

車車間通信サービスにおける通信品質の解析 - 通信特性のモデル化 -

今井 悟 史[†] 宇式 一 雅[†]
川崎 健[†] 藤野 信 次[†]

近年、安全運転を支援する車車間通信サービスが注目されている。車車間通信の代表的な通信方式として CSMA/CA がある。この通信品質の評価手法としてはマイクロなシミュレーションとマクロな統計的解析手法が存在する。前者は個々の車両間の品質評価が可能だが、車両数が多くなると膨大な計算時間を要する。一方、後者は個々の車両間の品質評価は困難だが、短時間で計算できるという利点がある。CSMA/CA の解析モデルは古くからあるが、理想的な環境を前提としており、実際の車車間通信の振る舞いとは合致しない。そこで本稿では、従来のモデルを実際の車車間通信に適用する場合の課題と対策について述べ、特定の車両間の通信品質を評価できる解析モデルを提案する。さらに提案方式とネットワークシミュレータ NS-2 による評価結果を比較し、提案方式の妥当性を検証する。

Quality Analysis of Communications in Inter-Vehicle Communication Services - Modeling of Communication Characteristics -

SATOSHI IMAI,[†] KAZUMASA USHIKI,[†] TAKESHI KAWASAKI[†]
and NOBUTSUGU FUJINO[†]

Recently, inter-vehicle communication services which support safe driving have attracted attention. CSMA/CA is a representative communication method in the inter-vehicle communications. There are a micro simulation and a macro statistical analysis method to evaluate the communication quality. The former can evaluate the communication quality between individual vehicles, but requires enormous calculation time when the number of the vehicles increases. On the other hand, the latter is difficult to evaluate the communication quality between individual vehicles, but has an advantage of rapid evaluations. Although there are traditional models for CSMA/CA which are derived in ideal environment, they are not consistent with behaviors in actual inter-vehicle communications. This paper represents the discrepancy between existing theory model and practice, and proposes the statistical model that approximates the communication quality between the specific vehicles. Furthermore, we compare analysis results derived by the proposed method and the network simulator NS-2, and verify the validity of the proposed model.

1. はじめに

P2P (Peer-to-Peer) 無線通信の応用として、ITS (Intelligent Transportation Systems) における車車間通信が注目されている。特に、安全運転支援サービスへの応用に対する期待は高く、ASV 推進検討会 (Advanced Safety Vehicle)¹⁾ や ITS 情報通信システム推進会議²⁾ では、車両間の無線通信により車両位置や速度の情報を相互に交換し、危険車両の警告、注意

喚起を実現することを目指した車車間通信サービスが検討されている。

車車間通信サービスの代表的な通信方式として、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) がある^{3),4)}。このような車車間通信の通信品質を評価する方法としては、ネットワークシミュレータを使用した評価方法がある。しかし、評価すべき車両台数が多くなるほどシミュレーション時間は増大し、1つの車両配置パターンのみを評価するだけでも膨大な時間を要するという問題がある。そこで、車車間通信特性を統計モデルとして扱い、短時間で車車間通信品質を解析・評価することができるシミュレータを構築することを目指す。基本的なアプ

[†] 株式会社富士通研究所 〒211-8588 川崎市中原区上小田中 4-1-1

FUJITSU LABORATORIES LTD. Kamikodanaka 4-1-1, Nakahara-ku, Kawasaki, Japan

ローチとして、”送受信車両に対しキャリアセンスが働く範囲下のCSMA/CA通信特性”と”受信車両の周りで送信車両の信号をキャリアセンスできずにパケットを送出してしまふ隠れ端末車両に起因する通信特性”を独立事象として分けて考え、それぞれの通信特性を統計モデルとして捉える。本稿では、広域に跨る車車間通信システムを総合的に評価するための第一段階として、送信エリア内の通信特性を近似する統計モデルを提案する。

なお、CSMA/CAにおける代表的な統計モデルとして、Kleinrockらが提案しているモデル⁵⁾が広く知られているが、このモデルは、すべての車車間通信に対する干渉影響が均一的な理想環境を想定したもので、現実環境との乖離が存在する。したがって、この乖離要因となる事象を明確化し、それらの問題点を解決することで、実環境に適応した統計モデルを構築することを本稿の主眼としている。

