

第 5 章

周期ブロードキャスト型車車間通信プロトコル PB-TRMA

5.1 まえがき

第 3 章及び第 4 章では、安全運転支援システムを実現する車車間通信の物理レベル QoS を議論の対象としてきた。一方、このような車車間通信では、複数車両間で通信しあうため、無線リンクの誤りだけではなく、パケット衝突の発生がアプリケーションレベルの品質に大きな影響を及ぼす。したがって、効率的な多元接続を実現するメディアアクセス制御 (MAC) プロトコルが重要となる。本章では、リンクレベル QoS を議論の対象とし、車車間通信の MAC プロトコルについて検討する。

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) [5] では、相手の存在有無が分からない状況下においても、全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、図 5.1 に示すように、通信形態としては、通信可能な全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。本章においては、このシステム、及び、通信形態を検討対象とする。

このような、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、自律的に低遅延で高信頼な通信ができる必要がある。これまでの自律分散環境下における研究例の多くは、無線 LAN で使用されている CSMA/CA[62] をベースとする検討がなされている [6], [7], [18]。CSMA/CA は、周辺車両との同期を取る必要が無い場合、本章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 は通信トラヒ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 [75]。

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 [95]–[108]。特に、CSMA/CA は一般的に、RTS/CTS[95]–[97] 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良く知られている。しかし、本章では、1 対多のブロードキャスト通信を前提としているため、ブロードキャストパケットに対して RTS/CTS による隠れ端末問題の回避を行うことはできない。

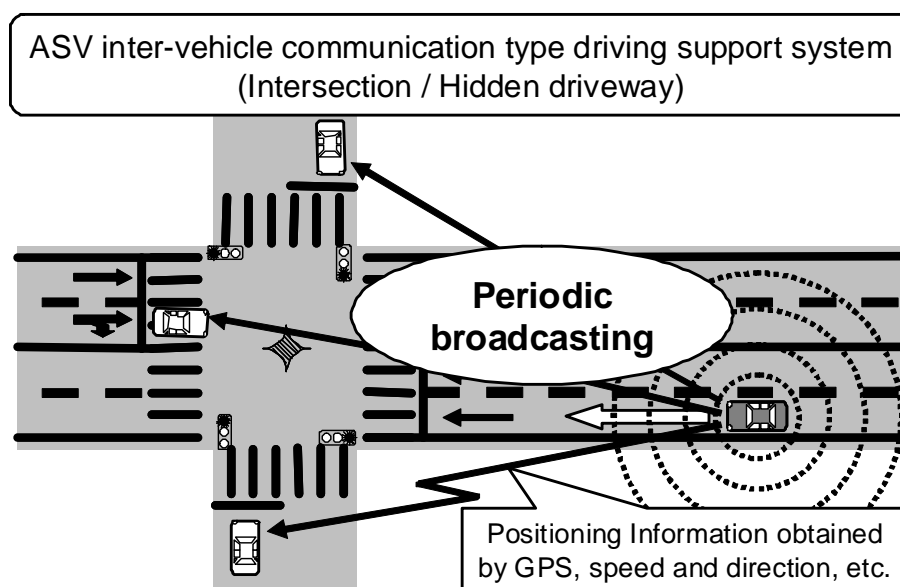


図 5.1 車車間通信による安全運転支援システム

更に、本章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 の拡張に関する研究もなされている [98]–[100]。しかしながら、文献 [98], [99] 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。また、ブロードキャスト用に RTS/CTS を拡張し、隠れ端末の危険度に基づいて、ブロードキャスト受信率に大きな影響を及ぼす隠れ端末の送信を優先的に抑制する手法が提案されている [100]。しかし、文献 [100] では、周期的な通信が考慮されていない。また、適用範囲は静的もしくは準静的なネットワークであるため、車車間通信のように端末が移動するようなネットワークでの性能評価が示されていない。

BTMA (Busy Tone Multiple Access) [101] は、ビジートーンを送出することにより、チャネルの使用状況（隠れ端末が通信中であること）を検出可能であるが、基地局が必要不可欠となる。更に、BTMA をアドホック通信環境に適用可能とした DBTMA (Dual Busy Tone Multiple Access) [102] が提案されている。しかしながら、DBTMA は、一つのデータチャネルと 2 種類のビジートーンチャネルを必要とするため、複数の周波数チャネルを用いる点で効率的ではない。

本章では、車両が周期的なブロードキャスト通信を行うようなシステムを前提としており、各車両は任意の周期で少なくとも 1 回は自車両の情報を送信することができなければならない。すなわち、このようなシステムには、TDMA 型のアクセスが向いているといえる。TDMA 型のアクセスは、所定の長さのフレームを幾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、隠れ端末とのパケット衝突が発生しないように適切にスロットが確保できれば、確実にパケット衝突が発生しないというメリットがある。文献 [103]–[108] に隠れ端末問題を解決する自律分散型 TDMA プロトコルが提案されている。しかし、これらのプロトコルでは、全ての車両間で自律的にスロット同期を実現する必要がある。一般的に、アクセスポイントや基地局など

が存在しない自律分散環境下においてスロット同期を実現することは非常に困難である。そこで、本章では、これらの課題を解決し、一つの周波数チャンネルで実現可能な新しいブロードキャスト MAC プロトコルである PB-TRMA (Periodic Broadcast-Timing Reservation Multiple Access) を提案する。

PB-TRMA は、CSMA/CA によるアクセスを基本とし、NAV を周期ブロードキャスト通信に拡張することにより、隠れ端末を検出・回避することを可能とし、自律的に送信タイミングを予約することを実現している。また、提案プロトコルは、一つの周波数チャンネルのみを使用し、車両間で自律的なスロット同期を実現する必要がない。そこで、スロット同期を実現する必要がなく隠れ端末問題を解決し、パケット衝突を回避できることをシミュレーションにより評価し、提案プロトコルが TDMA ライクなアクセスを実現していることを示す。更に、PB-TRMA について、高信頼な通信を実現するためには、衝突回復機能と隠れ端末検出機能の二つの機能が必要であることを明らかにする。

以下では、5.2 節で、PB-TRMA プロトコルを説明し、5.3 節において、シミュレーションモデルと諸元及び QoS パラメータを示す。また、5.4 節で、シミュレーション評価結果を示し、PB-TRMA の特性について議論する。

5.2 PB-TRMA プロトコル

本節では、提案する PB-TRMA (Periodic Broadcast-Timing Reservation Multiple Access) プロトコルを説明する。

5.2.1 方式概要

まず、提案プロトコルの基本動作を説明する。提案プロトコルの基本的なアクセス手法は、キャリアセンス機構を用いる CSMA/CA とした。したがって、キャリアセンス可能なエリアについては、他の端末とのパケット衝突をキャリアセンスを用いて回避することが可能である。各端末は、受信したデータパケットの通信結果 (CR: Communication Result) 信号をデータパケットを受信してから所定期間 (T_{rep}) 経過後に、キャリアセンスを無視して強制的にブロードキャストする。この CR 信号は、受信したパケットの正常受信、もしくは衝突検出を通知する信号である。そのため、他のデータパケットよりも優先的に送信されなければ、どのパケットに対する通信結果なのかを把握することができない。そこで、CSMA/CA で使用している IFS による優先制御を適用し、 T_{rep} を最も短い SIFS の値とした。通常、CSMA/CA はキャリアセンス後、キャリア未検出であれば、DIFS 時間待機してから、バックオフ制御後にデータパケットを送信することになるため、CR 信号が常に優先的に送信される。

PB-TRMA の基本動作概要を図 5.2 に示す。PB-TRMA プロトコルに関して、各端末が送信するパケットとして、以下の 3 種類を定義する。

- **データパケット (DATA)** : 端末の位置や速度などのデータペイロードを含むパケット
- **正常受信信号 (BUSY)** : 受信 DATA が正常に受信 (復調) できた時に送信する CR 信号

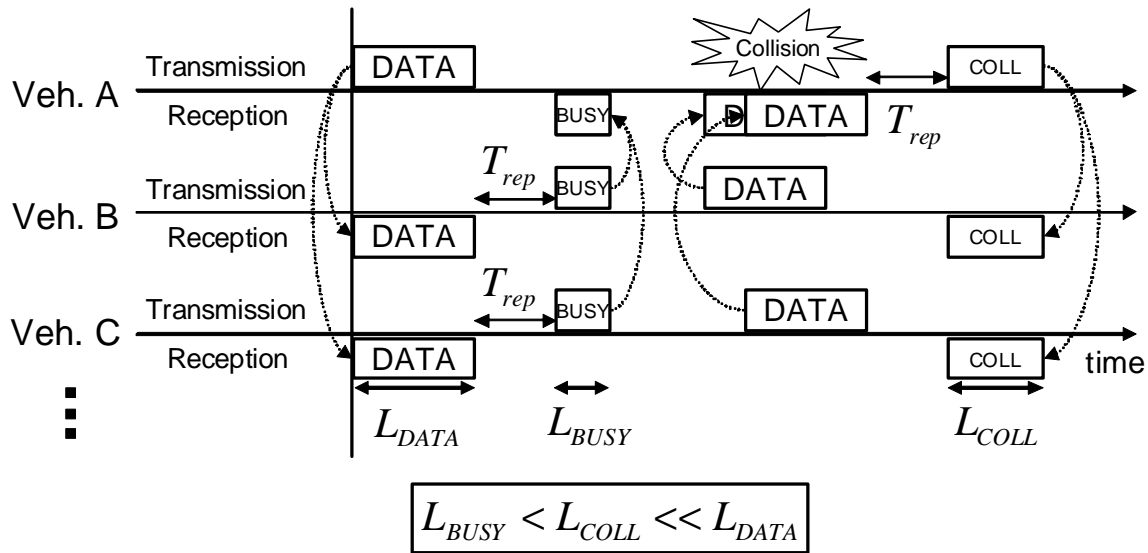


図 5.2 PB-TRMA プロトコルの動作概要

- **衝突検出信号 (COLL)** : 受信 DATA に対して衝突を検出した時に送信する CR 信号

CR 信号は、幾つかの端末からほぼ同時に送信され衝突し、通信結果の信号を正常受信することはできないため、復調処理などは行わないことを想定している。二つの通信結果信号 (BUSY, COLL) の判別方法として、式 (5.1) のように、信号の時間長で区別することを想定している。

$$L_{BUSY} < L_{COLL} \ll L_{DATA} \quad (5.1)$$

ここで、 L_{BUSY} 、 L_{COLL} 、 L_{DATA} は、それぞれ、BUSY、COLL、DATA の信号の時間長である。PB-TRMA は、このように CR 信号を強制的に衝突させることを特徴とし、通信結果を基にして、NAV を適宜、設定することにより、次の送信タイミングを自律的に制御する。NAV は仮想キャリアセンスメカニズムである。つまり、NAV が設定されている期間は、送信禁止期間と捉えることができる。送信禁止期間である NAV が設定されると、キャリアが未検出であっても、DATA を送信することはできない。したがって、各端末は、キャリア未検出及び NAV 期間未設定のときに DATA を送信することとなる。つまり、NAV を応用することにより、次の送信タイミングの変更だけでなく、隠れ端末の存在を検出した場合、隠れ端末とのパケット衝突を回避することが可能となる。ただし、BUSY と COLL は、NAV 期間に関わらず送信されることに注意されたい。以下では、通信結果に基づく NAV の設定による送信タイミング制御に関して説明する。

5.2.2 パケット衝突回復手法

PB-TRMA では、各車両が周期的に DATA を送信することを前提としている。つまり、一旦、送信した DATA が隠れ端末の DATA と衝突した場合、連続してパケット衝突が発生する恐れがある。したがって、このような場合には、自律的に送信タイミングを変更し、自ら隠れ端末とのパケット衝突を回避する必要がある。

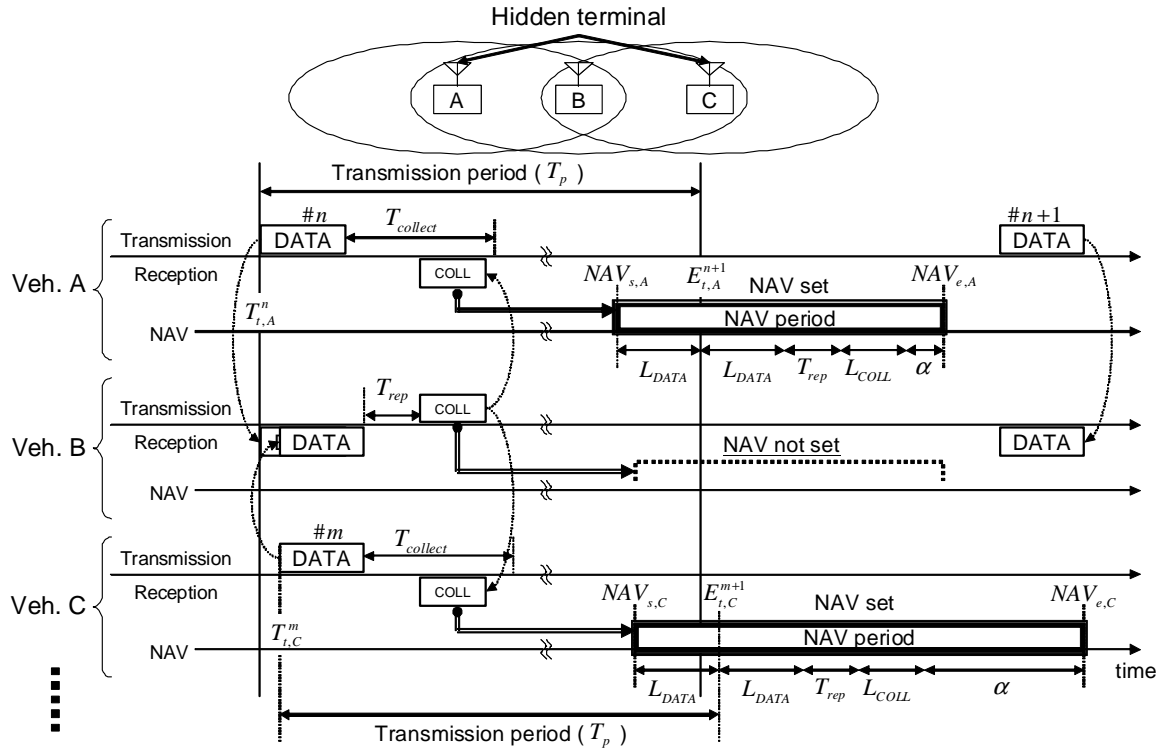


図 5.3 PB-TRMA のパケット衝突回復手法

図 5.3 は、パケット衝突検出時における NAV の設定状況を示している。図では、3 台の端末 (A, B, C) が存在しており、図中の楕円は各車両の通信エリアを示している。したがって、端末 A と端末 C は端末 B に対して隠れ端末関係にあることを想定している。端末 A と端末 C のデータパケットが衝突したとき、端末 B は、最後のデータパケット受信後から T_{rep} 時間経過後に COLL をブロードキャストする。端末 A と端末 C は、DATA を送信終了後、CR 信号の収集時間 ($T_{collect}$) 以内に COLL を受信する。これにより、端末 A と端末 C は、送信した DATA が衝突したことを検出し、1 送信周期後に該当する期間 ($[NAV_{s,j}, NAV_{e,j}]$) に NAV を設定する。この設定期間は、以下のように求められる。

$$E_{t,j}^{n+1} = T_{t,j}^n + T_p \quad (5.2)$$

$$NAV_{s,j} = E_{t,j}^{n+1} - L_{DATA} \quad (5.3)$$

$$NAV_{e,j} = E_{t,j}^{n+1} + L_{DATA} + T_{rep} + L_{COLL} + \alpha \quad (5.4)$$

ここで、 $NAV_{s,j}$ と $NAV_{e,j}$ は、それぞれ、車両 j (図の例では、 $j = A, C$) の NAV 設定期間の開始・終了時刻を示している。また、 $T_{t,j}^n$ 、 T_p 、 $E_{t,j}^{n+1}$ は、それぞれ、車両 j の n 番目の DATA の送信開始時刻、送信周期、車両 j の $n+1$ 番目の DATA の送信開始予測時刻を示している。ただし、同じ期間の NAV を設定すると、NAV 期間終了後に再度パケット衝突を発生させてしまう可能性がある。そこで、式 (5.4) に示すように、NAV 設定期間の終了時刻に $[0, T_p]$ 期間の一様乱数 α を用いることにより、再度パケット衝突することを予防している。図の例では、端末 C の NAV が端末 A のそれよりも長く設定されている状況を示している。

更に、COLL を送信した端末 B は、端末 A と端末 C が必ず次の送信タイミングを変更す

るため、該当する 1 送信周期後には、NAV を設定しないことにより、送信できる機会（タイミング）を増やしている。

5.2.3 隠れ端末検出及びパケット衝突回避手法

図 5.4 は、隠れ端末検出時における NAV の設定状況を示している。この図における 3 台の端末の位置関係は図 5.3 と同じである。ここで、端末 A が DATA をブロードキャストすると、端末 B のみが受信することができる。このとき、DATA を受信した車両 B は、BUSY を周辺にブロードキャストする。端末 C は、端末 B からの BUSY を受信することによって、このタイミングで隠れ端末（図 5.4 では端末 A）が存在していることを検出することができる。PB-TRMA では、全ての端末が DATA を周期的に送信するという通信形態の特徴を利用している。すなわち、端末 C は、端末 A が 1 送信周期後に送信する次の DATA パケットとの衝突を回避するために、次に示す式 (5.5) から式 (5.7) より算出される該当期間（1 送信周期後）に NAV を設定する。

$$E_{t,A}^{n+1} = R_B + T_p - L_{BUSY} - T_{rep} - L_{DATA} \quad (5.5)$$

$$NAV_{s,C} = E_{t,A}^{n+1} - L_{DATA} \quad (5.6)$$

$$NAV_{e,C} = E_{t,A}^{n+1} + L_{DATA} + T_{rep} + L_{COLL} \quad (5.7)$$

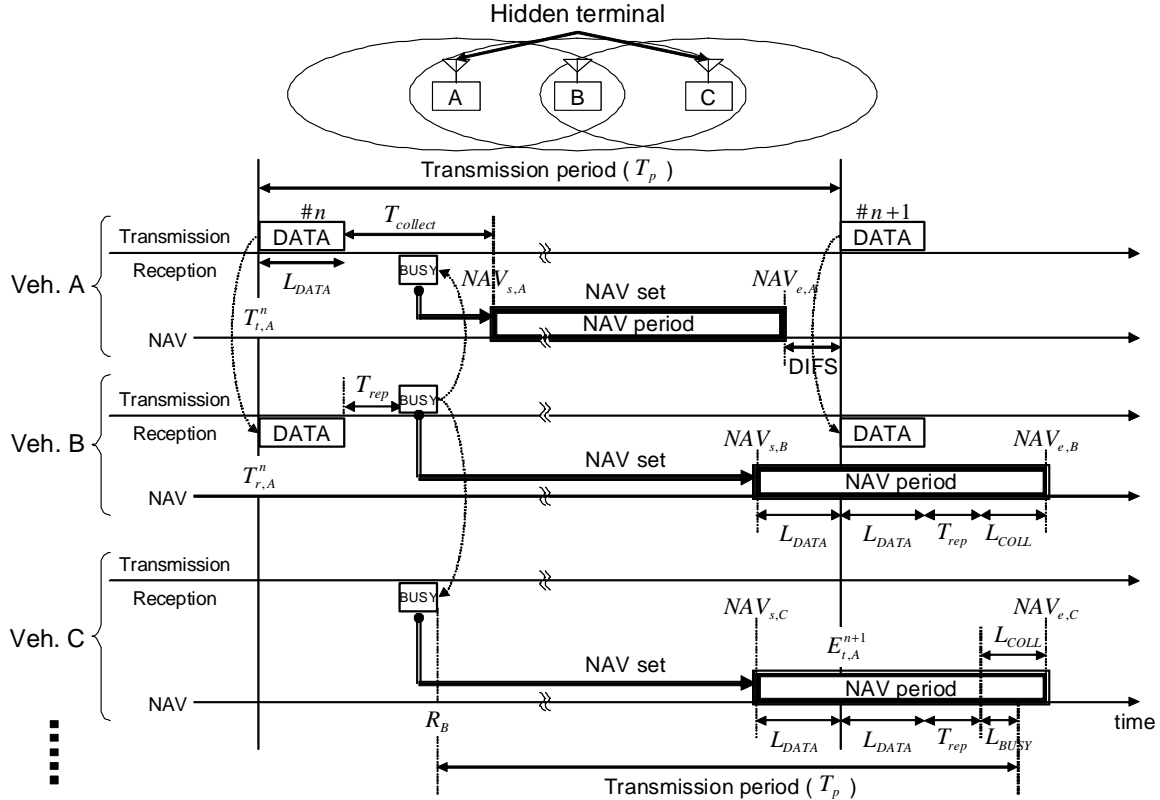


図 5.4 隠れ端末検出とパケット衝突回避手法

ここで、 R_B は、BUSY の受信時刻を示している。このように NAV を設定することにより、端末 C は隠れ端末関係にある端末 A との packets 衝突を回避することができる。一方、BUSY を送信した端末 B は、端末 A の n 番目の DATA の受信開始時刻を用いて式 (5.8) と式 (5.9) に示す期間に NAV を設定し、端末 A が DATA を送信するタイミングを予約する。

$$NAV_{s,B} = T_{r,A}^n + T_p - L_{DATA} \quad (5.8)$$

$$NAV_{e,B} = T_{r,A}^n + T_p + L_{DATA} + T_{rep} + L_{COLL} \quad (5.9)$$

このとき、DATA を送信終了後から $T_{collect}$ 時間以内に BUSY を受信した端末 A は、該当する 1 送信周期後が予約されたと判断し、式 (5.10) と式 (5.11) に示すように、BUSY の受信時刻から次の DATA の送信タイミングまでの期間 ($[NAV_{s,A}, NAV_{e,A}]$) に NAV を設定する。

$$NAV_{s,A} = T_{t,A}^n + L_{DATA} + T_{collect} \quad (5.10)$$

$$NAV_{e,A} = T_{t,A}^n + T_p - DIFS \quad (5.11)$$

ここで、 $DIFS$ は、DCF における IFS 時間である DIFS を示している。これらの動作により、自律的に送信タイミングの予約機構が確立できることになる。

図 5.4 では、BUSY によって隠れ端末を検出した場合を示したが、COLL によって検出する場合もある。この場合を図 5.5 に示す。図では、4 台の端末 (A, B, C, D) が存在しており、端末 A, C, D はお互いに隠れ端末関係にある場合である。これは、図 5.3 に端末 D が追加された場合を示している。

端末 D は、端末 B が送信した COLL を受信することによって、この時間に隠れ端末同士の DATA パケットが衝突していることを検出することができる (図 5.5 では、端末 A と端末 C)。このとき、自端末の送信した DATA が衝突したと判断した場合には、1 送信周期後に NAV を設定することにより、次の DATA の送信タイミングを変更する。すなわち、図 5.5 における端末 A と端末 C が、この動作を実施していることになる。したがって、端末 D は、送信機会を増やすことを考慮し、1 送信周期後に該当する時間に NAV を設定しない。端末 B についても端末 D と同様の動作を行う。

5.2.4 通信結果信号受信の判断ポリシー

通信結果の信号は、BUSY のみ、あるいは COLL のみ受信するというのではなく、図 5.6 のように、両方の信号が混在して受信されることがある。このとき、どちらの信号を受信したと判定するのか、判断基準が必要となる。図 5.6 は、端末 A と端末 C が送信した DATA が、端末 B では packets 衝突、端末 D では正常受信となっている状況を示している。したがって、端末 C は、端末 B からの COLL と端末 D からの BUSY を混在して受信する。これらの CR 信号は、強制的に同じタイミングで送信しているため衝突が発生する。すなわち、BUSY と COLL が混在しているため、区別して把握することは困難である。BUSY と COLL は信号長で区別していることから、一つでも長い信号長である COLL が受信された場合は、COLL を受信したと判断する処理とした。すなわち、COLL を BUSY よりも優先的に扱う処理としている。これは、packets 衝突が発生したときの回復機能を優先するためである。

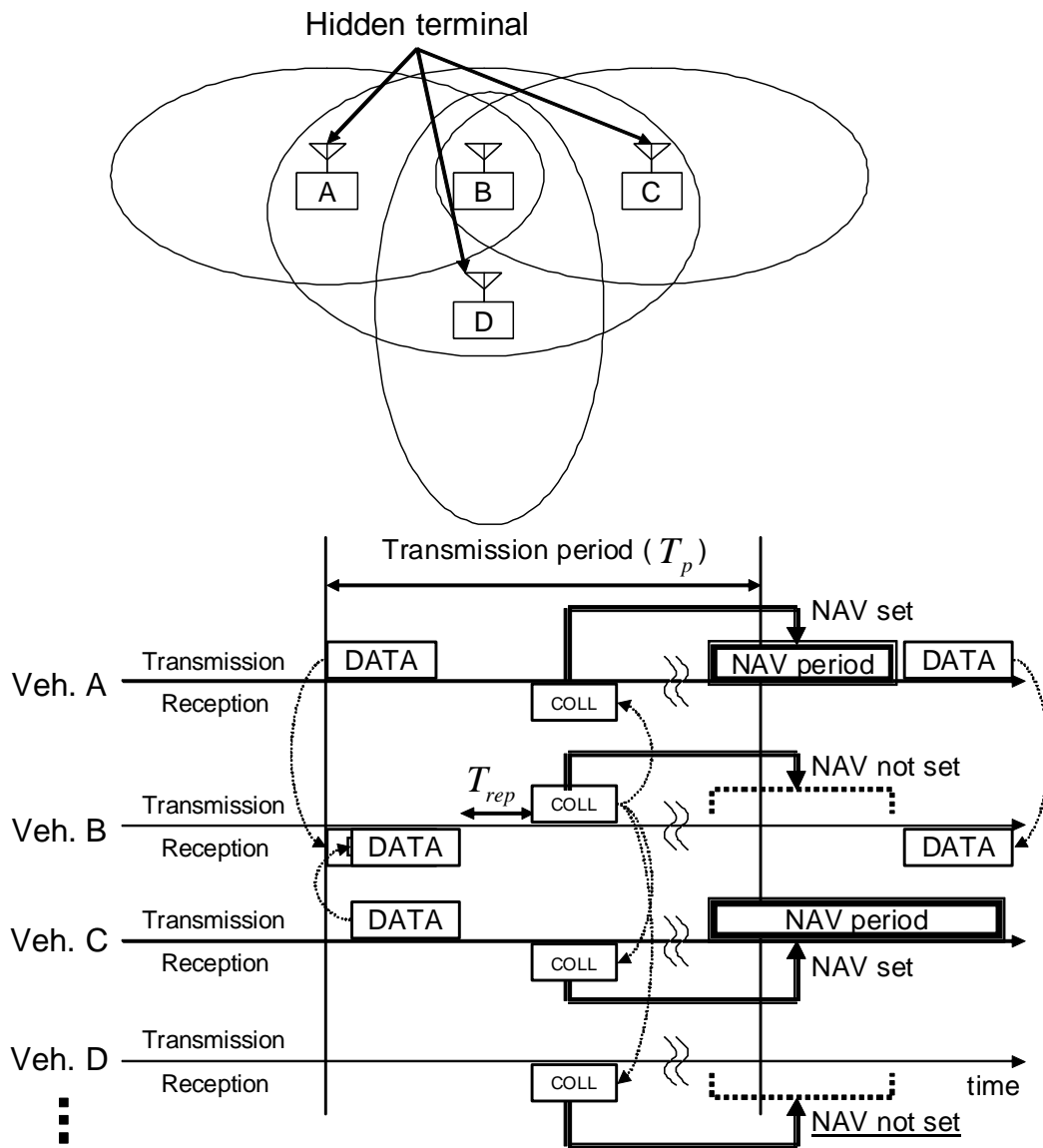


図 5.5 COLL 受信に基づく隠れ端末検出

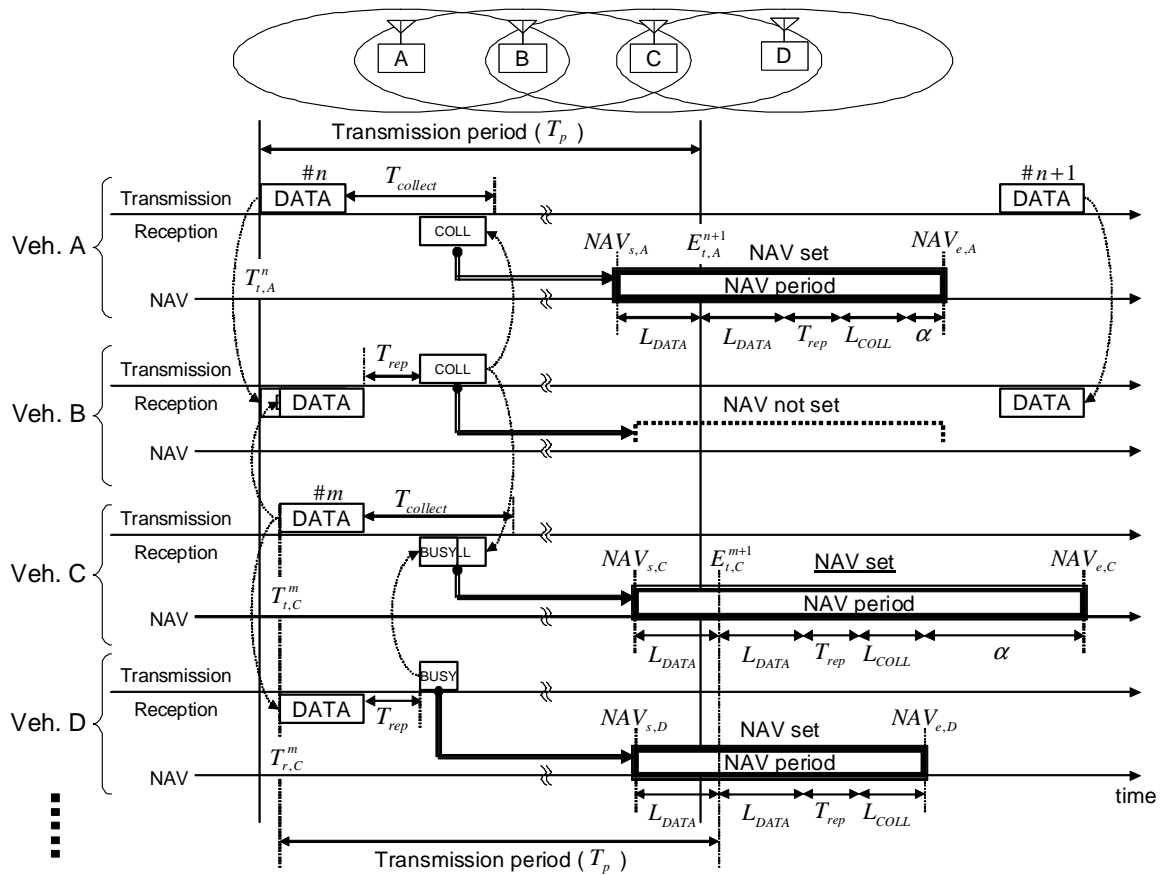


図 5.6 通信結果信号受信の判断ポリシー

5.3 シミュレーションモデル

本節では、シミュレーション評価モデル、シミュレーション諸元、及び、QoS パラメータについて概説する。

5.3.1 評価モデル及び車両配置

シミュレーション評価モデルには、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 5.7 に示すように、400m 四方で 50m 方形メッシュの道路配置となっている。片側 3 車線の幹線道路（実線）と片側 2 車線の主要道路（二重線）、片側 1 車線の細街路（点線）から成り立っている。車両配置については、道路上に一様乱数によりランダムに配置するモデルとした。シミュレーションでは、1 車線単位の車両密度を 1km 当たり 5 台から 30 台まで変化させた。各シミュレーションは 60 秒実施し、各車両の初期送信タイミングは、最初の 1 周期の期間内で一様乱数に従う乱数によりランダムに設定した。

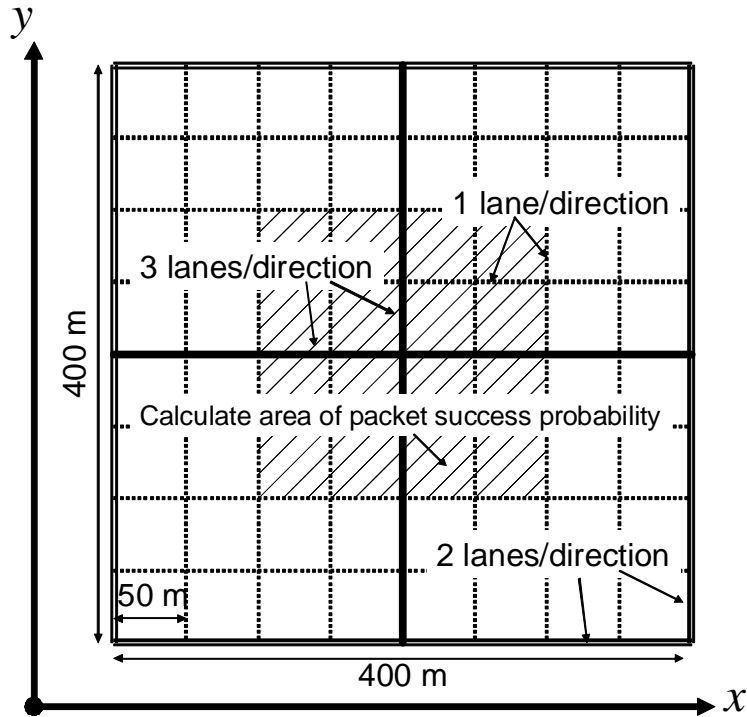


図 5.7 シミュレーション評価モデル

5.3.2 シミュレーション諸元及び QoS パラメータ

シミュレーション評価では、ネットワークシミュレータである ns-2[109] を用いて、PB-TRMA の有効性を明らかにする。表 5.1 にシミュレーション諸元を示す。

本章では、各車両が位置情報や速度情報などを周期的にブロードキャストする通信形態を想定している。そこで、DATA 送信周期である T_p を一定値とした。文献 [106], [110], [111] のような検討例によると、DATA 送信周期はアプリケーション要件によって異なる。本章では、PB-TRMA の MAC プロトコルとしての基本性能を明らかにするため、 T_p の値を 25ms の固定値にした。

また、データパケットの通信エリアを 100m と設定した。すなわち、パケット衝突が発生しなければ、送信車両から半径 100m 以内に存在する受信車両は、DATA パケットの受信に成功することを仮定している。また、CR 信号の受信感度についても周期的にブロードキャストしているデータパケットのそれと同じ値とした。したがって、各車両は 100m 以内に存在する周辺の車両から送信された CR 信号を認識することができる。このように設定した理由は次のとおりである。CR 信号の受信エリアがデータパケットの通信エリアよりも小さい場合、PB-TRMA は、隠れ端末によるパケット衝突を回避することができない恐れがある。一方、CR 信号の受信エリアが DATA の通信エリアよりも大きい場合を考えると、“さらされ端末問題”のように通信トラヒックが増加するにつれて、車両は DATA 送信タイミングを予約することができなくなる。

また、提案プロトコルは、10 数マイクロ秒の精度で CR 信号の時間長を区別できることが重要な機能となる。文献 [112] では、PB-TRMA の有効性を明らかにするために、フィールド実

表 5.1 シミュレーション諸元

item	value
Transmission period (T_p)	25 ms
Communication area	100 m
Carrier sense area	100 m
Sensing area of CR signals	100 m
DATA length (L_{DATA})	128 μ s
BUSY length (L_{BUSY})	16 μ s
COLL length (L_{COLL})	32 μ s
T_{rep}	SIFS (32 μ s)
DIFS	64 μ s
$T_{collect}$	128 μ s

験を行っている。この検討結果によると、BUSY と COLL の信号時間長の違いを 16 μ s に設定している。そして、右折事故シーンを想定した安全運転支援アプリケーションを例として、交差点に向かって車両を走行させる実験を行い、PB-TRMA の有効性を示している。したがって、BUSY と COLL の信号時間長を 16 μ s に設定することは実現可能な値であるといえる。

シミュレーションでは、捕捉効果（キャプチャ効果）は発生しないものとし、PB-TRMA のパケット衝突回避性能を評価する。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。

MAC プロトコルを評価するための QoS パラメータとして、パケット到達率を用いる。これは、送信されたデータパケット数に対するパケット衝突せず受信に成功したパケット数の割合として定義できる。パケット到達率は、図 5.7 に示した評価モデルにおける中央 200m 四方（斜線エリア）に存在する全ての車両について算出される。

5.4 シミュレーション結果

PB-TRMA の有効性を明らかにするため、基礎特性、CR 信号の影響、物理レイヤにおけるパケット誤りの影響、及び、車両移動の影響に関するシミュレーション結果を示す。

5.4.1 PB-TRMA の基礎特性

PB-TRMA の基本アクセス方式は、バックオフ制御 [62] によってパケット衝突回避を行う CSMA/CA である。バックオフ制御による衝突回避機能については、通信品質と動作状況を調査する必要がある。バックオフ制御では、各端末は次式に示すように、コンテンションウィンドウサイズ (CW) に基づき、バックオフ時間 ($T_{Backoff}$) と呼ばれるバックオフタイマーをランダム時間にセットする。

$$T_{Backoff} = rand[0, CW] \times T_{slot} \quad (5.12)$$

ここで, T_{slot} は CSMA/CA における単位スロット時間を表している. 更に, $rand[0, CW]$ は, $[0, CW]$ 時間における一様乱数の値 (整数) である.

まず, バックオフ制御が PB-TRMA の性能に及ぼす影響について評価した. シミュレーションでは, T_{slot} を $16\mu s$ とし, CW を 0 から 15 まで変化させた. これは, IEEE 802.11a において, CW のデフォルト最小値を示す CW_{min} の値 15 を参考にした. 本章で対象としているブロードキャスト型通信では, ACK フレームを用いないため, CW_{min} は常に CW として使用されることに注意されたい. また, $CW = 0$ は, バックオフ制御をしないことを意味している. すなわち, この場合は, 全ての端末は, キャリア未検出, かつ, NAV 期間でないとき, DIFS 時間 ($64\mu s$) 経過後にパケットを送出することになる.

図 5.8 では, コンテンションウィンドウサイズに対する PB-TRMA のパケット到達率を示している. パケット到達率は, 20 秒間 (800 送信周期分) の平均値として算出されている. また, シミュレーション開始から十分な時間経過後, パケット到達率の時間変動が小さくなった時間帯の 20 秒間を対象とした. 図におけるトラフィック量は, 各車両が 1 送信周期 (T_p) の時間内に受信した DATA の平均数として定義される. DATA パケットの受信数に関して, パケット衝突やパケット誤りが発生したとしても, 通信エリア内に存在する車両から送信された DATA パケットを受信 DATA (受信すべき DATA) としてカウントする. シミュレーションでは, 1 車線 1km 当たりの車両密度を 5 台, 10 台, 及び 15 台と変化させた. その時の各トラフィック量は, それぞれ, $15 \text{ パケット}/T_p$, $30 \text{ パケット}/T_p$, 及び $45 \text{ パケット}/T_p$ であることを確認した. 更に, シミュレーションモデルにおける全ての車両を停止 (速度 0m/s) させ, 物理レイヤにおけるパケット誤りは発生しないものとした.

