


図 17 最大情報更新距離の定義

Fig. 17 Definition of maximum distance between two successful communications.

シーンを想定した予防安全サービスの提供が可能である．一方，図 16(b) のように初回相手車両把握地点がサービス提供開始地点よりも手前であれば，運転者への情報提供が遅れ，右折事故シーンに対応できない車両ということになる．

また，本論文では，右折車両が右折待ちで停止した時点サービスをサービス開始時点とする．しかし，右折車両が右折待ちで停止した時点で，すでにサービス開始地点の 170 m 以内にも車両が存在することがあるが，これらの車両は評価対象外とし，右折車両からの通信範囲に新たに進入してくる対向直進車両を初回相手車両把握地点の評価対象車両とする．

5.2 最大情報更新距離

安全運転支援システムでは，通信によって相手車両をつねに把握できる必要がある．しかし，周期的な情報送信を試みたとしても，通信に失敗した場合には，相手車両を把握することができない．特に，連続して通信が失敗した場合，仮に，過去に通信成功した情報を基にして相手車両位置を予測したとしても，精度は悪くなってしまふ．そこで，安全サービスという観点から，連続して情報伝達できなかった区間を検討する．

ASV では，約 5 m の移動ごとに相手車両を把握できることを目標としている．これをどの程度の車両が満たしているかを評価するための評価指標が最大情報更新距離である．まず， n 番目のパケット通信が成功し，次に通信成功したパケットは m 番目であると仮定する． n 番目のパケット通信時の送受信車両の位置をそれぞれ， (x_n^t, y_n^t) ， (x_n^r, y_n^r) とすると，パケット通信が成功した時間間隔における送受信端末間の相対距離の変化量 $L_{n,m}$ は，

$$L_{n,m} = \left| \sqrt{(x_n^t - x_n^r)^2 + (y_n^t - y_n^r)^2} - \sqrt{(x_m^t - x_m^r)^2 + (y_m^t - y_m^r)^2} \right| \quad (7)$$

である．この値が，つねに約 5 m 以内を満たしていれば，ASV の示しているサービスを満足できる．

図 17 に最大情報更新距離の定義を示す．右折事故シーンを想定した場合，情報を受信

すべき車両は右折待ち車両と考え、評価時間内において、各直進車両と右折待ち車両間の $L_{n,m}$ の最大値 $\max(L_{n,m})$ を最大情報更新距離と定義する。ここで、評価対象となる車両は、初回相手車両把握地点の評価対象車両のうち、サービス開始後の右折車両からの距離が 170 m 以内に進入してきた車両とする。この車両のうち、最大情報更新距離が 5 m 以内を満足している車両台数割合を評価する。これを、もう 1 つのアプリケーションレベル QoS 評価指標として提案する。

6. シミュレーション結果

これまでに述べたシミュレーション評価環境を用いて、CSMA/CA と D-TDMA のパケットレベルの通信品質評価、および、アプリケーションレベル QoS の評価を行う。シミュレーション条件、および D-TDMA プロトコルパラメータは、それぞれ、前述した表 1、および表 2 のとおりである。また、比較対象方式である CSMA/CA のパケット長、コンテンションウィンドウサイズ、キャリアセンス感度の閾値を表 3 のとおり設定した。これらの値は、文献 21)、22) を参考にして決定している。さらに、捕捉効果については、D-TDMA と同様に取り扱い、図 2 に示す 4 つの受信状態のうち、D-TDMA においてスロット状態を ACK と判断する状況（最初に受信したパケットの受信信号レベルが、それ以降受信したすべてのパケットの受信信号レベルと比較して、閾値 ξ 以上の場合）のみ捕捉効果により、最初の受信パケットが正常に受信できるものとして取り扱う。なお、本章においても、物理レイヤにおけるパケット誤りはないものとしている。

6.1 パケットレベルの通信品質評価

まず、通信トラヒックに対する統計的な特性評価を行う。シミュレーションにおける道路ネットワークの中央 600 m 四方に存在する全車両についてのパケット到達率を評価する。ここでは、通信トラヒック量を可変させるため、シミュレーションにおける総車両台数を約 2,000 台から約 5,500 台まで変化させた。