以下、2章では、車車間通信サービスの要件および問題を示し、3章では、提案する統計モデルによる解析方法について説明する。4章で、提案方式の有効性を評価するため、NS-2⁶⁾によるシミュレーションとの比較結果を示し、最後にまとめる。

2. 車車間通信サービス

車車間通信を用いた安全運転支援サービスは、その実現に向け各所で検討されている^{7),8)}。例えば、車両が路地から優先道路へ出る際の出会い頭事故や、交差点での右折時に対向車線から来る直進車両との右直事故などの頻発事故を防ぐことを目的とし、白車両の位置および速度などの情報を近隣車両へ通知することで、危険車両の存在をドライバーへ警告、注意喚起などを実施することを目指している。

2.1 サービス要件

ASV-3⁹⁾では、代表的な事故類型から、i) 見通し通信距離：410m, ii) 見通し200m+ 回折後25m, という通信エリア範囲を規定している。この要件を実現するためには、通信要件として車両の周囲全方向に渡って、この通信エリアをカバーする必要がある。例えば、UHF帯を利用した場合、広域通信が実現しやすくなる一方で、同一エリア内に存在する車両台数も膨大になり、特定の車車間通信に対して同時パケット送信による干渉が発生し易くなる可能性がある。ここで、パケット受信に影響を与える干渉要素としては、上記の”他車両から送出されたパケットの衝突”以外に、”隣接周波数帯を利用する他システムからの電力干渉”等が考えられるが、これらの干渉影響下において、安全運転支援向けの車車間通信サービスを成立させるためには、パケット受信に対して厳しい品質基準が要求され

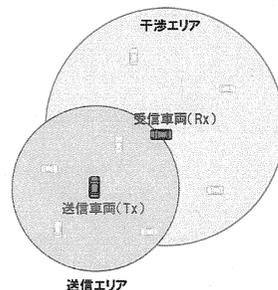


図1 アプローチ

る。一般に、上記の品質要件として、パケット到達率0.8よりも高い値が要求されると考えられる。

2.2 通信品質評価の問題

車車間通信サービスの実現に向け、パケット到達率と通信条件（車両台数、データサイズ、送信周期等）の関係を明確化することは急務である。車車間通信における通信品質を評価する方法としては、マイクロなシミュレーション評価方式とマクロな統計的な解析手法がある。前者は、個々の車両の通信特性を評価できる反面、対象とする車両台数が多くなると、シミュレーション時間が増大し、膨大な計算リソース必要とするという問題がある。実際、前節のサービス要件を想定すると、通信エリアは広域になり、考慮すべき車両台数も膨大になることから、様々な条件を想定した評価を実施することが難しくなる。

本稿では、様々な評価シナリオに対して、短時間で、かつ統計的に通信品質を評価ができる後者の手法を確立することを目指し、パケット到達率と発生するトラフィック量（車両台数）の関係を近似した統計モデルを提案する。

3. 車車間通信特性のモデル化

3.1 アプローチ

図1のように送信(Tx)/受信(Rx)車両の特定リンクに対し、Txの送信パケットが到達する送信エリアと、Txによる送信信号をキャリアセンスできずRxに対して隠れ端末干渉を与える干渉エリアを、それぞれ独立に解析することを考える。このとき、パケット到達率は、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \text{パケット到達率} = & (\text{送信エリア内パケット到達率}) \times \\ & (1 - \text{隠れ端末によるパケット誤り率}) \quad (1) \end{aligned}$$

本稿では、評価の第一段階として送信エリア内のパケット到達率を求める統計モデルを導出する。ここで、Txによる送信パケットのRxでの受信に対し、送信エリア内の車両が干渉を与える状況としては、Tx→