図 5.8 より, CW の値が増加し, トラフィック量が増加するにつれて, パケット到達率が劣化していることが確認できる. この理由を図 5.4 を用いて説明する. もし, 車両 B と C が車両 A の $n+1$ 番目の DATA とのパケット衝突を回避するために, NAV を設定したとしても, バッ

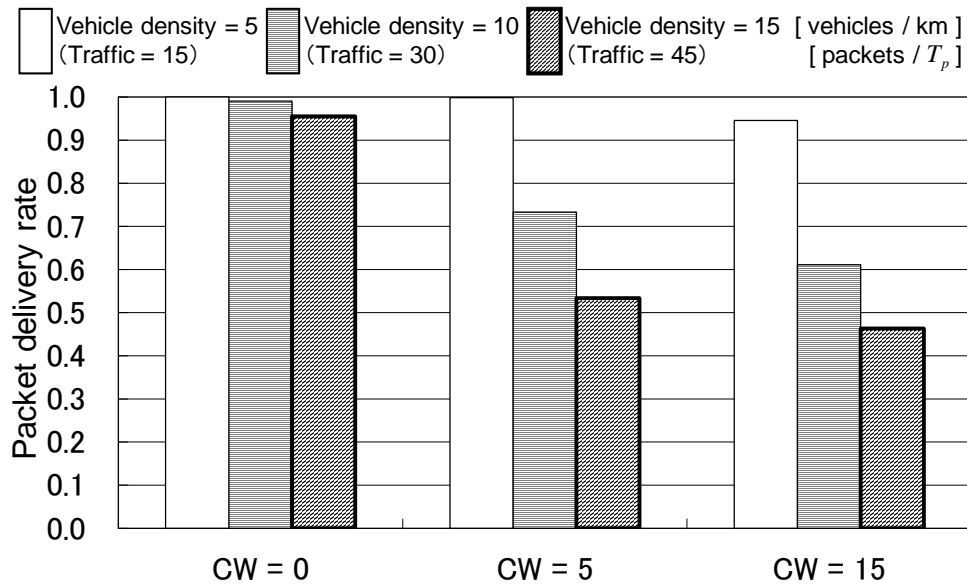


図 5.8 PB-TRMA に関する CW に対するパケット到達率

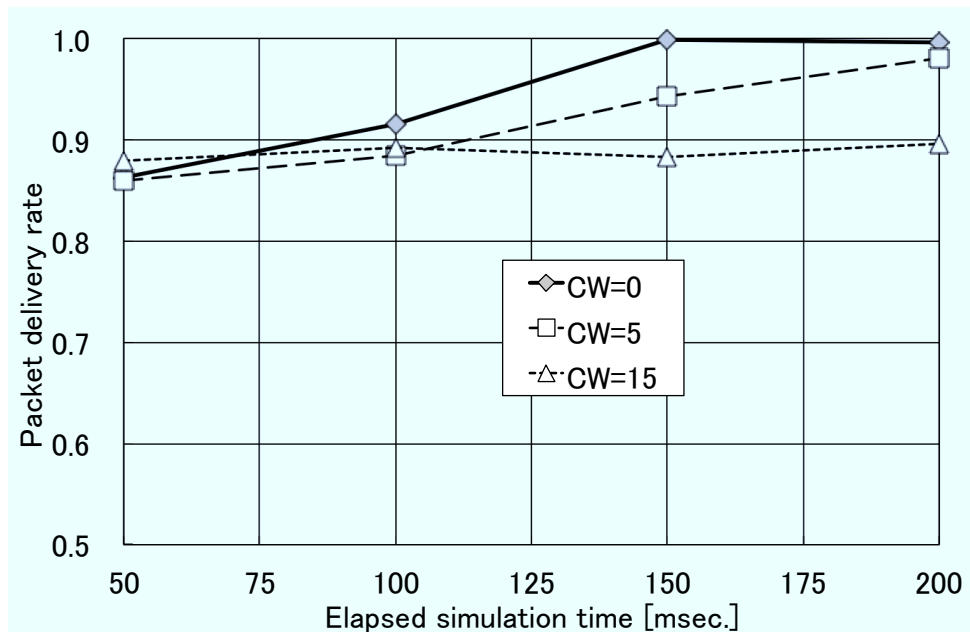


図 5.9 シミュレーション経過時間に対するパケット到達率

クォフ制御によって車両 A の $n+1$ 番目の DATA 送出が遅れる。その結果、パケット衝突が発生し、パケット到達率が劣化することになる。

図 5.9 に、シミュレーション経過時間に対して、50ms 毎に算出したパケット到達率を示す。また、図 5.10 に、車両密度を 5 台/km と設定した場合（1 送信周期あたりのトラヒック量は 15 パケット）の全車両に関する DATA パケットの送信タイミングを示す。

図 5.10 では、シミュレーション評価エリアの全ての車両を対象として、1 送信周期毎 ($T_p = 25\text{ms}$) に DATA パケットの送信タイミングをプロットしている。この図より、 $CW = 0$ の場合では、シミュレーション時間が 150ms を経過すると、各送信周期について DATA パケットの送信タイミングがほとんど同じであることが分かる。一方、 $CW = 5$ 、及び、 $CW = 15$ については、各送信周期毎の DATA パケット送信タイミングが異なっている。更に、 $CW = 15$ の場合の送信タイミングは $CW = 5$ の場合よりも大きく異なっていることが確認できる。これは、バックオフ制御によって、DATA パケットの送信が遅れるためである。更に、図 5.9 より、シミュレーション時間が 150ms を経過すると、 $CW = 0$ のパケット到達率はほとんど 1.0 となっている（パケット衝突がほとんど発生していない）。したがって、 $CW = 0$ の場合は、DATA パケットの送信タイミングがほとんど同じであることも考慮すると、隠れ端末とのパケット衝突を回避するための送信タイミングに NAV を設定し、意図したタイミングで DATA パケットの送信が実現できているといえる。

以上の考察より、バックオフ制御を用いない ($CW = 0$ の場合) ことによって、PB-TRMA は自律的にパケット衝突を回避するための送信タイミングを予約でき、TDMA ライクな動作を実現しているといえる。

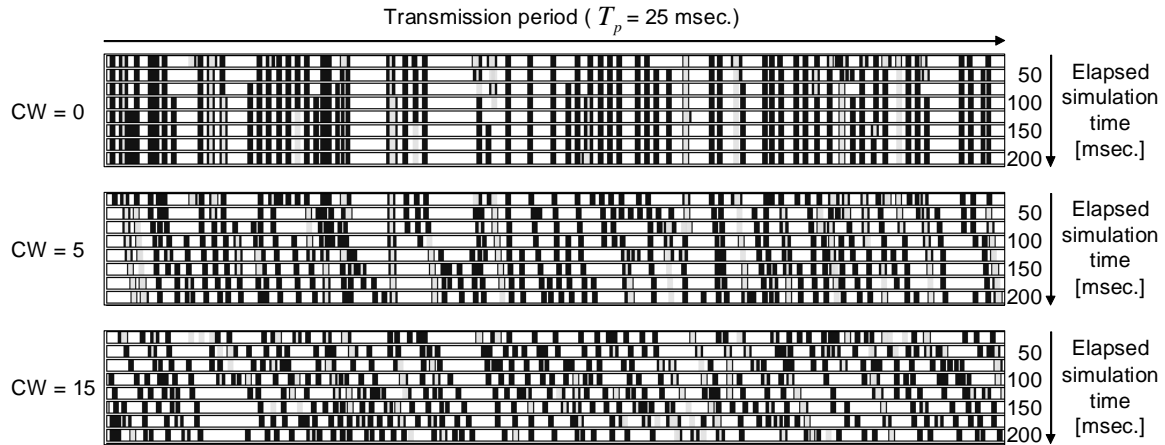


図 5.10 1 送信周期毎 ($T_p = 25\text{ms}$) の DATA 送信タイミング

5.4.2 通信結果信号 (CR 信号) の影響

PB-TRMA について, CR 信号の影響を調査するため, 次を示す三つの方式の通信品質を比較する.

- *PB-TRMA only BUSY*

この方式は CR 信号として BUSY のみを使用する. つまり, 図 5.11 に示すように, 車両 A と車両 C の DATA パケットが衝突した場合, 両車両は $T_{collect}$ 時間以内に COLL を受信しない. しかし, この場合には, 受信が成功したことを示す BUSY も受信していないため, 図 5.3 に示したように, 車両 A と車両 C はパケット衝突を検出し NAV を設定する.

- *PB-TRMA only COLL*

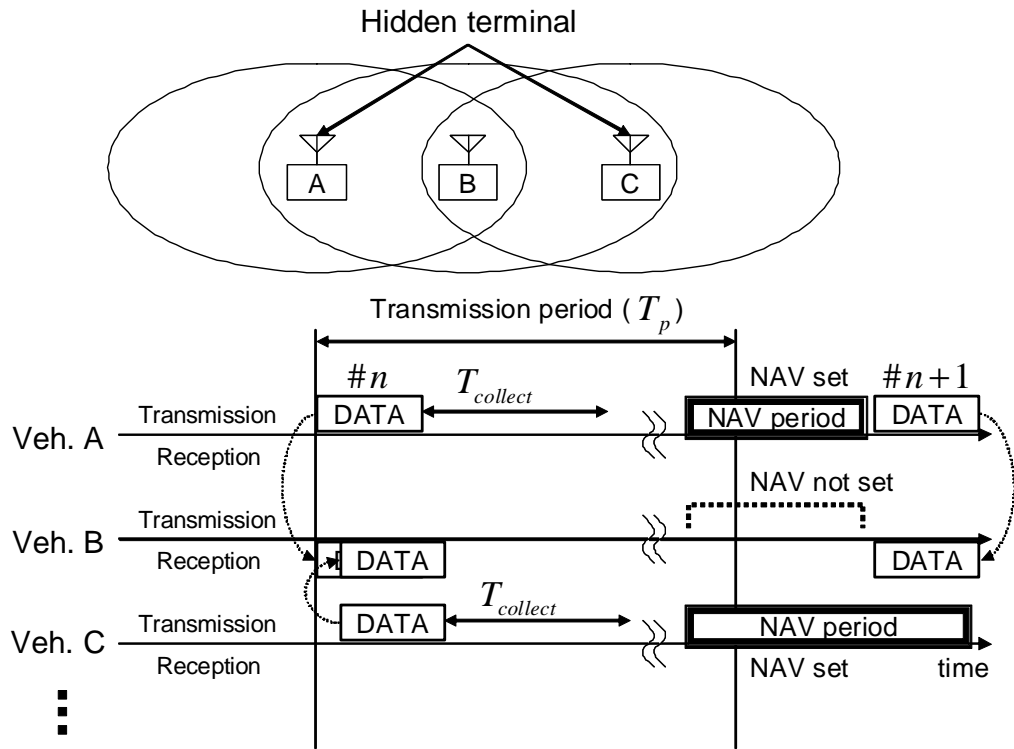
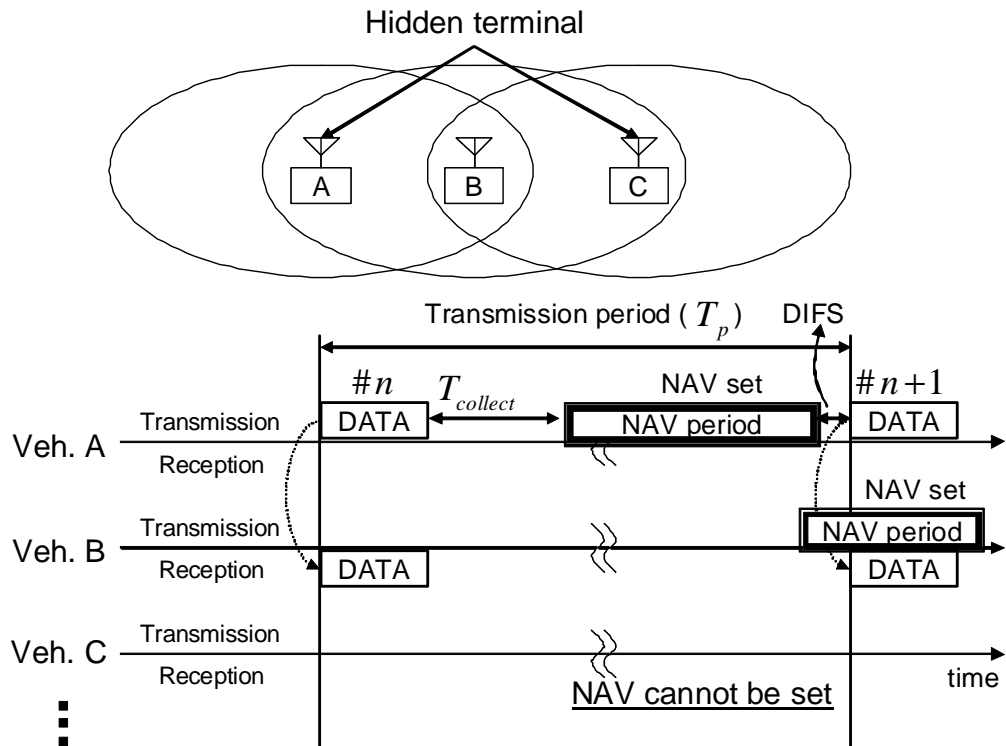
この方式は CR 信号として COLL のみを使用する. 図 5.12 に示すように, 車両 A は DATA 送信後の $T_{collect}$ 以内に BUSY を受信しない. しかし, この場合には, パケット衝突が発生したことを示す COLL も受信していないため, 図 5.4 に示したように, 車両 A と車両 B は NAV を設定する. 一方, 車両 C は隠れ端末 (図 5.12 では車両 A) を検出できないため, 車両 C は NAV を設定しない.

- *PB-TRMA w/ BUSY and COLL (PB-TRMA)*

この方式は 5.2 節において, 図 5.2 から図 5.6 で示した通常の PB-TRMA である. すなわち, COLL 信号によるパケット衝突回復と BUSY 信号による隠れ端末検出の二つの機能を備えている.

シミュレーションでは, PB-TRMA の CW の値を 0 とし, 全車両を停止させた (速度 0m/s). 更に, 物理レイヤでのパケット誤りは発生しないものとした.

図 5.13 に平均トラヒックに対するパケット到達率を示す. パケット到達率は, シミュレーション開始から十分な時間経過後, パケット到達率の時間変動が小さくなった時間帯の 20 秒間を対象とした.

図 5.11 DATA 衝突発生時の *PB-TRMA only BUSY* 方式の動作アルゴリズム図 5.12 DATA 受信成功時の *PB-TRMA only COLL* 方式の動作アルゴリズム

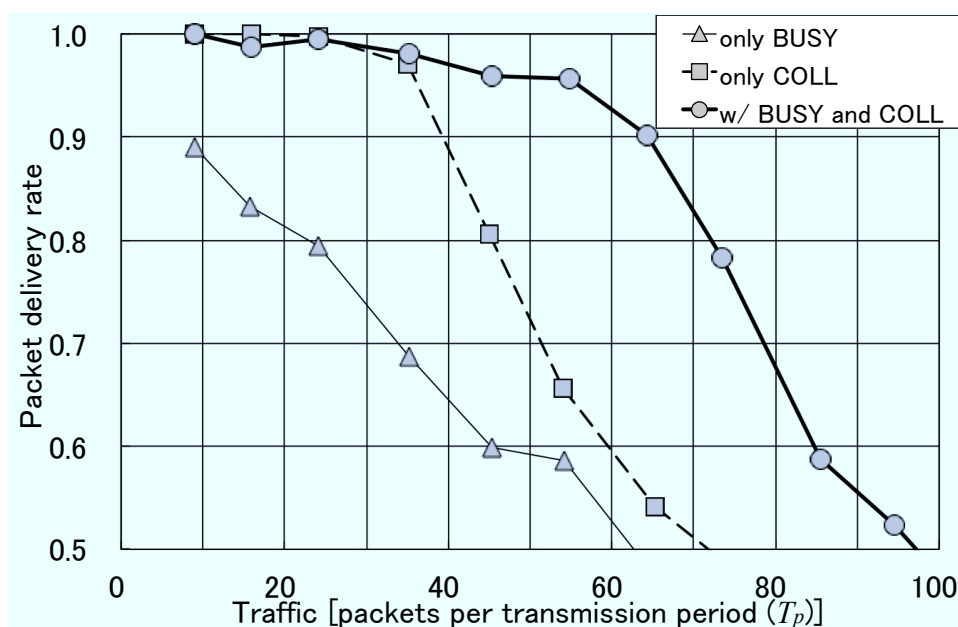


図 5.13 PB-TRMA に関する通信トラヒックに対するパケット到達率

図 5.13 より、PB-TRMA *w/ BUSY and COLL* 方式、すなわち、通常の PB-TRMA が最も良いパケット到達率を達成していることがわかる。また、PB-TRMA *only BUSY* 方式は、全てのトラヒックに関して、最もパケット到達率が低くなっている。この理由は、以下のとおりである。PB-TRMA *only BUSY* 方式の場合では、必ずしもパケット衝突を検出することができるとは限らないため、図 5.14 に示す車両 C のように連続して DATA パケットの衝突が発生する。一方、PB-TRMA *only COLL* 方式のパケット到達率は、通常の PB-TRMA のそれよりも小さくなっている。これは、必ずしも全ての車両が隠れ端末の送信タイミングを把握できず、パケット衝突が発生するためである。

以上の結果より、周期ブロードキャスト通信である PB-TRMA において、高品質な性能（例えば、高いパケット到達率）を達成するためには、COLL 信号によるパケット衝突回復と BUSY 信号による隠れ端末検出の二つの機能が必要不可欠であるといえる。

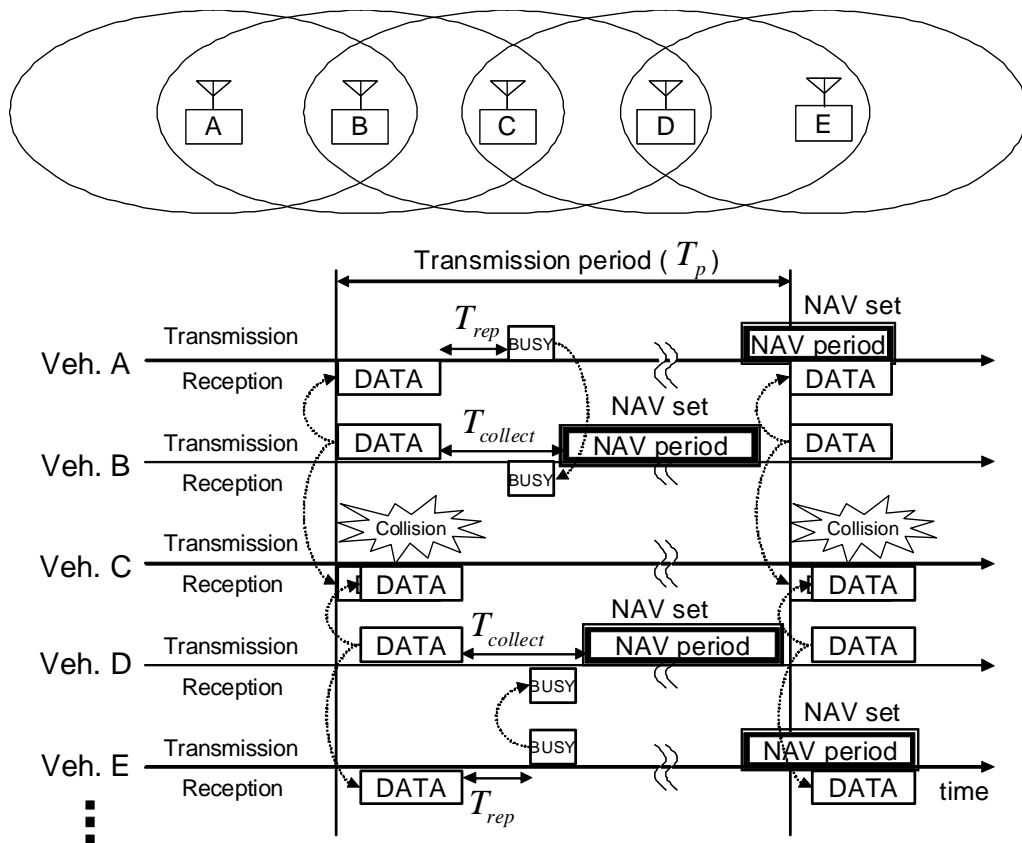


図 5.14 PB-TRMA only BUSY方式における連続パケット衝突の例

5.4.3 物理層におけるパケット誤りの影響

次に、物理レイヤにおけるパケット誤りの影響を調査するために、PB-TRMA w/ BUSY and COLL (以下、単にPB-TRMA とする) と CSMA/CA の2方式の通信品質を比較する。まず、物理レイヤにおけるパケット誤りとして、送信されたパケットは任意の確率 (P_{err}) でランダム誤りが発生するものとした。シミュレーションでは、 P_{err} を 0, 0.01, 0.1 と変化させ、PB-TRMA の CW を 0, CSMA/CA の CW を 15 とした。また、全車両速度を 0m/s とした。

図 5.15 に平均トラヒックに対するパケット到達率を示す。パケット到達率は、シミュレーション開始から十分な時間経過後、パケット到達率の時間変動が小さくなった時間帯の 20 秒間を対象とした。

図 5.15 より、 P_{err} が増加するに従って、両方のプロトコル性能が劣化していることがわかる。特に、 $P_{err} = 0.1$ について、PB-TRMA のパケット到達率は大きく低下していることが確認できる。この理由は以下のとおりである。車両がパケット誤りの発生によって DATA パケットが受信できなかった場合、その車両は BUSY 信号を送信しない。したがって、PB-TRMA の動作は、PB-TRMA only COLL 方式のそれに近づくことになり、周辺端末が必ずしも隠れ端末の送信タイミングを把握できず、パケット衝突が発生するためである。

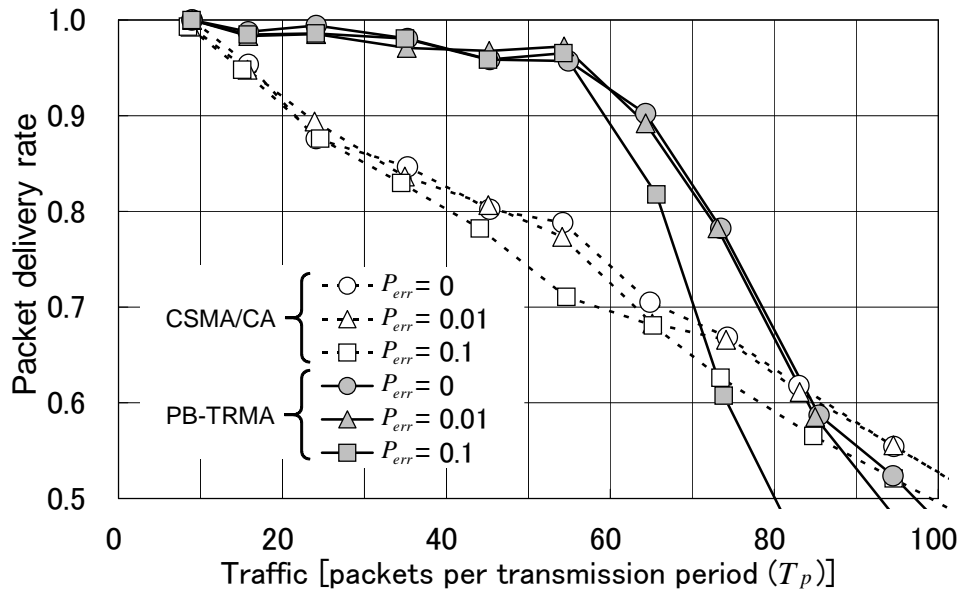


図 5.15 パケット誤りがPB-TRMA と CSMA/CA 性能に及ぼす影響

5.4.4 車両移動の影響

最後に、車両移動の影響を調査する。5.4.1 節の結果より、PB-TRMA は TDMA ライクな動作をしていることを確認した。そこで、隠れ端末問題を解決する自律分散型 TDMA プロトコルの一つとして、D-TDMA (Decentralized TDMA) [105] を取り上げる。そして、PB-TRMA(w/ BUSY and COLL), D-TDMA, 及び、CSMA/CA の三つの方式の通信品質を比較する。

D-TDMA プロトコルは、周期的に繰り返されるフレームを N スロットに分割し、スロット単位のアクセスを行う。図 5.16 に、PB-TRMA を用いた場合における 1 送信周期当たりの最大 DATA パケット数を示している。 $DIFS + L_{DATA} + T_{rep} + L_{BUSY}$ を 1 ユニット時間と定義すると、本シミュレーションにおける 1 ユニット時間は $240\mu s$ となり、1 送信周期 (25ms) に最大 104 の DATA パケットが送信されることになる。そこで、D-TDMA についても同様に 1 フレームにおけるスロット数 (N) を 104 と設定し、周辺車両とのスロット同期は完全に実現できているものと仮定した。

シミュレーションでは、PB-TRMA の CW を 0, CSMA/CA のそれを 15 と設定した。更に、シミュレーション評価モデルである図 5.7 について、 y 軸と平行な道路側の信号が青、 x 軸と平行な道路側の信号は赤と仮定した。すなわち、 y 軸と平行な道路を走行中の車両の速度を 0m/s, 10m/s, 20m/s と変化させた。それ以外の車両 (x 軸と平行な道路を走行中の車両) については停止させた (速度 0m/s)。

図 5.17 に、平均トラヒックに対するパケット到達率を示す。これは、シミュレーション開始から十分な時間経過後、パケット到達率の時間変動が小さくなった時間帯の 20 秒間を対象とした。また、物理レイヤでのパケット誤りは発生しないものとした。

シミュレーション結果では、ここで示したトラヒック量に関しては、D-TDMA の性能が PB-TRMA よりも良いことがわかる。したがって、自律分散型 TDMA プロトコルは、1 フレームを幾つかの時間スロットに分割してアクセスしているため、スロット分割のない PB-TRMA に

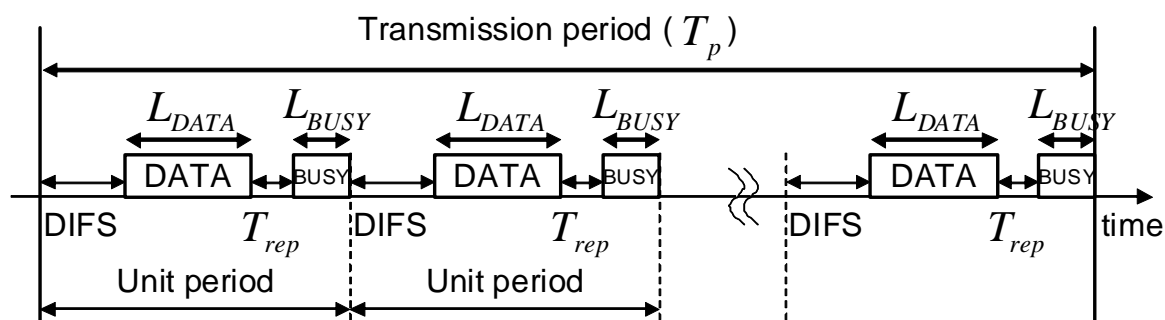


図 5.16 PB-TRMA における 1 送信周期の最大 DATA 数

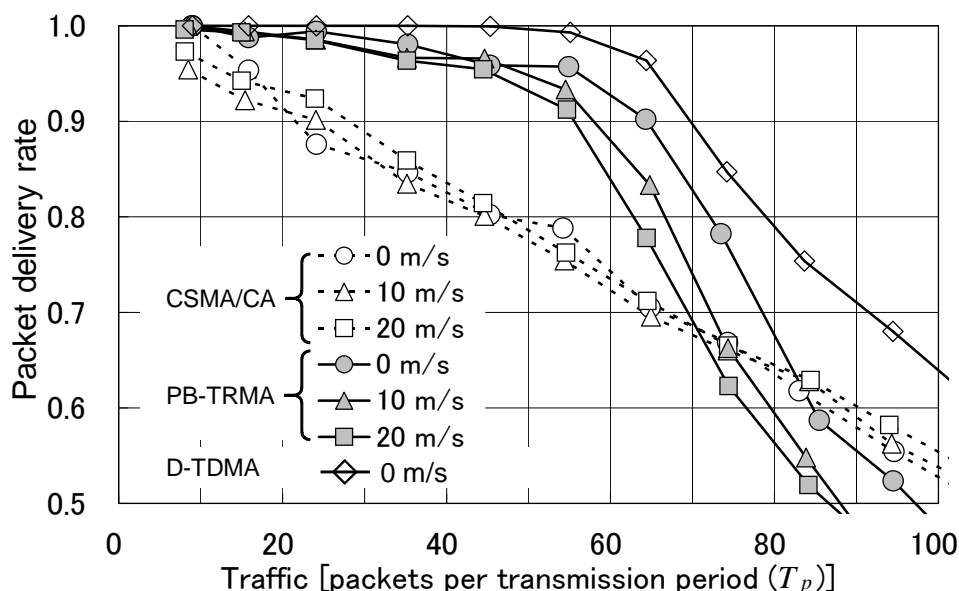


図 5.17 PB-TRMA, D-TDMA, 及び, CSMA/CA の性能比較

よって実現できる性能の上限値に相当すると考えられる。

また, 図 5.17 より, ここで示した全車両速度に対して, PB-TRMA の通信性能が CSMA/CA のそれよりも良いことが確認できる. 本シミュレーションにおいては, 物理レイヤにおけるパケット誤り, 捕捉効果を考慮していないため, 通信性能が低下する要因は, 隠れ端末問題によるパケット衝突のみである. しかし, 1 送信周期当たりのトラフィック量が約 75 パケットを超えると, PB-TRMA のパケット到達率は, CSMA/CA のそれよりも小さくなっている. これは, BUSY と COLL の CR 信号の送信によって通信トラフィックが増加しているためである.

PB-TRMA については, 車両速度が速くなるに従って, パケット到達率が劣化している. これは, 各車両が移動することによって発生するパケット衝突により, DATA 送信タイミングを変更するためである.

5.5 むすび

本章では、安全運転支援のための高信頼な車車間通信を実現する MAC プロトコル（リンクレベル QoS）について検討した。仮想キャリアセンスメカニズムである NAV を周期ブロードキャスト通信に拡張することによって、自律的に送信タイミングを制御しパケット衝突を回避する新しい MAC プロトコルとして、PB-TRMA を提案した。そして、計算機シミュレーションにより、MAC プロトコルとしての基本性能を明らかにした。

その結果、PB-TRMA は、隠れ端末問題を解決し、パケット衝突を低減できることがわかった。また、周期ブロードキャスト通信である PB-TRMA において、高品質な性能（例えば、高いパケット到達率）を達成するためには、COLL 信号によるパケット衝突回復と BUSY 信号による隠れ端末検出の二つの機能が必要不可欠である。更に、提案プロトコルは、周辺車両との自律的なスロット同期機能を必要とせず、TDMA ライクな動作を実現していることを確認した。

第 6 章

車車間通信による安全運転支援のアプリケーションレベル QoS

6.1 まえがき

第 5 章では、車車間通信システムのリンクレベル QoS に着目し、パケット衝突を回避するための送信タイミングを自律的に予約する新しい MAC プロトコルとして PB-TRMA を提案し、隠れ端末対策としての有効性を明らかにした。その結果、PB-TRMA は、TDMA ライクな動作を実現していることを確認するとともに、PB-TRMA の上限特性は、自律分散型 TDMA プロトコルであることを示した。ここでは、一例として、D-TDMA[105] を比較対象として示した。

TDMA 型のアクセスは、所定の長さのフレームを幾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、スロット同期が取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 [105] では、完全にスロット同期が取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。更に、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 [105] 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 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。

本章では、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、本章では、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 [113] 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を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、本章で評価対象とする 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 [105] で提案している D-TDMA の 2 方式を取り扱う。

以下では、6.2 節で、D-TDMA プロトコルの概要を述べ、6.3 節において、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、6.4 節において、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。更に、6.5 節では、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、6.6 節において、シミュレーション評価結果を示す。

6.2 D-TDMA プロトコル概要

本節では、文献 [105] 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 6.1 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 (PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) プリアンブルなど)、各車両が周辺車両の通信状態を示すフレーム情報 (FI: Frame Information)、位置情報などのデータペイロードから成る。

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 (Request To Change): パケット衝突が検出されたスロット

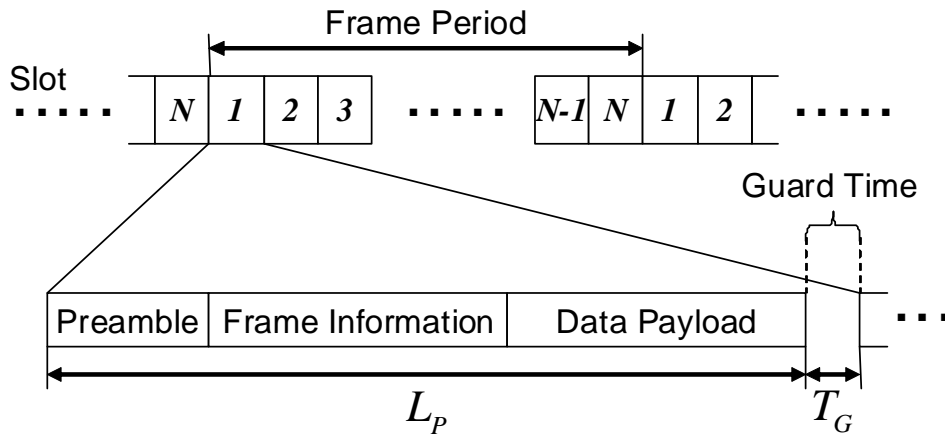


図 6.1 D-TDMA プロトコルのパケットフォーマット

- NACK (Negative ACK) : 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

本章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 6.2 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 6.2 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二つの閾値 (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、一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全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。

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。一つのスロット内に、一つのパケットしか受信しなかった場合は、正常受信とみなし、ACK と判断する。しかし、一つのスロット内で、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、それ以降受信した全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 6.2 のように、スロ

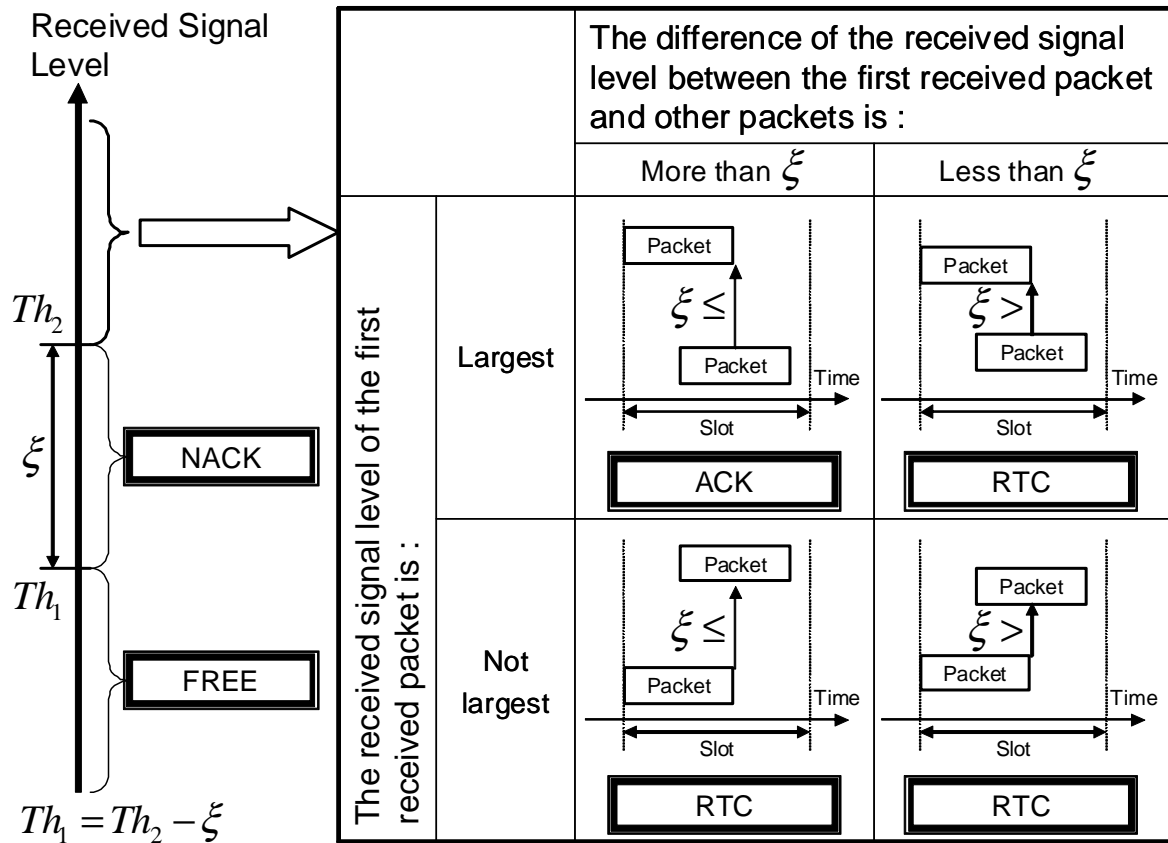


図 6.2 スロット情報の決定方法

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、

$$Th_1 = Th_2 - \xi \quad (6.1)$$

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、本章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、周辺に幾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 B にて考察する。

また、別の方法として、文献 [103] 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 [114] 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、及び、周辺車両から受信した全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、更に 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 フレーム中の全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、一つでも 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、周期的な送信を保証することが可能である。

6.3 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、スロット同期が取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、本節では、文献 [113], [115] 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ると考えられる車群すれ違い時を取り扱う。

6.3.1 自律分散スロット同期アルゴリズム

文献 [115] 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 [113] 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取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 6.3 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

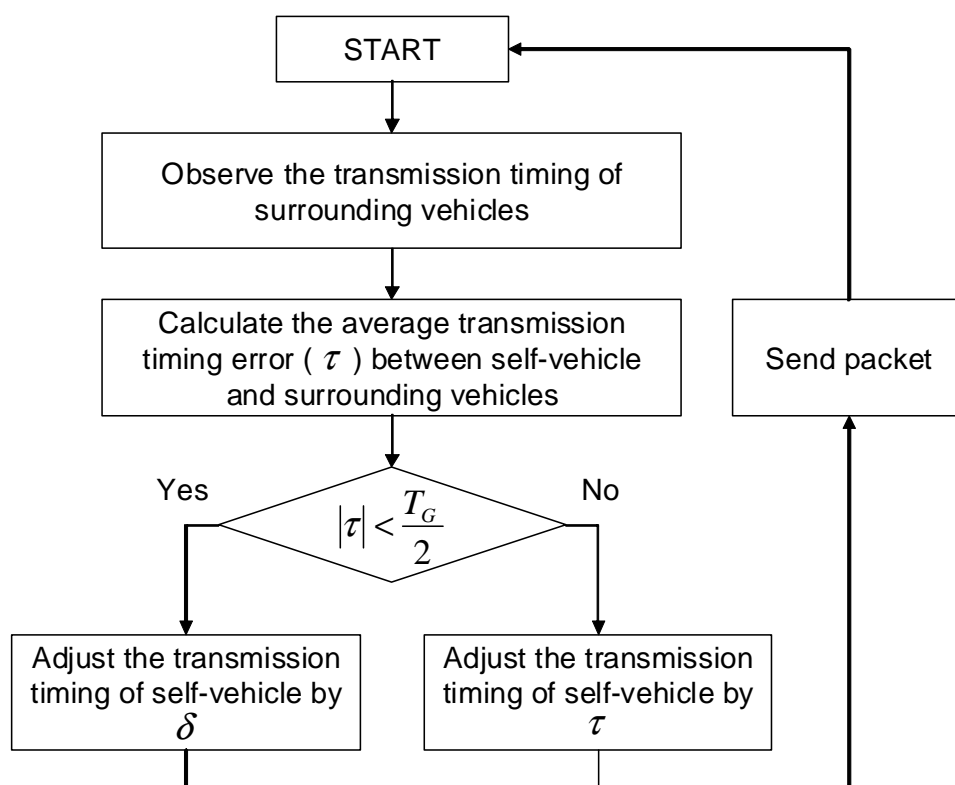


図 6.3 自律分散スロット同期アルゴリズム

る。これは、既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。

$$\delta = \text{sgn}(\Delta + \tau) \times \min\left(\frac{\Delta + \tau}{2}, \frac{T_G}{4}\right) \quad (6.2)$$

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。

6.3.2 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 6.4 に示す。これは、二つの車群 (135 台/車群) が速度 20m/s 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 7m で、3 車線上にランダムに配置した。また、二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。検討対象とした二つの同期アルゴリズム [113], [115] は、ともに周辺端末の送信