図 18 に通信トラヒックに対するパケット到達率を示す。ここで、通信トラヒックは、各

表 3 CSMA/CA プロトコルパラメータ
Table 3 Parameters in CSMA/CA protocol.

parameters	values
Packet length	128 μ sec.
Contention window size	15 (fix)
Carrier sense threshold (= Th_2)	-77.0 dBm

車両が 1 秒間で観測した平均パケット数と定義する。図より、今回評価対象とした、通信トラヒックの範囲内では、D-TDMA のパケット到達率が、CSMA/CA のそれよりも大きな値となっていることが分かる。これは、CSMA/CA では、隠れ端末問題により通信品質が大きく劣化するのに対し、D-TDMA では、FI を用いた隠れ端末問題への対策を行うことにより、品質劣化を防いでいるためである。また、通信トラヒックが 1,500 packets/sec. を超えると、D-TDMA の通信品質も徐々に劣化していることが確認できる。これは、車両の移動にともない送信スロットが重なった車両とのパケット衝突が生じ、送信スロットの変更が多数発生するようになるためである。

さらに、高負荷時においては、空きスロットが存在しなくなり D-TDMA の通信品質が大きく劣化する恐れがある。そこで、表 4 に、シミュレーションエリア内に約 8,000 台の車両が存在する環境における通信トラヒックおよび通信性能を示す。

まず、表 2 の D-TDMA プロトコルパラメータであるスロット数 ($N = 416$) より、1 秒間のスロット数は 4,166 となる。シミュレーション結果の表 4 より、D-TDMA の通信トラヒックは 6,739 となり、スロット数よりも多くなっているため、FREE のスロットが存在し

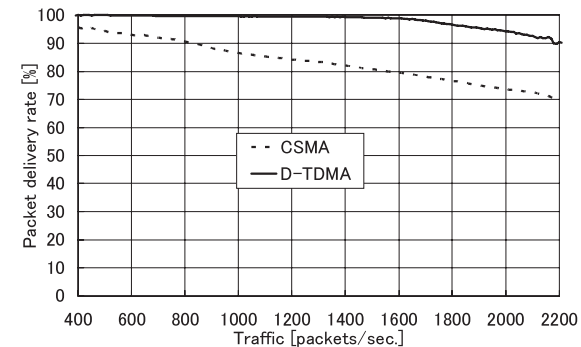


図 18 通信トラヒックに対するパケット到達率
Fig. 18 Packet delivery rate with respect to traffic.

表 4 高負荷時におけるシミュレーション結果
Table 4 Simulation results in high traffic.

	Traffic [packets/sec.]	Packet delivery rate
CSMA/CA	4,695	34%
D-TDMA	6,739	16%

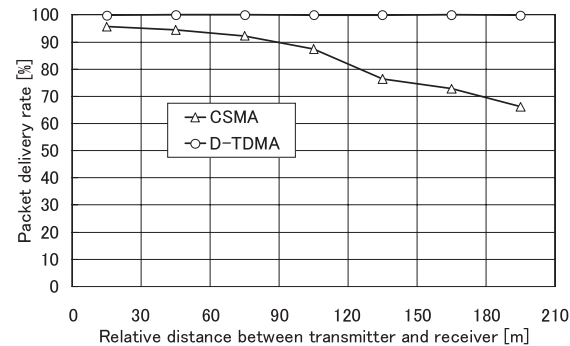


図 19 右折事故における相対距離に対するパケット到達率

Fig. 19 Packet delivery rate with respect to relative distance in right turn collisions.