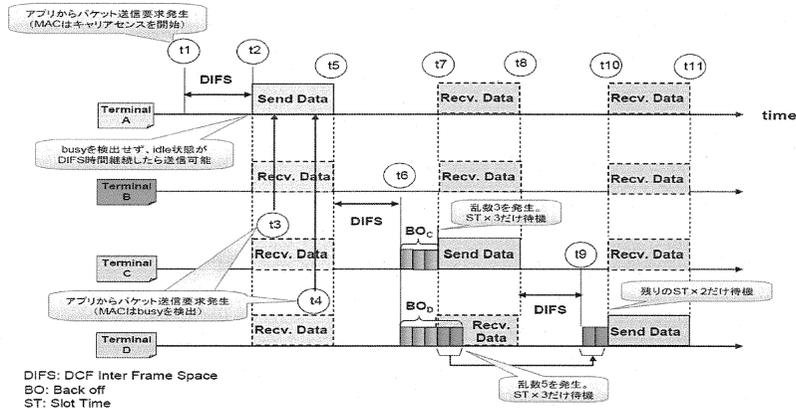


図 2 IEEE 802.11 動作概要

Rx のパケット受信時、同時あるいは伝播遅延時間内にキャリアを検出できずにパケットを送信してしまい、Rx に対してノイズ干渉を与える状況が考えられる。次節以降では、この同時送信に伴う干渉に着目して統計的に解析を行う。

3.2 CSMA/CA モデルと課題

車車間通信では、ACK パケット応答や再送を行わないブロードキャスト型の CSMA/CA 方式の適用が想定される。CSMA/CA を用いた代表的な無線通信規格 IEEE 802.11¹⁰⁾ の動作概要を図 2 に示す。802.11 には、隠れ端末対策として RTS(Request To Send)/CTS(Clear To Send) 交換があるが、本手順はブロードキャスト通信では使用されないことに注意されたい。下記に 802.11 の処理フローを示す。

802.11 処理フロー

- I) 端末が ready 状態になる
- II) キャリアをセンスする
 - (a) idle を検出した場合
 - (i) idle 状態が DIFS (Distributed Coordination Function Inter Frame Space: 分散制御用フレーム間隔) 時間継続したらパケットを送信 → 終了
 - (ii) idle 状態が DIFS 時間継続する前に busy を検出したら III を実行する
 - (b) busy を検出した場合、III を実行する
- III) idle になってから DIFS 時間経過するまで待機し、乱数を発生
 - (a) 確率 p で、パケットを送信 → 終了
 - ※ p は、乱数値=0 になる確率に等しい
 - (b) 確率 $1-p$ で、パケットの送信をランダム時間だけ遅延させる
 - ※ ランダム時間 = 乱数 × スロット時間

IV) キャリアをセンスし、idle 時間 (DIFS 時間を除く) の合計が III で決めたランダム時間に等しくなったらパケットを送信 → 終了

ここで、III におけるランダム時間を決定する乱数は、 $[0, CW]$ 範囲の様な分布から生成されたランダムの整数値に従う。同一優先度のパケット送信が行われるとすると、 $CW=15$ となり、最大 15 スロット時間のランダム時間が設定されることになる。また、IV に示すように、III で設定されたランダム時間期限までパケット送出されない場合は、idle 時間になった時点で必ずパケットが送出される。

これに対し、従来より CSMA/CA の理論解析が行われてきており、802.11 の処理に近い理論モデルとして、idle 時に固定確率 p に従ってデータ送出を決定することを特徴とする p -persistent モデル⁵⁾ がある。 p -persistent モデルの処理フローを以下に示す。

p-persistent モデル処理フロー

- I) 端末が ready 状態になる
- II) キャリアをセンスする
 - (a) idle の場合
 - (i) 確率 p で、パケットを送信 → 終了
 - (ii) 確率 $1-p$ で、固定時間 (スロット時間) だけ待機
 - (iii) キャリアをセンスする
 - * idle の場合 (a) に戻る
 - * busy の場合、ランダム時間だけ待機して II) に戻る
 - (b) busy の場合 idle 状態になるまで待機して II) に戻る

802.11 との大きな違いは、idle 状態になった時点で必ず乱数を発生させてパケット送信を行うか否かの確率判定を行う点にある。802.11 では、送信開始時ラン

ダム時間が $[0,15] \times$ スロットタイムで決定されることに着目すると、 p -persistent モデルに相当する確率 p は、 $1/16$ に近い値をとると考えられる。しかし、idle 状態から busy 状態へ遷移しパケット送出に至るまでの過程が、 p -persistent モデルでは、前の状態に依存しない無記憶性の幾何分布に従うのに対し、802.11 の場合、ランダム時間に対する経過状態が記憶され、時間経過の上限に達した時点でパケットが送出される。この送出過程の相違を考慮すると、 $1/16 \leq p < 1$ とする。