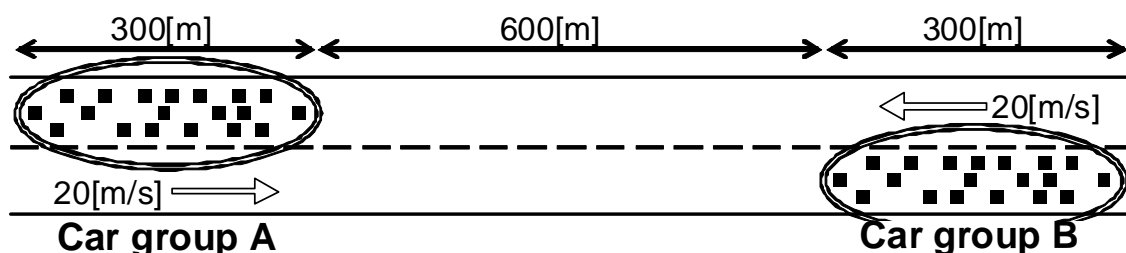


図 6.4 シミュレーションモデル

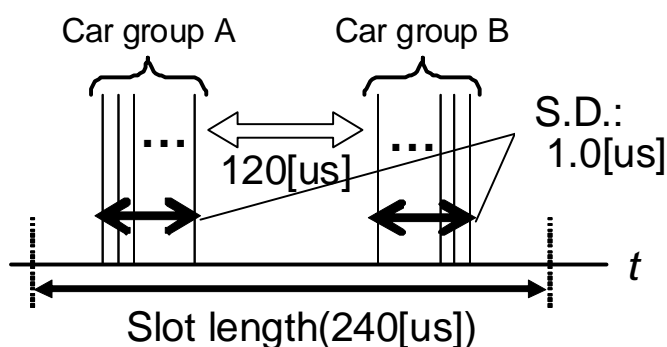


図 6.5 スロット同期タイミングの初期状態

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 6.4 の二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、その車両と二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、全ての車両の送信タイミングの同期が取れることになる。つまり、二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、二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、二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、共に台数が多い場合を想定した環境が、二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 6.5 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 $1.0\mu\text{s}$ 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-2[109] 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 6.1 と表 6.2 に示す。本章では、物理レイヤは、文献 [26] の 700MHz 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 16QAM とし、最低受信感度は文献 [62] 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無いものとした。

更に、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 99.84ms と固定した。

表 6.1 シミュレーション諸元

items	values
Bandwidth	10 MHz
Data rate	12 Mbps
Modulation	16QAM / OFDM
Coding rate	1/2
Data bits per OFDM symbol	96 bits
PLCP preamble duration	32 μ s
Symbol interval	8 μ s
Radio frequency	800 MHz
Transmission power	20 dBm (100 mW)
Receive threshold (16QAM; 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 ms
Antenna height	$h_t = h_r = 1.5$ m

表 6.2 D-TDMA プロトコルパラメータ

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

シミュレーション内の全ての車両は乗用車を想定し、送受信のアンテナ高は全て 1.5m 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 [58] の見通し内の式を使用する。文献 [58] 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、800MHz での電力損失 (L) の近似式である式 (6.3) と式 (6.4) を用いて算出する。

$$L = \begin{cases} 20 \log d + 54.3 - 15.5 \log W & (d < b_p) \\ 20 \log b_p + 43.3 \log \frac{d}{b_p} + 54.3 - 15.5 \log W & (d \geq b_p) \end{cases} \quad (6.3)$$

$$b_p = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (6.4)$$

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27mとした。これらの条件から、通信可能距離は約210m、プリアンブル検出可能距離は約350mとなる。シミュレーションでは、車群が移動し、車群の先頭車両同士がプリアンブル検出可能となった時刻からスロット同期タイミングの調整を開始するため、二つの車群間の距離が約350m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。

6.3.3 スロット同期処理を考慮したシミュレーション結果

図6.6及び図6.7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、及び、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[113]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[115]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、及び、それぞれの周辺車両の通信タイミングがガード時間($T_G = 32 \mu s$)に収まっている時、その車両はスロット同期が成立しているものとみなしている。

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、車両毎の連続的なパケット誤りを評価するため、図6.8と図6.9に、提案のスロット同期手法に関して、車両毎のパケット誤り発生の有無、及び、連続パケット誤りに関する車両台数分布を示す。図6.8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台の車両毎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、各プロットには、一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6.9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わかる。

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わかり、通信品質に大きな影響を及ぼさないといえる。

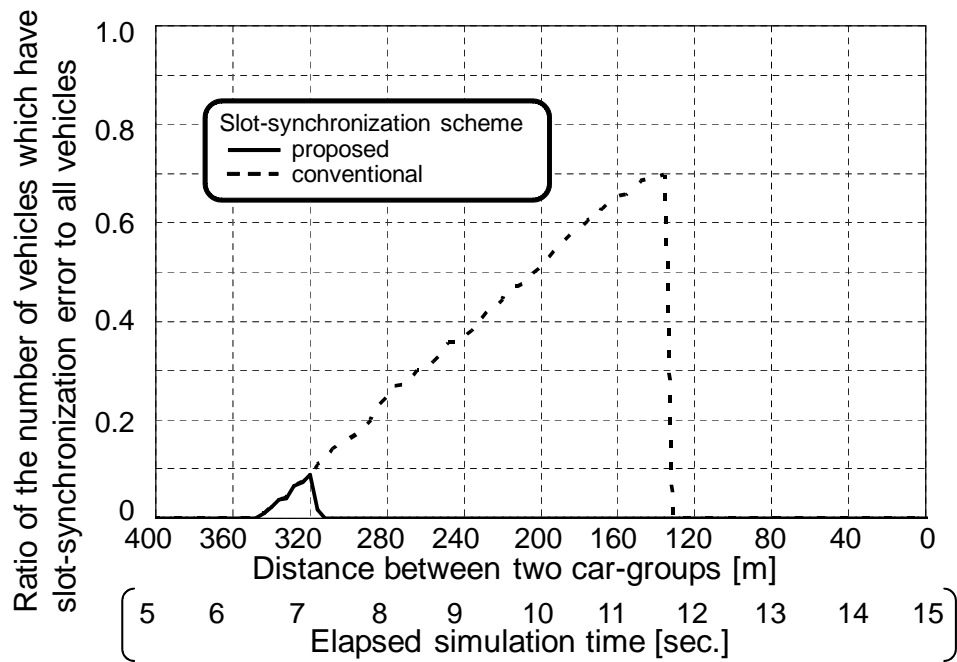


図 6.6 スロット同期が確立できていない車両の割合

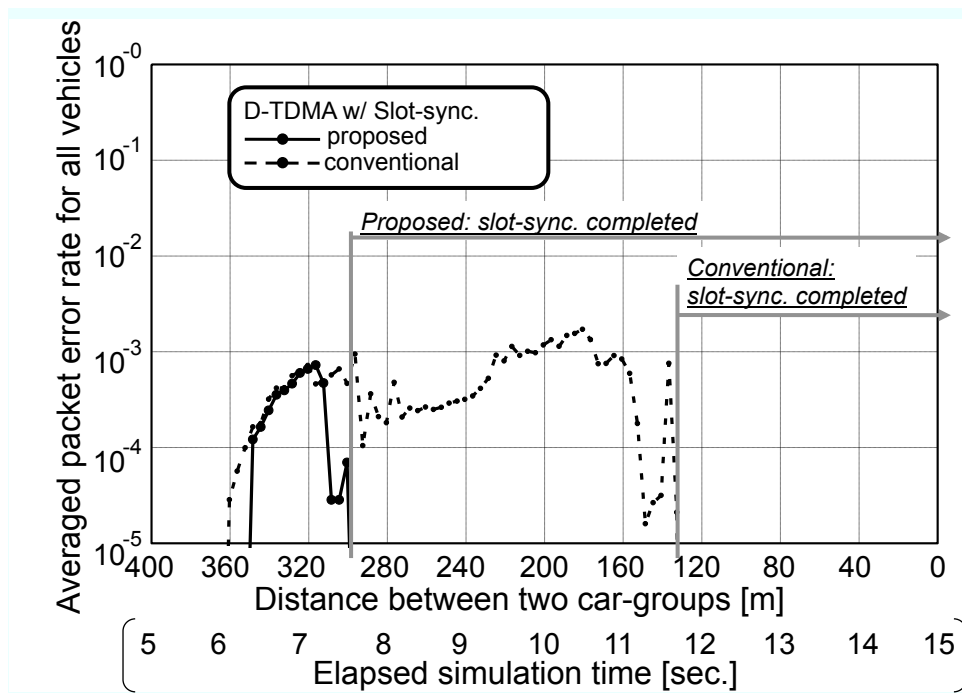


図 6.7 平均パケット誤り率

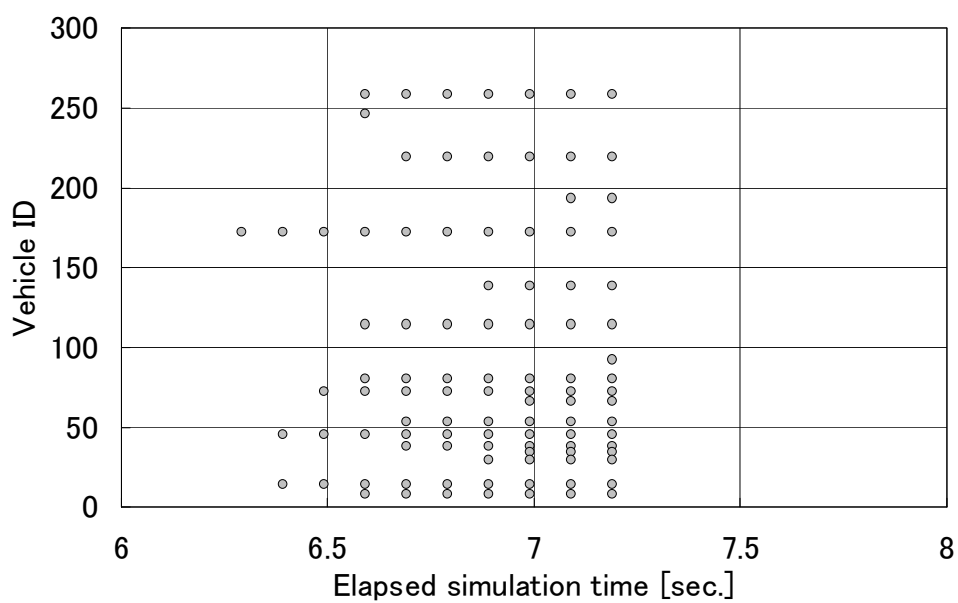


図 6.8 車両毎のパケットエラー発生タイミング

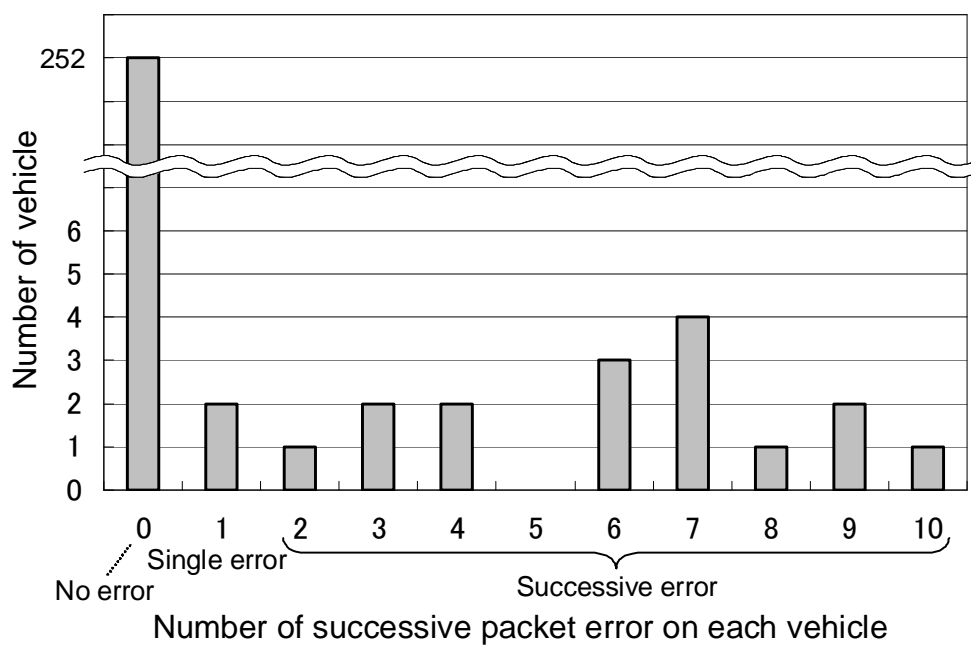


図 6.9 車両毎の連続パケット誤りに関する車両台数分布

6.3.4 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 [113] 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を確立し、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、本章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、全ての車両が GPS 受信機を搭載していることを想定している。文献 [116] 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 $1\mu\text{s}$ 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、全ての端末が 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取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 [113] 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。

更に、文献 [117] では、地上デジタル放送のガードインターバル（GI：Guard Interval）のタイミングを検出することによって、平均 CNR 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 $10\mu\text{s}$ 以内の精度で、1.134ms 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 [113] 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、本章では、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。

6.4 アプリケーションレベル QoS 評価のためのシミュレーションモデル

本章では、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、本節では、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。

6.4.1 道路及び交通流モデル

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 6.10 に示すように、1500m 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 6.10 右側の実線）と片側 2 車線の主要道路（図 6.10 右側の二重線）を 200m 毎に配置している。また、片側 1 車線の細街路は図 6.10 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 [118] の交通流シミュレーション（NETSTREAM: NETwork Simulator for TRaffic Efficiency And Mobility）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、幹線道路及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。

更に、通信シミュレーションについては、6.3.2 節と同一の ns-2 を用いているため、物理レ

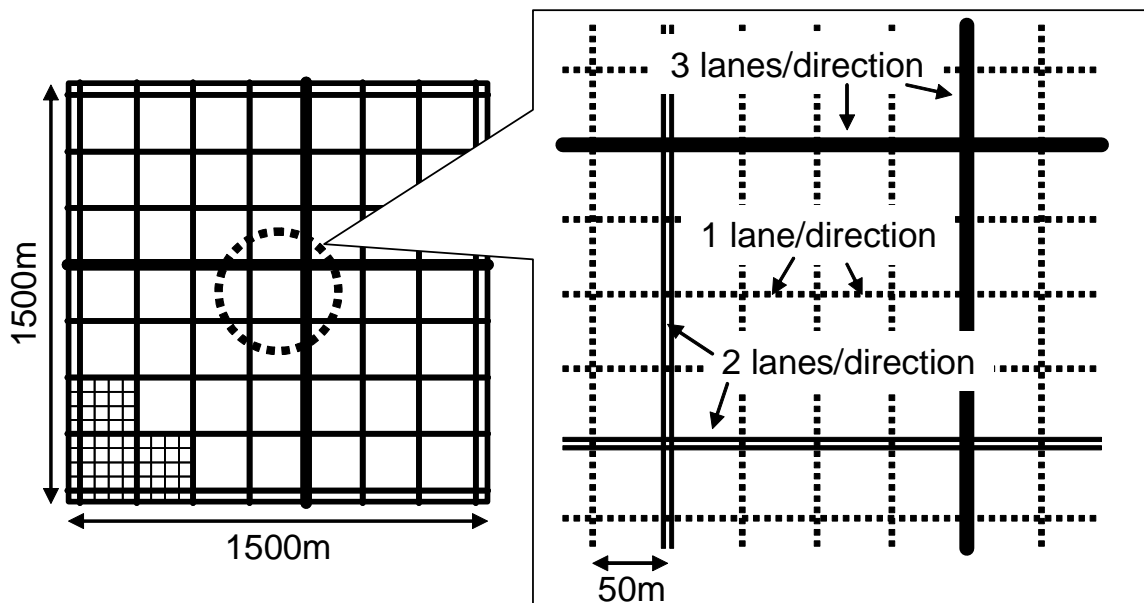


図 6.10 シミュレーションにおける道路モデル

イヤにおけるパケット誤りは無いものとしている。これは、本章では、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。

6.4.2 電波伝搬モデル

前節同様、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 [58]。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 の道路幅の道路が基盤目状に配置されている）において 800MHz と 1400MHz 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) の前後で二つに分けて直線（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 [119]。

星型の形状を持つ関数は多数考えられるが、式 (6.5) の関数を用いて等電力線を近似する。

$$|x|^k + |y|^k = D^k \quad (k < 1) \quad (6.5)$$

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 300m 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 6.11 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 (6.3) と式 (6.4) 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 6.12 と図 6.13 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 1.5m 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わかる。また、送信点からの距離が 300m 程度までのエリアでは両モデルは概ね同様な値となる。一方、更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が生じるが、損失量が大いいため、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、本章で提案した伝搬モデルは、任意の二つの端末（例えば、以下、端末 A と端末 B で説明する）に着目した場合、車両の移動が無ければ、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

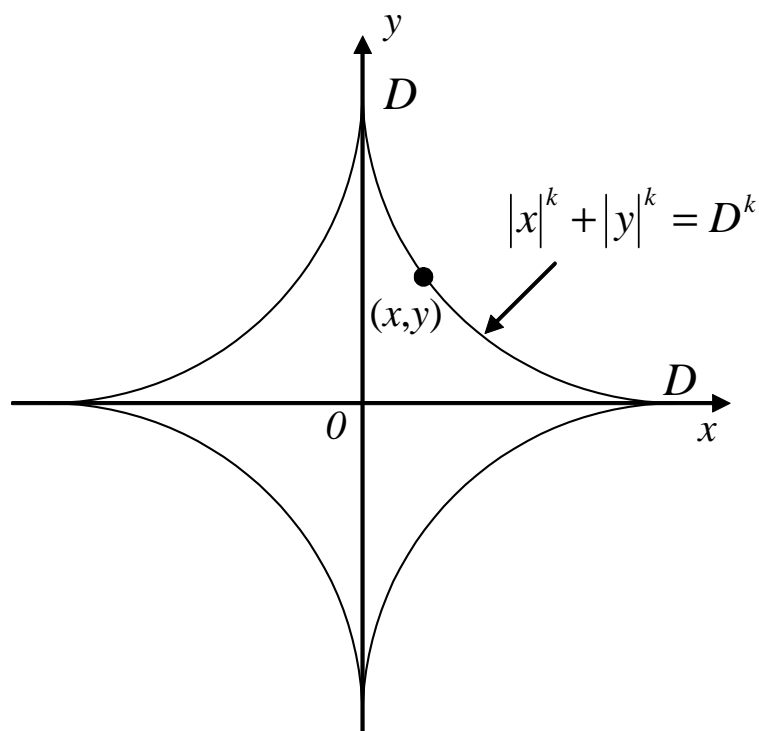


図 6.11 電波伝搬モデルの等電力線モデル

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、交通流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二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。すなわち、シミュレーションでは、端末の移動に伴い、受信電力関係が非対称となることを実現し、MAC プロトコルの特性を評価している。

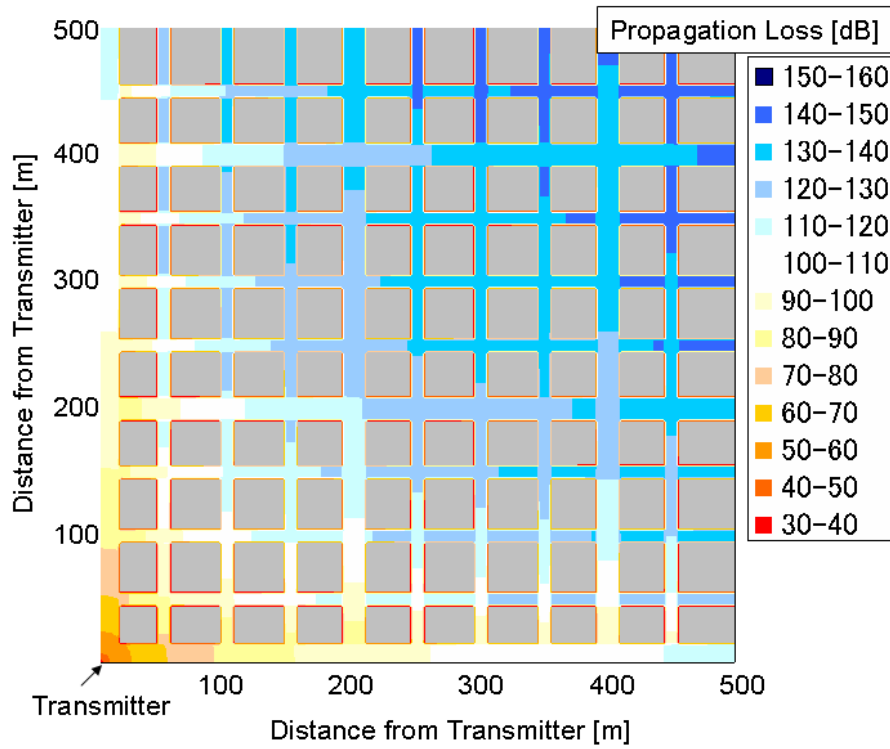
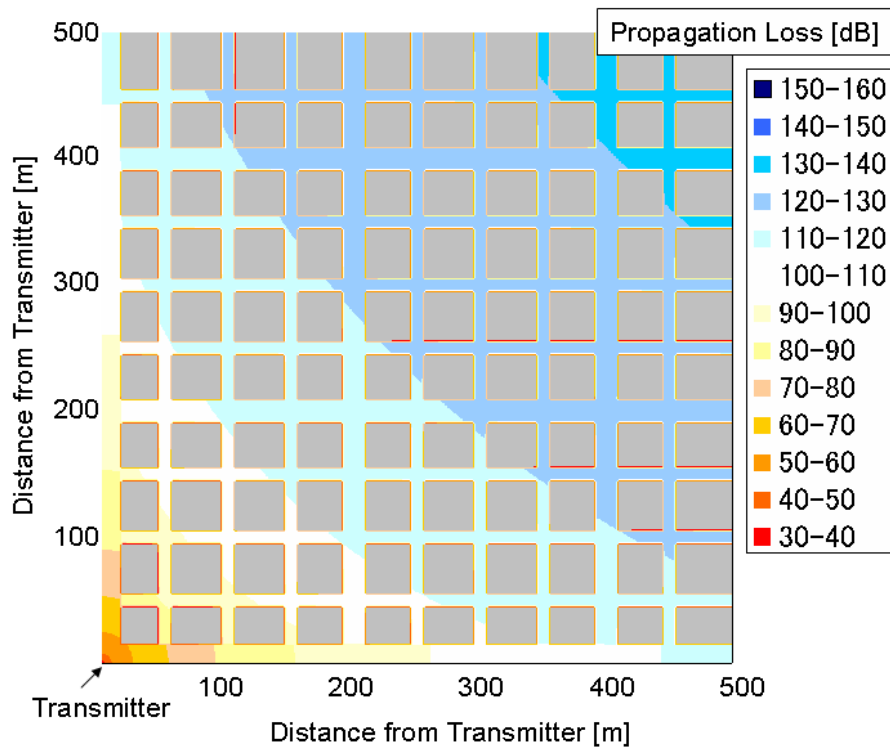


図 6.12 市坪モデルで算出した伝搬損失

図 6.13 簡易等電力星型近似モデル ($k = 0.6$) を用いた伝搬損失

6.5 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。本節では、更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 6.14 に示すコンセプトで、二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のか（サービスの情報更新精度）について評価する。

一つは、図 6.14(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。もう一つは、図 6.14(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、車両及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、本章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。

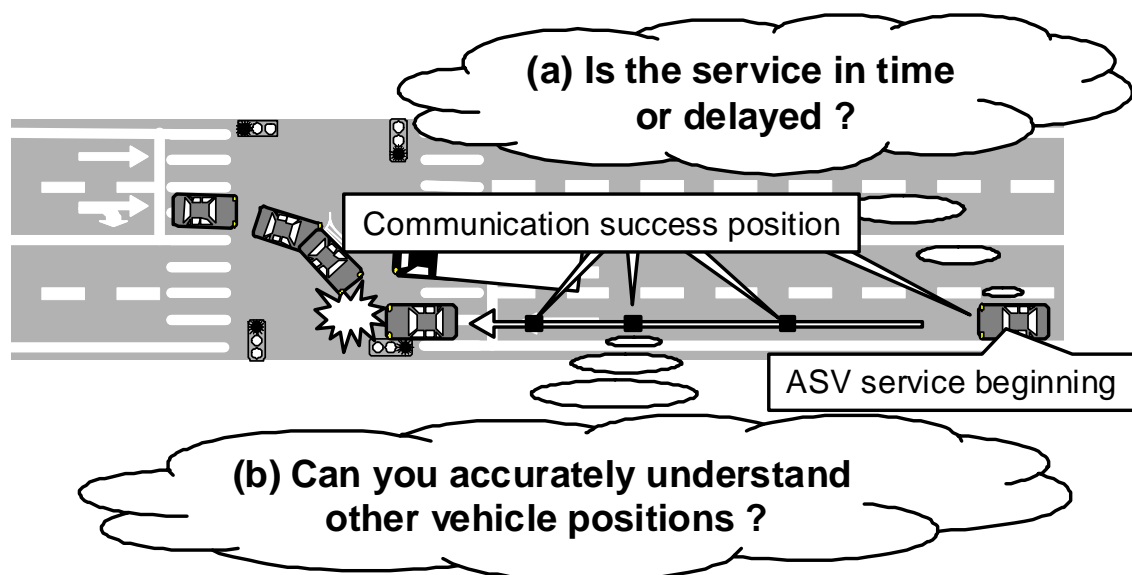


図 6.14 予防安全サービスのための評価指標コンセプト

6.5.1 初回相手車両把握地点

ASV では、想定事故シーン毎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、事故シーン毎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 [31]。

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。

$$L_s = \frac{V^2 - V_t^2}{2\alpha} + (V - V_t)T \quad (6.6)$$

ここで、 L_s はサービス提供開始地点 (m) であり、 V 及び 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。更に、 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提としている。すなわち、目標車両速度 $V_t = 0$ であり、式 (6.6) から算出すると、サービス提供開始地点は 172m 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 6.15 に示すように、交差点中央付近から約 170m 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 評価指標の一つとして提案する。これを初回相手車両把握地点と定義する。図 6.16(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 6.16(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、本章では、右折車両が右折待ちで停止した時点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、既にサービス開始地点の 170m 以内にも車両が存在す

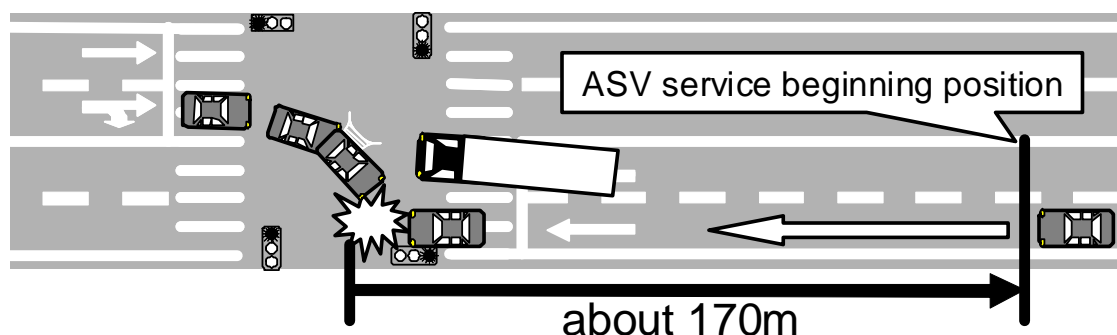
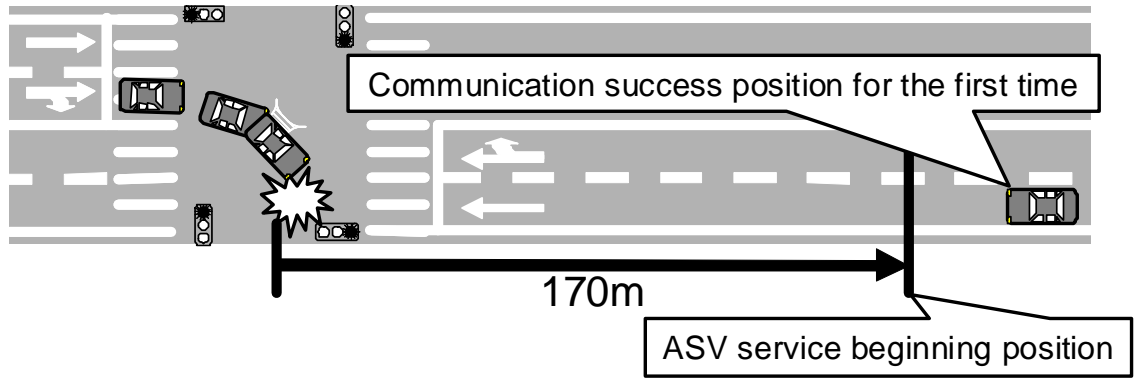
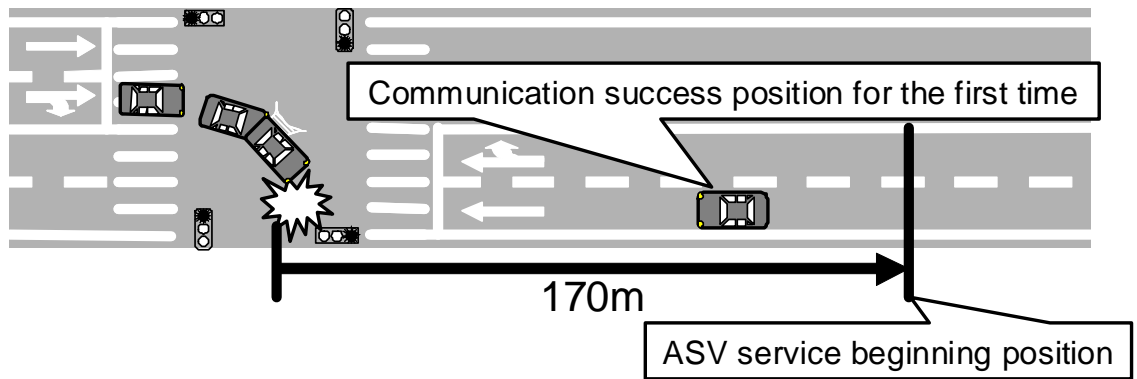


図 6.15 右折事故シーンにおける ASV サービス提供開始地点



(a) ASV service beginning is in time.



(b) ASV service beginning is delayed.

図 6.16 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

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。

6.5.2 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常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う。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5mの移動毎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、

$$L_{n,m} = \left| \sqrt{(x_n^t - x_n^r)^2 + (y_n^t - y_n^r)^2} - \sqrt{(x_m^t - x_m^r)^2 + (y_m^t - y_m^r)^2} \right| \quad (6.7)$$

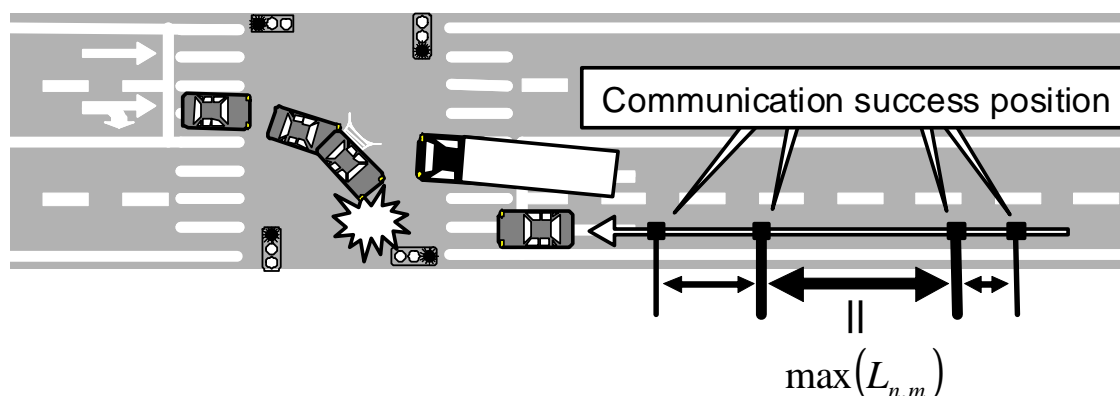


図 6.17 最大情報更新距離の定義

である。この値が、常に約 5m 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 6.17 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 170m 以内に入進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 5m 以内を満たしている車両台数割合を評価する。これを、もう一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。

6.6 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、及び、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、及び D-TDMA プロトコルパラメータは、それぞれ、前述した表 6.1、及び表 6.2 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 6.3 のとおり設定した。これらの値は、文献 [26], [62] を参考にして決定している。更に、捕捉効果については、D-TDMA と同様に取り扱い、図 6.2 に示す四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、それ以降受信した全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扱う。なお、本節においても、物理レイヤにおけるパケット誤りは無いものとしている。

6.6.1 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 600m 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、

表 6.3 CSMA/CA プロトコルパラメータ

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

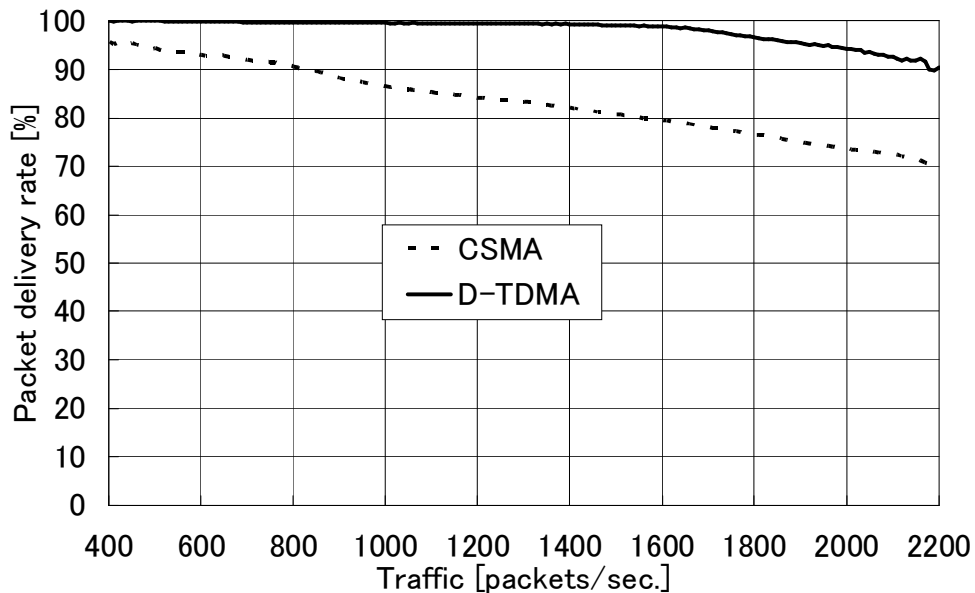


図 6.18 通信トラヒックに対するパケット到達率

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 2000 台から約 5500 台まで変化させた。

図 6.18 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わかる。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 1500 packets/s 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、車両の移動に伴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。

更に、高負荷時には、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 6.4 に、シミュレーションエリア内に約 8000 台の車両が存在する環境における通信トラヒック及び通信性能を示す。

まず、表 6.2 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 4166 となる。シミュレーション結果の表 6.4 より、D-TDMA の通信トラヒックは 6739 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ない環

表 6.4 高負荷時におけるシミュレーション結果

	Traffic [packets/s]	Packet delivery rate
CSMA/CA	4695	34 %
D-TDMA	6739	16 %

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、全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 [31] 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、本章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 4300 台（図 6.18 の通信トラヒックが約 1500 packets/s）の場合について評価する。シミュレーションでは、全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 6.19 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 30m 毎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。

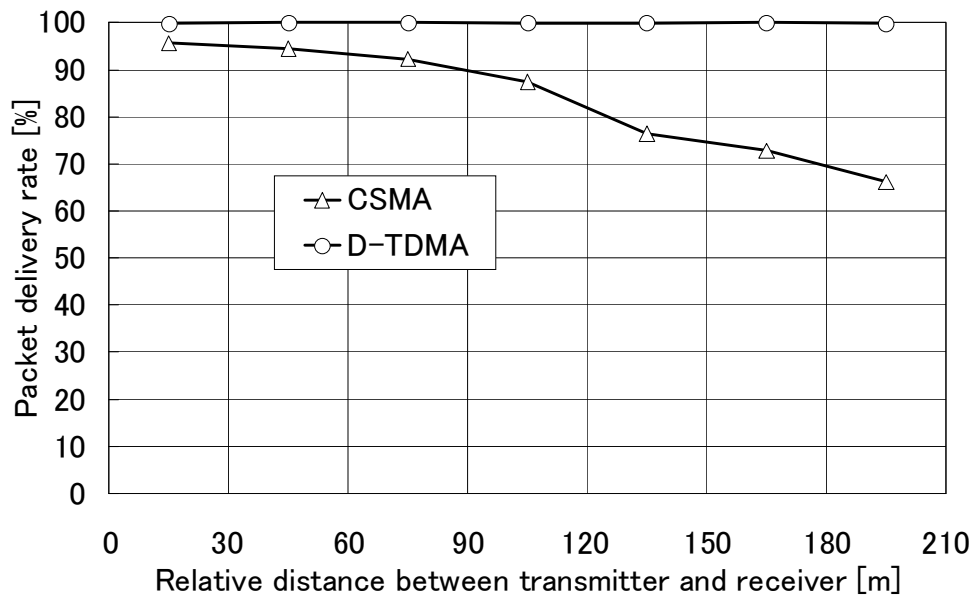


図 6.19 右折事故における相対距離に対するパケット到達率

6.6.2 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

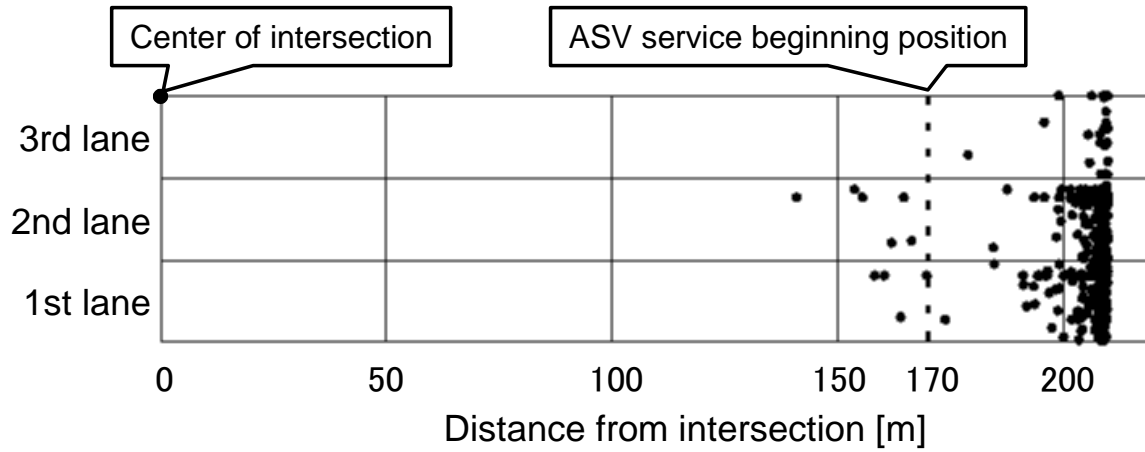
ここでは、アプリケーションレベル QoS を評価するため、右折事故シーンを取り上げ、前節で提案した安全運転支援システムの成立性評価のための二つの評価指標を用いる。ここでは、シミュレーションにおける総車両台数が約 4300 台の場合を用いる。

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 600m 四方に存在している車両から選択している。なお、本章で提案している電波伝搬モデル及び、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 210m である。