ない環境となっていることが確認できる。CSMA/CA の通信トラヒックは、D-TDMA のそれよりも小さくなっている。この理由は以下のとおりである。D-TDMA は、前述したように FREE となっているスロットが存在しない場合、すべてのスロットの中から任意の 1 スロットを選択して、送信するため、必ず 1 フレームに 1 度送信される。一方、CSMA/CA は、キャリアセンス制御やバックオフ制御により、送信遅延が発生するため、1 秒間で観測する平均パケット数が小さくなる。

また、D-TDMA のパケット到達率は CSMA/CA のそれよりも劣化している。これは、通信トラヒックが D-TDMA の方が多くなっているだけでなく、CSMA/CA は高負荷時でも、キャリアセンス可能エリアの車両とのパケット衝突を回避できるが、D-TDMA は、FREE となっているスロットが存在しない場合、任意のスロットを選択するため、ランダムに送信するような状況となり、パケット衝突が発生するためである。しかし、このような状況では、文献 28) で提案されている車両速度に応じて送信周期を可変する送信周期制御を用いて、通信トラヒックを抑えることを考えているため、以降では、本論文の評価対象外とする。

次に、右折事故シーンに限定した通信品質の評価を行う。ここでは、シミュレーションにおける総車両台数が約 4,300 台 (図 18 の通信トラヒックが約 1,500 packets/sec.) の場合について評価する。シミュレーションでは、すべての車両が送受信を行っているが、右折事故シーンに限定するため、直進車両が情報を送信し、右折待ち車両が受信に成功した確率を評価している。

図 19 に右折事故における送受信間の相対距離に対する送受信間距離 30 m ごとの平均パ

ケット到達率を示す。図より、CSMA/CA は送受信間の距離が離れるに従って、パケット到達率が低下しているが、D-TDMA は 99.8% から 100% の値を示していることが分かる。これは、送受信間距離が離れるにつれて、隠れ端末の割合が多くなり、CSMA/CA では、隠れ端末問題を回避できないため、特性が劣化する。一方、D-TDMA は、隠れ端末問題への対策を行っているため、パケット衝突を防ぎ、送受信間の距離には依存しない高品質な特性が得られるためである。

6.2 アプリケーションレベル QoS 評価 (安全運転支援システムの成立性評価)

ここでは、アプリケーションレベル QoS を評価するため、右折事故シーンを取り上げ、5 章で提案した安全運転支援システムの成立性評価のための 2 つの評価指標を用いる。ここでは、シミュレーションにおける総車両台数が約 4,300 台の場合を用いる。

まず、初回相手車両把握地点の評価を行うため、幹線道路を走行する車両から無作為に 20 台を抽出し、右折事故シーンを想定して、対向車線の車両と初めて通信が成功した位置を評価する。ただし、抽出した車両は、周辺車両からの干渉の影響を考慮するため、シミュレーション道路モデルの中央 600 m 四方に存在している車両から選択している。なお、本論文で提案している電波伝搬モデルおよび、シミュレーションの最低受信感度の設定より、通信可能な距離は、交差点中央から約 210 m である。

図 20 に交差点中央からの距離に対する初回相手車両把握地点を示す。縦軸は、幹線道路の対向車線の各車線を表している。図 20 (a) より、CSMA/CA の場合は、評価対象車両のうち約 2% の車両が、右折待ち車両から ASV サービス提供開始地点である 170 m の距離以内で初めて通信が成功する状況となっている。これは、図 19 の送受信間の距離が離れるに従って、隠れ端末問題の影響が大きくなり、パケット到達率が低下するためである。したがって、CSMA/CA では、隠れ端末問題によって、連続して通信に失敗し、初めて通信に成功する位置が ASV のサービス提供開始地点より手前になることが発生するため、ASV の右折事故サービスには対応できない場合が存在するといえる。

一方、図 20 (b) より、D-TDMA の場合は、すべての車両が、通信可能距離である 210 m 付近で最初の通信が成立していることが確認できる。したがって、D-TDMA は隠れ端末問題への対策によって、全車両が ASV の右折事故サービスの開始が間に合うといえる。

次に、図 21 に、右折事故における最大情報更新距離を評価する。図は、最大情報更新距離の確率分布と累積確率についての車両台数割合を示している。

図 21 より、CSMA/CA の確率分布は、最大情報更新距離 40 m まで広がっているのに対し、D-TDMA のそれは、99.8% の車両が 8 m 以内となっていることが分かる。これは、