本稿では、前記想定での 802.11 の通信特性を p -persistent モデルで近似する方式を提案する。 p -persistent モデルは、エリア内の発生トラフィック量を正規化したパラメータ G と各車両間の平均伝播遅延時間 a を入力として与えるだけで、平均パケット到達率を容易に計算することが可能となる。(詳細は付録 A.1)

$$\text{平均パケット到達率} = f_p(G, a) \quad (2)$$

しかし、前記パケット送出過程の相違以前に、 p -persistent モデルの導出前提が現実の通信環境と乖離しており、適切な正規化パラメータ G を算出するためには、以下の課題が伴う。

課題 1 不均一な干渉の考慮

課題 2 通信オーバーヘッドの考慮

課題 3 キャリアセンスした結果、再スケジュールされるパケット生起の考慮

課題 4 各車両が同一周期でパケット送信した場合の、 p -persistent モデルで前提とする指数分布特性との適合

以降で、これらの課題に対する解決手段を示す。

3.3 不均一な干渉の考慮

p -persistent モデルでは、エリアに存在する車両間のすべての送受信リンクに対して、同じ干渉影響が存在するという仮定のもと、エリア内の発生トラフィック量に対して正規化したパラメータを (2) 式に与えることで、全送受信リンクの平均パケット到達率を算出する。しかし、実環境を想定すると、個々の送受信リンクに対し干渉を与えるトラフィック量は、送信車両 (Tx) と受信車両 (Rx) の位置関係に応じた CIR (Carrier to Interference Ratio) に依存することから、すべての送受信リンクにおいて干渉影響が同じ条件になる環境は特異なケースといえる。本稿では、特定の送受信リンクのパケット到達率を解析することを目的とし、 p -persistent モデルで利用する干渉トラフィックの解釈を以下のように捉える。図 3 のように、特定 Tx → Rx リンクにおける Rx でのデータ受信電力に対し CIR に基づくエリアを形成し、送信エリアとの重複エリアに存在する車両から発生するトラフィック

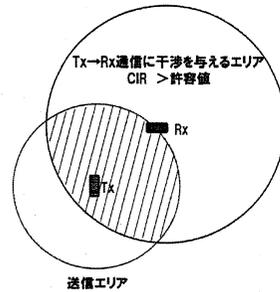


図 3 干渉トラフィックの見積り

を干渉トラフィックと見なす。実際、 p -persistent モデル (付録) における干渉トラフィックの解釈を、特定パケット受信に対して干渉を与えるトラフィックと見なしても導出論理の一般性を失わないことに着目されたい。

干渉トラフィックを見積もる領域を、Rx に対する CIR からパケット衝突時に 100% 受信誤りを与える領域とする。実際には、CIR に応じて衝突時に 100% 未満の受信誤りを与える領域が送信エリア内に存在するが、この領域面積が 100% 受信誤りを与える領域に比べ小さいこと、さらに送信エリア内の同時送出確率自体が小さいことを想定すると、該当領域の影響は殆どないと考えられる。この領域の定量的な干渉解析については、今後の課題とする。

さらに、干渉トラフィック E は、送受信車両の 2 台を除いた重複エリアに存在する車両台数 N (台) と個々の車両 i がパケットを送出する間隔 T_i (sec) を用いて以下のように求められる。

$$E = \sum_i^N \frac{1}{T_i} \quad (3)$$

3.4 通信オーバーヘッドの考慮

p -persistent モデルでは、802.11 のパケット送出過程に存在する DIFS 区間やプリアンプルの通信オーバーヘッドを考慮していない。そこで、すべての車両におけるデータ送信がキャリアセンスに基づいて同期していることを想定すると、1. プリアンプル受信, 2. データ受信, 3. DIFS 期間待機後データ送信までにランダム時間待つ、という処理シーケンスとなり、 p -persistent モデルの単位時間であるデータ送信期間 T_p は、下記のように見なすことができる。