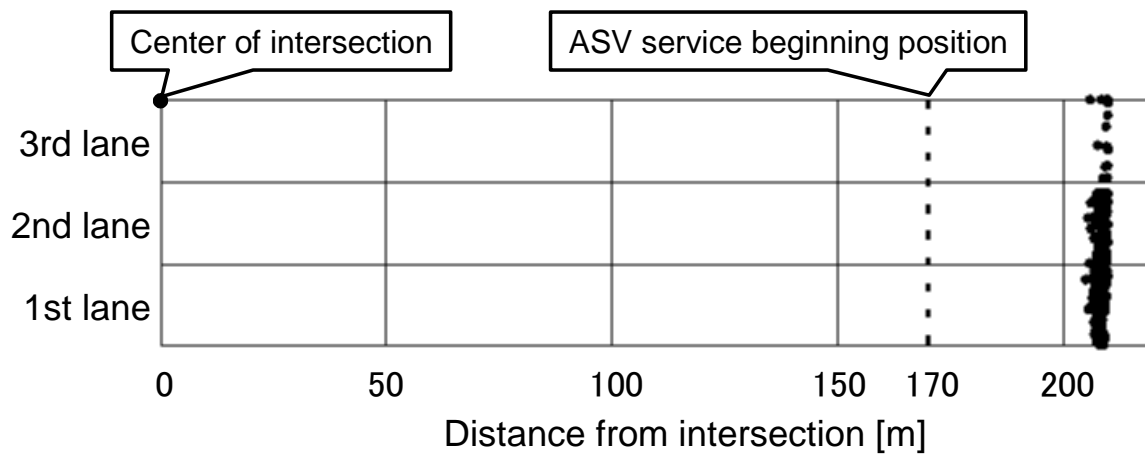
図 6.20 に交差点中央からの距離に対する初回相手車両把握地点を示す。縦軸は、幹線道路の対向車線の各車線を表している。図 6.20(a) より、CSMA/CA の場合は、評価対象車両のうち約 2% の車両が、右折待ち車両から ASV サービス提供開始地点である 170m の距離以内で初めて通信が成功する状況となっている。これは、図 6.19 の送受信間の距離が離れるに従って、隠れ端末問題の影響が大きくなり、パケット到達率が低下するためである。したがって、CSMA/CA では、隠れ端末問題によって、連続して通信に失敗し、初めて通信に成功する位置が ASV のサービス提供開始地点より手前になることが発生するため、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 6.20(b) より、D-TDMA の場合は、全ての車両が、通信可能距離である 210m 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 6.21 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。



(a) CSMA/CA



(b) D-TDMA

図 6.20 右折事故における初回相手車両把握地点

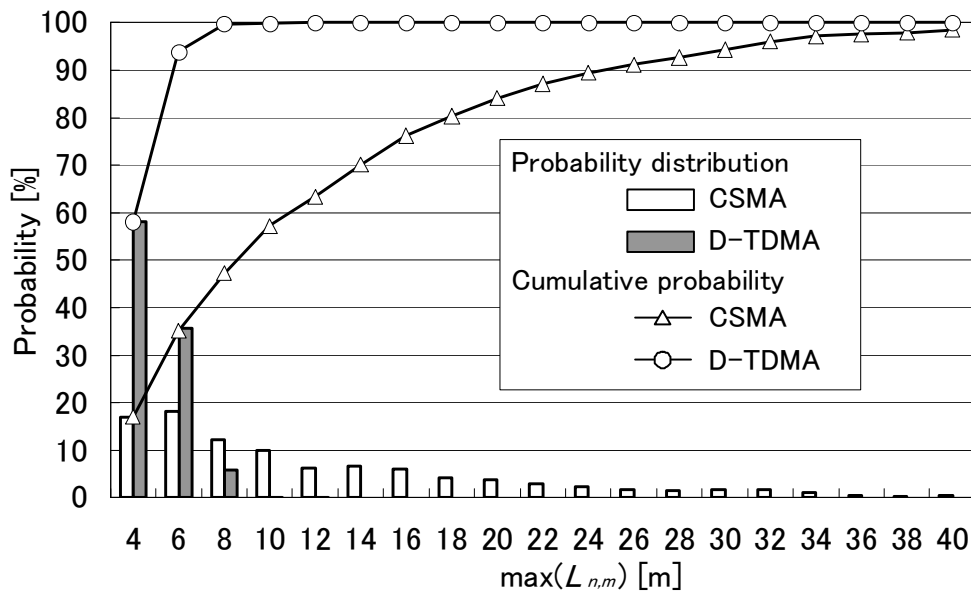


図 6.21 最大情報更新距離の確率分布と累積確率

図 6.21 より，CSMA/CA の確率分布は，最大情報更新距離 40m まで広がっているのに対し，D-TDMA のそれは，99.8% の車両が 8m 以内となっていることがわかる．これは，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 5m 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対し，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，5.5m であるため，更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 6.19 より，99.8% から 100% を示しているにも関わらず，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．6.5.1 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 70km/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，70km/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 6.22 に示す．図 6.22 より，ASV のサービス要件を満たす最大情報更新距離 5m 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．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．

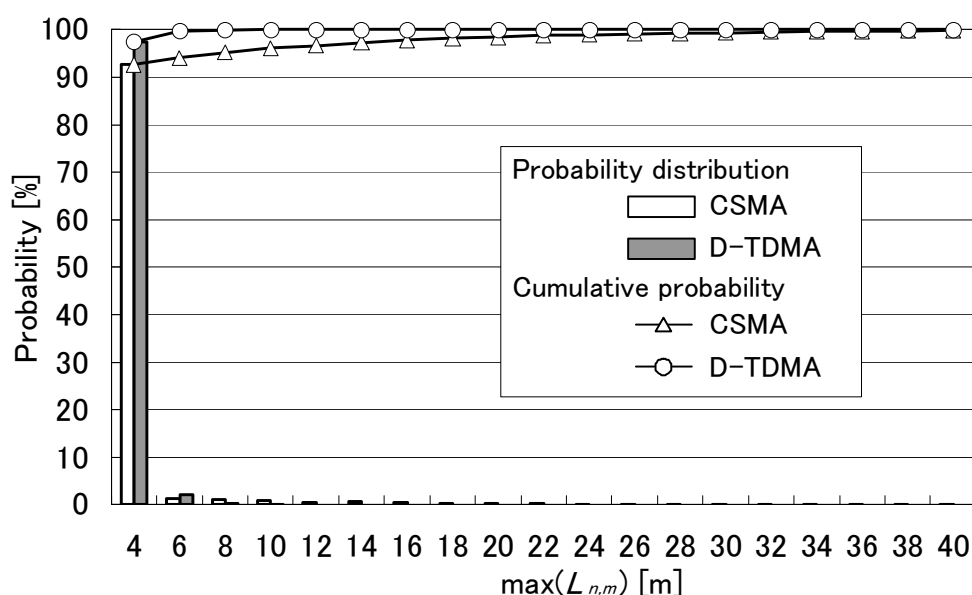


図 6.22 最大情報更新距離の確率分布と累積確率（70km/h 以下の車両）

6.7 むすび

本章では、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、本章では、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はなく、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二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 [113] 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を確立し、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。更に、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、その対策方式の一つとして、D-TDMA は有望なプロトコルであるといえる。また、第 5 章で提案した PB-TRMA については評価の対象としなかったが、隠れ端末対策としての有効性を考慮すると、PB-TRMA のアプリケーションレベル QoS は D-TDMA のそれに近い結果が期待できると考えられる。

第 7 章

パケットスケジューリングアルゴリズムによるメディア同期品質

7.1 まえがき

第 6 章までは、車車間アドホックネットワーク環境を対象に検討した。一方で、インフラ協調車車間通信システムの形態として、インフラ側のネットワークの介して車車間通信を行うことも検討されている [10]。ここでは、インターネットである IP ネットワーク（特に、IPv6）を用いるようなシステムに関する研究がなされている。したがって、このようなネットワーク環境においては、インフラ側である IP ネットワークの QoS 制御技術についてもアプリケーションの QoS パラメータに大きな影響を及ぼす。

しかし、現在のインターネットによって提供されている主なサービスはベストエフォート型であり、必ずしも高品質な転送を保証できるとは限らない。

一方、数年前から、QoS 保証メカニズムのネットワークへの導入が注目されてきた。これには、IETF (Internet Engineering Task Force) が提案している IntServ (Integrated Services) [120], [121] や、DiffServ (Differentiated Services) [122] がある。これらは、ネットワークレベルの QoS 制御技術である。

IntServ はエンドツーエンドの帯域予約に基づいており、フロー毎の QoS を保証するために、RSVP (Resource ReSerVation Protocol) シグナリング [123] を採用している。したがって、IntServ を実現するためには、すべてのルータが帯域予約機能を持ち、すべてのフローのステート情報を管理する必要がある。その結果、フロー数が増加するにつれてステート情報量が増大し、スケーラビリティの問題が生じる。

一方、DiffServ はフロー別制御を行わず、PHB (Per-Hop Behavior) [122] を採用している。各ルータにおいて、同一の DSCP (DiffServ CodePoint) [124] を有するパケットは同一の扱いを受ける。したがって、DiffServ において各ルータが管理しなければならない情報量は小さくなり、すべてのルータが同じ機能を持つ必要は無い。その結果、DiffServ は高いスケーラビリティを実現することができる。このため、DiffServ は IntServ よりも将来のインターネットサービスアーキテクチャとして期待されている。しかし、DiffServ は、必ずしもエンドツーエンドの QoS を保証できるとは限らない。

IntServ と DiffServ の両方において、各ルータのパケットスケジューラは必要不可欠な構成要

素である。これは、ルータに入力された packets をあるアルゴリズムに従って適切な待ち行列に格納し、packets の出力順をスケジューリングする。スケジューラは個々のルータで動作するが、結果的にエンドツーエンドの QoS に影響を及ぼす。このため、WFQ (Weighted Fair Queueing) [125]–[127] や DRR (Deficit Round-Robin) [128] などの様々なアルゴリズムが提案されている。

ノードレベルの QoS 制御技術であるパケットスケジューリングの性能評価に関しては、これまで多くの研究が行われている [129]–[133]。しかし、これらの多くは、パケットスループットやパケット遅延などのパケットレベルの性能を扱っており、音声やビデオ品質を含む上位レイヤにおける連続メディアの性能を評価しているものは無い。連続メディアレベルの性能を評価するためには、メディアの時間的構造を考慮することが必要であり、この点がパケットレベル性能との大きな違いである。

しかし、連続メディアの時間的構造の保持・回復、すなわち、メディア同期品質の観点からパケットスケジューリングを研究対象としているものは、これまでには見られない。

そこで、本章では、インターネット上でライブ音声とビデオを転送する場合を想定して、パケットスケジューリングアルゴリズムがメディア内及びメディア間同期品質であるアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響を調査する。パケットスケジューリングアルゴリズムとして、FIFO, PQ (Priority Queueing), CBQ (Class-Based Queueing) [134], WFQ の四つを扱う。FIFO は、実装が容易なため、現在のインターネットにおいて広く利用されている。PQ は、優先制御のスケジューリングである。リアルタイムトラヒックの転送を優先することができるが、トラヒック間の不公平という問題がある。また、CBQ は各クラスにスタティックに割り当てられた帯域を保証することができる。更に、WFQ はフローベースのスケジューリングアルゴリズムであり、要求レートに基づいて各フローに動的に帯域を割り当てることができる。

本章では、パケットスケジューリングアルゴリズムがメディア同期品質に及ぼす影響を調査するために、実験によって、メディア同期制御の有無と四つのパケットスケジューリングアルゴリズムとの組み合わせからなる 8 方式のメディア同期品質を評価する。実験では、VTR メディア同期アルゴリズム [72], [73] を用いる。更に、測定結果を基にして、メディア同期品質の観点から各アルゴリズムの特徴を明らかにする。

以下では、7.2 節で四つのパケットスケジューリングアルゴリズムの概要を述べ、7.3 節で実験システム構成と実験方法を示す。そして、パケットスケジューリングアルゴリズムの詳細な実装方式と評価尺度を説明する。更に、7.4 節で測定結果を述べ、パケットスケジューリングアルゴリズムの特徴を明らかにする。

7.2 パケットスケジューリング

本節では、実験で使った四つのパケットスケジューリングアルゴリズム (FIFO, PQ, CBQ, WFQ) の概要を示す。

7.2.1 First-In First-Out

FIFO は、現在のインターネットにおいて、最も広く利用されているスケジューリングアルゴリズムである。これは、ルータに到着した packets を一つのバッファに格納し、フロー間の

区別をせず到着順に処理する。そして、新しく到着したパケットを格納するためのバッファ容量が無い場合には、そのパケットは廃棄される。したがって、バッファ利用率やパケット到着率が小さい場合でも、特定のフローにおけるパケットが連続して欠落することがある。つまり、FIFO はフロー間における不公平の問題が生じ、要求された帯域を保証することはできない。

7.2.2 Priority Queueing

PQ は、パケットの IP アドレス、プロトコルタイプや入力インタフェースなどに従って、優先度の異なるクラスを設定し、優先度別に異なるバッファを用意する。このアルゴリズムは、到着したパケットを、その優先度に対応したバッファに格納する。そして、最も優先度が高いバッファにあるパケットを優先処理し、そのバッファが空きになると、次に優先度が高いバッファに処理を移す。以下、同様の方法によって、優先度順にパケットを処理する。この優先制御は、リアルタイムトラヒックなどの特定のトラヒックを優先して扱うことが可能である。しかし、PQ にも不公平性の問題点がある。

7.2.3 Class-Based Queueing

CBQ[134] は、アプリケーションやプロトコルタイプなどに従って、到着したパケットをクラス分けし、そのクラスに対応したバッファに格納する。あらかじめ、各クラス毎に割り当てられる帯域と優先度が決定される。同じ優先度を持つクラスは、各クラスに割り当てられた帯域に比例した重み付けが行われ、バイト単位の WRR (Weighted Round-Robin) [135] 方式によってスケジュールされる。この重みは、各クラスのバッファから 1 ラウンド当りに送出することのできるバイト数を決定する。CBQ は、スタティックな帯域割り当てを行い、ネットワーク状態の変化に動的に対応することができない。

7.2.4 Weighted Fair Queueing

WFQ[125]–[127] は、フローベースのアルゴリズムであり、フローの重みに応じて動的に利用できる帯域を割り当てる。あるフローの重みは、その要求レートに基づいて決定される。すべての要求レートの総和が出力レートよりも小さい場合には、各フローの要求レートは保証されるが、そうでない場合は、各フローの割り当て帯域はその要求レートよりも小さくなる。この場合、利用できる帯域の割合は、ある瞬間にバックログ状態にある、すなわち、そのフローに対応するバッファが空でないフローの要求レートの総和に対する各フローの要求レートの割合である。したがって、WFQ はネットワーク状態の変化に動的に適応できる。

7.3 実験システム

実験では、ルータにおけるパケットスケジューリングアルゴリズムがメディア同期品質に及ぼす影響を調査するために、ライブ音声・JPEG (Joint Photographic Experts Group) ビデオストリームを転送する。そして、拡張 VTR アルゴリズム [136] を用いた方式とメディア同期

制御を行わない方式の二つの性能を測定する。以下、前者を VTR、後者を NC (No Control) と簡単に表すこととし、これらのメディア同期品質を比較する。VTR アルゴリズムでは、音声をマスタメディア、ビデオをスレーブメディアとする。これは、音声ビデオに比べてメディア内同期誤差の影響を受けやすいためである。

本節では、まず、品質評価のための実験システム構成を示す。そして、ルータにおけるパケットスケジューリングアルゴリズムの詳細な実装方式と実験方法を説明する。最後に、品質評価のための評価尺度を定義する。

7.3.1 システム構成

図 7.1 に、実験システム構成を示す。6 台のワークステーション（以下、WS と略す）を五つのイーサネットハブ（10Base-T）と三つのルータ（Cisco Systems 社製 2514）からなるネットワークに接続する。

WS3 は、SUN Ultra2（CPU クロック周波数 200MHz、メインメモリ容量 128Mbyte）であり、それ以外の WS は、SUN Ultra1（CPU クロック周波数 143MHz、メインメモリ容量 64Mbyte）である。WS3 及び WS6 は、JPEG ビデオボード（Parallax Graphics 社製 PowerVideo）を搭載しており、すべての WS は、Solaris2.5.1（OpenWindow3.5.1）で動作している。

ルータ 2 は、Cisco IOS 11.3 で動作しており、残り二つのルータは Cisco IOS 11.2 で動作している。各ルータ間は V.35 規格のシリアル回線により接続されている。実験では、このシリアル回線の転送レートを 2Mbps と設定した。

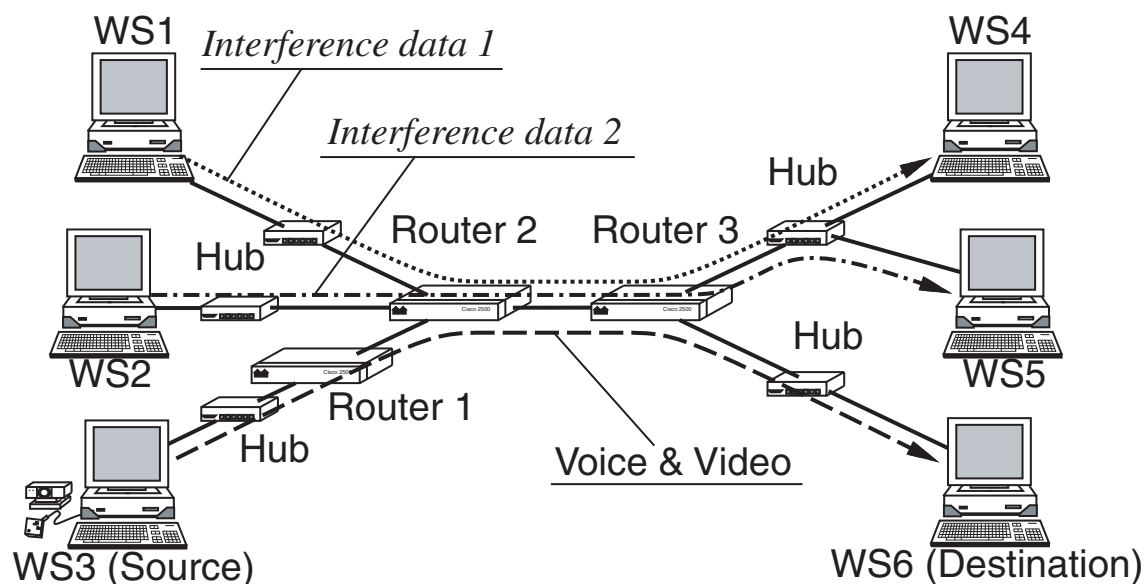


図 7.1 実験システム構成

表 7.1 音声とビデオの仕様

item	voice	video
coding scheme	ITU-T G.711 μ -law	JPEG
image size [pixels]	—	320 × 240
average MU size [bytes]	400	3150
original average MU rate [MU/s]	20.0	
original average inter-MU time [ms]	50.0	
original average bit rate [kbps]	64.0	504.0
measurement time [s]	120.0	

7.3.2 実験方法

実験では、リップシンク（話者の音声と口の動きとの合致）を対象とし、話者の音声と上半身（肩から上）の映像を、それぞれ、音声ストリームとビデオストリームとして扱った。表 7.1 に音声とビデオの仕様を示す。音声には、ITU（International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector）-T G.711 μ -law を用い、ビデオについては、JPEG 圧縮方式を使用した。

実験では、WS3 は、各実験ごとに同じ量のトラヒックを発生させるため、ビデオデッキから入力された音声とビデオをリアルタイムにエンコードし、WS6 に転送する。トランスポートプロトコルとして RTP/UDP（Real-Time Transport Protocol / User Datagram Protocol）を用いて、音声とビデオを別々のトランスポートストリームとして転送する。

WS1, WS2, WS4, 及び、WS5 は干渉トラヒックとして、負荷データを発生させるために使用する。WS1 は、UDP を用いて固定長（1472 バイト）のメッセージを指数分布に従う間隔で WS4 に送信する（これを負荷データ 1 と定義する）。WS2 も WS1 と同様の方法で、WS5 に負荷データを転送する（これを負荷データ 2 とする）。また、指数分布の平均を変化させることにより、負荷の量を調整する。実験では、負荷データ 1 の量を 0.5Mbps から 1.0Mbps まで変化させ、負荷データ 2 の量を 0.5Mbps と固定した。更に、VTR メディア同期アルゴリズムで用いるパラメータを $J_{\max} = 100\text{ms}$, $\Delta_{\text{al}} = 300\text{ms}$ と設定し、その他の閾値は文献 [136] と同じ値にした。

実験では、図 7.1 のルータ 2 に四つのアルゴリズム（FIFO, PQ, CBQ, WFQ）のうち一つを適用し、これらのアルゴリズムがメディア同期品質に及ぼす影響を調査する。また、図 7.1 のルータ 1 とルータ 3 は FIFO のみを使用する。

7.3.3 スケジューリング実装方式

本章では、四つのスケジューリングアルゴリズム（FIFO, PQ, CBQ, WFQ）を検討対象とする。そこで、以下では、FIFO を除く三つのパケットスケジューリングアルゴリズムの実装方式を説明する。

表 7.2 PQ の品質測定に用いるタイプ

type	priority of incoming interface		
	voice & video	interference data 1	interference data 2
PQ1	medium	normal	normal
PQ2	normal	medium	normal
FIFO	—	—	—

(1) PQ の実装方式

実験で使用したルータでは四つの優先度が定義されており，“high”が最も優先度が高く，以下順に，“medium”，“normal”，“low”となっている [137]。PQ では，各到着パケットは，その割り当てられた優先度に基づいて四つの待ち行列のうち一つに格納される。ただし，優先度が割り当てられていないパケットは“normal”の待ち行列に格納される。実験では，ルータ 2 の各入力インタフェースに四つの優先度の一つを設定した。

表 7.2 に PQ の品質測定に用いるタイプを示す。PQ1 では，音声とビデオストリームは負荷データ 1 と負荷データ 2 よりも優先度が高く優先的に取り扱われる。一方，PQ2 では，負荷データ 1 は，音声とビデオストリームよりも優先度が高く設定されている。

(2) CBQ の実装方式

実験で使用した Cisco のルータでは，CBQ は CQ (Custom Queueing) という名前で実装されている [137]。CBQ ではクラス間にあらかじめ優先度が決定されるのに対して，CQ ではクラス間の優先度の違いが無く，同じ優先度として扱われる。したがって，CQ はすべてのクラスをバイト単位の WRR 方式でスケジュールする。

CQ に関する実験では，音声・ビデオストリーム，負荷データ 1，及び，負荷データ 2 の 3 クラスをルータ 2 の三つの入力インタフェースに対応させる。したがって，CQ は同じ入力インタフェースに到着したパケットを同じバッファに格納する。更に，WRR 方式における 1 ラウンドの処理バイト数 (byte count value) を定義することが可能である。

表 7.3 に CQ の品質測定に用いるタイプを示す。各クラスの 1 ラウンド当りの処理バイト数を 1500 バイトの整数倍とした理由は，以下のとおりである。CQ のスケジューリングは，バイト単位の WRR に従って行われるが，ルータはパケット単位で転送を行う。1 ラウンドについて，Cisco のルータでは，処理バイト数を越えるまでバッファからパケットを転送する。そして，越えた場合，転送中のパケットは完全に転送される。例えば，処理バイト数を 1500 バイトと設定し，1000 バイトと 600 バイトのパケットがバッファに格納されている場合には，両方のパケットが 1 ラウンドで転送されることになる。

本実験で扱った音声のパケットサイズは，IP，UDP 及び RTP ヘッダを含めて 440 バイトであり，同様にビデオのそれは，最大 1052 バイトである。ここで，ビデオについては，JPEG 圧縮方式を用いており，ビットレートが変動するため，ビデオ MU サイズは MU 毎に異なり，一

表 7.3 CQ の品質測定に用いるタイプ

type	the byte count value [bytes]		
	voice & video	interference data 1	interference data 2
CQ1	3000	4500	1500
CQ2	1500	1500	1500
CQ3	1500	4500	1500
FIFO	—	—	—

方，音声 MU サイズは一定であることに注意されたい。したがって，1 音声パケットと最大の 1 ビデオパケットの和が約 1500 バイトであるので，1 ラウンド当りの処理バイト数を 1500 バイトの整数倍とした。また，負荷データ 1，及び，負荷データ 2 については，IP と UDP のヘッダを含めて 1500 バイトのパケットを送信しているので，その整数倍とした。

実験では，ルータ 2 の出力帯域を 2Mbps に設定した。したがって，CQ1 では，全体の 2 分の 1 の帯域（約 1Mbps）が負荷データ 1 に割り当てられ，音声・ビデオストリームには，3 分の 1 の帯域（約 667kbps），そして，負荷データ 2 には，全体の 6 分の 1 の帯域（約 334kbps）が割り当てられる。実験における音声とビデオストリームの合計ビットレートが 568.0kbps であるため，音声・ビデオストリームには十分な帯域が割り当てられている。ただし，1 ラウンド当たりの実際の処理バイト数は一定ではないため，ラウンド毎に音声とビデオの割り当て帯域は変化することになる。CQ2 では，全てのインタフェースに全体の 3 分の 1 の帯域（約 667kbps）が割り当てられる。このタイプも音声・ビデオストリームに関しては十分な帯域が割り当てられていることになる。更に，CQ3 では，全体の 5 分の 3 の帯域（約 1.2Mbps）が負荷データ 1 に割り当てられ，音声・ビデオストリームと負荷データ 2 には，どちらも約 5 分の 1 の帯域（約 400kbps）が割り当てられることになる。このタイプでは，負荷データ 1 のトラフィック量の増加に伴い，音声・ビデオストリームの転送に十分な帯域が利用できないことになる。

(3) WFQ の実装方式

実験で使用した Cisco のルータでは，WFQ は，フロー毎にパケットをバッファに格納する [137]。各フローに割り当てられる帯域（サービスレートと呼ばれる）は，そのフローの重みによって決められる。WFQ は，IPv4 (Internet Protocol version 4) パケットヘッダの ToS (Type of Service) フィールドに含まれる IP 優先度フィールド (3 ビット) を用いて，各フローの重み付けを行う。IP 優先度フィールドは 0 から 7 の値をとり，0 が最も優先度が低く，7 が最も高い。このアルゴリズムでは，フローの優先度が高くなるほどサービスレートが大きくなり，より多くの帯域が割り当てられる。

まず，IP 優先度フィールドの値を用いたサービスレートの決定方法を説明する [137]。全体の帯域は各フローの“優先度ビットの値 + 1”の総和で表され，総和に対するこの値の割合がサービスレートとなる。

表 7.4 は，WFQ の品質測定に用いるタイプを示している。ここで，各タイプにおけるサー

表 7.4 WFQ の品質測定に用いるタイプ

type	IP precedence field value			
	voice	video	interference data 1	interference data 2
WFQ1	1	1	2	0
WFQ2	0	0	0	0
WFQ3	0	0	2	0
FIFO	—	—	—	—

ビスレートを計算する。WFQ1 には、優先度 0 のストリームが一つ、優先度 1 のストリームが二つ、優先度 2 のストリームが一つである。したがって、“優先度ビットの値 + 1” の総和は 8 となり、これが、実験システム (図 7.1) におけるルータ 2 の出力帯域である 2Mbps に相当する。音声とビデオには、それぞれ、出力帯域の 8 分の 2 の帯域 (約 500kbps) が割り当てられる。負荷データ 1 と負荷データ 2 には、それぞれ、8 分の 3 の帯域 (約 750kbps) と 8 分の 1 の帯域 (約 250kbps) が割り当てられる。ただし、実際の各フローのサービスレートは時間的に変動する。

同様の方法で、WFQ2 と WFQ3 における各フローのサービスレートを算出することが可能である。WFQ2 では、音声、ビデオ、負荷データ 1、及び、負荷データ 2 の全てのストリームに対して同じ帯域が割り当てられる。すなわち、各フローのサービスレートは、4 分の 1 の帯域 (約 500kbps) となる。一方、WFQ3 では、音声、ビデオ、及び、負荷データ 2 のサービスレートは、それぞれ 6 分の 1 の帯域 (約 334kbps) となり、負荷データ 1 のそれは、6 分の 3 の帯域 (約 1Mbps) となる。つまり、このタイプでは、負荷データ 1 のトラフィック量の増加に伴い、ビデオストリームのサービスレートが不足することがわかる。

実験では、各フロー (負荷データ 1、負荷データ 2、及び、音声・ビデオストリーム) の IP 優先度フィールドの値を、それぞれの送信端末 (WS1, WS2 及び WS3) で設定した。

7.3.4 QoS パラメータ

音声やビデオのメディア転送に関する QoS 評価は、転送効率とメディア同期品質の観点から行う必要がある。

転送効率の評価には、平均 MU レートを用いる。これは、メディア出力先端末において、単位時間 (1 秒) 当りに出力される MU 数の平均である。

メディア同期品質の評価については、出力間隔の変動係数、及び、メディア間同期の平均二乗誤差 [73], [136] を測定する。出力間隔の変動係数は、メディア出力の滑らかさを表すものであり、出力間隔の標準偏差を平均値で割ったものと定義される。この値が小さいほどメディアの出力が滑らかであり、メディア内同期品質が高いといえる。

メディア間同期の平均二乗誤差は、スレーブメディア MU の出力時刻とこれに対応するマスターメディア MU の出力時刻との差から、それぞれのタイムスタンプの差を引いた値の二乗を平均したものと定義される。ただし、MU 欠落やスキップにより、スレーブメディアの MU、も

しくは、対応するマスタメディアのそれが出力されなかった場合、その MU の組は二乗誤差の計算から除外する。文献 [138] の結果から、この値が $6400 (= 80^2) \text{ ms}^2$ 以下のとき、メディア間同期の品質は高いといえ、この値が $25600 (= 160^2) \text{ ms}^2$ を超えると同期はずれであるといえる。更に、各実験において、必要に応じて主観評価も行った。

また、ライブメディアに対しては、平均 MU 遅延も重要な QoS パラメータである。これは、一つの MU が発生してから出力されるまでの時間の平均であり、リアルタイム性を示す尺度である。

最後に、負荷データの性能を測定するために、負荷データのスループットを用いる。負荷データ 1、及び、負荷データ 2 のスループットは、それぞれ、WS4 と WS5 で測定される。

7.4 実験結果及び考察

四つのスケジューリングアルゴリズムを用いて、負荷データが VTR と NC の品質に及ぼす影響を測定した。

7.4.1 PQ の品質測定

まず、メディア内同期品質を評価する。負荷データ 1 の平均負荷に対する音声及びビデオの出力間隔の変動係数を、それぞれ、図 7.2 と図 7.3 に示す。ここで、平均負荷とは、送信された負荷データ 1 の総ビット数を送信にかかった時間で割ったものである。これらの図の VTR に関して、PQ1 の音声とビデオの出力間隔の変動係数が、ここで示した全ての平均負荷において、もっとも小さな値を示していることが分かる。一方、PQ2 は、最も大きな変動係数の値となっている。これは、PQ が優先度の高い待ち行列を優先的にスケジューリングしており、PQ2 については、優先度の低い音声・ビデオパケットが負荷データ 1 よりも後に処理されるためである。また、NC の三つのタイプ (PQ1, PQ2, FIFO) に関して VTR のそれと同様の傾向であることが確認できる。

平均負荷に対する音声とビデオの平均 MU レートを、それぞれ、図 7.4 と図 7.5 に示す。これらの図より、音声、ビデオともに、PQ1 が最も良い性能を達成していることが確認できる。一方、平均負荷が約 0.8 Mbps を超えると、PQ2 の性能は最も低下している。この理由は、PQ2 の音声・ビデオパケットが負荷データ 1 よりも後に処理され、ルータ 2 において、パケット欠落が増加しているためである。

主観評価では、PQ1 の VTR と NC のどちらについても、ここで示した全ての平均負荷において、音声の途切れやビデオのぎこちなさを感じるものがなく良好であった。しかし、他のタイプのメディア品質については、平均負荷が約 0.8 Mbps を超えると、メディア出力の劣化を感じた。

次に、メディア間同期品質を評価する。平均負荷に対するメディア間同期の平均二乗誤差を図 7.6 に示す。図 7.6 より、全てのタイプについて、NC よりも VTR の方がメディア間同期の平均二乗誤差の値が小さくなっていることが確認できる。しかし、NC でさえも、その値は高々 1000 ms^2 であり、高いメディア間同期品質の閾値である $6400 (= 80^2) \text{ ms}^2$ よりも小さな値で

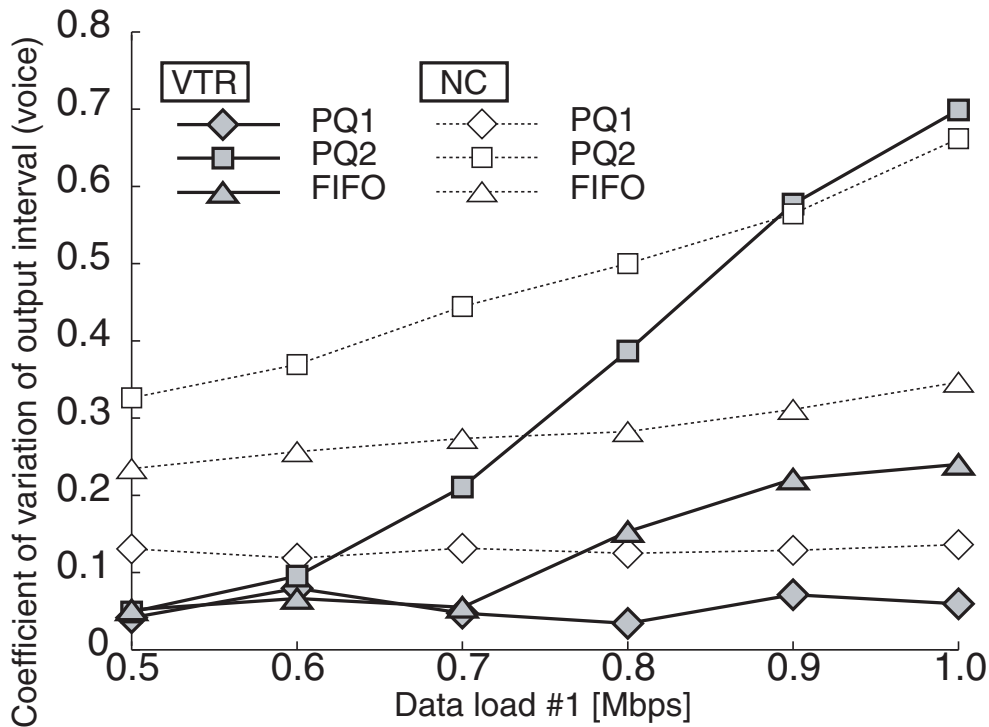


図 7.2 音声の出力間隔の変動係数 (PQ)

ある。これは、ライブメディアの特性でもある [139]。実際、主観評価を行った結果においても、メディア間の同期は常にとれており、タイプ間の違いは感じられなかった。

更に、平均 MU 遅延を用いて、メディア転送効率を評価する。平均負荷に対する音声とビデオの平均 MU 遅延を、それぞれ、図 7.7、及び、図 7.8 に示す。図 7.7 より、平均負荷が増加しても、PQ1 の音声の平均 MU 遅延がほとんど変化していないことが分かる。しかし、音声・ビデオの優先度が負荷データ 1 よりも小さくなっている PQ2 については、平均 MU 遅延が増加している。また、PQ2 を除く全てのタイプの平均 MU 遅延は、拡張 VTR アルゴリズムの最大許容遅延 Δ_{al} ($= 300\text{ms}$) よりも小さくなっていることが確認できる。更に、図 7.8 より、ビデオの平均 MU 遅延についても音声と同じ傾向であることを確認した。

最後に、負荷データのスループットを評価する。図 7.9 に負荷データ 1 の平均負荷に対する負荷データ 1、及び、負荷データ 2 のスループットを示す。PQ2 の負荷データ 1 のスループットの値は、平均負荷と同じ値を示している。すなわち、WS1 で入力した負荷データが全て出力端末 (WS4) に到達していることになる。これは、PQ2 については、負荷データ 1 が最も優先度が高く、他のパケット (音声、ビデオ、負荷データ 2) よりも優先的にスケジュール処理されるため、負荷データ 1 のパケット欠落が発生しないためである。PQ2 の負荷データ 1 以外のタイプは、平均負荷が約 0.8Mbps を超えると入力した負荷データよりも小さな値となっていることが分かる。これは、他のパケットよりも非優先に処理されルータ 2 においてパケット欠落が発生しているためである。

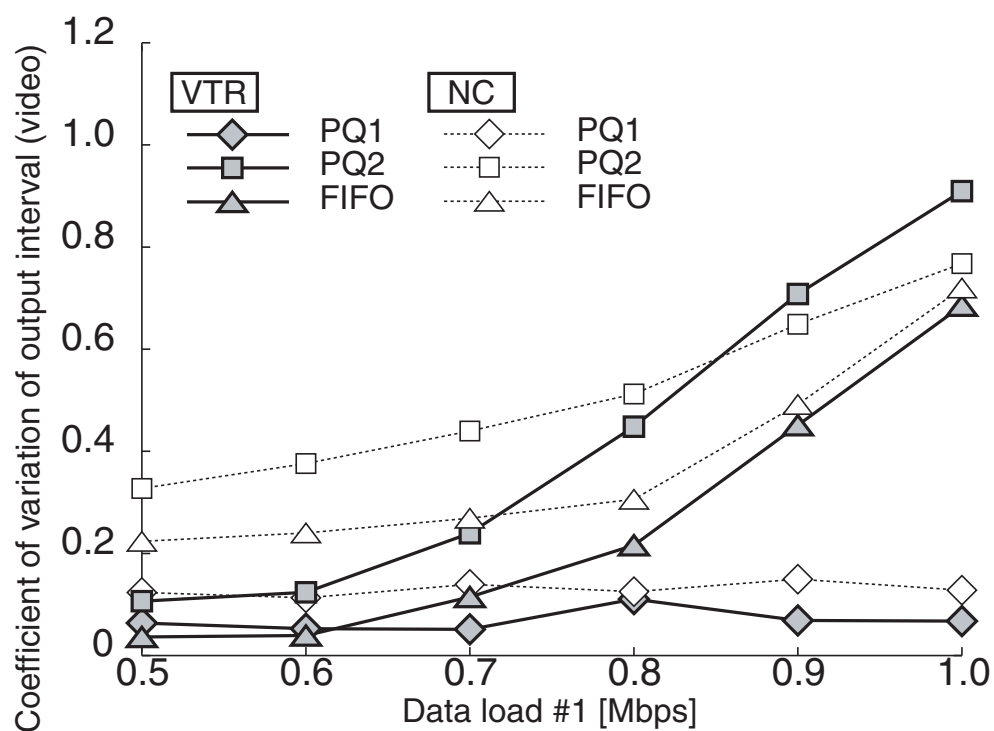


図 7.3 ビデオの出力間隔の変動係数 (PQ)

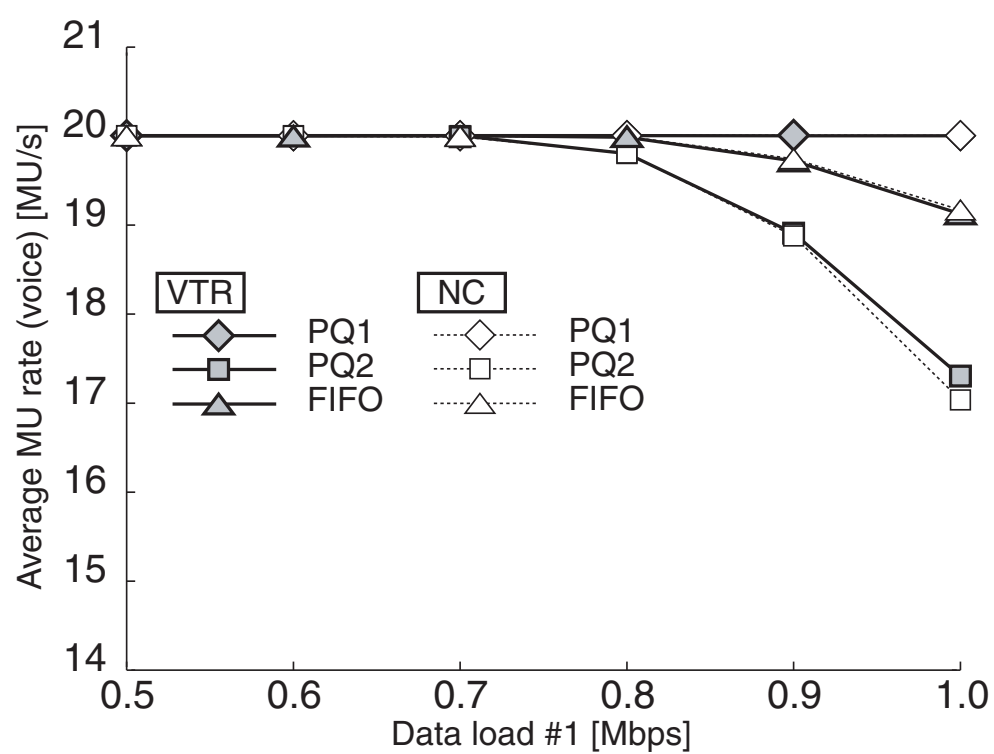


図 7.4 音声の平均 MU レート (PQ)