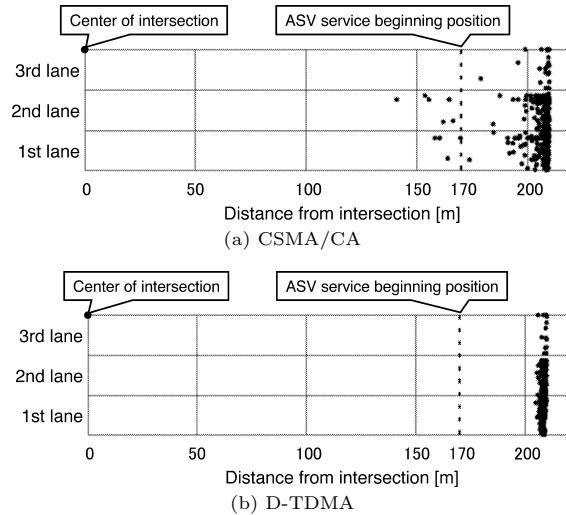


図 20 右折事故における初回相手車両把握地点

Fig. 20 Communication success position for the first time in right turn collisions.

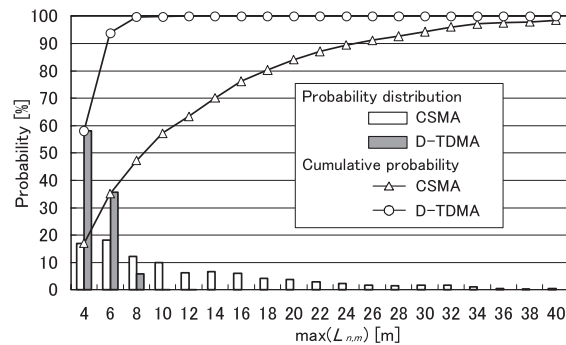


図 21 最大情報更新距離の確率分布と累積確率

Fig. 21 Probability distribution and cumulative probability of maximum distance between two successful communications.

CSMA/CA では、隠れ端末問題により、連続して通信に失敗する車両が多数存在するためである。ASV のサービス要件を満たす最大情報更新距離 5 m 以内を満たしている車両台数の割合について累積確率を比較すると、CSMA/CA は 27%の車両だけが満足するのにに対し、

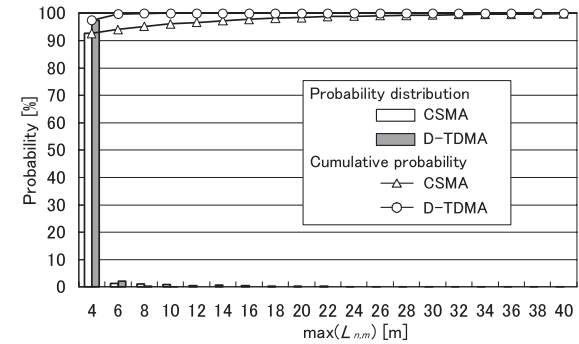


図 22 最大情報更新距離の確率分布と累積確率 (70 km/h 以下の車両)

Fig. 22 Probability distribution and cumulative probability of maximum distance between two successful communications (vehicle speed is 70 km/h or less).

D-TDMA は 84%の車両が満足する。また、D-TDMA プロトコルについて、90%以上の車両が満足する最大情報更新距離の値は 5.5 m であるため、さらなる品質向上を目指し、方式改良などの検討が必要であるといえる。

次に、サービス提供開始地点内でのパケット到達率は、図 19 より、99.8%から 100%を示しているにもかかわらず、最大情報更新距離が大きくなっている原因について考察する。5.1 節で述べたように、右折事故防止支援サービスの対向直進車両の適用上限車両速度が 70 km/h と設定していることを考慮し、最大情報更新距離の評価対象車両のうち、70 km/h 以下の車両のみに関する最大情報更新距離の確率分布と累積確率を図 22 に示す。図 22 より、ASV のサービス要件を満たす最大情報更新距離 5 m を満たしている車両台数の割合について、累積確率を比較すると、CSMA/CA は 93%、D-TDMA は 99%となっていることが分かる。すなわち、速度が速い対向車両が送信したパケットが隠れ端末とのパケットと衝突した場合に、最大情報更新距離が大きくなるといえる。