$$T_p = \text{プリアンプル時間} + \text{データ送信時間} + \text{DIFS} \quad (4)$$

ここで、入力パラメータ G は、干渉トラフィックに対して 1 データ送信時間 T_p 内に発生し得る量として正規化した値であり、(3) 式の値を用いて

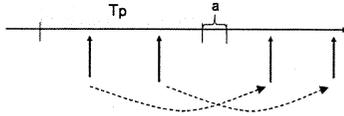


図4 再スケジューリングトラフィックの見積り

$$G = \sum_i^N \frac{1}{T_i} \times T_p = E * T_p \quad (5)$$

と表すことができる。

3.5 再スケジューリングの考慮

p-persistent モデルにおける入力パラメータ G を導出するためには、キャリアセンスし再スケジューリングされて送出されるパケット生起も考慮する必要がある。ここで、(5) 式の G を、再スケジューリング分のトラフィック量を含めて再定義する。

個々のパケット送信間隔が指数分布に従うとすると、 T_p 区間での送信要求パケット数 G に対して、

$$G(1 - e^{-(1+a)G}) = G_{re\{1\}} \quad (6)$$

分が再スケジューリングされる (図4)。さらに、再スケジューリングされたトラフィック量 $G_{re\{1\}}$ に対しても同様に $G_{re\{1\}} * (1 - e^{-(1+a)G_{re\{1\}}})$ で再々スケジューリングされるということを考えると、すべての再スケジューリングトラフィックを加算した入力パラメータ \bar{G} は、

$$\bar{G} = G + \sum_{i=1}^{\infty} G_{re\{i\}} (1 - e^{-(1+a)G_{re\{i\}}}) \quad (7)$$

で表される。ただし、

$$\begin{aligned} G_{re\{i\}} &= G_{re\{i-1\}} (1 - e^{-(1+a)G_{re\{i-1\}}}) \\ G_{re\{0\}} &= G \end{aligned}$$

とする。

3.6 トラフィック周期性の考慮

車車間通信サービスにおける個々の車両のパケット送信は、一般に周期性を伴う。代表的な送信周期は 100ms と考えられている⁹⁾ が、すべての車両において同一周期でパケット送信を行う場合を想定すると、総トラフィックの振る舞いも同一の周期性を持つ。これは、p-persistent モデルで想定しているトラフィックの指数分布特性と乖離する。

ここで、すべての車両が送信周期 β でパケット送出する場合のパケット生起過程を指数分布で近似する手段を示す。パケット生起を指数分布に従うものとする、 β 内に再スケジューリングされて発生する分を含めた総発生パケット数が M 個のとき、微小時間 Δ で平均 $M\Delta$ 個のパケットが定常的に発生する。しかし、送信周期性を前提とすると、 β 内に一度パケットを送信し

Δ 内に発生し得るパケット数

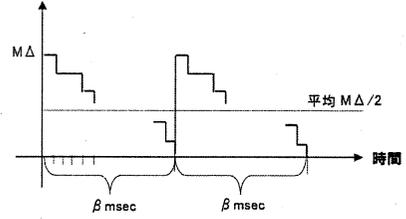


図5 指数分布による近似

た車両は、次の β までパケットを送出しなため、指数分布における定常性の仮定が崩れる。指数分布を前提とすると、特定時間区間に生起するパケット数は、確率的に ∞ 個までを想定しているのに対し、上記の場合 β 間に M 個という上限制約が存在してしまう。つまり、平均レート M (個/ β) の指数分布を仮定したときの、 β 内に発生する平均パケット数は、本来

$$\sum_{k=1}^{\infty} k \times \frac{M^k}{k!} e^{-M} = M \quad (8)$$

となるのに対し、上限制約を前提とすると、

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^M k \times \frac{M^k}{k!} e^{-M} \\ &= M \times \sum_{k=1}^M \frac{M^{k-1}}{(k-1)!} e^{-M} \approx \frac{M}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

このような周期性を持つ上限制約のある確率事象を、指数分布における定常性の仮定に適合するように近似するためには、図5に示すような M (個/ β) の周期制約を持つパケット生起に対し、微小時間 Δ で生起する平均パケット数を $M\Delta/2$ とし、その定常性を仮定すればよい。したがって、各車両が同じ周期でパケット送信する、さらには、再スケジューリングされ送信周期以上遅延してパケット送信されることは無いという前提のもとで、p-persistent モデルへの入力パラメータは、 $\bar{G}/2$ となる。