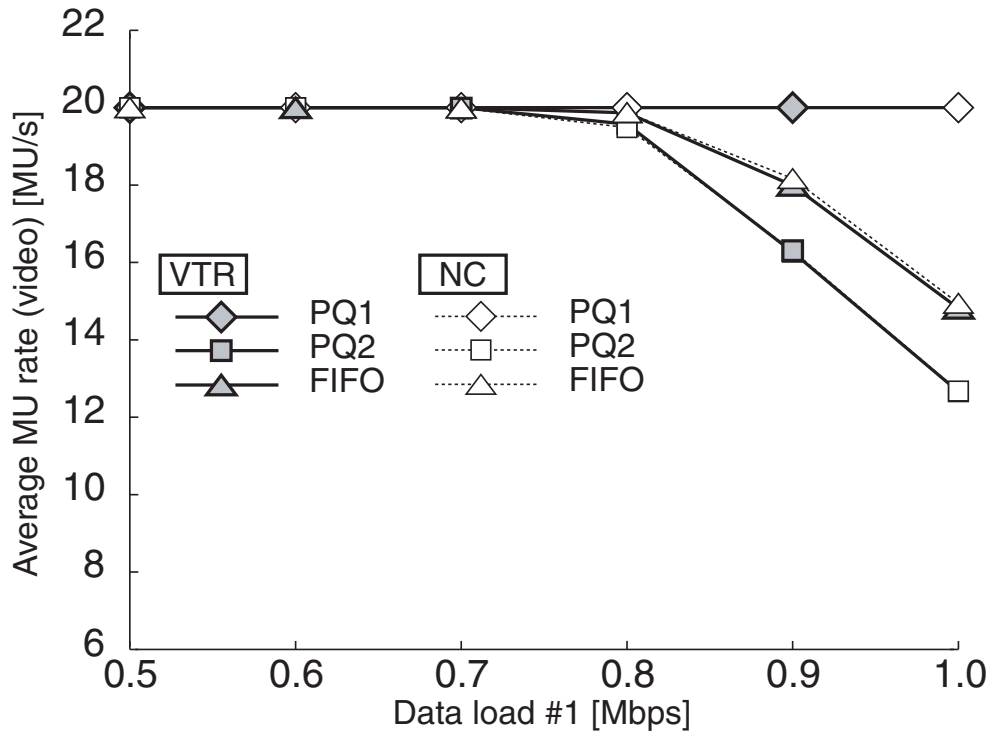


図 7.5 ビデオの平均 MU レート (PQ)

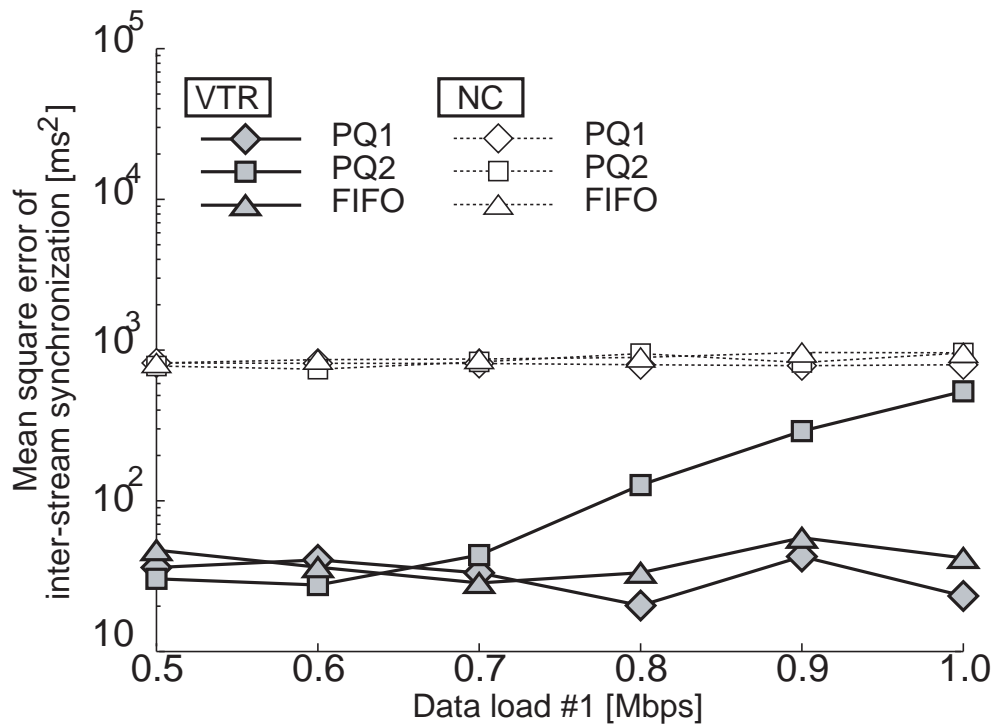


図 7.6 メディア間平均二乗誤差 (PQ)

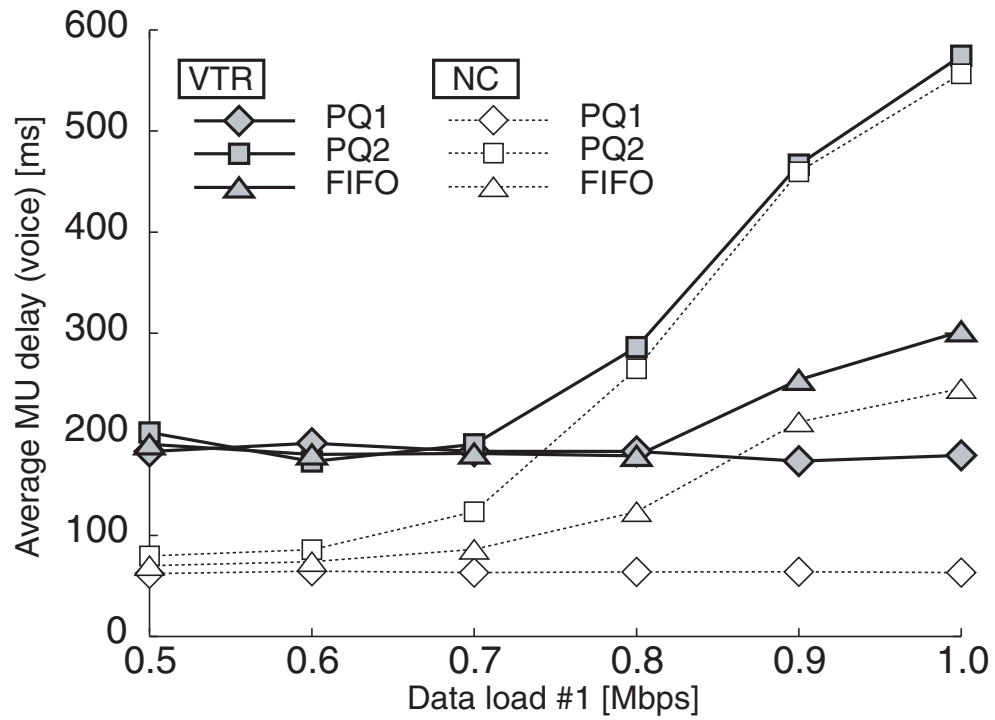


図 7.7 音声の平均 MU 遅延 (PQ)

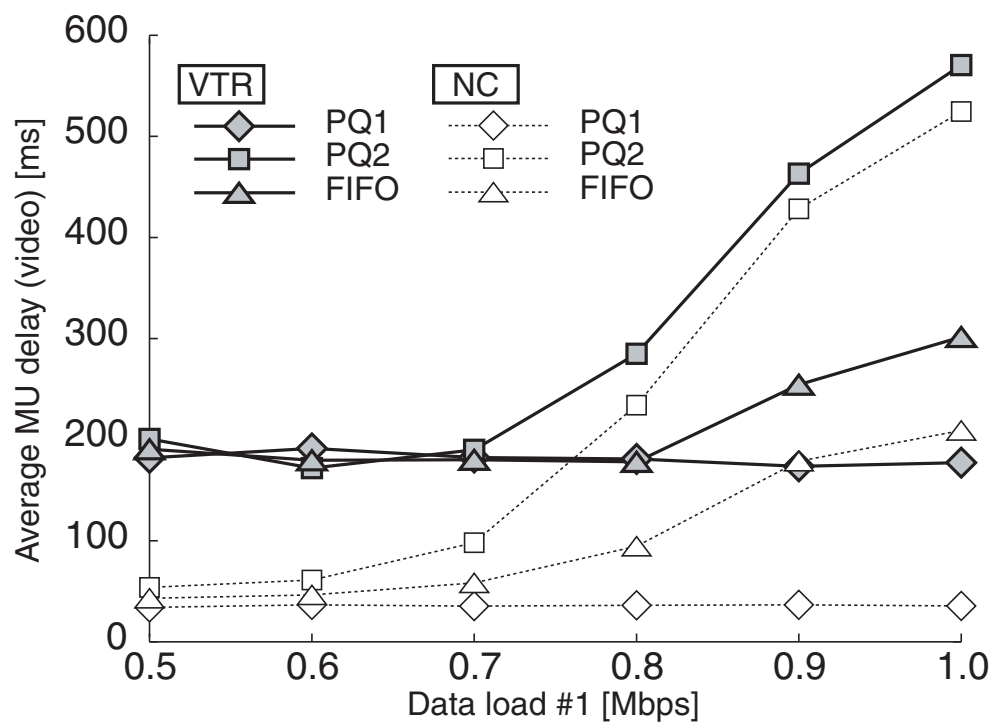


図 7.8 ビデオの平均 MU 遅延 (PQ)

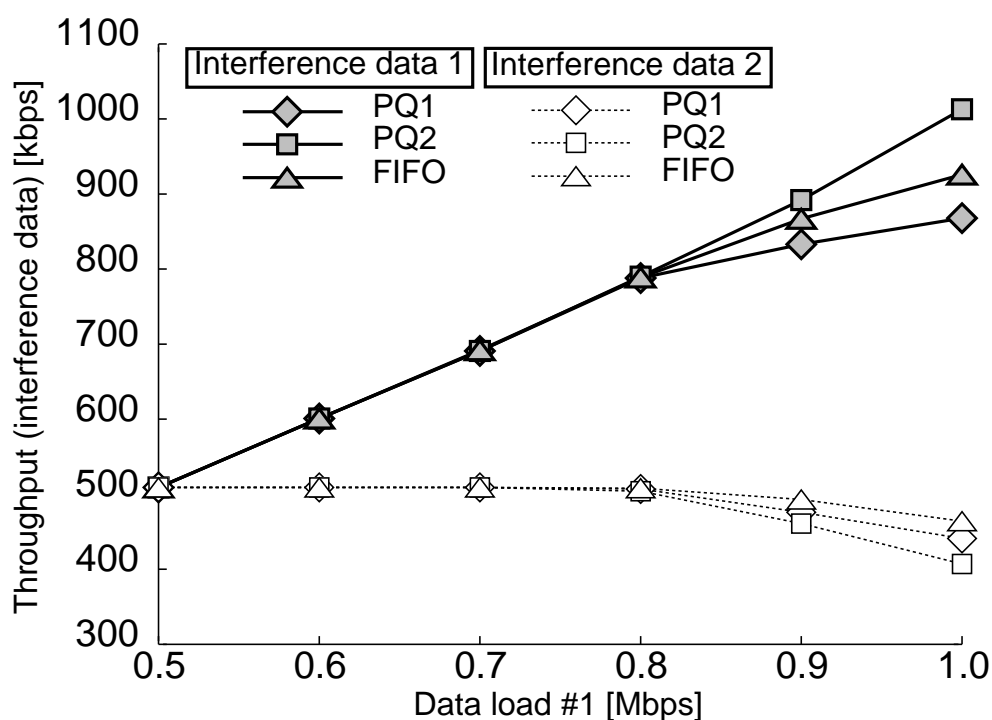


図 7.9 負荷データのスループット (PQ)

7.4.2 CQ の品質測定

平均負荷に対する音声とビデオの出力間隔の変動係数を、それぞれ、図 7.10、図 7.11 に示し、平均 MU レートを図 7.12、図 7.13 に示す。また、平均負荷に対するメディア間の平均二乗誤差を図 7.14 に示し、音声とビデオの平均 MU 遅延をそれぞれ、図 7.15 と図 7.16 にプロットする。更に、負荷データのスループットを図 7.17 に示す。

図 7.10、図 7.11 より、VTR と NC の両方に関して、CQ1 と CQ2 の音声とビデオの出力間隔の変動係数は、平均負荷が増加しても、ほとんど一定の値を保っていることがわかる。これは、前述したように、CQ1 と CQ2 に関しては、音声・ビデオストリームの転送に十分な帯域が保証されているためである。また、NC に着目すると、CQ1 の音声とビデオの出力間隔の変動係数は、CQ2 のそれよりも大きな値となっている。一方、VTR に関しては、CQ1 と CQ2 は同程度の値となっている。この理由は以下のとおりである。CQ1 における負荷データ 1 の割り当て帯域は、CQ2 のそれよりも大きいため、CQ1 の音声・ビデオパケットの遅延ジッタが CQ2 よりも大きくなる。しかし、VTR はネットワーク遅延のジッタを吸収できるためである。

CQ3 に関して、平均負荷が約 0.8Mbps よりも大きくなると、音声・ビデオの出力間隔の変動係数の値が増加していることが、図 7.10 と図 7.11 より確認できる。これは、音声・ビデオに割り当てられた帯域が不足しているためである。

また、メディア出力の滑らかさに関して主観評価を実施した。その結果、CQ1 と CQ2 に関しては、VTR の音声とビデオの出力品質は良好であった。しかし、平均負荷が約 0.8Mbps を超えると、CQ3 に関しては音声とビデオの両方が劣化していた。

図 7.12、図 7.13 より、平均負荷が約 0.8Mbps よりも大きくなると、CQ3 の音声及びビデオ

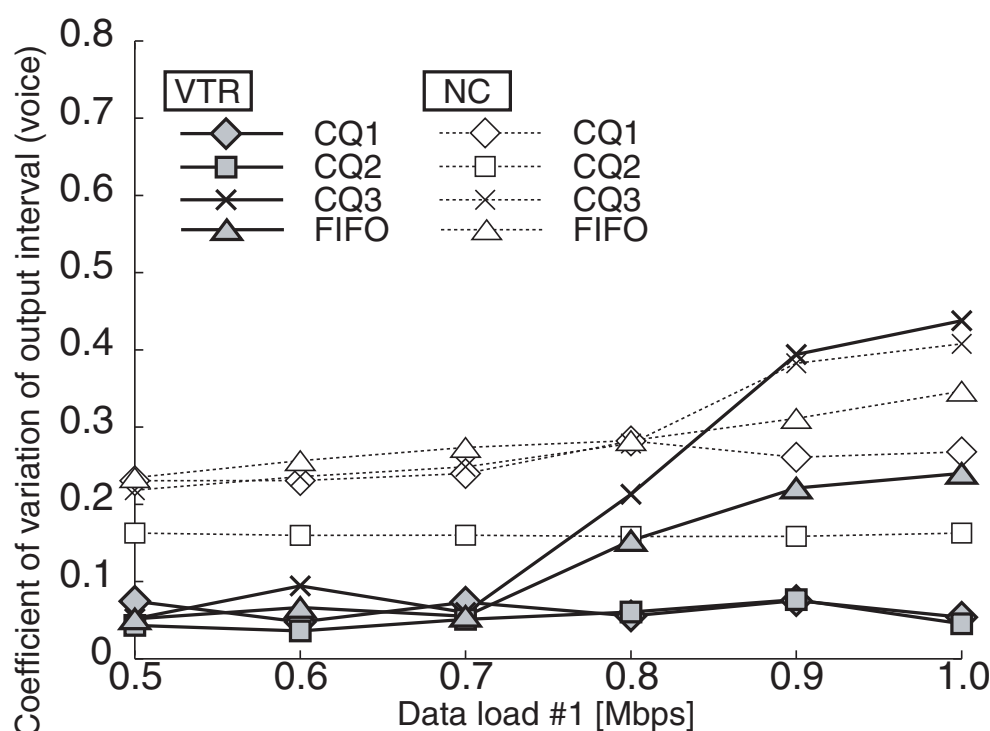


図 7.10 音声の出力間隔の変動係数 (CQ)

の平均 MU レートは大きく減少していることがわかる。この理由は、次のとおりである。CQ3 の音声・ビデオストリームに割り当てられた帯域がメディア転送に必要とする帯域を満足していない。そのため、ルータのバッファあふれが起こり、MU の欠落が生じているからである。一方、帯域が十分利用できる CQ1 と CQ2 の平均 MU レートは常に高く維持されている。

また、図 7.14 より、メディア間同期の平均二乗誤差については、PQ のそれ (図 7.6) と同様であることが確認できる。したがって、すべてのタイプのメディア間同期品質が良好であった。

図 7.15, 図 7.16 において、CQ3 の音声及びビデオの平均 MU 遅延は、平均負荷が約 0.8Mbps を越えると急激に増加していることがわかる。これは、CQ3 では、音声とビデオに割り当てられた帯域がメディアを転送するのに不十分なためである。一方、メディア転送に十分な帯域が割り当てられている CQ1 と CQ2, 及び、FIFO の平均 MU 遅延は、今回示した平均負荷の範囲では、300ms よりも小さな値となっている。

図 7.17 より、平均負荷が約 0.8Mbps 以上の領域において、CQ2 の負荷データ 1 のスループットが一定の値となっている。また、その値は、CQ2 の負荷データ 1 に割り当てられた帯域 (約 667kbps) よりも大きい。この理由は次のとおりである。CQ2 では、音声・ビデオストリームが実際に使用している帯域 (568kbps) は割り当て帯域 (約 667kbps) よりも小さい。この未使用の帯域が負荷データ 1 の転送に使用されるため、スループットが割り当て帯域よりも大きくなる。更に、負荷データ 1 のスループットは、その割り当て帯域が増加するにつれて、入力ビットレートに一致することが確認できる。

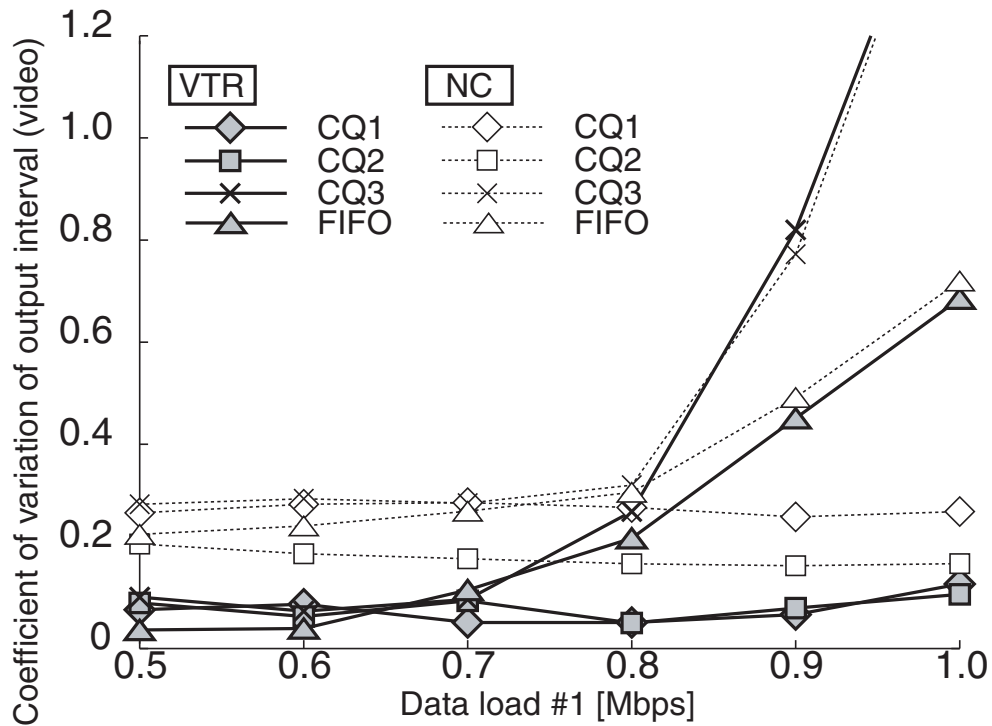


図 7.11 ビデオの出力間隔の変動係数 (CQ)

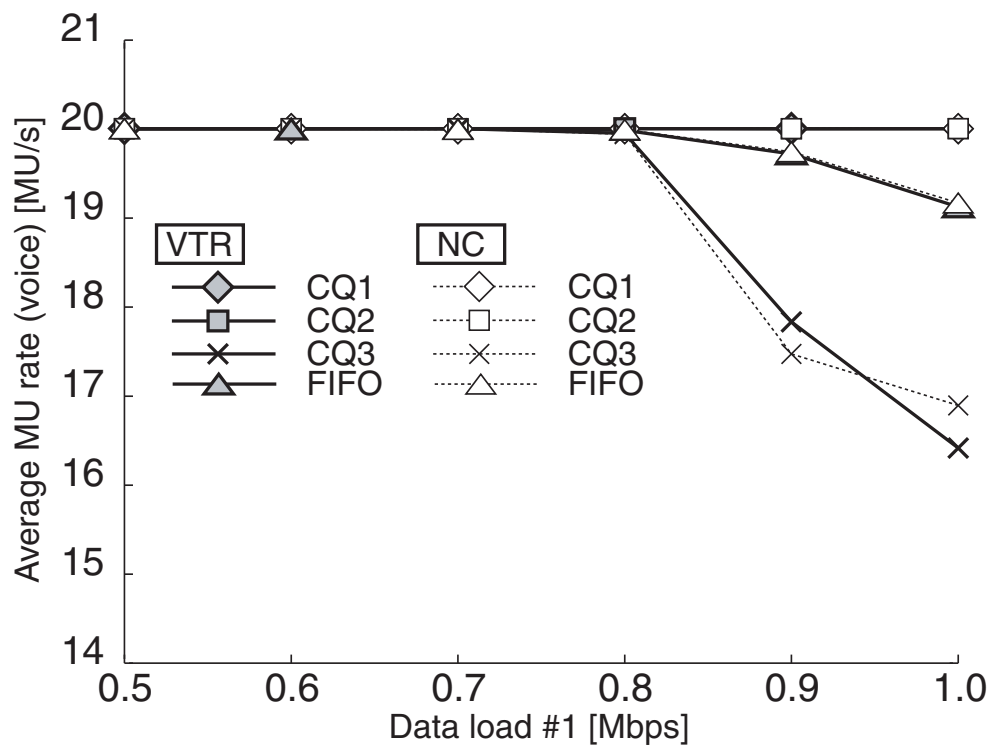


図 7.12 音声の平均 MU レート (CQ)

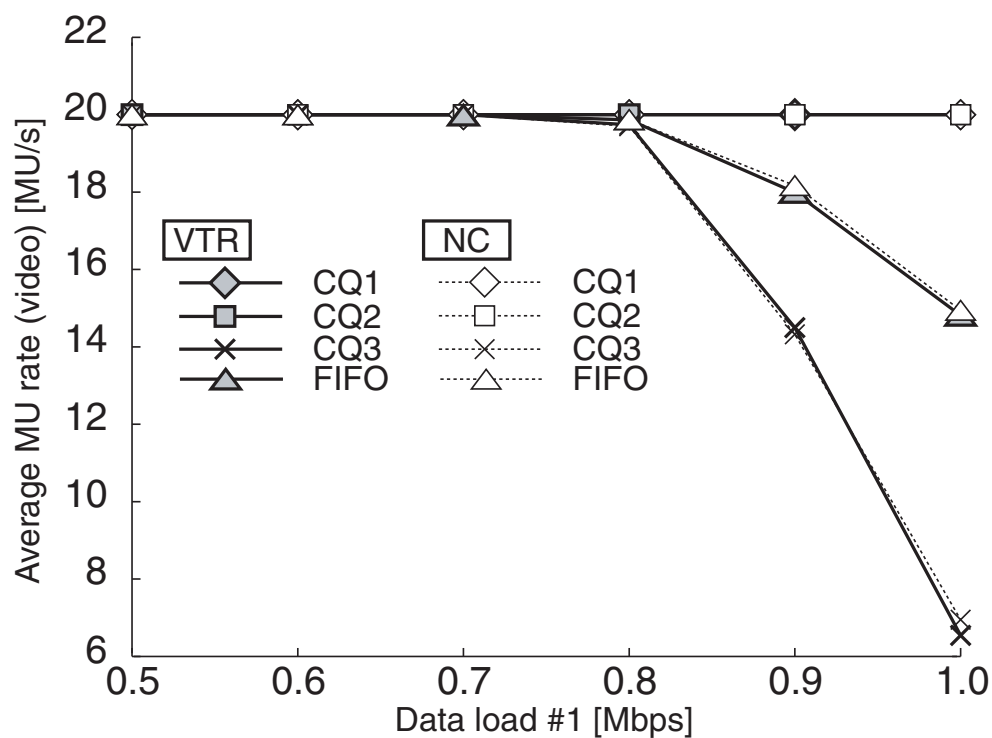


図 7.13 ビデオの平均 MU レート (CQ)

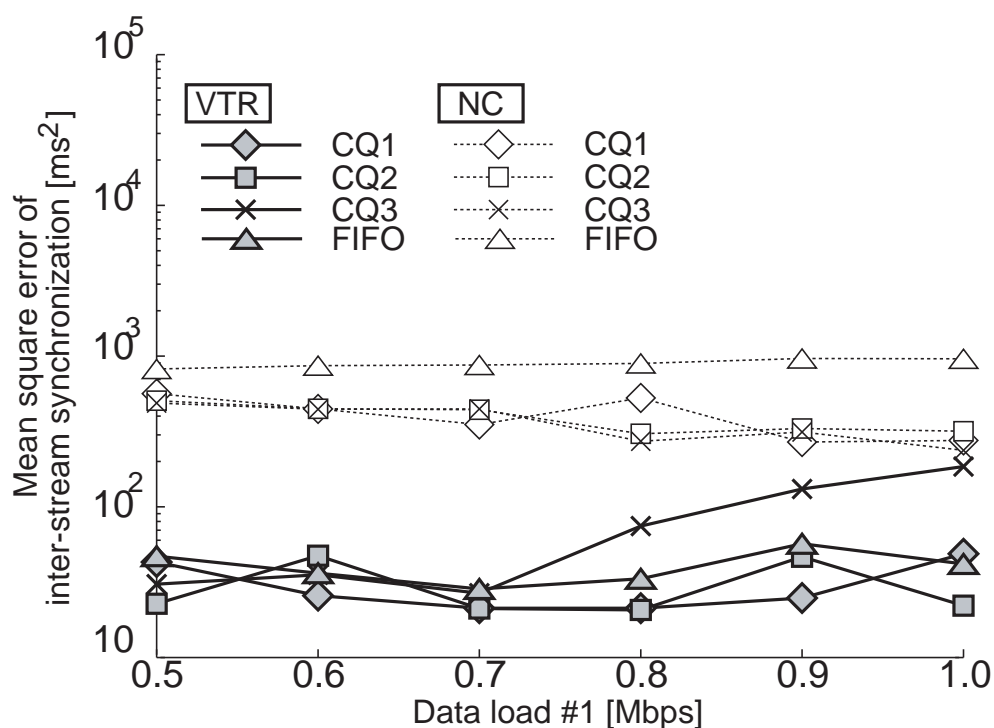


図 7.14 メディア間平均二乗誤差 (CQ)

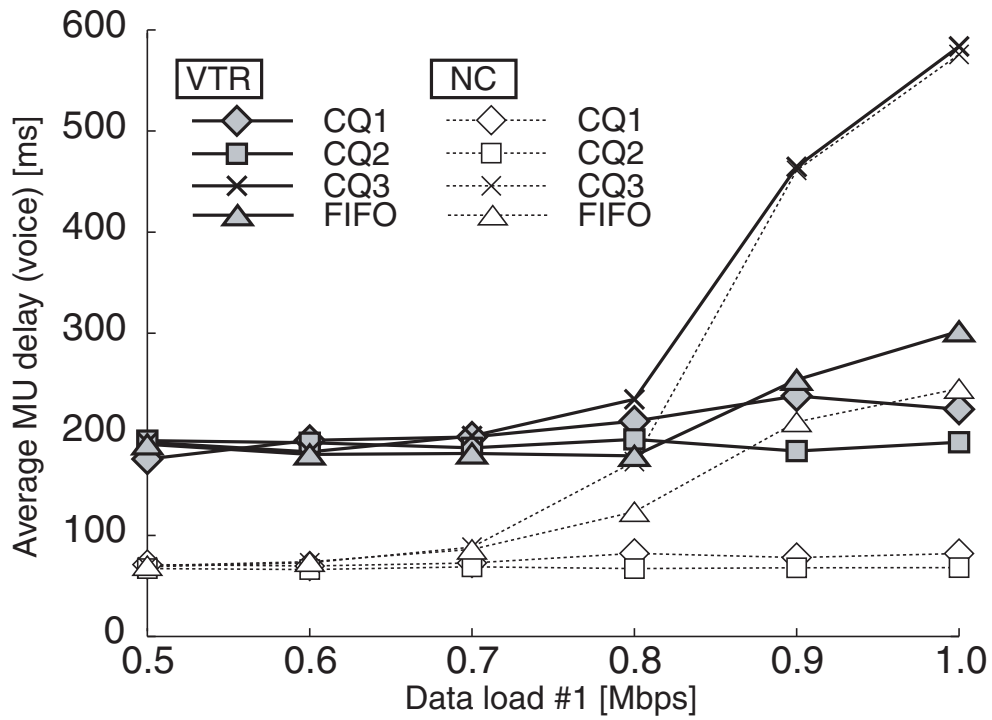


図 7.15 音声の平均 MU 遅延 (CQ)

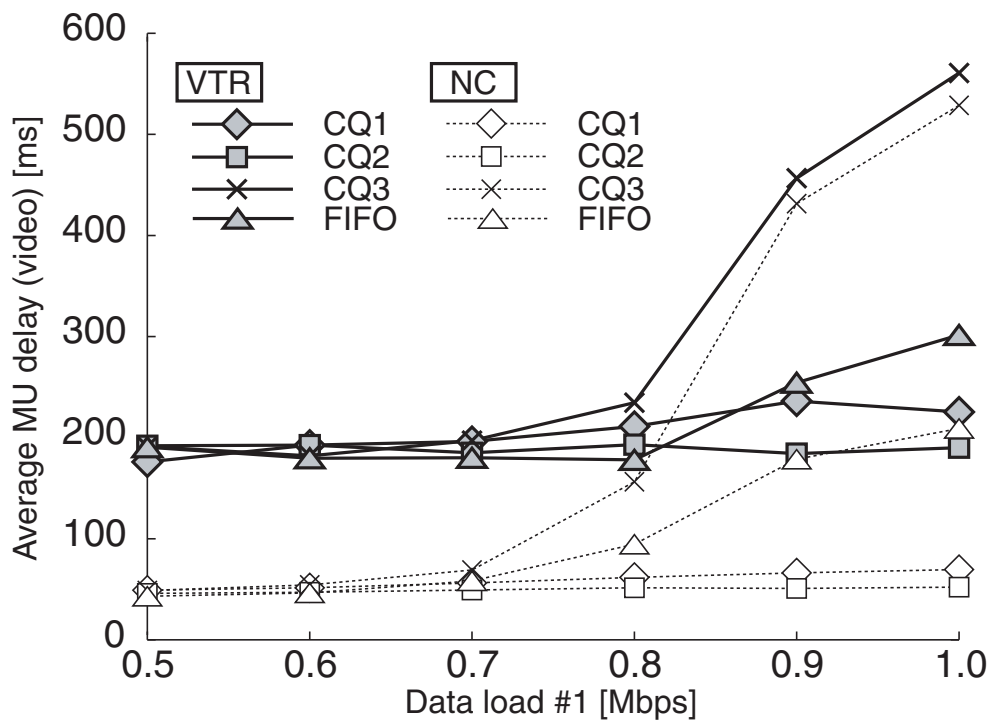


図 7.16 ビデオの平均 MU 遅延 (CQ)

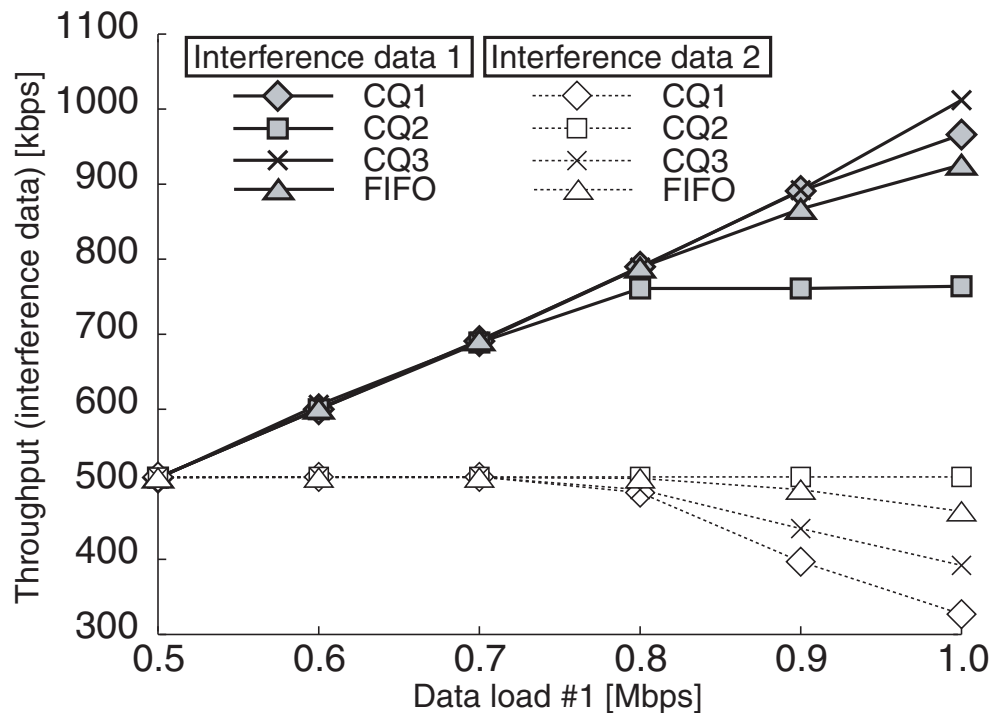


図 7.17 負荷データのスループット (CQ)

7.4.3 WFQ の品質測定

まず、メディア内同期品質を評価する。平均負荷に対する音声とビデオの出力間隔の変動係数を、それぞれ、図 7.18、図 7.19 に示す。

図 7.18 より、FIFO を除くタイプの出力間隔の変動係数は、平均負荷が増加してもほとんど変化していない。この理由は以下のとおりである。WFQ は、ストリーム毎のスケジュールであり、音声とビデオを別個のストリームとしてスケジュール処理する。そして、本実験では、音声のビットレート (64kbps) は、その割り当て帯域よりも小さく、すべてのタイプについて、音声ストリームの転送に必要な帯域が保証されているためである。

一方、図 7.19 より、平均負荷が約 0.8Mbps より大きくなると、WFQ3 のビデオ出力間隔の変動係数は、FIFO のそれと同様に増加している。これは、WFQ3 では、負荷データ 1 の優先度が最も大きく、ビデオストリームのために利用できる帯域が入力ビットレート (504kbps) よりも小さいためである。

また、音声とビデオの平均 MU レートを、それぞれ、図 7.20、及び、図 7.21 に示す。図 7.20 より、FIFO 以外のタイプについて、音声の平均 MU レートはメディアソースの MU レート (20MU/s) と等しくなっている。一方、ビデオについては、平均負荷が約 0.8Mbps を超えると、FIFO と WFQ3 の平均 MU レートが減少している。これは、出力間隔の変動係数の劣化に関する理由と同じである。

図 7.22 にメディア間の平均二乗誤差を示す。この図より、WFQ3 を除くタイプのメディア間平均二乗誤差の値は、ここで示した全ての平均負荷に関して、高いメディア間同期品質の閾値である 6400ms^2 よりも小さな値となっている。しかし、WFQ3 については平均負荷が約 0.7Mbps

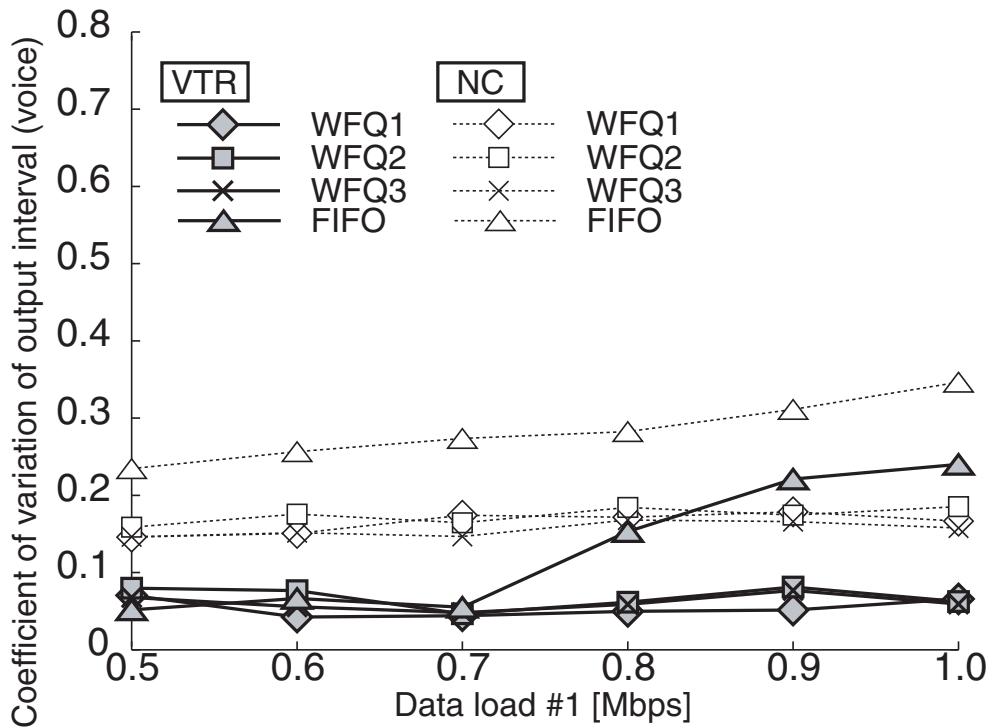


図 7.18 音声の出力間隔の変動係数 (WFQ)

より大きくなると、その閾値を超えている。この理由は次のとおりである。前述したように、WFQでは、ルータは音声とビデオを別個のストリームとしてスケジューリング処理する。WFQ3では、ビデオストリームの転送に十分な帯域が割り当てられていない。したがって、ビデオパケットに対応する音声パケットは、ビデオパケットよりも常に早くメディア出力先に到着するためである。

また、各メディアの平均 MU 遅延を図 7.23 と図 7.24 に示す。これらの図より、WFQ を用いた音声と、WFQ3 と FIFO 以外のタイプのビデオに関しては、平均 MU 遅延が一定の値となっていることが確認できる。一方、WFQ3 は、高い平均負荷の範囲で、他のタイプよりも大きな MU 遅延となっている。