以上の結果より、隠れ端末問題への対策は、初回の通信成立を通信可能エリアの境界付近で実現できるだけでなく、連続して通信に失敗することを防ぐことも可能である。すなわち、車車間通信を用いた安全運転支援システムにおいて、高信頼な通信を実現し、安全サービスの成立を実現するためには、隠れ端末問題への対策は必要不可欠であるといえよう。

7. む す び

本論文では、交差点事故削減を目的とする安全運転支援システムを想定し、高信頼な車車

間通信を実現するための MAC プロトコルの性能評価を行った。特に、D-TDMA に関しては、自律分散スロット同期アルゴリズムと通信性能との関係を示した。また、これまでの検討の多くは、パケットスループットや誤り率などパケットレベルの通信品質のみが評価されてきたが、本論文では、安全アプリケーションという観点から、パケットレベルの通信品質だけでなく、アプリケーションレベル QoS (安全運転支援システムの成立性) について評価した。特に、アプリケーションレベル QoS を評価するための評価指標として、初回相手車両把握地点と最大情報更新距離という 2 つの新しい指標を提案し、サービスを開始できるタイミングや相手車両の挙動を把握できる頻度を評価することを実現した。

その結果、スロット同期という観点では、最も厳しいと考えられる車群すれ違い時においても、文献 17) で提案されている自律分散スロット同期アルゴリズムを適用することで、高速にスロット同期が確立され、通信品質に大きな影響を与えないことが確認できた。また、スロット同期が確立されるまでの過渡状態時の通信品質劣化についても、GPS や地上デジタル放送などの外部信号から得られるタイミングパルスと自律分散スロット同期アルゴリズムとを併用することで、影響が軽減されることが考えられることを示した。さらに、車車間通信を用いた安全運転支援システムにおいて、アプリケーションレベル QoS を評価した結果、サービスの成立を実現するためには、隠れ端末問題への対策は必要不可欠であり、その対策方式の 1 つとして、D-TDMA は有望なプロトコルであるといえる。

今後の課題として、今回検討した CSMA/CA, D-TDMA 以外の MAC プロトコルの性能評価を行い、右折事故シーンだけでなく、出会い頭事故などの他の事故シーンを想定し評価することが必要である。また、今回の評価に用いた ASV で検討されている銀座道路モデルだけではなく、実際の道路・建物モデルを用いた評価などがあげられる。