前節までの全ての手段を適用したときの p-persistent モデルにより解析した平均パケット到達率は、(7) 式を用いて以下のように表すことができる。

$$\text{平均パケット到達率} = f_p(\bar{G}/2, a) \quad (10)$$

4. 評価

特定の車両配置シナリオにおいて、提案する入力パラメータを p-persistent モデルに適用して推定した平均パケット到達率と、同様の環境で、NS-2 により計測した平均パケット到達率を比較する。ここで、NS-2

表 1 NS-2 設定パラメータ

ペイロード長	100byte
MAC ヘッド+FCS	28byte
変調方式	16QAM(符号化率 1/2)
送信周期	100ms
CW(コンテンツンウィンドウ)	15
DIFS 時間	64 μ s
電波伝播モデル	Walfisch-池上モデル ¹¹⁾
100%PER を与える CIR	12dB
平均伝播遅延時間	300~500ns
シンボル区間	8 μ s

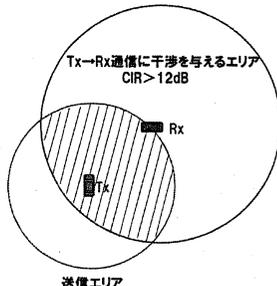


図 6 評価シナリオ

におけるシミュレーション条件を表 1 に示す。

4.1 評価シナリオ

図 6 に示すように、送信車両に対して半径が最低着信レベルの円型エリアのエッジ端に受信車両が存在するシナリオを想定する。送信車両を中心とした円型エリア(半径:最低着信レベル)と、Tx から送出されたパケットの Rx での受信電力量に対して所要 CIR(12dB)を確保できず 100% の干渉影響を与える Rx を中心とした円型エリアで、重複する領域内に車両を配置し、車両台数を増加させたとき、Tx → Rx のパケットが Rx において正常に取得できる確率を評価する。

特定車両以外の車両配置に関しては、重複エリア内にランダムに配置するものとし、各車両の送信開始時間は指数分布に従うように設定した。さらに、シミュレーションは、送信開始の初期条件で周期解に陥ることを避けるため、初期条件を変えてシミュレーション試行を 50 回実施し、その結果の平均パケット到達率を計算した。

4.2 評価結果

評価シナリオに対し、NS-2 シミュレーションによって計測した Rx での平均パケット到達率と、提案方式に従って p-persistent モデル ($p = 1/16, 1/8, 1/5, 1$: $p=1$ は one-persistent モデル) により算出した Rx での平均パケット到達率を図 7 に示す。ここで、100ms 周期で各車両がパケット送出したときの、システムとしての容量限界は、すべての時間でパケット送信が行

われている状態であり、そのときの車両台数限界は以下となる。

$$0.1/T_p = 520(\text{台}) \quad (11)$$

ただし、(4) 式に示す T_p は、標準化作業中の IEEE 802.11p^{12),13)} の仕様を例に、プリアンブル時間を 40 μ s、DIFS 時間が 64 μ s とし、 $T_p = \text{DIFS}(64\mu\text{s}) + \text{プリアンブル}(40\mu\text{s}) + \text{データ送信時間}(88\mu\text{s}) = 192\mu\text{s}$ と設定した。

評価結果より、システム容量限界にある車両台数 500 台以下においては、統計モデルより得られた結果が、NS-2 の計測結果の 95% 信頼区間内で近い値を示していることが確認できる。特に、パケット到達率要件 0.8 以上である 400 台以下に対しては、 $p = 1/16 \sim 1/5$ の p-persistent モデルによって $\pm 2\%$ 程度の誤差範囲で近似できている。一方、500 台以上の特性は、NS-2 の結果と統計モデルの結果に乖離が見られる。802.11 では、ランダム時間経過後に強制的にパケット送出してしまうのに対し、p-persistent モデルは時間切れの概念が無く、確率的には ∞ 時間送信待ちするケースも包含している。したがって、高負荷時に、この差異の影響が顕在化してくるものと考えられる。

したがって、提案モデルは、システム容量限界以下における品質解析に有効となる。サービスの成立性の評価を目的とした場合、通信サービスとして機能しないシステム容量限界以上の領域での品質解析の必要性は高くないと考えられる。