最後に、負荷データのスループットを図 7.25 に示す。この図より、平均負荷が約 0.8Mbps 以上の領域において、WFQ2 の負荷データ 1 のスループットが一定の値となっており、その値は、WFQ2 の負荷データ 1 に割り当てられた帯域 (約 500kbps) よりも大きい。この理由は次のとおりである。WFQ2 では、負荷データ 2 のビットレートは割り当て帯域 (約 500kbps) と同じであるが、音声ストリームが実際に使用している帯域 (64kbps) は割り当て帯域 (約 500kbps) よりも小さい。この未使用の帯域が他のフローであるビデオストリーム、及び、負荷データ 1 の転送に使用されるため、負荷データ 1 のスループットが割り当て帯域よりも大きくなる。各タイプにおいて、負荷データのスループットが、その割り当て帯域よりも大きくなっている理由は、これと同様である。

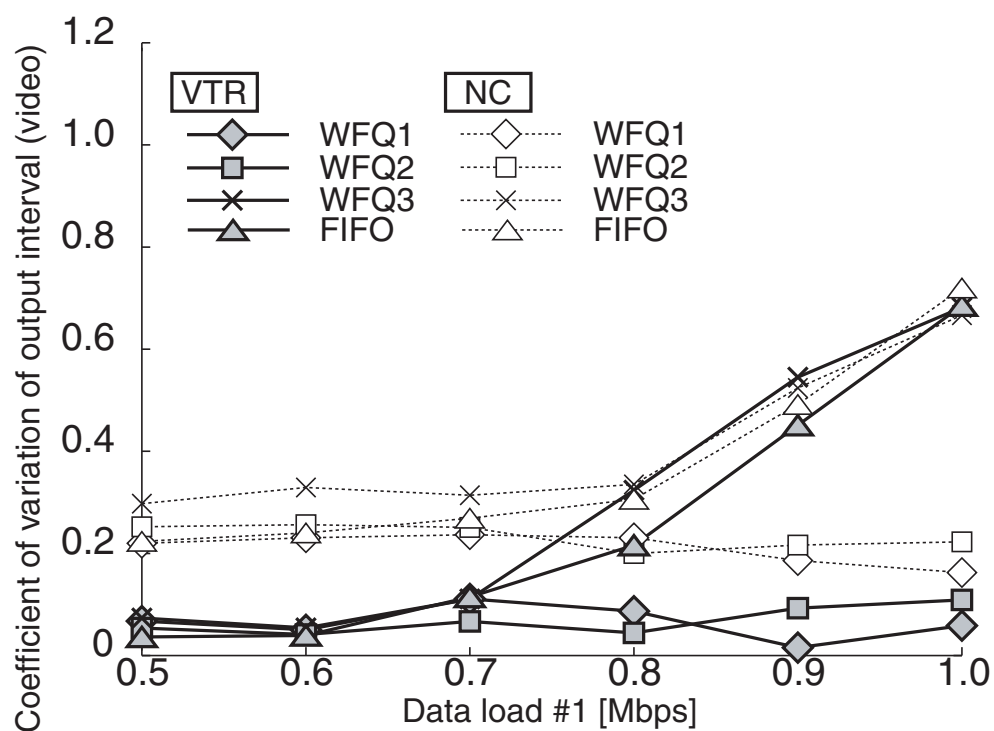


図 7.19 ビデオの出力間隔の変動係数 (WFQ)

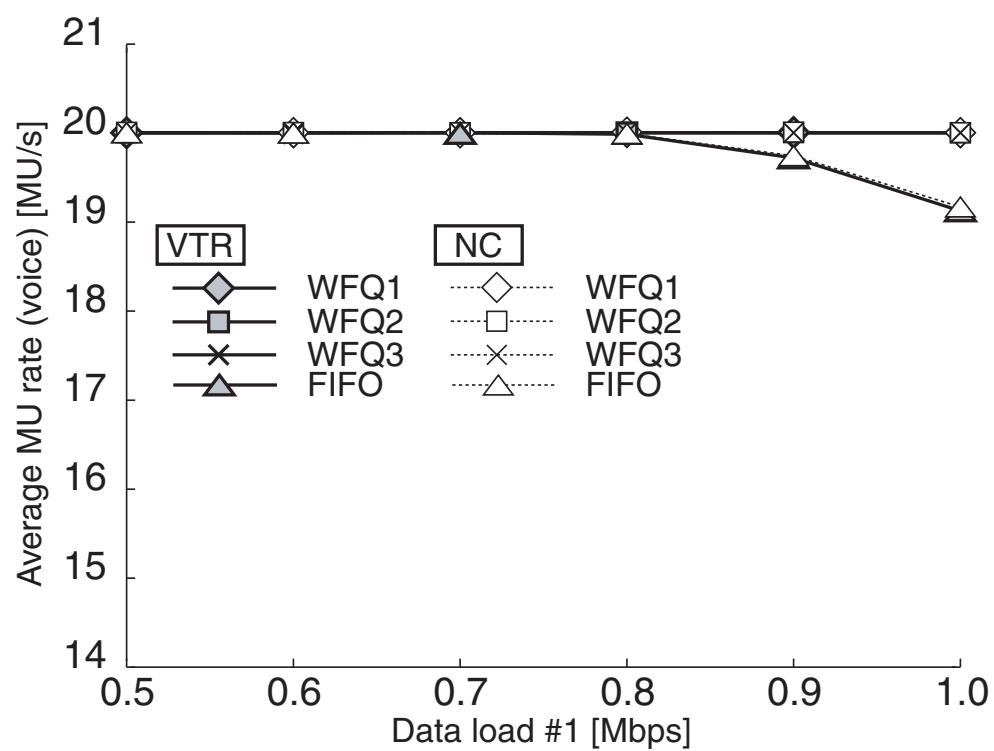


図 7.20 音声の平均 MU レート (WFQ)

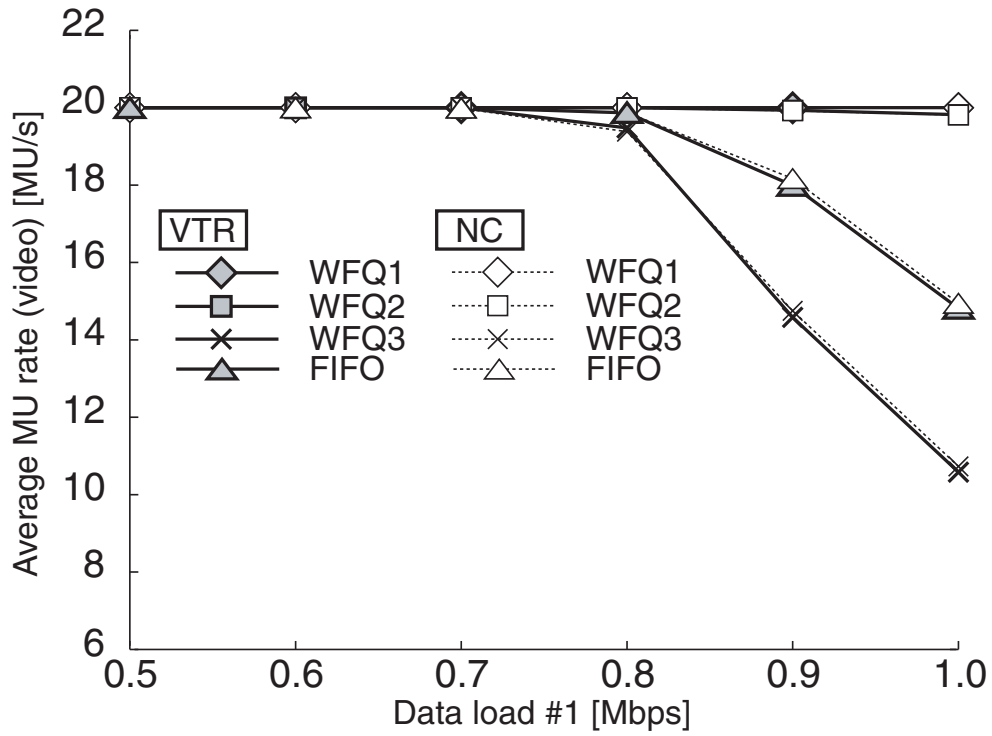


図 7.21 ビデオの平均 MU レート (WFQ)

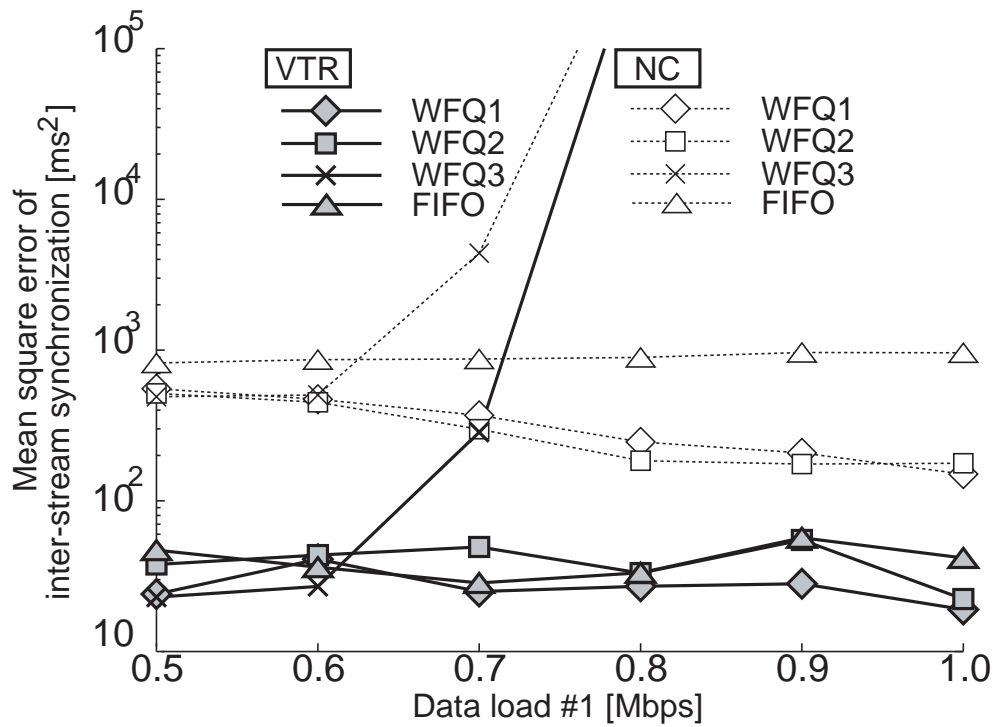


図 7.22 メディア間平均二乗誤差 (WFQ)

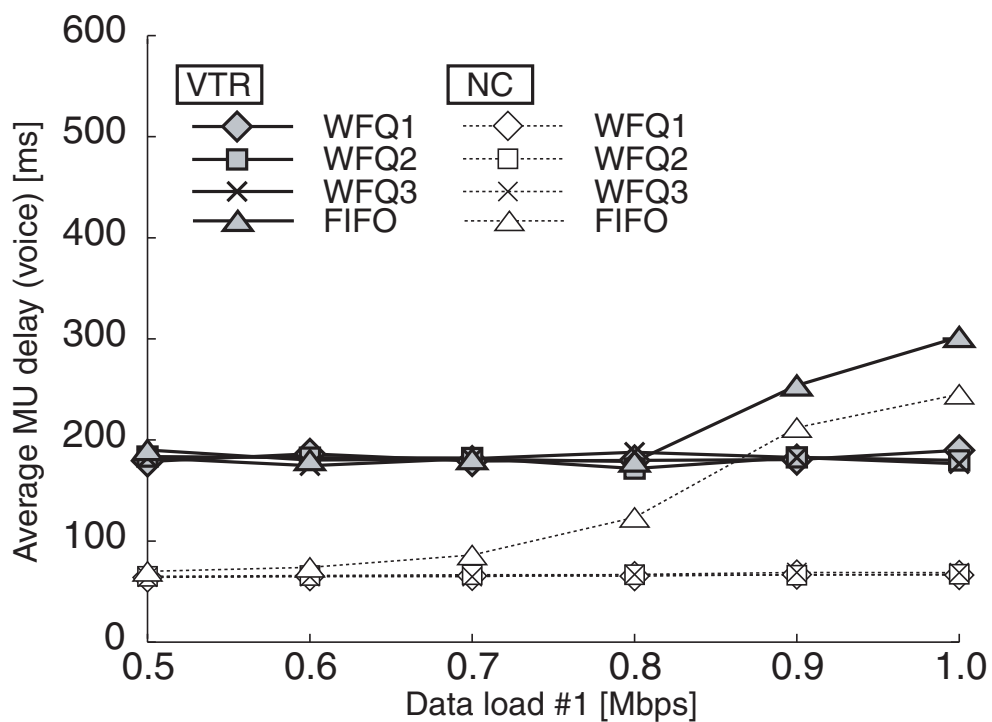


図 7.23 音声の平均 MU 遅延 (WFQ)

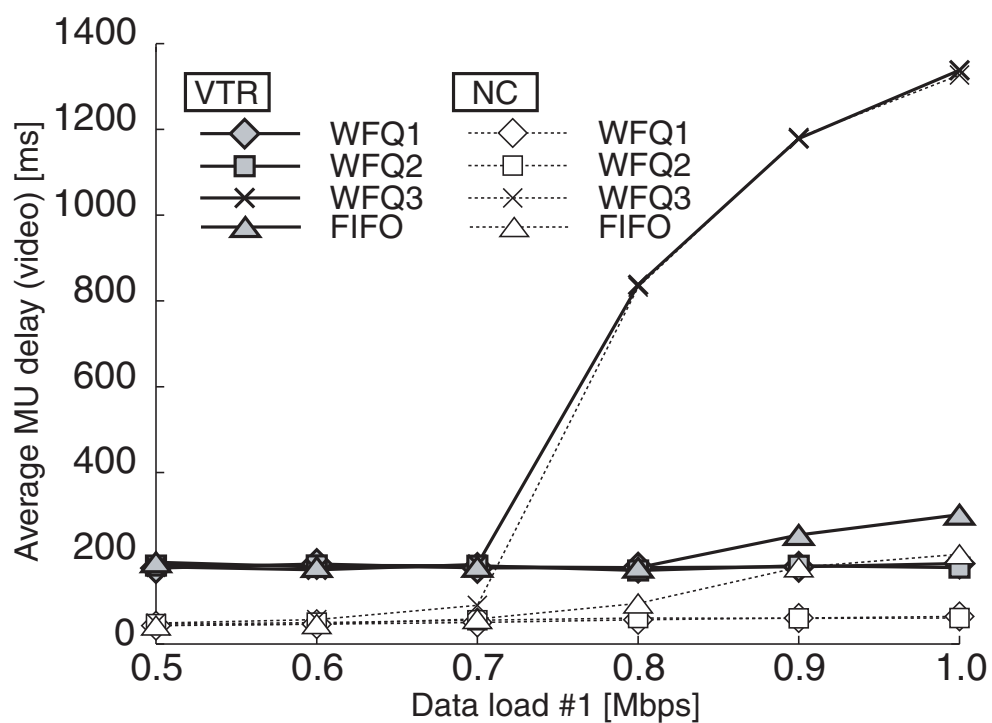


図 7.24 ビデオの平均 MU 遅延 (WFQ)

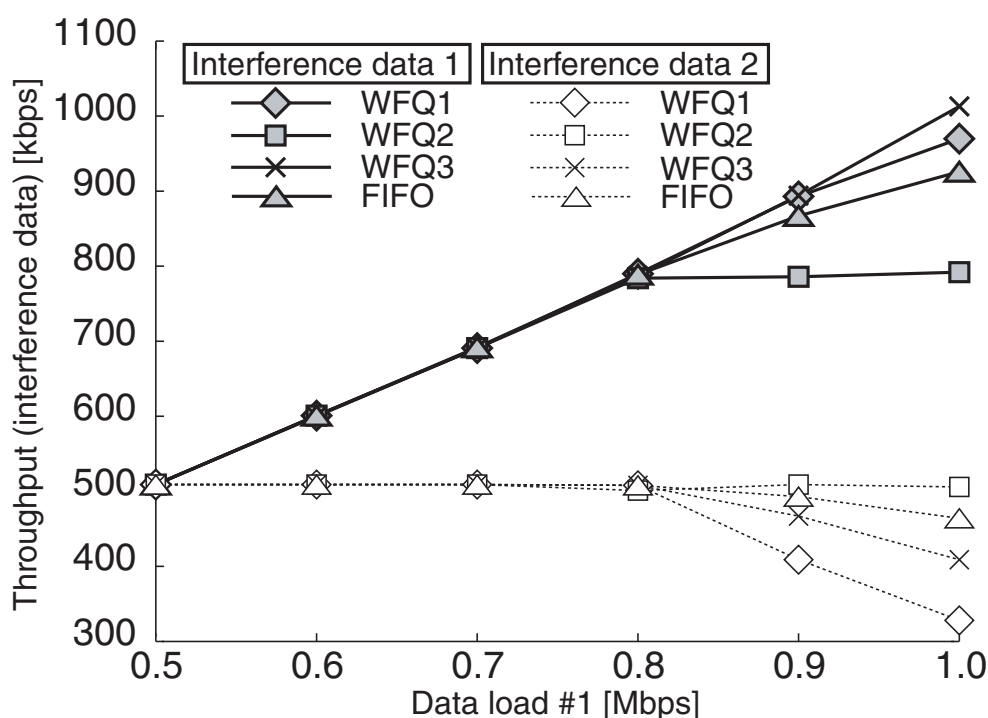


図 7.25 負荷データのスループット (WFQ)

7.4.4 スケジューリングアルゴリズムの性能比較

前節までに得られた結果を基にして、四つのスケジューリングアルゴリズムの特徴を明らかにする。

FIFO は、QoS 保証メカニズムを持たないため、ネットワーク負荷が増加すると音声及びビデオの両方の品質が低下する。

PQ では、音声とビデオの優先度が他のトラフィックよりも高い場合には高品質を保つことができるが、そうでない場合には、他のトラフィックが増大するにつれて、音声とビデオの両方の品質が劣化する。この場合、FIFO を用いたときのメディア出力品質よりも低下する恐れがある。

CQ と WFQ では、音声とビデオの合計の送信レートが割り当て帯域よりも小さい場合には、帯域が保証されるので良好な品質が得られる。しかし、そうでない場合、品質は低下する。まず、前者の場合 (CQ1, CQ2, WFQ1, 及び, WFQ2 のタイプ) に注目する。図 7.26 は、平均負荷が 0.8Mbps における音声 MU のネットワーク遅延の確率分布を示している。この図より、CQ1 が他のタイプよりも分布が緩やかなスロープとなっていることがわかる。これは、CQ がスタティックな帯域割り当てを行っているため、ネットワーク状態の変化に適応できないからである。

後者の場合 (CQ3 と WFQ3 のタイプ) について、図 7.10 と図 7.18 を用いて音声の出力間隔の変動係数に着目する。平均負荷が約 0.8Mbps より大きくなると WFQ3 の音声の出力間隔の変動係数は、CQ3 よりも小さい値となっている。すなわち、音声について、WFQ3 は CQ3 よりも高いメディア内同期品質が提供できる。ビデオに関しては、図 7.11 と図 7.19 より、同じ平均負荷の範囲で、CQ3 と WFQ3 の両方とも出力間隔の変動係数が大きくなっている。ま

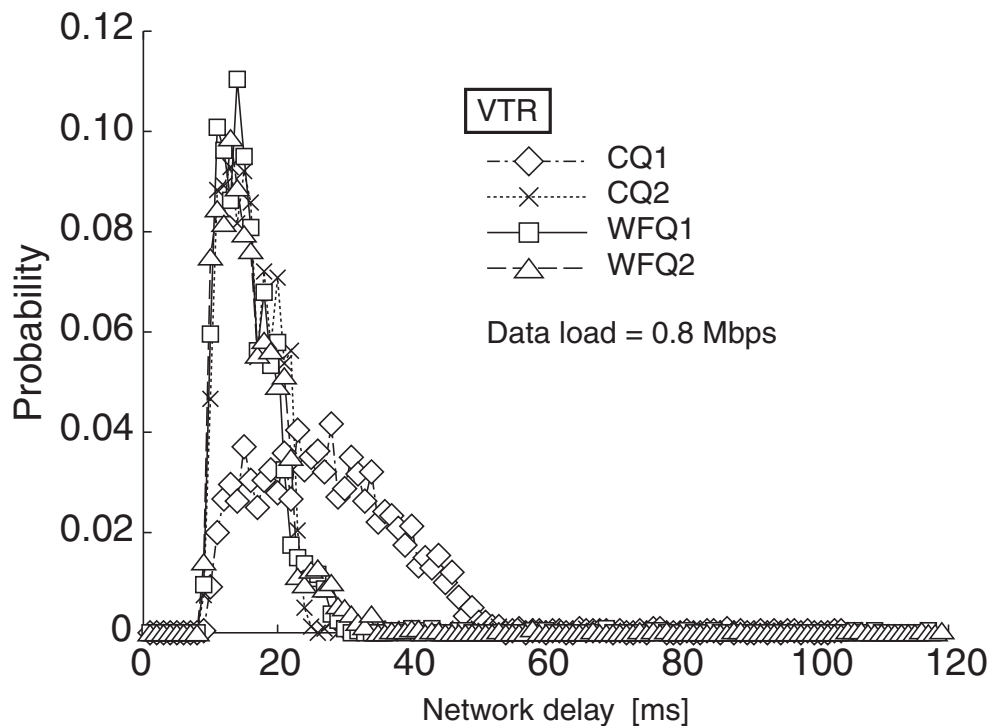


図 7.26 音声のネットワーク遅延の確率分布 (CQ1, CQ2, WFQ1 及び WFQ2)

た、図 7.13 と図 7.21 より、ビデオの平均 MU レートも大きく劣化している。したがって、ビデオのメディア内同期品質は悪いといえる。更に、図 7.22 と図 7.14 より、WFQ3 のメディア間同期の平均二乗誤差は、CQ3 のそれよりも大きくなっている。すなわち、WFQ3 は CQ3 よりもメディア間同期品質が低いといえる。また、図 7.24 と図 7.16 より、WFQ3 は CQ3 よりもビデオの平均 MU 遅延が大きくなっている。しかし、CQ3 のビデオに割り当てられた帯域 (約 336kbps=約 400kbps-64kbps) と WFQ3 のそれ (約 334kbps) はほとんど同じ値となっている。これは、WFQ3 では、音声とビデオのサービスレートは、それぞれ、ルータ出力帯域の 6 分の 1 であり、CQ3 では、音声とビデオを一緒に取り扱い、合わせて 5 分の 1 の帯域が割り当てられているためである。WFQ はフロー毎に動的に帯域を割り当てるため、WFQ3 については、ビデオに割り当てられた帯域は、ビデオソースの送信レートよりも小さく、音声の割り当て帯域は十分すぎるほど大きいことになる。したがって、WFQ3 では、多くのビデオ MU が対応する音声 MU よりも大きく遅れて到着する。一方、CQ3 では、音声 MU は、対応するビデオ MU と同様に遅れて到着することになる。上記のことに関して、図 7.27 により確認することができる。図 7.27 は、CQ3 と WFQ3 に関して、平均負荷が 0.8Mbps における音声 MU とビデオ MU のネットワーク遅延の確率分布を示している。すなわち、ビデオと同様に音声のメディア内同期品質が劣化する CQ3 と比べて、WFQ3 は音声 (マスタメディア) に関して高いメディア内同期品質が提供できる。一般的に、マスタメディア (ここでは、音声ストリーム) の品質はスレーブメディア (ここでは、ビデオストリーム) の品質よりも重要となるため、フロー毎に動的に帯域が割り当てられることが効果的である。

以上の考察より、WFQ は連続メディアに対して有効なパケットスケジューリングであるといえる。

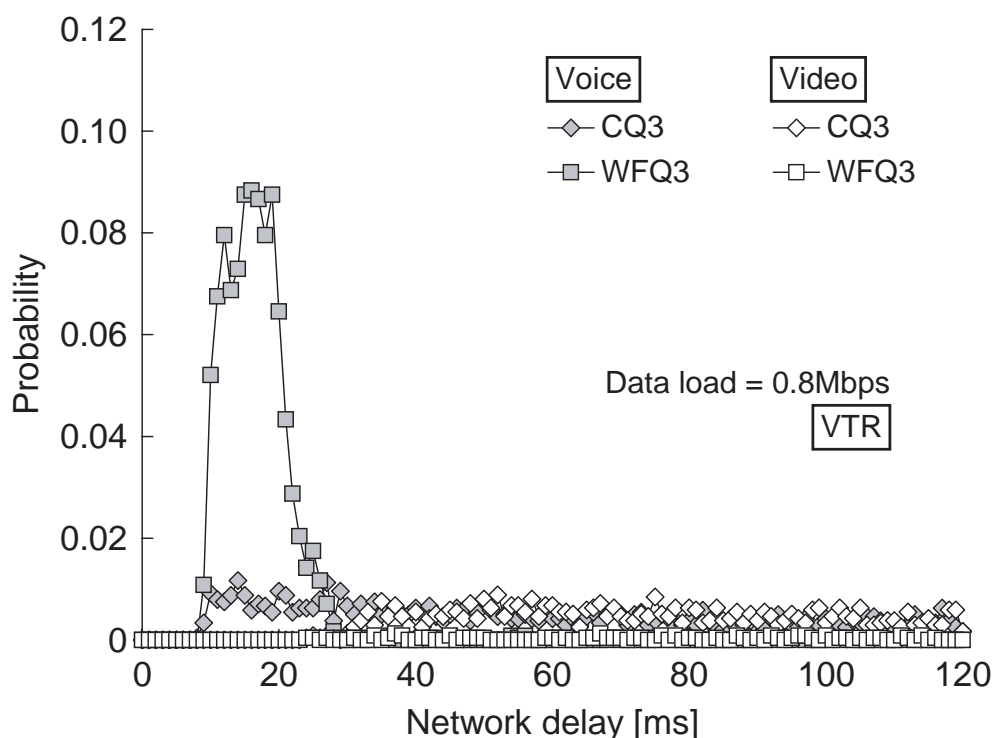


図 7.27 音声とビデオのネットワーク遅延の確率分布 (CQ3, WFQ3)

7.5 むすび

本章では、インフラ協調車車間通信システムの形態として、インフラ側のネットワークの介して車車間通信を行うことを想定した。このようなネットワーク環境においては、インフラ側である IP ネットワークの QoS 制御技術についてもアプリケーションの QoS パラメータに大きな影響を及ぼす。そこで、インターネットにおけるリンクレベル QoS 制御技術としてパケットスケジューリングを取り上げた。そして、本章では、ライブ音声及びビデオ転送を想定して、パケットスケジューリングアルゴリズムがメディア同期品質に及ぼす影響について調査した。そこで、実験を用い、メディア同期制御の有無と四つのパケットスケジューリングアルゴリズム (FIFO, PQ, CBQ, WFQ) との組み合わせからなる 8 方式のメディア同期品質を評価した。

実験の結果、FIFO, PQ 及び CQ を用いると、音声、ビデオともに品質が劣化することがわかった。一方、WFQ は、フローベースで動的にパケットをスケジュールするため、高品質な音声を提供できる。したがって、四つのアルゴリズムのうち、WFQ が連続メディアに対して最も有効なパケットスケジューリングアルゴリズムであるといえる。

第 8 章

結論

本論文では、自動車社会において、安全で環境に優しい円滑な交通環境と快適な乗車空間を目指す ITS を実現するため、インフラ協調車車間通信システムに着目し、電波伝搬特性の解析、QoS 制御技術、及び、複数レイヤにわたる QoS パラメータについて二つのネットワークモデル（利用形態）を対象にした検討を行った。一つは、周辺車両に周期的に自車位置情報などをブロードキャストするようなアドホックネットワーク形態であり、受信した車両のドライバーに対して見通し外の車両が接近していることを知らせる交通事故の予防に役立つシステムを対象としたネットワークモデルである。もう一方は、インターネット網と車車間通信との連携を想定し、前方を走行中の車両が検出した路面情報や前方交通情報を後続の遠方車両に対して情報提供するシステムを想定したモデルである。

まず、第 2 章では、車車間通信を利用するシステムの回線設計の際に必要な伝搬損失量について、周辺車両による伝搬損失への影響をモデル化する手法を提案した。日本における車車間通信として検討されている、5.8GHz 帯と 700MHz 帯の二つの周波数を使用し、フィールド実験により、周辺車両による伝搬損失量と交通量との関係について検討した。その結果、次のような結論を得た。

- 車両を停止させた状況での基礎実験により、車両が存在することによって生じる損失量（真値）の発生確率が対数正規分布で表現できる。
- 上記分布の平均値、及び、標準偏差の値を交通量パラメータで表現できる。
- 提案モデル化手法により導出したモデル式は、実測した伝搬損失値を表現できる。

次に、交差点における衝突回避警告のような安全運転支援システムのための車車間通信では、物理レイヤにおける高信頼通信の実現が重要であることから、第 3 章では、交差点における車車間通信時の電波伝搬状況を考慮した MIMO-STBC 車車間通信方式について検討した。まず、見通し外の交差点モデルにおける電波伝搬の特徴をレイトレース法により評価し、伝搬モデリングを行った。そして、その特徴に基づき、車両の移動速度情報を用いたチャネル推定法と判定帰還型チャネル推定法の 2 種類を提案した。その結果、次のような結論を得た。

- 車両速度に基づくチャネル推定法は、電波の到来方向や放射方向は道路交差方向が支配的である環境において、STBC 符号化による符号間干渉誤りが発生せず、移動距離や搬送波周波数に関わらず、SNR に対して常に一定の特性が得られる点で有効である。

- 判定帰還型チャネル推定法については、角度広がりや透過パスなどが存在するような伝搬特性環境においても、移動距離や搬送波周波数に関わらず、常に一定のビット誤り率特性が得られる。
- 交差点伝搬モデリングについては、レイリーフェージング環境と仲上ライスフェージング環境の特性にほとんど一致する。

更に、MIMO の伝送特性は電波伝搬特性に大きく依存するため、具体的な状況を想定した評価が必要である。そこで、第4章では、右折時衝突防止支援を対象とした車車間通信環境の電波伝搬特性の測定結果から、遮蔽環境下における伝搬モデルを提案し、MIMO-STBC の有効性について検討した。その結果、次のような結論を得た。

- 右折時における大型車両による遮蔽環境下においては、遮蔽されたパスの平均的な受信電力が大きく低下し、移動通信で用いるスペースダイバーシチ機能というより、サイトダイバーシチ（あるいは、不等電力ダイバーシチ）的な環境が存在する。
- 車車間通信における MIMO 適用は、前方がかなり遮蔽された状態であっても、車載した左右のアンテナのどちらかが見通しに近い状態を得る確率を上げる働きとなり、従来のスペースダイバーシチ効果以上に、サイトダイバーシチ（あるいは、不等電力ダイバーシチ）的な効果が期待できる。
- 特に、遮蔽時には、送受信両方のダイバーシチ効果が期待できる MIMO-STBC の適用により、高信頼な車車間通信の実現が期待できる。

次に、車車間通信を用いた安全運転支援システムにおけるリンクレベル QoS に着目した。これまで、車車間通信環境で検討されてきた CSMA/CA は、隠れ端末問題により、大きく通信品質が劣化することが懸念されている。そこで、第5章では、仮想キャリアセンスメカニズムである NAV を周期ブロードキャスト通信に拡張することによって、自律的に送信タイミングを制御しパケット衝突を回避する新しい MAC プロトコルとして、PB-TRMA を提案した。そして、計算機シミュレーションにより、MAC プロトコルとしての基本性能を調査し、次のような結論を得た。

- PB-TRMA は隠れ端末問題を解決し、パケット衝突を低減できる。
- 周期ブロードキャスト通信である PB-TRMA において、高品質な性能（例えば、高いパケット到達率）を達成するためには、COLL 信号によるパケット衝突回復と BUSY 信号による隠れ端末検出の二つの機能が必要不可欠である。
- PB-TRMA は自律的なスロット同期機能を必要とせず、TDMA ライクな動作を実現できる。

更に、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、パケットレベルの通信品質評価だけではなく、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）の観点から評価するため、第6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二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。また、ここで取り上げた自律分散型 TDMA プロトコルである D-TDMA に関して、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調査した。その結果、次のような結論を得た。

- 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、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を確立し、通信品質に大きな影響を及ぼさない。
- 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。
- 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、その対策方式の一つとして、D-TDMA は有望なプロトコルである。

第2章から第6章の検討内容は、車車間アドホックネットワーク環境を対象にして、車車間通信による安全運転支援システムの評価に繋がる要素技術研究として一貫している。第6章におけるプロトコルシミュレーションでは、ASV 銀座モデルによる評価環境であるため、第2章の伝搬損失モデルを適用していない。しかし、交通密度パラメータで伝搬損失量を導出することを実現できているため、実際の道路・建物モデルを考慮したシミュレーションに適用することは十分可能である。また、物理レベル QoS を向上させる車車間 MIMO 方式を用いた場合のシステムレベルの評価を行っていないが、第3章及び第4章で得られた BER 特性、もしくは、最低受信感度特性をプロトコルシミュレーション諸元として考慮することで評価可能である。実際には、第6章で評価した状況と比較して各車両の通信エリアが広がるが、隠れ端末問題の影響は大きく軽減されることはないため、物理レイヤに MIMO 技術を適用した場合においても、第6章で結論づけたように、安全運転支援システムのサービスを実現するためには、隠れ端末問題への対策が必要不可欠であることは同じである。更に、第5章で提案した PB-TRMA についてはアプリケーションレベル QoS 評価の対象としなかったが、隠れ端末対策としての有効性を考慮すると、PB-TRMA のアプリケーションレベル QoS は第6章で扱った D-TDMA のそれに近い結果が期待できるといえる。

一方で、インフラ車車間通信システムのもう一つのネットワーク形態であるインターネット網を介する車車間通信の場合、インターネットの QoS 制御技術についてもアプリケーションレベル QoS パラメータに大きな影響を及ぼす。そこで、第7章では、前方を走行中の車両が前方交通情報をストリーミングデータとして、後続の遠方車両に対して情報提供することを想定し、インターネットにおけるリンクレベル QoS 制御技術とアプリケーションレベル QoS との関係について検討した。具体的には、ライブ音声及びビデオ転送を想定して、パケットスケジューリングアルゴリズムがメディア同期品質に及ぼす影響について調査した。ここでは、実験を用い、メディア同期制御の有無と四つのパケットスケジューリングアルゴリズム (FIFO, PQ, CBQ, WFQ) との組み合わせからなる8方式のメディア同期品質を評価した。その結果、次のような結論を得た。

- FIFO, PQ 及び CQ を用いると, 音声, ビデオともに品質が劣化する.
- WFQ は, フローベースで動的にパケットをスケジュールするため, 高品質な音声を提供できる.
- 四つのアルゴリズムのうち, WFQ が連続メディアに対して最も有効なパケットスケジューリングアルゴリズムである.

以上より, 本論文では, 安全で環境に優しい円滑な交通環境と快適な乗車空間を目指す ITS 技術であるインフラ協調車車間通信システムを設計するために必要となる様々な研究を行った. まず, より実態に近い交通環境下におけるシステムレベルの性能評価を実現するため, 周辺車両が車車間伝搬損失特性に及ぼす影響を解析した. そして, 見通し外という劣悪な電波環境下において無線通信品質を向上させるため, 車車間通信に MIMO 技術を応用する手法を提案し, その実現可能性を明確にした. 更に, 周辺車両に周期的に自車位置情報などをブロードキャストする安全運転支援システムにおいて, 隠れ端末問題によるリンクレベル QoS の劣化を防ぐため, パケット衝突を回避する車車間 MAC プロトコルを提案するとともに, アプリケーションレベル QoS パラメータを提案することによって, 隠れ端末対策の重要性を明らかにした. また, 将来のインターネット網と車車間通信との連携を想定して, インターネットにおける QoS 制御技術と連続メディア品質との関係を明らかにし, 連続メディアに有効なパケットスケジューリングアルゴリズムを導出した.

このように, 本論文はインフラ協調車車間通信を一つの QoS レベルに限定した通信技術として扱うことなく, 様々なレイヤにわたる QoS パラメータを対象とすることで, 一つのシステムとして捉えている. したがって, 本論文で得られたこれらの検討結果は, 通信技術の側面からインフラ協調車車間通信システムを設計するための指針として用いることができる. 特に, 交通事故を予防するための通信システムに求められる高信頼性 (物理レベル及びリンクレベル QoS 向上) について, 具体的な交差点衝突防止支援アプリケーションを想定した評価結果は, 今後の研究開発に大いに役立つものと期待している. 今後に残された課題としては, 以下のようなことが考えられる.

- 車車間安全運転支援システムの実フィールド評価
- 様々な環境下における安全運転支援システムとしての効果検証
- インフラ協調システムとしてのユーザレベルの QoS パラメータの提案及び QoS 評価

これらの課題は, いずれも通信技術の側面から考えられるものである. しかしながら, インフラ協調車車間通信システムは, 単なる通信システムではなく, 将来の社会インフラとして大きく捉えることも必要である. したがって, 通信技術だけでなく, 交通流解析, ドライバー状態推定や心理学, 社会システム及び都市設計など, 様々な学術分野が融合されたものであると捉えることが必要である. すなわち, 将来にわたって, 有益な社会インフラとして実現するためには, 様々な学術分野を横断的に理解し, システムとしてまとめ上げる必要がある. 今後, 交通事故・渋滞の予防や環境改善を目指すシステムの実現に向け, 様々な分野にわたって, 多

くの研究が行われると思われる。本研究が、今後の様々な研究開発の発展に寄与すれば幸いである。

また、本研究で対象としたインフラ協調車車間通信システムのように、今後、更に複雑化するシステムを実現するためには、横断的に物事を捉えることが重要である。このことを意識しながら、今後の研究開発活動、技術情報の発信に努めていきたい。

謝辞

本研究において、学生時代からの懇切な御指導、並びに御助言をいただき、格別の御配慮と温かい激励を賜りました名古屋工業大学教授 田坂修二先生に心から深謝し、厚く御礼申し上げます。そして、本研究の遂行において、御議論、並びに貴重な御意見をいただきました名古屋工業大学教授 石橋豊先生に深謝し、心から御礼申し上げます。また、本研究をまとめるにあたり、数々の貴重な御意見や御指導をいただきました名古屋工業大学教授 岩波保則先生、及び、同大学教授 菊間信良先生に深く感謝いたします。

また、本研究の第3章、及び、第4章における共同研究者であり、貴重な御指導、御鞭撻をいただきました電気通信大学教授 唐沢好男先生に深く感謝いたします。

本研究は、私が株式会社豊田中央研究所、及び、名古屋工業大学在学中における研究業務の一環として実施したものであり、多くの方々の御指導、御支援をいただきました。長年にわたり、ほぼ一貫して同一分野の研究に従事できましたのは、一重に上司の御理解の賜物であります。まず、本研究の機会を与えていただきました株式会社豊田中央研究所 西川訓利取締役役から心から御礼申し上げます。そして、私が株式会社豊田中央研究所に入社して以来、直接の上司として常に親身になって御指導、御鞭撻を賜りました同社情報エレクトロニクス研究部・部長 伊藤修朗主監に深謝いたします。また、同一分野の研究テーマを継続して担当させてくれました株式会社豊田中央研究所情報エレクトロニクス研究部電波応用研究室・室長 佐藤和夫主席研究員、同研究部 ITS 研究室・室長 寺本英二主席研究員に深く感謝いたします。

更に、本研究の遂行にあたり、日頃から熱心な討論をさせて頂き、有意義な御指導や多大な御協力をいただきました株式会社豊田中央研究所 棚橋巖主任研究員、原田知育主任研究員、柴田伝幸主任研究員、鈴木徳祥主任研究員、林宏明技師、牧戸知史研究員、今井純志研究員、三田勝史研究員、田所幸浩研究員、高梨昌樹副研究員、及び、福井大学准教授 藤元美俊先生に感謝いたします。また、フィールド実験等、本研究の遂行を支えていただきました株式会社豊田中央研究所 村松潤哉副研究員、杉浦慎哉副研究員、田中宏哉副研究員、レノブル・マティユ客員研究員に感謝いたします。

また、本研究の第7章の実験において御協力いただきました元名古屋工業大学大学院生の竹尾淳氏（現在、株式会社ソフテル勤務）に感謝いたします。

更に、本研究の第2章では、790MHz帯の実験に関し、FPU帯の実験局運用調整等、多大な御協力をいただきましたトヨタ自動車株式会社、並びに株式会社トヨタ IT 開発センターの関係者各位に感謝いたします。

最後に、私の研究活動を温かく見守り、励まし、常に心の支えとなってくれました妻 奈緒子と長男 実樹に感謝いたします。また、これまで育て、見守ってくれました父 信夫、母 典子、そして妹 歩美に感謝いたします。更に、学位取得に関して、いつも気にかけて、励ましてくれた妻の父 悟、妻の母 ゆき子に感謝いたします。

なお、本研究の一部は、様々な研究助成、及び特区制度の一環として実施したものです。ここに記すとともに、感謝の意を表します。

- ITS に関するユビキタス特区（路車間＋車車間通信によるインフラ協調安全運転支援システム）プロジェクト（第2章における 5.8GHz 帯の実験）
- 総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」における「車車間通信の実現に向けた周波数高度利用技術の研究開発」プロジェクト（第5章、及び、第6章）
- 情報通信研究機構（NICT: National Institute of Information and Communications Technology）の委託研究「地上デジタルテレビ放送方式の高度化に関する研究開発」プロジェクト（付録 A）

2011 年
伊藤 健二

参考文献

- [1] “国土交通省道路局 ITS ホームページ,” <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/>.
- [2] “新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) – エネルギー ITS 推進事業,” <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p08018.html>.
- [3] 内閣府共生社会政策統括官交通安全対策, “平成 22 年版交通安全白書”, June 2010.
- [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”, Oct. 2005.
- [5] “Advanced Safety Vehicle (先進安全自動車),” <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/>.
- [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, Feb. 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, March 2009.
- [8] 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.
- [9] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack and P. Lorenz, “Wireless communication technologies for ITS applications,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 5, pp. 156–162, May 2010.
- [10] “GeoNet,” <http://www.geonet-project.eu/>.
- [11] J. Postel, “Internet protocol,” RFC791, Sept. 1981.
- [12] S. Deering and R. Hinden, “Internet protocol, version 6 (IPv6) specification,” RFC 2460, Dec. 1998.
- [13] A. Vogel, B. Kerhervé, G. v. Bochmann and J. Gecsei, “Distributed multimedia and QOS: A survey,” *IEEE Multimedia*, vol. 2, no. 2, pp. 10–19, Summer 1995.
- [14] G. Carle and E. W. Biersack, “Survey of error recovery techniques for IP-based audio-visual multicast applications,” *IEEE Network*, vol. 11, no. 6, pp. 24–36, Nov./Dec. 1997.
- [15] G. Blakowski and R. Steinmetz, “A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 5–35, Jan. 1996.