謝辞 本研究は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」プロジェクトの成果である。

参 考 文 献

- 1) Chen, W. and Cai, S.: Ad hoc peer-to-peer network architecture for vehicle safety communications, *IEEE Commun. Mag.*, Vol.43, No.4, pp.100-107 (2005).
- 2) Misener, J., Sengupta, R. and Krishnan, H.: Cooperative collision warning: Enabling crash avoidance with wireless technology, *Proc. 12th World Congress on Intelligent Transport Systems* (2005).
- 3) 関 馨: ITS における VSC (Vehicular Safety Communication) の動向, 情報処理学会研究報告, Vol.2005, No.113, pp.165-172 (2005).
- 4) 国土交通省: 情報交換型運転支援システムシンポジウム (2005).
- 5) 国土交通省: Advanced Safety Vehicle (先進安全自動車)(オンライン). 入手先 <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/> (参照 2009-03-01)
- 6) 徳田清仁: 安全運転支援用車々間通信システムの開発—新通信フォーマット ITS FORUM RC-005 準拠, 自動車技術, Vol.63, No.2, pp.25-29 (2009).
- 7) 自動車技術会: 特集 ここまで来た安全運転支援技術, 自動車技術, Vol.63, No.3, pp.4-88 (2009).
- 8) Seki, K.: Data relay performance of 5.8 GHz inter-vehicle communications (The Second Report), *Proc. 13th World Congress on Intelligent Transport Systems* (2006).
- 9) Karn, P.: MACA - A new channel access method for packet radio, *Proc. ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Comp. Networking Conf.*, pp.134-140 (1990).
- 10) 小野良司, 撫中達司, 渡辺 尚: アドホックルーチングプロトコルの制御メッセージによる無線 LAN リンクスループットへの影響の分析, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J88-A, No.12, pp.1422-1431 (2005).
- 11) Tang, K. and Gerla, M.: Random access MAC for efficient broadcast support in ad hoc networks, *IEEE WCNC 2000*, Vol.1, pp.454-459 (2000).
- 12) Tang, K. and Gerla, M.: MAC reliable broadcast in ad hoc networks, *IEEE MIL-COM 2001*, Vol.2, pp.1008-1013 (2001).
- 13) 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, *Wireless Networks 10*, pp.359-366 (2004).
- 14) Borgonovo, F., Capone, A., Cesana, M. and Fratta, L.: Impact of user mobility on the broadcast service efficiency of ADHOC MAC protocol, *Proc. IEEE Vehi. Tech. Conf. 2005, VTC2005-Spring*, pp.2310-2314 (2005).
- 15) 神崎映光, 上向俊晃, 原 隆浩, 西尾章治郎: アドホックネットワークにおける端末数の変化に応じた TDMA スロット割り当て手法, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.3, pp.824-837 (2004).
- 16) 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).
- 17) 今井純志, 田所幸浩, 伊藤健二, 鈴木徳祥, 伊藤修朗: 車車間通信における自律分散スロット同期手法, 電子情報通信学会総合大会, A-17-9 (2008).
- 18) 原田知育, 鈴木徳祥, 牧戸知史, 伊藤修朗, 林 宏明, 寺田重雄: 自律分散型 TDMA 車車間通信システムの開発, 情報処理学会研究報告, 高度交通システム研究会, 2007-ITS-31 (2007).
- 19) 今井純志, 鈴木徳祥: タイミング同期の自律分散制御に関する検討—局所解を回避する手法, 電子情報通信学会技術研究報告, ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2007-13 (2007).

- 20) The Network Simulator ns-2 (オンライン). 入手先 <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (参照 2009-03-01)
- 21) 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 (2009).
- 22) IEEE: Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, IEEE Std 802.11-2007 (2007).
- 23) 市坪信一, 今井哲朗: 低アンテナ基地局におけるマイクロセル伝搬損測定, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75B-II, No.8, pp.596-598 (1992).
- 24) 前田久昭: 時刻基準としての GPS 受信機, ポジション株式会社技術レポート (1998).
- 25) Karasawa, Y., Kumagai, T., Takemoto, A., Fujii, T., Ito, K. and Suzuki, N.: Experiment on synchronous timing signal detection from ISDB-T terrestrial digital TV signal with application to autonomous distributed ITS-IVC network, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E92-B, No.1, pp.296-305 (2008).
- 26) 馬場美也子, 棚橋 巖, 北岡広宣, 森 博子, 寺本英二: 交通流シミュレータ NET-STREAM, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.1, pp.226-235 (2005).
- 27) Goldsmith, A.J. and Greenstein, L.J.: A measurement-based model for predicting coverage areas of urban microcells, *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, Vol.11, No.7, pp.1013-1023 (1993).
- 28) 金光寛幸: ASV 情報交換型運転支援システムシステムコンセプトと技術的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 高度交通システム研究会, ITS2005-44, pp.29-34 (2005).

付 録

A.1 捕捉効果発生時におけるパケット衝突検出エリアの考察

本節では, 捕捉効果発生時において, どの程度パケット衝突を検出することが可能かについて, 考察する.

試算する評価環境として, 2つの送信端末 (Tx1, Tx2) 間の距離を変化させ, 同時にパケットを送信した場合に, 次の3つのエリアを算出する.

- 捕捉効果により強い受信電力のパケットの受信に成功するエリア
- パケット衝突を検出することができるエリア
- 受信可能レベル以下のエリア

ここで, 試算条件としては, 3.2 節のシミュレーション条件と同一とし, 伝搬損失モデルは, 市坪モデルの見通し内の式を使用する. 表 1 と同様に, 送信電力 20 dBm, パケットのデータを復調することが可能な受信レベル (Th_2) を -77 dBm とし, 捕捉効果の閾値 (ξ) を 8 dB とする.