シミュレーション時間は、NS-2 の場合、1 つの車両配置条件で数秒分のシナリオを 1 回実行するのに 1000 秒以上かかる場合があり、結果として合計で数時間要したのに対し、本解析手法を用いた場合、数秒で実行できた。したがって、様々なシナリオの評価が短時間で実施可能になる。

5. ま と め

車車間通信サービスの通信品質を評価することを目的とし、p-persistent モデルをベースに特定 Tx/Rx における通信品質(パケット到達率)を評価する方法を提案した。さらに、同じ車両台数下で、提案方式を用いて特定 Tx/Rx のパケット到達率を解析した結果と、NS-2 シミュレーションにより特定 Tx/Rx のパケット到達率を計測した結果を比較し、システム限界以下での妥当性を確認した。また、計算時間の観点からも、NS-2 によるシミュレーション評価方式と比較し、提案方式が極めて短時間で評価できることを確認した。

今回は、Tx に対する送信エリア内の通信特性の解析方法を提案し、その有効性を確認したが、送信エリア内で 100% 未満の受信誤り率を与える干渉影響の評

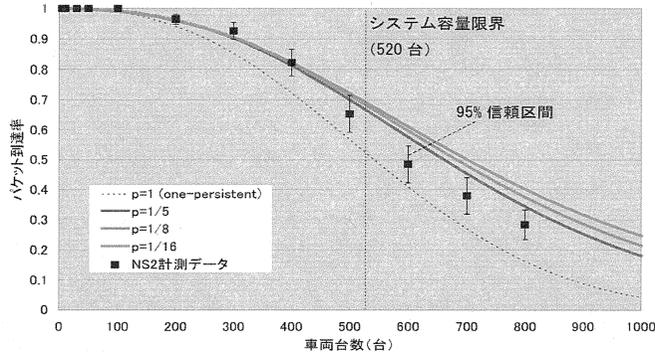


図7 評価結果

価については、今後の課題とする。さらに、送信エリア内の通信品質に比べ、隠れ端末車両からの干渉影響は大きくなることが懸念されることから、干渉エリアの評価方法についても今後検討していきたい。

参考文献

- 1) ASV, "http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzhen/01asv/index.html".
- 2) ITS 情報通信システム推進会議, "http://www.itsforum.gr.jp/".
- 3) 金光, "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.
- 4) "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.
- 5) L. Kleinrock and F. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I: Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics", IEEE Transactions on Communications, Vol. Com-23, No. 12, December 1975.
- 6) The network simulator-ns-2, "http://www.isi.edu/nsnam/ns/".
- 7) 藤村, 長谷川 "車両の安全のためのコンテンション型 MAC を用いた車車間通信・路車間通信の性能評価", 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J90-A No.6 pp.535-550, June 2007.
- 8) 村松, 田所, 牧戸, 鈴木, "車々間通信環境における隠れ端末問題発生エリアの評価", 電子情報通信学会総大会講演論文集, B-1-1, March, 2007.
- 9) 国土交通省自動車交通局 先進安全自動車推進検討会, "先進安全自動車 (ASV) 推進計画 報告書", March, 2006.
- 10) IEEE Std 802.11-2007, June, 2007.
- 11) "Urban transmission loss models for mobile

radio in the 900- and 1800-MHz bands," Tech. Rep. COST 231 TD(90) 119 Rev. 2, COST 231, 1990.

12) IEEE P802.11/D4.0, March 2008.

13) IEEE P802.11/D0.26, January 2006.

付 録

A.1 p-persistent モデルにおけるパケット到達率

p-persistent モデルを用いてパケット到達率を導出する関数 $f_p(G, a)$ は、以下で与えられる。

$$f_p(G, a) = \frac{P_a}{T_n} \quad (12)$$

ただし、 P_a は、特定パケットの平均送信成功確率で、

$$P_a = \pi_0 P'_s + (1 - \pi_0) P_s. \quad (13)$$

T_n は、特定区間の平均パケット生起数で、

$$T_n = G \left\{ \pi_0 \left[a \bar{l}' + 1 + a + \frac{a}{1 - e^{-aG}} \right] + (1 - \pi_0) [a \bar{l} + 1 + a] \right\} \quad (14)$$