- [16] 田坂修二, “ネットワーク環境におけるメディア同期”, 電子情報通信学会誌, vol. 84, no. 3, pp. 177–183, March 2001.
- [17] A. F. Molisch, F. Tufvesson, J. Karedal and C. F. Mecklenbrauker, “A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 16, no. 6, pp. 12–22, Dec. 2009.
- [18] T. L. Willke, P. Tientrakool and N. F. Maxemchuk, “A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications,” *IEEE Commun. Surveys Tutorials*, vol. 11, no. 2, pp. 3–20, Second Quarter 2009.
- [19] S. Olariu and M. C. Weigle, “Vehicular networks: From theory to practice,” *Chapman and Hall/CRC*, March 2009.
- [20] W. Chen and S. Cai, “Ad hoc peer-to-peer network architecture for vehicle safety communications,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 4, pp. 100–107, Apr. 2005.
- [21] J. Misener, R. Sengupta and H. Krishnan, “Cooperative collision warning: Enabling crash avoidance with wireless technology,” in *Proc. 12th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Nov. 2005.
- [22] 関 馨, “ITS における VSC (Vehicular Safety Communication) の動向”, 情処学研報, vol. 2005, no. 113, pp. 165–172, Nov. 2005.
- [23] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部, “新たな情報通信技術戦略”, May 2010.
- [24] “財団法人 道路交通情報通信システムセンター,” <http://www.vics.or.jp/>.
- [25] ITS 情報通信システム推進会議, “5.8GHz を用いた車々間通信システムの実験用ガイドライン”, ITS FORUM RC-005 1.0 版, May 2007.
- [26] ITS 情報通信システム推進会議, “700MHz 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, Feb. 2009.
- [27] ETSI, “Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Definitions,” ETSI TR 102 638 v1.1.1 (Technical Report), June 2009.
- [28] ETSI, “Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 1: Functional requirements,” ETSI TS 102 637-1 v1.1.1 (Technical Specification), Sept. 2010.
- [29] ETSI, “Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 2: Specification of cooperative awareness basic service,” ETSI TS 102 637-2 v1.2.1 (Technical Specification), March 2011.

- [30] ETSI, “Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; Basic set of applications; Part 3: Specifications of decentralized environmental notification basic service,” ETSI TS 102 637-3 v1.1.1 (Technical Specification), Sept. 2010.
- [31] 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”, 信学技報, ITS2005-44, pp. 29–34, Dec. 2005.
- [32] “社団法人 新交通管理システム協会 (UTMS) – DSSS,” <http://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>.
- [33] “IntelliDrive,” <http://www.intellidriveusa.org/>.
- [34] R.A. Uzvategui and G.A. Marum, “WAVE: A tutorial,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 5, pp. 126–133, May 2009.
- [35] T. Kosch, I. Kulp, M. Bechler, M. Strassberger, B. Weyl and R. Lasowski, “Communication architecture for cooperative systems in Europe,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 5, pp. 116–125, May 2009.
- [36] “COMeSafety,” <http://www.comesafety.org/>.
- [37] “PReVENT,” <http://www.prevent-ip.org/>.
- [38] “SAFESPOT,” <http://www.safespot-eu.org/>.
- [39] “CVIS,” <http://www.cvisproject.org/>.
- [40] “COOPERS,” <http://www.coopers-ip.eu/>.
- [41] “PRE-DRIVE C2X,” <http://www.pre-drive-c2x.eu/>.
- [42] “INTERSAFE-2,” <http://www.intersafe-2.eu/>.
- [43] “Aktiv,” <http://www.aktiv-online.org/>.
- [44] “sim^{TD},” <http://www.simtd.de/>.
- [45] H. Stübing, M. Bechler, D. Heussner, T. May, I. Radusch, H. Rechner and P. Vogel, “sim^{TD}: A car-to-x system architecture for field operational tests,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 5, pp. 148–1154, May 2010.
- [46] “CAR 2 CAR Communication Consortium,” <http://www.car-to-car.org/>.
- [47] IEEE 802.11 Working Group, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, Amendment 6: Wireless access in vehicular environments,” IEEE Std 802.11p-2010, July 2010.

- [48] S. Hess, G. Segarra, K. Evensen, A. Festag, T. Weber, S. Cadzow, M. Arndt and A. Wiles, "Towards standards for sustainable ITS in Europe," in *Proc. 16th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Sept. 2009.
- [49] ETSI, "Intelligent transport systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of intelligent transport systems operating in the 5 GHz frequency band," ETSI ES 202 663 v1.1.0 (ETSI Standard), Jan. 2010.
- [50] ETSI, "Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; GeoNetworking; Part 1: Requirements," ETSI TS 102 636-1 v1.1.1 (Technical Specification), March 2010.
- [51] ETSI, "Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; GeoNetworking; Part 2: Scenarios," ETSI TS 102 636-2 v1.1.1 (Technical Specification), March 2010.
- [52] ETSI, "Intelligent transport systems (ITS); Vehicular communications; GeoNetworking; Part 3: Network architecture," ETSI TS 102 636-3 v1.1.1 (Technical Specification), March 2010.
- [53] 戸田 巖, "ネットワーク QoS 技術", オーム社, 2001.
- [54] 間瀬憲一, "マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質", 電子情報通信学会, 2001.
- [55] S. Tasaka and Y. Ishibashi, "Mutually compensatory property of multimedia QoS," in *Conf. Rec. IEEE ICC2002*, pp. 1105–1111, Apr./May 2002.
- [56] 唐沢好男, "デジタル移動通信の電波伝搬基礎", コロナ社, 2003.
- [57] Rec. ITU-R P.1411-5, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," ITU-R Recommendations, vol. 2009 P Series, ITU, Geneva 2009.
- [58] 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失推定", 信学論 (B), vol. J75B-II, no. 8, pp. 596–598, Aug. 1992.
- [59] 伊藤義信, 多賀 登喜雄, 村松潤哉, 鈴木徳祥, "車車間通信環境における見通し内伝搬損失推定", 信学技報, AP2006-126, pp. 95–100, Jan. 2007.
- [60] 伊藤義信, 多賀 登喜雄, "車車間通信環境における見通し外伝搬損失推定", 信学総大, B-1-61, March 2008.
- [61] 中嶋信生 (編), "新世代ワイヤレス技術", 丸善, 2004.
- [62] IEEE 802.11 Working Group, "Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," IEEE Std 802.11-2007, Oct. 2007.

- [63] IEEE 802.11 Working Group, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, Amendment 5: Enhancements for higher throughput,” IEEE Std 802.11n-2009, June 2009.
- [64] S. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998.
- [65] V. Tarokh, N. Seshadri and A. R. Calderbank, “Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction,” *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744–765, March 1998.
- [66] 守倉正博, 久保田 周治, “改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書”, インプレス R&D, 2008.
- [67] 松江英明, 守倉正博, 佐藤明雄, 渡辺和二, “高速ワイヤレスアクセス技術”, 電子情報通信学会, 2004.
- [68] 藤川和利, 下條真司, 松浦敏雄, 西尾章治郎, 宮原秀夫, “分散型ハイパメディアシステム Harmony における情報間同期機構の実現”, 信学論 (D-I), vol. J76-D-I, no. 9, pp. 473–483, Sept. 1993.
- [69] S. Ramanathan and P. V. Rangan, “Adaptive feedback techniques for synchronized multimedia retrieval over integrated networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 2, pp. 246–260, Apr. 1993.
- [70] Y. Ishibashi, S. Tasaka and E. Minami, “Performance measurement of a stored media synchronization mechanism: Quick recovery scheme,” in *Conf. Rec. IEEE GLOBE-COM’95*, pp. 811–817, Nov. 1995.
- [71] Y. Ishibashi and S. Tasaka, “A group synchronization mechanism for live media in multicast communications,” in *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM’97*, pp. 746–752, Nov. 1997.
- [72] Y. Ishibashi and S. Tasaka, “A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications,” in *Proc. IEEE INFOCOM’95*, pp. 1010–1019, Apr. 1995.
- [73] Y. Ishibashi, S. Tasaka and A. Tsuji, “Measured performance of a live media synchronization mechanism in an ATM network,” in *Conf. Rec. IEEE ICC’96*, pp. 1348–1354, June 1996.
- [74] S. Sai, E. Niwa, K. Mase, M. Nishibori, J. Inoue, M. Obuchi, T. Harada, H. Ito, K. Mizutani and M. Kizu, “Field evaluation of UHF radio propagation for an ITS safety system in an urban environment,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 120–127, Nov. 2009.

- [75] K. Seki, “Data relay performance of 5.8 GHz inter-vehicle communications (The Second Report),” in *Proc. 13th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Oct. 2006.
- [76] J. Muramatsu, N. Suzuki, Y. Ito and T. Taga, “Measurement of radio propagation characteristics for inter-vehicle communication in urban areas,” in *Proc. ISAP2007, 1D5-1*, pp. 161–164, Aug. 2007.
- [77] 岩井誠人, 菅江一平, “700MHz 帯における ITS 用伝搬損失距離特性モデルおよび遅延プロファイルモデル”, 信学技報, AP2010-8, pp. 35–40, Apr. 2010.
- [78] 中岡 謙, 永井真琴, 樋口啓介, 李 从兵, “車車間・路車間共用通信のための時分割アクセス制御方式”, 信学ソ大, AS-2-3, Sept. 2009.
- [79] 細矢良雄 (監修), “電波伝搬ハンドブック”, リアライズ社, 1999.
- [80] 家田清一, 村上裕一, 井奈波 恒, 藤本真吾, 押田拓郎, “車車間通信における UHF 帯伝搬損失特性の道路路面違い検討”, 信学技報, AP2010-7, pp. 31–34, Apr. 2010.
- [81] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. J. Smith and A. Naguib, “From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, Apr. 2003.
- [82] Y. Karasawa, “MIMO propagation channel modeling,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E88-B, no. 5, pp. 1829–1842, May 2005.
- [83] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen and F. Frederiksen, “A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1211–1226, Aug. 2002.
- [84] M. A. Jensen and W. Wallace, “A review of antennas and propagation for MIMO wireless communications,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 11, pp. 2810–2824, Nov. 2004.
- [85] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, “Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 879–891, Nov. 1994.
- [86] 今井哲朗, “レイトレース法を用いたトンネル内伝搬特性の推定”, 信学論 (B), vol. J85-B, no. 2, pp. 216–226, Feb. 2002.
- [87] M. A. McKeown, D. G. M. Cruickshank, I. A. B. Lindsay, J. S. Thompson, S. A. Farson and Y. Hu, “Carrier frequency offset estimation in BLAST MIMO systems,” *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 1752–1753, Nov. 2003.
- [88] F. Siemons and M. Moeneclaey, “Computationally efficient frequency offset estimation for flat-fading MIMO channels: Performance analysis and training sequence design,” in *Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2004*, pp. 2460–2464, Dec. 2004.

- [89] O. Besson and P. Stoica, "On parameter estimation of MIMO flat-fading channels with frequency offsets," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 3, pp. 602–613, March 2003.
- [90] S. Shahbazpanahi, A. B. Gershman and G. B. Giannakis, "Joint blinded channel and carrier frequency offset estimation in orthogonally space-time block coded MIMO systems," in *Proc. IEEE 6th Workshop on Signal Process. Advances in Wireless Commun.*, pp. 363–367, June 2005.
- [91] J. R. Barry and A. Batra, "A multidimensional phase-locked loop for blind equalization of multi-input multi-output channels," in *Conf. Rec. IEEE ICC'96*, vol. 3, pp. 1307–1312, June 1996.
- [92] V. Tarokh and H. Jafarkhani, "A differential detection scheme for transmit diversity," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 18, no. 7, pp. 1169–1174, July 2000.
- [93] "Radio propagation laboratory –RapLab–," <http://www4.kke.co.jp/raplab/>.
- [94] V. Erceg, A. J. Rustako and R. S. Roman, "Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz, and 6 GHz," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 762–766, Aug. 1994.
- [95] 小野良司, 撫中達司, 渡辺 尚, "アドホックルーティ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", 信学論 (A), vol. J88-A, no. 12, pp. 1422–1431, Dec. 2005.
- [96] P. Karn, "MACA – A new channel access method for packet radio," in *Proc. ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Comp. Networking Conf.*, pp. 134–140, Sept. 1990.
- [97] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wireless LAN's," in *Proc. ACM SIGCOMM'94*, pp. 212–225, Aug./Sept. 1994.
- [98] K. Tang and M. Gerla, "Random access MAC for efficient broadcast support in ad hoc networks," in *Proc. IEEE WCNC 2000*, vol. 1, pp. 454–459, Sept. 2000.
- [99] K. Tang and M. Gerla, "MAC reliable broadcast in ad hoc networks," in *Proc. IEEE MILCOM 2001*, vol. 2, pp. 1008–1013, Oct. 2001.
- [100] 重安哲也, 松野浩嗣, 森永規彦, "隠れ端末の危険度に基づいた衝突回避制御を行うブロードキャストプロトコル", 情処論, vol. 51, no. 2, pp. 453–465, Feb. 2010.
- [101] F. A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: Part II – The hidden terminal problem in carrier sense multiple access and the busy-tone solution," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-23, pp. 1417–1433, Dec. 1975.

- [102] Z. J. Haas and J. Deng, "Dual busy tone multiple access (DBTMA) – A multiple access control scheme for adhoc networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 6, pp. 975–984, June 2002.
- [103] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana and L. Fratta, "ADHOC MAC : New mac architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services," *Wireless Networks 10*, vol. 10, no. 4, pp. 359–366, July 2004.
- [104] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana and L. Fratta, "Impact of user mobility on the broadcast service efficiency of ADHOC MAC protocol," in *Proc. IEEE Vehi. Tech. Conf. 2005, VTC2005-Spring*, pp. 2310–2314, May/June 2005.
- [105] 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", 情処論, vol. 48, no. 7, pp. 2257–2266, July 2007.
- [106] Y. Tadokoro, K. Ito, J. Imai, N. Suzuki and N. Itoh, "A new approach for evaluation of vehicle safety communications with decentralized TDMA-based MAC protocol," in *Proc. IEEE V2VCOM 2008*, June 2008.
- [107] S. Tabbane and P. Godlewski, "Performance evaluation of the R-BTMA protocol in a distributed mobile radio network context," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, no. 1, pp. 24–34, Feb. 1992.
- [108] 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", 情処論, vol. 45, no. 3, pp. 824–837, March 2004.
- [109] "The Network Simulator ns-2," <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [110] Y. Tadokoro, K. Ito, J. Imai, N. Suzuki and N. Itoh, "Advanced transmission cycle control scheme for autonomous decentralized TDMA protocol in safe driving support systems," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2008*, pp. 1062–1067, June 2008.
- [111] S. Kato, S. Tsugawa, K. Tokuda, T. Matsui and H. Fujii, "Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications," *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 155–161, Sept. 2002.
- [112] 牧戸知史, 林 宏明, 今井純志, 原田知育, 伊藤健二, 田所幸浩, 田中宏哉, 鈴木徳祥, 寺本英二, "次世代車車間通信のための高信頼 MAC プロトコル—高負荷模擬環境におけるフィールド評価—", 信学技報, RCS2009-272, pp. 89–94, March 2010.
- [113] 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", 信学総大, A-17-9, March 2008.

- [114] 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”, 情処学研報, 高度交通システム研究会, 2007-ITS-31, Nov. 2007.
- [115] 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”, 信学技報, USN2007-13, May 2007.
- [116] 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.
- [117] Y. Karasawa, T. Kumagai, A. Takemoto, T. Fujii, K. Ito and N. Suzuki, “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, Jan. 2008.
- [118] 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”, 情処論, vol. 46, no. 1, pp. 226–235, Jan. 2005.
- [119] A. J. Goldsmith and L. J. Greenstein, “A measurement-based model for predicting coverage areas of urban microcells,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 11, no. 7, pp. 1013–1023, Sept. 1993.
- [120] J. Wroclawski, “The use of RSVP with IETF integrated services,” RFC 2210, Sept. 1997.
- [121] P. P. White, “RSVP and integrated services in the Internet: A tutorial,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 5, pp. 100–106, May 1997.
- [122] S. Blake, D. Blake, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang and W. Weiss, “An architecture for differentiated services,” RFC 2475, Dec. 1998.
- [123] R. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog and S. Jamin, “Resource reservation protocol (RSVP),” RFC 2205, Sept. 1997.
- [124] K. Nichols, S. Blake, F. Baker and D. Black, “Definition of the differentiated services field (DS field) in the IPv4 and IPv6 headers,” RFC 2474, Dec. 1998.
- [125] A. Demers and S. Shenker, “Analysis and simulation of a fair queueing algorithm,” in *Proc. ACM SIGCOMM’89*, vol. 19, no. 4, pp. 1–12, Sept. 1989.
- [126] A. K. Parekh and R. G. Gallager, “A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 1, no. 3, pp. 344–357, June 1993.
- [127] A. K. Parekh and R. G. Gallager, “A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The multiple node case,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 2, no. 2, pp. 137–150, Apr. 1994.

- [128] M. Shreedhar and G. Varghese, "Efficient fair queueing using deficit round-robin," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 4, no. 3, pp. 375–385, June 1996.
- [129] A. Varma and D. Stiliadis, "Hardware implementation of fair queueing algorithms for asynchronous transfer mode networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 12, pp. 54–68, Dec. 1997.
- [130] D. A. Hayes, M. Rumsewicz and L. L. H. Andrew, "Quality of service driven packet scheduling disciplines for real-time applications: Looking beyond fairness," in *Proc. IEEE INFOCOM'99*, pp. 405–412, March 1999.
- [131] D. Stiliadis and A. Varma, "Latency-rate servers: A general model for analysis of traffic scheduling algorithms," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 611–624, Oct. 1998.
- [132] G. Hasegawa, T. Matsuo, M. Murata and H. Miyahara, "Comparisons of packet scheduling algorithms for fair service among connections on the Internet," in *Proc. IEEE INFOCOM2000*, pp. 1253–1262, March 2000.
- [133] R. Guerin, S. Kamat, V. Peris and R. Rajan, "Scalable QoS provision through buffer management," in *Proc. ACM SIGCOMM'98*, vol. 28, no. 4, pp. 29–40, Oct. 1998.
- [134] S. Floyd and V. Jacobson, "Link-sharing and resource management models for packet networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 3, no. 4, pp. 365–386, Aug. 1995.
- [135] M. Katevenis and C. Courcoubetis, "Weighted round-robin cell multiplexing in a general-purpose ATM switch chip," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 9, no. 8, pp. 1265–1279, Oct. 1991.
- [136] S. Tasaka, T. Nunome and Y. Ishibashi, "Live media synchronization quality of a retransmission-based error recovery scheme," in *Conf. Rec. IEEE ICC2000*, pp. 1535–1541, June 2000.
- [137] "Cisco IOS(TM) software quality of service solutions," White Paper, Cisco Systems, Inc., 1998.
- [138] R. Steinmetz, "Human perception of jitter and media synchronization," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 61–72, Jan. 1996.
- [139] S. Tasaka and Y. Ishibashi, "A performance comparison of single-stream and multi-stream approaches to live media synchronization," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 11, pp. 1988–1997, Nov. 1998.
- [140] J. Imai, M. Fujimoto, T. Shibata, N. Suzuki, N. Itoh and K. Mizutani, "Experimental results of diversity reception for terrestrial digital broadcasting," *IEICE Trans. Commun.*, pp. 2527–2530, Nov. 2002.

-
- [141] 三田勝史, 柴田伝幸, 伊藤修朗, 今井純志, 鈴木徳祥, 伊藤健二, “地上デジタル放送の移動受信における指向性制御方式に関する検討”, 情処学研報, ITS-15-13, Nov. 2003.
- [142] 松沢 晋一郎, 佐藤和夫, 西川訓利, “地上デジタル放送用ガラスアンテナ素子の小型化”, 2003 年信学総大, B-1-172, March 2003.

研究業績

(1) 学術論文（査読あり）

(1-1) 本論文に関する業績（論文 5 件，レター 1 件）

1. Kenji Ito, Noriyoshi Suzuki, Satoshi Makido and Hiroaki Hayashi, “Periodic broadcast timing reservation multiple access for inter-vehicle communication,” *Journal of Information Processing*, vol. 19, pp. 141–152, March 2011.
 - 上記論文の Reprint
Kenji Ito, Noriyoshi Suzuki, Satoshi Makido and Hiroaki Hayashi, “Periodic broadcast timing reservation multiple access for inter-vehicle communication,” *IPJS Journal*, vol. 52, no. 3, pp. 1114–1125, March 2011.
2. 伊藤健二, 三田勝史, 高梨昌樹, 田所幸浩, “周辺車両が車車間伝搬特性に及ぼす影響に関する一検討,” *電子情報通信学会論文誌 (B)*, vol. J94–B, no. 3, pp. 455–467, March 2011.
3. 伊藤健二, 田所幸浩, 鈴木徳祥, 今井純志, 牧戸知史, “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,” *情報処理学会論文誌*, vol. 51, no. 1, pp. 83–100, Jan. 2010.
4. 伊藤健二, 伊藤修朗, 三田勝史, 唐沢好男, “交差点付近の伝搬特性を対象とする判定帰還型チャネル推定法による MIMO-STBC 車車間通信方式,” *電子情報通信学会論文誌 (B)*, vol. J89–B, no. 9, pp. 1776–1788, Sept. 2006.
 - 上記論文の英語翻訳
Kenji Ito, Nobuo Itoh, Katsushi Sanda and Yoshio Karasawa, “MIMO-STBC scheme for inter-vehicle communications using decision feedback channel estimation method based on propagation feature at intersection,” *Wiley Electronics and Communications in Japan, Part1*, vol. 90, no. 9, pp. 1–15, Sept. 2007.
5. 伊藤健二, 三田勝史, 伊藤修朗, “高速走行時における地上デジタル放送移動受信の品質測定,” *映像情報メディア学会誌 研究速報*, vol. 59, no. 1, pp. 111–114, Jan. 2005.
6. Kenji Ito, Shuji Tasaka and Yutaka Ishibashi, “Media synchronization quality of packet scheduling algorithms,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E85–B, no. 1, pp. 52–62, Jan. 2002.

(1-2) その他の業績（論文 5 件，レター 1 件）

1. Yi Wang, Kenji Ito and Yoshio Karasawa, “Propagation channel modeling in the mixture of NLOS and LOS environments for MIMO-MRC system and its application to ITS-IVC,” IEICE Transactions on Communications, vol. E94-B, no. 5, pp. 1207–1214, May 2011.
2. 田所幸浩, 牧戸知史, 伊藤健二, 鈴木徳祥, “車車間通信を用いた予防安全アプリケーションのための自律分散型 TDMA プロトコル向け送信周期制御方式の提案,” 情報処理学会論文誌 テクニカルノート, vol. 51, no. 3, pp. 945–950, March 2010.
3. Yoshio Karasawa, Taichi Kumagai, Atsushi Takemoto, Takeo Fujii, Kenji Ito and Noriyoshi Suzuki, “Experiment on synchronous timing signal detection from ISDB-T terrestrial digital TV signal with application to autonomous distributed ITS-IVC network,” IEICE Transactions on Communications, vol. E92-B, no. 1, pp. 296–305, Jan. 2009.
4. Katsushi Sanda, Nobuo Itoh, Noriyoshi Suzuki, Junji Imai and Kenji Ito, “Adaptive beam steering reception system for ISDB-T based on pre-FFT diversity technique,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 52, no. 2, pp. 327–335, May 2006.
5. Noriyoshi Suzuki, Kenji Ito, Tsutayuki Shibata and Nobuo Itoh, “A novel multi-service simultaneous reception by sharing diversity branches,” IEICE Transactions on Communications, vol. E88-B, no. 11, pp. 4212–4219, Nov. 2005.
6. 布目敏郎, 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “マルチキャスト通信用連続メディア再送制御方式 MRVTR とそのアプリケーションレベル QoS”, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J86-B, no. 3, pp. 576–589, March 2003.

(2) 国際会議（査読あり）

(2-1) 本論文に関する業績（4 件）

1. Kenji Ito, Noriyoshi Suzuki, Satoshi Makido and Hiroaki Hayashi, “Periodic broadcast type timing reservation MAC protocol for inter-vehicle communications,” in Conf. Rec. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2009), Nov./Dec. 2009.
2. Kenji Ito, Noriyoshi Suzuki and Yoshio Karasawa, “Performance evaluation of MIMO-STBC for inter-vehicle communications in a shadowing environment generated by a large vehicle,” in Proc. IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC 2007-Fall), pp. 758–762, Sept./Oct. 2007.
3. Kenji Ito, Nobuo Itoh, Katsushi Sanda and Yoshio Karasawa, “A novel MIMO-STBC scheme for inter-vehicle communications at intersection,” in Proc. IEEE 63rd Vehicular Technology Conference (VTC 2006-Spring), vol. 6, pp. 2937–2941, May 2006.

4. Kenji Ito, Shuji Tasaka and Yutaka Ishibashi, “Effect of packet scheduling algorithms on media synchronization quality in the Internet,” in Conf. Rec. IEEE International Conference on Communications (ICC 2001), vol. 9, pp. 2865–2871, June 2001.

(2-2) その他の業績 (8 件)

1. Mathieu Lenoble, Kenji Ito, Yukihiro Tadokoro, Masaki Takanashi and Katsushi Sanda, “Header reduction to increase the throughput in decentralized TDMA-based vehicular networks,” in Proc. IEEE Vehicular Network Conference (VNC 2009), Oct. 2009.
2. Yukihiro Tadokoro, Kenji Ito, Junji Imai, Noriyoshi Suzuki and Nobuo Itoh, “A performance evaluation of autonomous decentralized TDMA protocol for safe driving support systems,” in Proc. 15th World Congress on Intelligent Transport Systems, Nov. 2008.
3. Yukihiro Tadokoro, Kenji Ito, Junji Imai, Noriyoshi Suzuki and Nobuo Itoh, “Advanced transmission cycle control scheme for autonomous decentralized TDMA protocol in safe driving support systems,” in Proc. 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2008), June 2008.
4. Yukihiro Tadokoro, Kenji Ito, Junji Imai, Noriyoshi Suzuki and Nobuo Itoh, “A new approach for evaluation of vehicle safety communications with decentralized TDMA-based MAC protocol,” in Proc. IEEE 4th Workshop on Vehicle to Vehicle Communications (V2VCOM 2008), June 2008.
5. Katsushi Sanda, Tsutayuki Shibata, Nobuo Itoh, Kenji Ito, Noriyoshi Suzuki and Junji Imai, “Adaptive beam steering reception system for ISDB-T based on pre-FFT diversity technique,” in Proc. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2006), pp. 465–466, Jan. 2006.
6. Noriyoshi Suzuki, Kenji Ito, Tsutayuki Shibata and Nobuo Itoh, “A novel multi-service simultaneous receiver with diversity reception technique by sharing branches,” in Proc. 2004 Software Defined Radio Technical Conference (SDR 2004), 4.3–4, Nov. 2004.
7. Tsutayuki Shibata, Katsushi Sanda, Nobuo Itoh, Noriyoshi Suzuki, Junji Imai and Kenji Ito, “Receiving HDTV on automobile,” in Proc. 11th World Congress on Intelligent Transport Systems, Nagoya, Oct. 2004.
8. Junji Imai, Nobuo Itoh, Tsutayuki Shibata, Noriyoshi Suzuki, Katsushi Sanda and Kenji Ito, “Experimental results of mobile reception with diversity techniques for ISDB-T,” in Proc. 8th International OFDM-Workshop, Sept. 2003.

(3) 国内研究会（査読なし）

(3-1) 本論文に関する業績（7件）

1. 伊藤健二, 鈴木徳祥, 田所幸浩, 牧戸知史, 林 宏明, “車車間安全システムのための衝突回避型ブロードキャスト MAC プロトコルの提案”, 情報処理学会研究報告, 2008-ITS-33, pp. 15-21, June 2008.
2. 伊藤健二, “安心・安全を支える車車間通信技術の最新動向”, Microwave Workshops and Exhibition, MWE 2007, Nov. 2007. (招待講演)
3. 伊藤健二, 田所幸浩, 伊藤修朗, “電波を利用した自動車の安全システム”, GPS/GNSS Symposim 2007, Nov. 2007. (招待講演)
4. 伊藤健二, 田所幸浩, 鈴木徳祥, 原田知育, 尾口健太郎, 伊藤修朗, “車車間通信による安全運転支援システムの性能評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2007-26, Sept. 2007.
5. 伊藤健二, 伊藤修朗, 三田勝史, 唐沢好男, “交差点伝搬特性に基づく判定帰還型チャネル推定法による MIMO-STBC 車車間通信方式”, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2005-166, Feb. 2006.
6. 伊藤健二, 伊藤修朗, 三田勝史, 唐沢好男, “見通し外交差点伝搬環境における MIMO-STBC 車車間通信方式 ～高速移動時における符号間干渉問題とその対策～”, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2005-108, Oct. 2005.
7. 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “種々のパケットスケジューリングによる連続メディア転送の品質測定”, 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2000-66, IN2000-142, Nov. 2000.

(3-2) その他の業績（13件）

1. 牧戸知史, 林 宏明, 今井純志, 原田知育, 伊藤健二, 田所幸浩, 田中宏哉, 鈴木徳祥, 寺本英二, “次世代車車間通信のための高信頼 MAC プロトコル –高負荷模擬環境におけるフィールド評価–”, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2009-272, March 2010.
2. 田所幸浩, 伊藤健二, 今井純志, 鈴木徳祥, 伊藤修朗, “安全運転支援システムのための自律分散型 TDMA プロトコル向け送信周期制御方式”, 情報処理学会研究報告, 2007-ITS-31, Nov. 2007.
3. 唐沢好男, 藤井威生, 熊谷太一, 伊藤健二, 鈴木徳祥, “地上デジタル放送波の OFDM ガードインターバル周期情報を利用した同期システム型車車間通信ネットワークの提案”, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2006-127, Jan. 2007.
4. 鈴木徳祥, 今井純志, 三田勝史, 伊藤健二, 伊藤修朗, “固有ベクトルビーム形成の際の計算量削減に関する検討”, 第 27 回情報理論とその応用シンポジウム, pp. 199-202, Dec. 2004.

5. 鈴木徳祥, 伊藤健二, 柴田伝幸, 伊藤修朗, “ブランチを共用する選択ダイバーシチ受信による複数メディア同時受信の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, SR04-8, May 2004.
6. 三田勝史, 柴田伝幸, 伊藤修朗, 今井純志, 鈴木徳祥, 伊藤健二, “地上デジタル放送の移動受信における指向性制御方式に関する検討”, 情報処理学会研究報告, 2003-ITS-15-13, Nov. 2003.
7. 伊藤健二, 柴田伝幸, 三田勝史, 伊藤修朗, “車載ネットワークにおける QoS 制御方式の提案”, 情報処理学会研究報告, 2002-ITS-11-13, Nov. 2002.
8. 柴田伝幸, 三田勝史, 伊藤修朗, 藤元美俊, 今井純志, 伊藤健二, “指向性制御による地上波デジタル放送移動受信特性の改善方法の検討”, 情報処理学会研究報告, 2002-ITS-11-11, Nov. 2002.
9. 伊藤修朗, 三田勝史, 柴田伝幸, 伊藤健二, 鈴木徳祥, 原田知育, “車載統合通信システムの一検討”, 電子情報通信学会第 17 回デジタル信号処理シンポジウム, B4-3, Nov. 2002.
10. 三田勝史, 柴田伝幸, 伊藤修朗, 伊藤健二, 藤元美俊, 今井純志, “地上デジタル放送におけるアダプティブ受信方式の簡略化に関する検討”, 電子情報通信学会第 17 回デジタル信号処理シンポジウム, B4-4, Nov. 2002.
11. 伊藤健二, 竹尾 淳, 田坂修二, 石橋 豊, “DiffServ における AF サービスの連続メディア同期品質”, 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2001-38, July 2001.
12. 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “連続メディア再送制御方式 RVTR のマルチキャスト通信への拡張”, 電子情報通信学会技術研究報告, SSE2000-12, April 2000.
13. 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “メディアインタリーブがメディア同期品質に及ぼす影響”, 電気学会東海支部若手セミナー, March 1999.

(4) 国内大会（査読なし）

(4-1) 本論文に関する業績（3 件）

1. 伊藤健二, 鈴木徳祥, 牧戸知史, 林 宏明, 寺本英二, “車車間安全システムのための同報型 MAC プロトコルの性能比較”, 2008 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-17-8, Sept. 2008.
2. 伊藤健二, 鈴木徳祥, 唐沢好男, “大型車両による遮蔽を考慮した MIMO-STBC 車車間通信特性”, 2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-209, Sept. 2006.
3. 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “複数ノードのパケットスケジューリングがメディア同期品質に及ぼす影響”, 2001 年電子情報通信学会総合大会, B-11-18, March 2001.

(4-2) その他の業績 (15 件)

1. Mathieu Lenoble and Kenji Ito, “Effect of multi-hop transmissions on safety application quality in decentralized TDMA-based VANET,” in Proc. 2011 IEICE General Conference, B-21-15, March 2011.
2. 林 宏明, 伊藤健二, 今井純志, 鈴木徳祥, 原田知育, 牧戸知史, “多数の車両を模擬する車車間通信装置の開発”, 2010 年電子情報通信学会総合大会, A-17-14, March 2010.
3. 牧戸知史, 林 宏明, 今井純志, 原田知育, 田所幸浩, 田中宏哉, 伊藤健二, 鈴木徳祥, 寺本英二, “高信頼車車間通信プロトコルのフィールド評価”, 2010 年電子情報通信学会総合大会, A-17-15, March 2010.
4. Mathieu Lenoble, Kenji Ito, Yukihiro Tadokoro, Masaki Takanashi and Katsushi Sanda, “Opportunistic header management to increase the throughput in decentralized TDMA-based vehicular networks,” in Proc. 2009 IEICE Society Conference, B-8-27, Sept. 2009.
5. Yi Wang, Kenji Ito and Yoshio Karasawa, “ITS-IVC propagation channel model for MIMO-STBC transmission at an intersection where a large vehicle shadows the oncoming car,” in Proc. 2009 IEICE Society Conference, B-1-196, Sept. 2009.
6. 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”, 2008 年電子情報通信学会総合大会, A-17-9, March 2008.
7. 田所幸浩, 今井純志, 伊藤健二, 鈴木徳祥, 伊藤修朗, “自律分散スロット同期手法を用いた D-TDMA 方式の通信品質”, 2008 年電子情報通信学会総合大会, A-17-10, March 2008.
8. 唐沢好男, 藤井威生, 熊谷太一, 伊藤健二, 鈴木徳祥, “地上デジタル放送波の OFDM ガードインターバル周期情報を利用した同期システム型車車間通信ネットワークの提案”, 2007 年電子情報通信学会総合大会, A-17-17, March 2007.
9. 鈴木徳祥, 今井純志, 三田勝史, 伊藤健二, 伊藤修朗, “固有ベクトルによる適応マルチビームフォーミングの計算量削減”, 2005 年電子情報通信学会総合大会, B-1-274, March 2005.
10. 鈴木徳祥, 伊藤健二, 柴田伝幸, 伊藤修朗, “ダイバーシチブランチに受信メディアを動的に割り当てる複数メディア同時受信方式の検討”, 2004 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-17-11, Sept. 2004.
11. 伊藤健二, 柴田伝幸, 三田勝史, 伊藤修朗, “車載ネットワークにおける IDB-1394 性能向上手法に関する一検討”, 2003 年電子情報通信学会総合大会, B-7-104, March 2003.
12. 藤元美俊, 今井純志, 伊藤修朗, 柴田伝幸, 三田勝史, 伊藤健二, “地上波デジタル放送指向性制御受信に関する一検討”, 2002 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-70, Sept. 2002.
13. 三田勝史, 鈴木徳祥, 原田知育, 柴田伝幸, 藤元美俊, 伊藤健二, 伊藤修朗, “車載統合通信システムの検討”, 2002 年電子情報通信学会総合大会, A-17-19, March 2002.

14. 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “マルチキャスト通信連続メディア再送制御における再送スケーリング方式の提案”, 2000 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-11-11, Sept. 2000.
15. 伊藤健二, 田坂修二, 石橋 豊, “ストリーム多重化方式がメディア同期品質に及ぼす影響”, 1999 年電子情報通信学会総合大会, B-11-8, March 1999.

(5) 受賞歴

(5-1) 本論文に関する業績 (4 件)

1. “情報処理学会平成 20 年度山下記念研究賞 (IPSI Yamashita SIG Research Award)”, 2009.
2. “平成 20 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞”, 2009.
3. “平成 19 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞”, 2008.
4. “2000 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”, 2001.

(5-2) その他の業績 (1 件)

1. “IEEE Consumer Electronics Society 2006 Chester Sall Award for the First place Transactions paper Award”, 2008.

(6) 特許 (登録)

(6-1) 本論文に関する業績 (4 件)

1. “受信装置”, 特許 4737532 号.
2. “Communication device”, EP 2 083 603 B1.
3. “通信装置”, 特許第 4518155 号.
4. “通信装置及び通信システム”, 特許第 4421539 号.