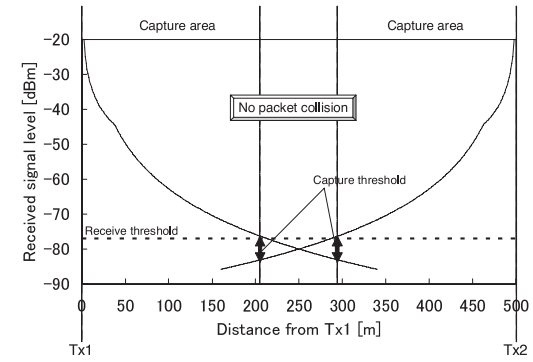


図 23 捕捉効果発生および衝突検出エリア (送受信間距離: 500 m)
Fig. 23 Capture area and collision detection area (distance between two transmitters is 500 m).

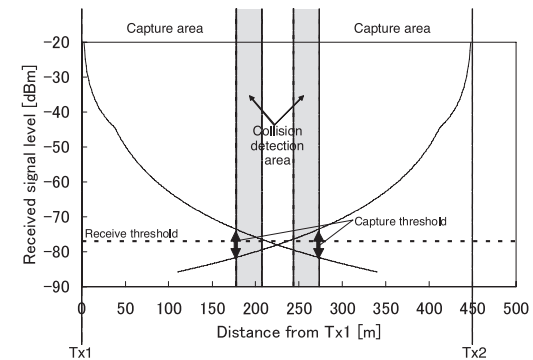


図 24 捕捉効果発生および衝突検出エリア (送受信間距離: 450 m)
Fig. 24 Capture area and collision detection area (distance between two transmitters is 450 m).

図 23 から図 26 に, 2つの送信端末の距離を 500 m から 350 m まで 50 m 刻みで変化させた場合の受信レベルと捕捉効果発生および衝突検出エリアの算出結果を示す.

図 23 より, 送受信間の距離が 500 m の場合には, 各送信端末から 210 m の範囲については, 捕捉効果により受信が成功するエリアとなっている. 一方, それ以外のエリア (Tx1 からの距離が, 210 m から 290 m のエリア) については, 受信レベルが閾値 Th_2 未滿となるため, パケット衝突は発生せず, 受信ができないエリアとなる. したがって, このような状況では, 隠れ端末を検出する必要はない. また, 送受信間距離が, 500 m より離れた場合

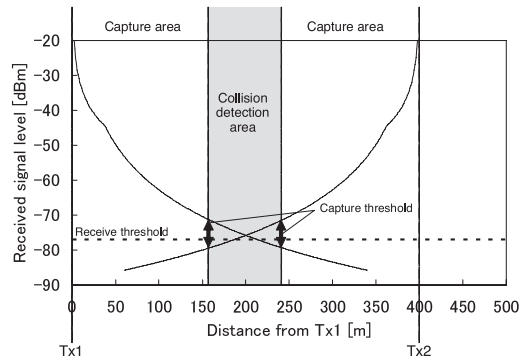


図 25 捕捉効果発生および衝突検出エリア (送受信間距離: 400 m)

Fig. 25 Capture area and collision detection area (distance between two transmitters is 400 m).

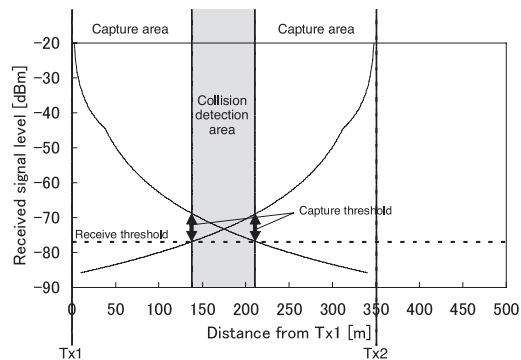


図 26 捕捉効果発生および衝突検出エリア (送受信間距離: 350 m)

Fig. 26 Capture area and collision detection area (distance between two transmitters is 350 m).