となる。各パラメータは以下の意味を持つ。

P'_s : Busy Period の最初の TP (Transmission Period) において、送信が成功する確率

P_s : Busy Period の 2 回目以降の TP において送信が成功する確率

\bar{l}' : 平均 First Initial Random Transmission Delay: [a で正規化]

\bar{l} : 平均 IRTD (Initial Random Transmission Delay): [a で正規化]

π_n : TP(a+1) 中に n 個のパケットが到着する確率: [データ転送時間が単位 1]

各パラメータの算出方法については参考文献⁵⁾を参照されたい。以下に p-persistent モデルの導出概要を説明する。図 8 に示すように、対象パケットが実際に転

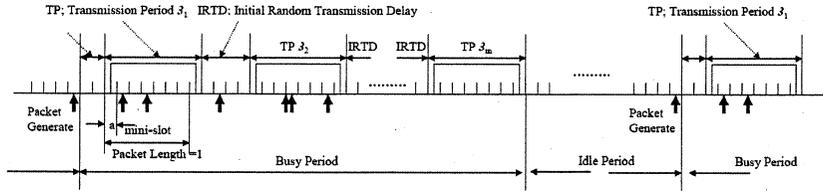
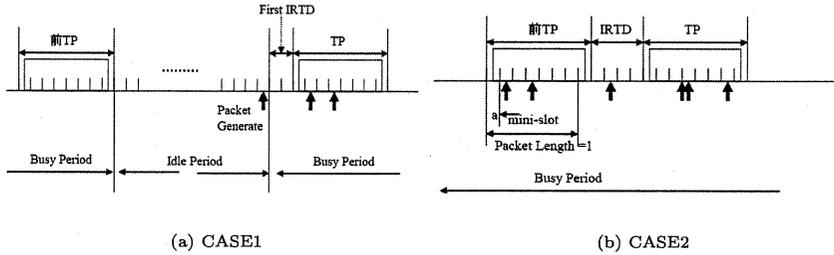


図 8 p-persistent におけるパケット転送過程



(a) CASE1

(b) CASE2

図 9 CASE1/CASE2

送されている期間 (TP) とその前に生起するパケット転送期間 (前 TP) のパケット生起関係に基づいて導出される。モデル導出の論理は、対象パケットにおける TP に対し直前の伝播遅延時間 a において、

- 1つのみパケット転送が行われたとき、対象パケットの送信が成功する。
- 2つ以上のパケット転送が行われたとき、対象パケットの送信が失敗する。

という考えに基づく。また、図中の IRTD は、連続する TP 間において確率 $1-p$ で全車両が送信を控えている時間を表している。

図 8 の状態は以下の 2 つのケースに分けて考えることができる。(図 9)

CASE1 前 TP を最後に Idle 状態に移し、Idle Period 期間を経過後、First IRTD \bar{t} 期間を経過して、対象パケットの転送期間 (TP) に遷移する。

CASE2 Busy 状態において、前 TP から IRTD \bar{t} 期間を経過後、対象パケットの転送期間 (TP) に遷移する。

TP 区間を単位時間 1 としたとき、CASE1 で想定する全体の平均期間は、

$$a\bar{t} + 1 + a + \frac{a}{1 - e^{-aG}} \quad (15)$$

同様に、CASE2 で想定する全体の平均期間は

$$a\bar{t} + 1 + a \quad (16)$$

と表すことができる。CASE1 の事象が生起する確率は、前 TP でパケットが生起しない確率で π_0 、CASE2 の事象が生起する確率は、前 TP で 1 つ以上のパケットが生起する確率で $1 - \pi_0$ となることから、CASE1

と CASE2 における平均期間は、

$$\pi_0 \left\{ a\bar{t} + 1 + a + \frac{a}{1 - e^{-aG}} \right\} + (1 - \pi_0) \{ a\bar{t} + 1 + a \} \quad (17)$$

となる。この平均期間内に発生する平均パケット数は、(17) 式と平均レート G との積となり、(14) 式に示す T_n となる。なお、 $(1/T_n)$ が対象パケットが生起する確率になることに注意されたい。

また、同様に CASE1 を想定したときの、対象パケットの送信成功率が P'_s 、CASE2 を想定したときの対象パケットの送信成功率が P_s となることに着目すると、CASE1 と CASE2 における平均送信成功率は (13) 式となる。