(6-2) 本論文以外の業績 (8 件)

1. “Mobile radio communication system”, US 7804395 B2.
2. “ダイバーシチ受信装置”, 特許第 4457923 号.
3. “ダイバーシチ受信における振幅の時間変動補償方法及び装置、マルチキャリアダイバーシチ受信におけるシンボル内時間変動補償方法及び装置”, 特許第 4403877 号.

4. “指向性制御装置”, 特許第 4322723 号.
5. “駐車位置案内装置及び車載駐車位置案内装置”, 特許第 4263634 号.
6. “移動体間無線システム”, 特許第 4232836 号.
7. “車両退避指示装置、車両退避指示システム及び車両退避指示方法”, 特許第 4187669 号.
8. “ダイバーシチ受信機”, 特許第 4055706 号.

(7) 特許（公開中）

(7-1) 本論文に関する業績（9 件）

1. “通信装置”, 特開 2011-3989.
2. “通信装置”, 特開 2010-74752.
3. “通信装置”, 特開 2010-50882.
4. “通信装置”, 特開 2010-41694.
5. “通信端末装置”, 特開 2009-278187.
6. “空間多重伝送復調方法及び空間多重伝送復調装置”, 特開 2008-124818.
7. “受信装置”, 特開 2008-78880.
8. “無線通信装置”, 特開 2007-259178.
9. “受信装置”, 特開 2007-166194.

(7-2) 本論文以外の業績（23 件）

1. “通信環境模擬装置”, 特開 2011-4237.
2. “通信端末装置”, 特開 2009-130542.
3. “通信端末装置”, 特開 2009-124426.
4. “通信端末装置”, 特開 2009-118153.
5. “通信端末装置”, 特開 2008-244519.
6. “通信端末装置”, 特開 2008-236237.
7. “通信装置”, 特開 2008-227962.
8. “通信端末装置”, 特開 2008-205889.

9. “通信端末装置”, 特開 2008-187463.
10. “路車間通信装置及び路車間通信方法”, 特開 2008-99070.
11. “路車間通信方法及び路車間通信装置”, 特開 2008-85494.
12. “ダイバーシチ受信装置”, 特開 2007-243853.
13. “通信方式”, 特開 2007-158897.
14. “ダイバーシチ受信方式”, 特開 2007-96454.
15. “ダイバーシチ受信装置”, 特開 2006-287899.
16. “ダイバーシチ受信方法及びダイバーシチ受信装置”, 特開 2006-261815.
17. “ダイバーシチ受信方法及びダイバーシチ受信装置”, 特開 2006-261814.
18. “移動体における受信方法及び受信装置”, 特開 2006-261813.
19. “ダイバーシチ受信装置”, 特開 2006-253866.
20. “通信制御装置”, 特開 2005-252533.
21. “移動体内情報処理装置”, 特開 2004-120221.
22. “車載用データベースの情報転送方法、車載用ネットワークシステム、及びプログラム”, 特開 2004-56171.
23. “スケジュール提供方法およびスケジュール提供装置”, 特開 2003-214890.

付録 A

高速走行時における地上デジタル放送移動受信の品質測定

A.1 まえがき

将来のインフラ協調車車間通信システムでは、地上デジタル放送などの放送メディアとの連携により、高度な情報サービスを目指すことも考えられる。特に、地上デジタル放送のデータ放送に含まれる情報とリンクした別の情報を車車間通信システムを用いて取得するという形態である。その際、地上デジタル放送の高品質な移動受信技術が重要となる。

このように、地上デジタル放送を自動車で移動受信することは、リアシートエンターテイメントとして、キーマディアになるだけでなく、将来の高度な情報サービスを提供する上で大きく期待されている。

移動受信では、移動方向と送信局との位置関係により電波の到来方向が時々刻々と変化する。また、市街地などでは、マルチパスが多く存在するため、所望波の到来方向にアンテナ指向性を制御し、所望波に対して最大の感度で受信する指向性制御方式を開発し、60km/h 以下においては、その有効性を確認してきた [140], [141]。

しかし、さらに高速走行中（例えば、100km/h 程度）の受信品質に関して、実験的検証が報告されていない。高速走行中は、伝搬特性の激しい変動と走行速度に応じたドップラーシフトの影響を受け、受信信号の周波数が変化する。複数のアンテナで構成される指向性制御方式では、各アンテナが周波数の異なる信号、つまりドップラーシフト量の異なる信号を同時に受信すると、周波数差に応じた振幅変動が発生し、受信特性に悪影響を及ぼす。ドップラーシフトの影響は、車速に比例して増大するため、特に高速走行時における特性劣化対策を検討することが必須となる。

そこで、指向性制御システムの持つドップラーシフト補償の基本特性を実験により明らかにし、フィールド実験において、100km/h 程度で走行した場合の地上デジタル放送の受信品質を評価する。

以下では、A.2 節で、指向性制御システムの基本構成を説明し、A.3 節において、ドップラーシフト補償特性の実験的評価を行う。そして、A.4 節ではフィールド走行実験の結果を示す。

A.2 帯域分割指向性制御システム

地上デジタル放送を移動受信する際、アンテナ高が1～2m と低いことによる SNR 劣化やマルチパス歪みが、受信性能を低下させる大きな要因である。

帯域分割指向性制御方式の基本構成を図 A.1 に示す。これは、空間的に配置された複数のアンテナで受信した信号をそれぞれ三つに帯域分割処理し、最大比合成 (MRC) することにより、等価的にアンテナ全体の指向性特性を制御する。帯域分割処理により、分割した帯域毎に位相制御を最適化し、分割処理なしの場合と比べて、受信品質が改善されることを確認している [141]。

A.3 ドップラーシフト補償特性の評価

ドップラーシフト量の異なる複数の信号を受信した場合、指向性制御の相関演算で算出される重み係数をその周波数誤差だけ回転させれば、原理的に両者の周波数差は補正可能であり、ドップラーシフトが補償できる。

そこで、指向性アンテナを用いた場合に、ドップラーシフト補償の基本特性を実験的に明らかにする。

A.3.1 実験システム構成

指向性制御方式における素子間のドップラーシフト補償特性を調査するために、図 A.2 に示す実験系を構築した。なお、周波数選択性フェージングや遅延波などによる受信特性劣化と切

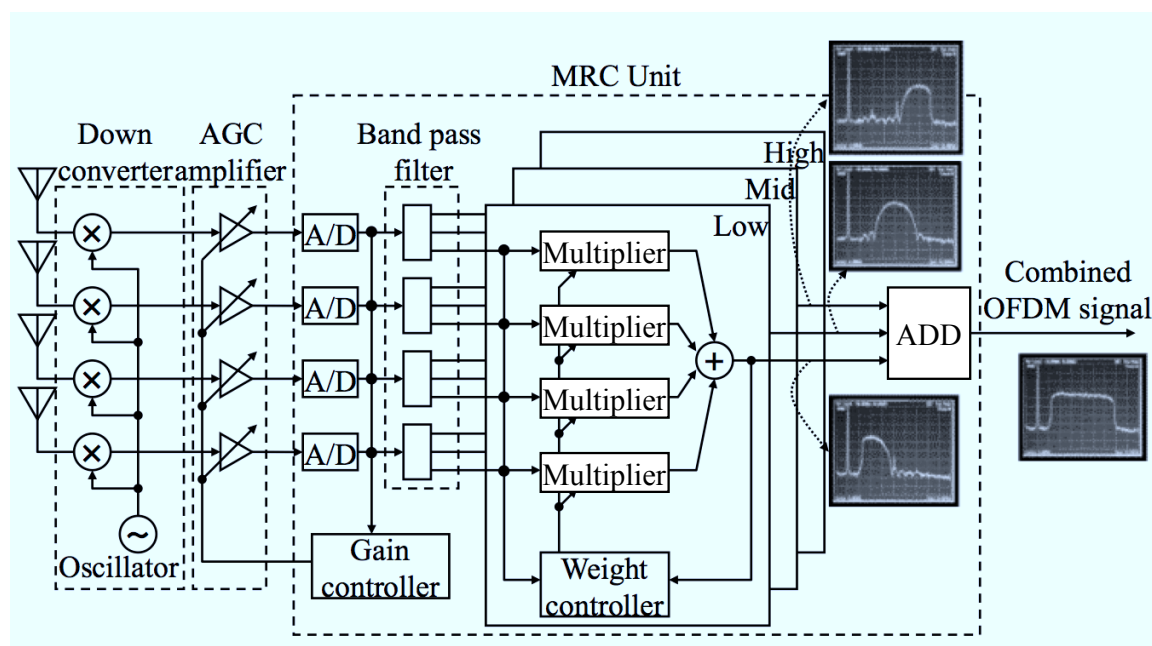


図 A.1 帯域分割指向性制御システム

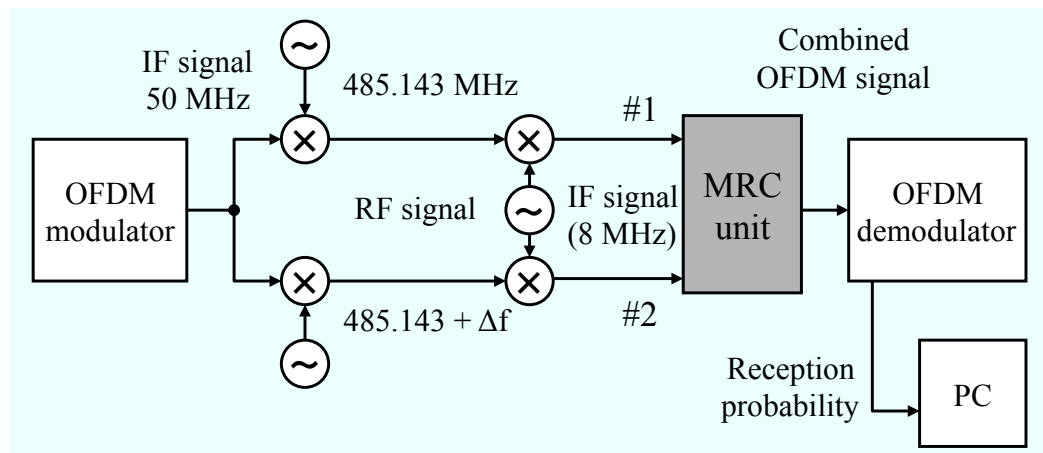


図 A.2 ドップラースhift補償特性評価のシステム構成

り離し、ドップラースhift量の異なる信号を受信することのみに着目するため、このような基礎的な実験構成としている。

本実験系では、まず 50MHz の OFDM 変調信号を UHF (Ultra High Frequency) の 15ch (485.143MHz) の無線周波数 (RF: Radio Frequency) 信号に変換する。この際、素子 1 (#1) の信号は、中心周波数が 485.143MHz に、一方、素子 2 (#2) の信号は $(485.143 + \Delta f)$ MHz となるように、それぞれ異なるローカル信号で周波数変換し、素子間で周波数ずれを発生させている。その後、2 素子間の周波数ずれを保ったまま、約 8MHz の中間周波数 (IF: Intermediate Frequency) 信号を生成し、指向性制御装置に入力した。ただし、周波数変換後の 2 素子の信号レベルは同一とした。

基本特性を評価するため、素子間の周波数ずれ Δf に対する受信状況、および指向性制御で算出される重み係数振幅比を調査した。ここで、重み係数は、合成信号と各素子の入力信号との間で相関演算を実施し、平均化係数 α を乗じた結果を、過去の重み係数値に加算して得られる複素係数である。したがって、その位相は合成信号に対する入力信号の位相差を、その振幅は合成信号に対する入力信号の相関の強さを表す。

A.3.2 評価結果

図 A.3 は、各周波数ずれ Δf について、素子 2 に対する素子 1 の重み係数振幅比をプロットしたものである。また、相関演算周期は $128\mu s$ であり、○は指向性制御の平均化係数 $\alpha = 0.1$ 、□は $\alpha = 0.5$ 、そして△は $\alpha = 1.0$ の場合の結果を示す。

図 A.3 において、重み係数の振幅比 0.9 を境にして、重み係数の振幅比が急激に変化しているのがわかる。これは、重み係数の位相回転が素子間の周波数ずれ Δf に追従できていないことを示している。実際、受信状況を調査した結果、振幅比 0.9 より小さくなると映像・音声出力が劣化していた。

また、 α の値が大きくなるほど Δf に対する特性が良くなっているのがわかる。これは、 α の値が大きくなると、重み係数に瞬時の相関結果値が反映される割合が大きくなり、指向性を速く制御することができるため、高速移動時には、追従性を高めた方が良い特性となると考えら

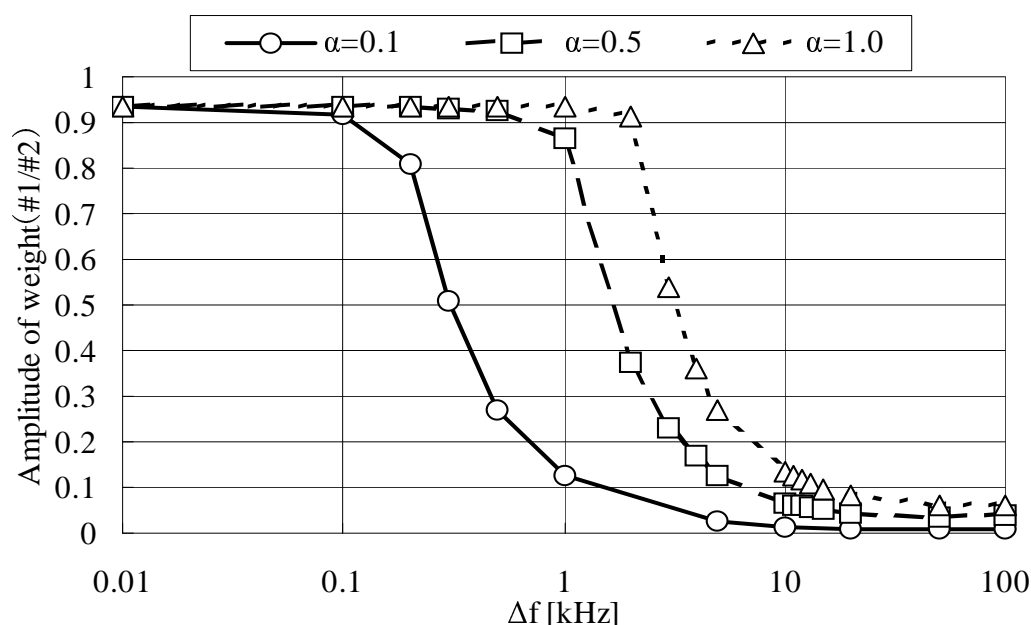


図 A.3 素子 2 に対する素子 1 の重み係数振幅比

れる。しかし、一般には α の値を大きくすると、ノイズの影響を受けやすくなる欠点があり、追従性とノイズ耐性とはトレードオフの関係となる。

さらに、 Δf が大きくなると 2 素子間で相関が取れなくなるため、一方の素子の重み係数振幅が 0 となる。この状況では、映像・音声が正常に再生されるが、合成の効果が少なくなり、実フィールドでは大きく特性劣化が生じる。

ここで、移動速度が 100km/h 程度であれば、ドップラーシフトによる素子間の周波数ずれ Δf は、車両前後から電波が到来する場合においても、UHF 周波数帯においては、高々約 100Hz である。したがって、指向性制御を適用することにより、高速移動時のドップラーシフトによる影響を吸収できると考えられる。

A.4 フィールド実験

高速移動時における地上デジタル放送の受信品質を評価するため、開発した指向性制御システムを用いて、移動受信実験を実施した。

A.4.1 システム構成

実験に使用した走行車両、および車載アンテナの構造を図 A.4 に示す。実験車両は、1box タイプ（エスティマ）であり、地上デジタル放送の受信には、左右リアクォータガラスの対向する 2 辺にアンテナ素子をそれぞれ搭載し（地上高約 1.3m）、合計 4 素子で受信する構成としている [142]。この車載アンテナの特性は、470MHz から 770MHz の周波数範囲において、目標仕様（反射減衰量 -10dB 以下、素子間結合量 -15dB 以下）を達成している。また、受信電界強度を測定するために、図 A.4 に示すクロスダイポールアンテナを搭載した（地上高約 2m）。

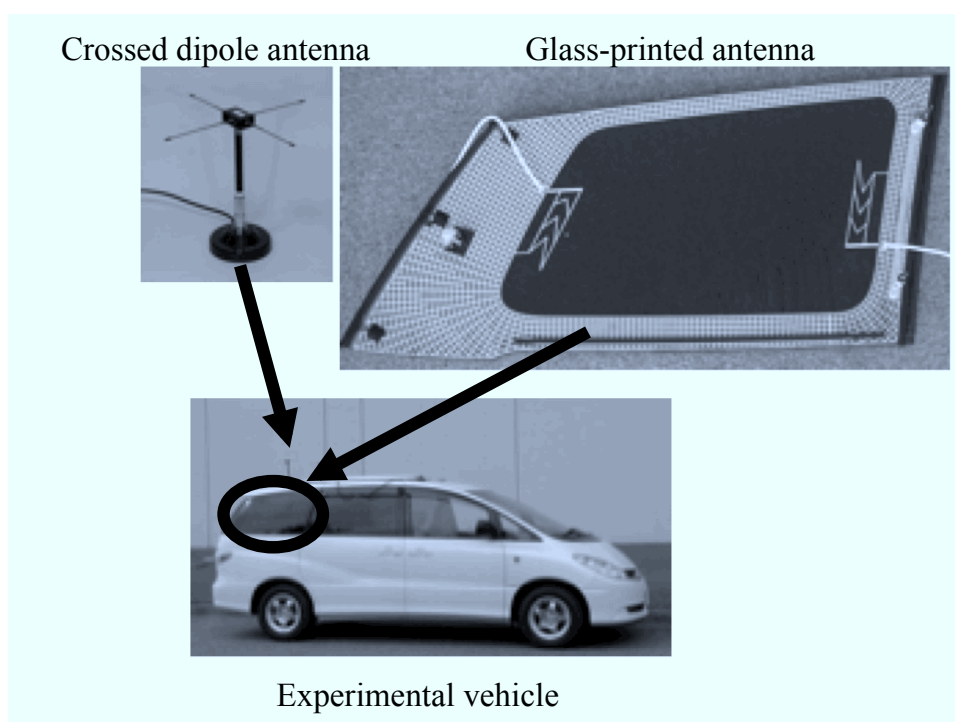


図 A.4 実験車両および受信アンテナ

表 A.1 送出パラメータ

parameters	values
Transmission power	10W
Modulation of sub-carriers	64QAM
Mode	3
Guard interval (GI)	1/8 (126 μ s)
Coding rate (FEC: Forward Error Correction)	3/4
Center frequency	563.15MHz (28ch)

実験は、図 A.5 に示すように、北陸自動車道における富山 IC から走行を開始し、立山 IC までの約 11km 区間を 100km/h 程度で高速走行した。富山市内の呉羽山送信所からの距離は約 7km～15km であり、実験時における電波送出パラメータを表 A.1 に示す。

モード 3 とは搬送波の数：5617 本、シンボル周期：1.008ms で伝送するモードであり、ガードインターバル（GI）は、マルチパスによる遅延時間の広がりに対する耐性を高めるために、シンボル間に挿入されるものである。また、実験では 28ch のハイビジョン放送を受信した。

指向性制御における制御パラメータとして、相関演算周期 128 μ s、平均化係数 $\alpha = 0.5$ を用いた。これらの値は、実際にパラメータ値を幾つか変更して、60km/h～100km/h での予備実験結果から決定されたものである。

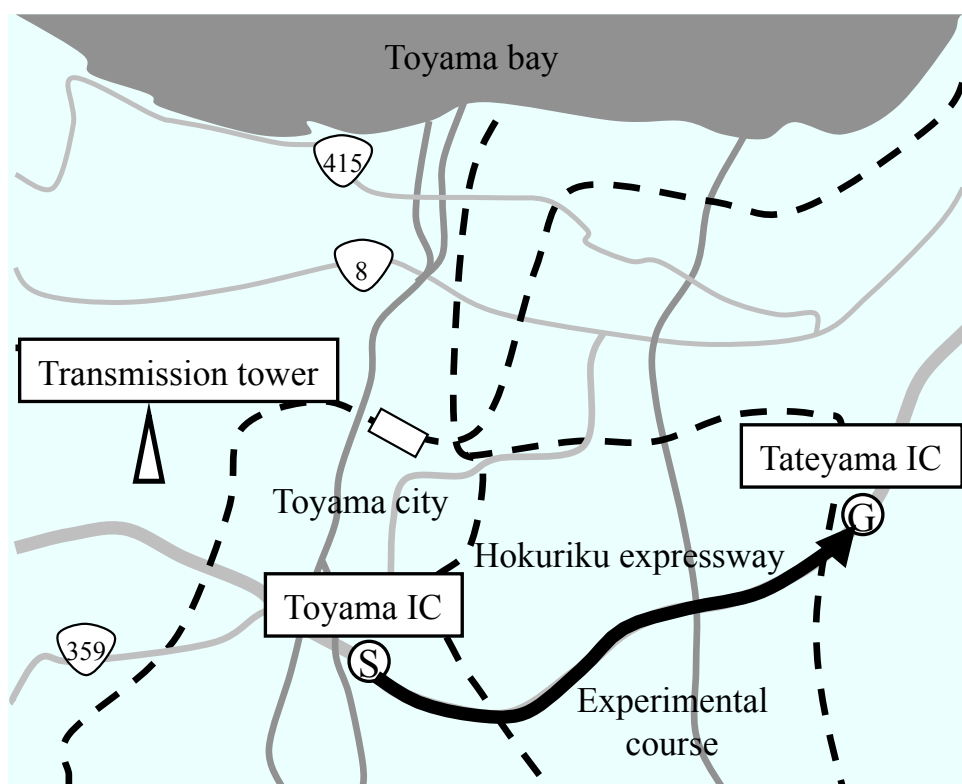


図 A.5 実験コース

A.4.2 実験結果

走行距離 100m 毎にプロットした受信電界強度と受信率を図 A.6 に示す。ここで、受信率は、地上デジタル放送の受信品質を評価するための評価尺度であり、ある走行距離区間に対して、OFDM 復調部において、TS (Transport Stream) パケットのエラー訂正フラグを用いて算出したものである。今回、2m 走行毎にエラー訂正フラグを確認し、走行区間 100m 毎に、すなわち合計 50 ポイントのエラー訂正フラグの割合を 100m の受信率としている。また、100m 区間の受信電界強度は、クロスダイポールアンテナで受信した信号を、走行距離 2m 毎に電界強度測定器で測定した、電界強度瞬時値 50 サンプルの中央値をプロットしたものである。なお、この受信電界強度は、弱電界による受信不良を切り分けるための参考値として測定したものである。

図 A.6 より、走行したほとんどの地点において、100m の区間受信率 99% 以上が得られている。主観評価の結果では、受信率が約 99% 以上であれば、良好な受信映像と認識することを確認している。また、実験コース（走行距離 11km 間）におけるトータルの平均受信率は 99.2% であり、実験コース全体においても良好な受信特性が得られているといえる。

以上より、前節で示したとおり、100km/h 程度の高速走行では、ドップラーシフトによる影響を指向性制御が吸収できているといえる。したがって、約 100km/h で走行しても、安定受信可能なことが確認できた。しかし、受信不良が発生している地点に着目すると、受信電界強度が急激に低下しているときであることが確認できる。このような急激な受信レベル変動への対応として、AGC (Auto Gain Control) の追従性向上などが考えられる。

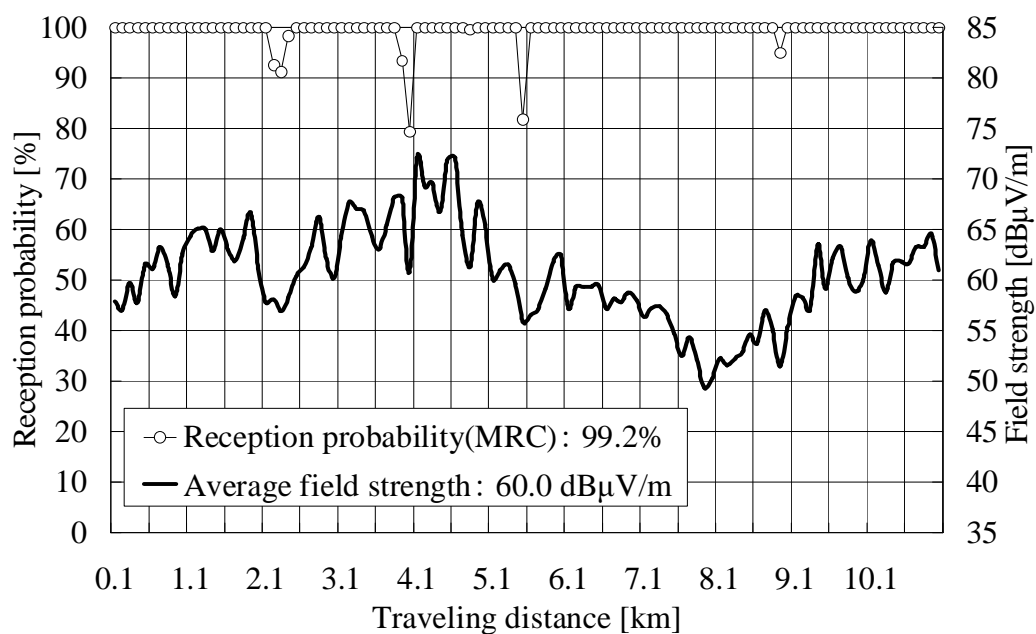


図 A.6 電界強度と受信率

A.5 むすび

帯域分割指向性制御システムを開発し，高速走行時における地上デジタル放送の受信特性を実験により評価した．その結果，指向性制御のドップラーシフト補償特性としては，素子間の周波数ずれが約 100Hz 程度まで吸収可能であり，実際，100km/h 程度での高速走行実験でも，良好な受信特性が得られた．

付録 B

捕捉効果発生時におけるパケット検出エリアの考察

B.1 まえがき

第5章、及び、第6章で示したように、安全運転支援システムを対象とした車車間通信では、周期的に情報を伝えることが重要となる。そして、このようなシステムを成立させるためには、隠れ端末問題への対策は必要不可欠であることを示した。

しかし、無線通信においては、パケット衝突が発生したとしても、捕捉効果（キャプチャ効果）によってパケットを受信できる可能性がある。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。

第6章で取り扱った D-TDMA では、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、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を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、周辺に幾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。

そこで、この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を調査する。以下では、B.2 節でシミュレーションモデルを説明し、B.3 節において、捕捉効果発生時のパケット検出エリアの評価結果を示す。

B.2 シミュレーションモデル

本節では、捕捉効果発生時におけるパケット検出エリアを算出するためのシミュレーション評価モデル、及び、シミュレーション諸元を説明する。

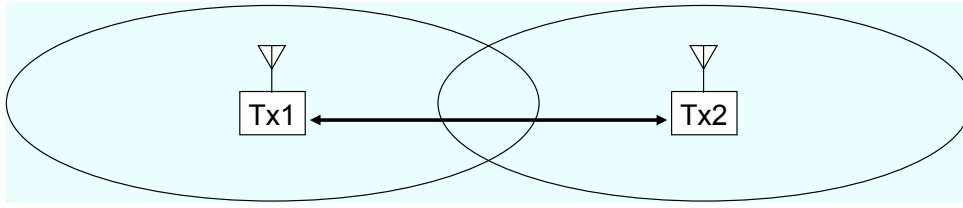


図 B.1 捕捉効果発生時におけるパケット検出エリア算出の評価モデル

B.2.1 評価モデル

試算する評価環境として、図 B.1 に示すように、一直線上に並んだ二つの送信端末 (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、次の三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

なお、二つの端末間の伝搬特性は見通し内環境であると仮定した。

B.2.2 シミュレーション諸元

ここで、試算条件を示す。二つの端末間の伝搬損失モデルは、市坪モデルの見通し内の式を使用する。すなわち、受信電力は、800MHz での電力損失 (L) の近似式である式 (B.1) と式 (B.2) を用いて算出する。

$$L = \begin{cases} 20 \log d + 54.3 - 15.5 \log W & (d < b_p) \\ 20 \log b_p + 43.3 \log \frac{d}{b_p} + 54.3 - 15.5 \log W & (d \geq b_p) \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

$$b_p = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (\text{B.2})$$

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 27m とした。

更に、表 B.1 に示すように、送信電力を 20dBm、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 -77dBm とし、捕捉効果の閾値 (ξ) を 8dB とする。

B.3 シミュレーション結果

図 B.2 から図 B.5 に、二つの送信端末の距離を 500m から 350m まで 50m 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 B.2 より、送受信間の距離が 500m の場合には、各送信端末から 210m 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

表 B.1 シミュレーション諸元

items	values
Radio frequency	800 MHz
Transmission power	20 dBm (100 mW)
Receive threshold (Th_2)	-77.0 dBm
Receive threshold (Th_1)	-85.0 dBm
Capture threshold (ξ)	8 dB
Antenna height	$h_t = h_r = 1.5$ m

離が、210m から 290m のエリア) については、受信レベルが閾値 Th_2 未満となるため、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、500m より離れた場合についても同様となることを確認した。

次に、図 B.3 の送受信間距離が 450m の場合には、Tx1 からの距離が約 180m 以下と約 270m 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 170m から約 210m のエリアと約 240m から約 270m の二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二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 400m, 350m とした場合について、それぞれ、図 B.4 と図 B.5 に示す。パケット衝突を検出できるエリアは、図 B.4 では、Tx1 からの距離が約 160m から約 240m, 図 B.5 については、約 140m から約 210m となっている。

B.4 むすび

車車間通信環境を対象として、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を調査した。その結果、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 B.3 から図 B.5 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考えられる。

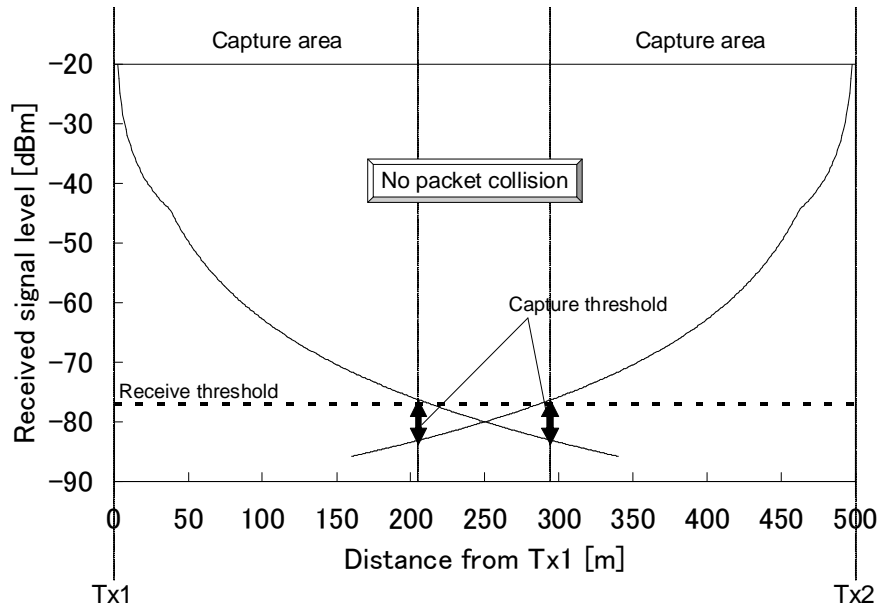


図 B.2 捕捉効果発生および衝突検出エリア（送受信間距離：500m）

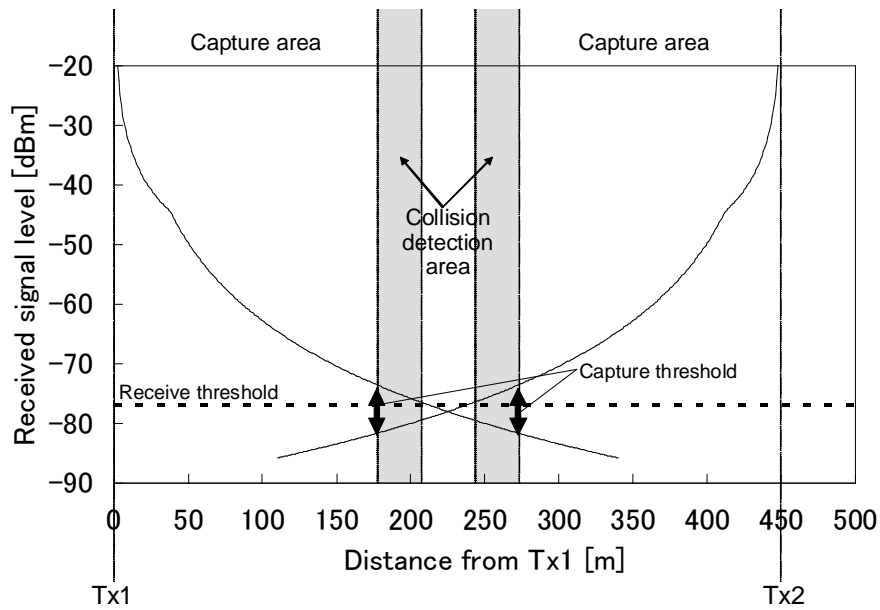


図 B.3 捕捉効果発生および衝突検出エリア（送受信間距離：450m）

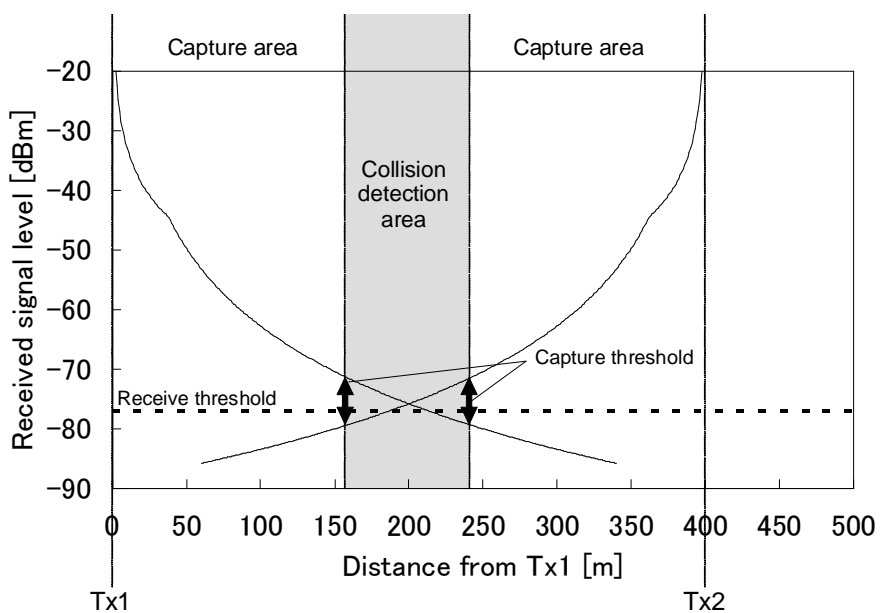


図 B.4 捕捉効果発生および衝突検出エリア（送受信間距離：400m）

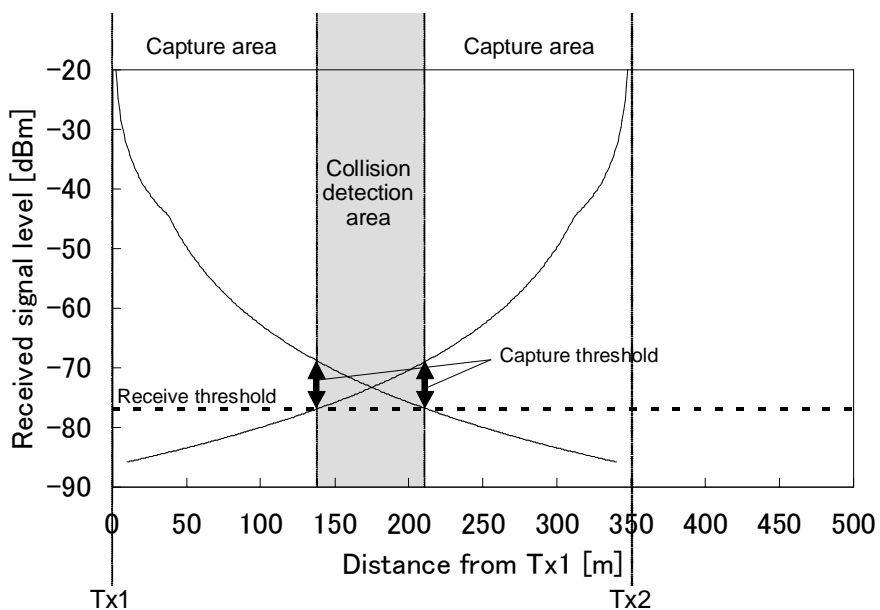


図 B.5 捕捉効果発生および衝突検出エリア（送受信間距離：350m）

付録 C

略語一覧

Acronym	Long form
1PPS	1 Pulse Per Second
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACK	ACKnowledgement
AGC	Auto Gain Cotorol
ARIB	Association of Radio Industries Businesses
ARPANET	Advanced Research Project Agency NETwork
ASV	Advanced Safety Vehicle
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BTMA	Busy Tone Multiple Access
C2C-CC	CAR 2 CAR Communication Consortium
CBQ	Class-Based Queueing
CIR	Carrier-to-Interference Ratio
CQ	Custom Queueing
CR	Communication Result
CSI	Channel State Information
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear-To-Send
CW	Contention Window
DBTMA	Dual Busy Tone Multiple Access
DCF	Distributed Coordination Function
DiffServ	Differentiated Services
DIFS	DCF Inter Frame Space
DRR	Deficit Round-Robin
DSCP	DiffServ CodePoint
DSRC	Dedicated Short Range Communication

Acronym	Long form
DSSS	Driving Safety Support Systems
D-TDMA	Decentralized TDMA
EC	European Commission
ETC	Electronic Toll Collection
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FI	Frame Information
FIFO	First-In First-Out
FP7	7th Framework Programme
FPU	Field Pickup Unit
GI	Guard Interval
GPS	Global Positioning Systems
HDTV	High Definition TeleVision
ICT	Information and Communication Technology
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IF	Intermediate Frequency
IFS	Inter Frame Space
IntServ	Integrated Services
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
ISI	Intersymbol interference
IT	Information Technology
ITS	Intelligent Transport Systems
ITU	International Telecommunication Union Telecommunication Standard- ization Sector
IVC	Inter-Vehicle Communication
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LAN	Local Area Network
LOS	Line-of-Sight
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
MOS	Mean Opinion Score
MRC	Maximum Ratio Combining
MU	Media Unit

Acronym	Long form
NACK	Negative ACK
NAV	Network Allocation Vector
NC	No Control
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
NETSTREAM	NETwork Simulator for TRaffic Efficiency And Mobility
NICT	National Institute of Information and Communications Technology
NLOS	Non-Line-of-Sight
NSF	the National Science Foundation
NSFNET	NSF NETwork
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PB-TRMA	Periodic Broadcast-Timing Reservation Multiple Access
PCF	Point Coordination Function
PHB	Per-Hop Behavior
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PQ	Priority Queueing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RMSE	Root Mean Square Error
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RSVP	Resource ReSerVation Protocol
RTC	Request To Change
RTP	Real-Time Transport Protocol
RTS	Request-To-Send
RVC	Road-to-Vehicle Communication
SIFS	Short Inter Frame Space
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STBC	Space-Time Block Coding
STD	Space-Time Decoding
STE	Space-Time Encoding
STTC	Space Time Trellis Coding
TC	Technical Committee
TDMA	Time Division Multiple Access
ToS	Type of Service

Acronym	Long form
TS	Transport Stream
UDP	User Datagram Protocol
UHF	Ultra High Frequency
US DoD	United States Department of Defense
US DOT	United States Department of Transportation
UTC	Coordinated Universal Time
UTD	Uniform Geometric Theory of Diffraction
UTMS	Universal Traffic Management Society of Japan
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VICS	Vehicle Information and Communication System
VII	Vehicle-Infrastructure Integration
VSC	Vehicle Safety Communications
VTR	Virtual-Time Rendering
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WFQ	Weighted Fair Queueing
WRR	Weighted Round-Robin
WWW	World Wide Web