についても同様となることを確認した。

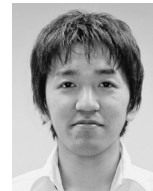
次に、図 24 の送受信間距離が 450 m の場合には、Tx1 からの距離が約 180 m 以下と約 270 m 以上のエリアについては、捕捉効果により受信が成功するエリアとなっている。また、約 170 m から約 210 m のエリアと約 240 m から約 270 m の 2 つの区間でパケット衝突が発生し、それ以外のエリアについては、受信ができないエリアとなっている。したがって、捕捉効果が発生しても、パケット衝突が発生する 2 つのエリア内に車両が存在する場合には、隠れ端末とのパケット衝突を検出できることになる。

以下、同様に送受信間距離を 400 m, 350 m とした場合について、それぞれ、図 25 と図 26 に示す。パケット衝突を検出できるエリアは、図 25 では、Tx1 からの距離が約 160 m から約 240 m、図 26 については、約 140 m から約 210 m となっている。

以上の結果より、捕捉効果により受信が成功した端末は、パケット衝突を検出することはできないが、図 24 から図 26 に示すようなパケット衝突検出エリア内に車両が 1 台でも存在すれば、その車両がパケット衝突を検出できることになる。もし、ある時刻において、パケット衝突検出エリア内に車両が存在しない場合においても、車両の移動がある場合を考慮すると、別の時刻では、パケット衝突検出エリア内に車両が進入してくる可能性があり、隠れ端末とのパケット衝突を検出することができると思われる。

(平成 21 年 3 月 30 日受付)

(平成 21 年 10 月 2 日採録)



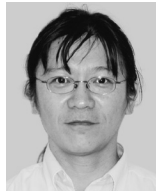
伊藤 健二 (正会員)

昭和 52 年生。平成 11 年名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業。平成 13 年同大学大学院博士前期課程修了。同年 (株) 豊田中央研究所入社。地上デジタル放送移動受信システム、車車間通信システムの研究に従事。平成 12 年度電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会奨励賞、平成 20 年 IEEE Consumer Electronics Society 2006 Chester Sall Award for the First Place Transactions Paper Award、平成 20 年および平成 21 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞、平成 21 年情報処理学会山下記念研究賞受賞。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



田所 幸浩

昭和 53 年生。平成 12 年名古屋大学工学部電子情報工学科卒業。平成 17 年同大学大学院博士後期課程修了。平成 18 年 (株) 豊田中央研究所入社。スペクトル拡散通信システム、マルチユーザ受信技術、車車間通信システムの研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



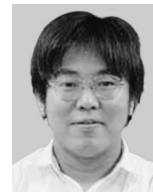
鈴木 徳祥

昭和 41 年生。平成 2 年京都大学工学部電子工学科卒業。平成 4 年同大学大学院修士課程修了。同年(株)豊田中央研究所入社。マルチキャリア変調技術、デジタル移動通信システム、ソフトウェア無線、車車間通信システムの研究に従事。博士(工学)。平成 10 年度電子情報通信学会学術奨励賞、平成 20 年 IEEE Consumer Electronics Society 2006 Chester Sall Award for the First Place Transactions Paper Award 受賞。電子情報通信学会、情報理論とその応用学会、IEEE 各会員。



今井 純志

昭和 50 年生。平成 9 年京都大学工学部数理工学科卒業。平成 11 年同大学大学院修士課程修了。同年(株)豊田中央研究所入社。デジタル移動通信システム、車車間通信システムの研究に従事。平成 20 年 IEEE Consumer Electronics Society 2006 Chester Sall Award for the First Place Transactions Paper Award 受賞。日本 OR 学会、電子情報通信学会各会員。



牧戸 知史(正会員)

昭和 49 年生。平成 13 年(株)豊田中央研究所入社。平成 15 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。自動車用レーダの研究に従事後、現在、車車間通信の研究に従事。博士(工学)。平成 19 年情報処理学会 DICO 最優秀論文賞受賞。電子情報通信学会会員。