

DSRC を利用した路車間通信における TCP スループットの評価と向上方法の検討

服部 元[†] 小野 智弘[†] 西山 智[‡] 堀内 浩規[†]

株式会社 KDDI 研究所[†]

株式会社 YRP ユビキタス・ネットワーキング研究所[‡]

ITS(Intelligent Transport Systems)における車両と固定網の通信形態(以下、路車間通信と呼ぶ)の1つとして、DSRC (Dedicated Short Range Communications)を利用した通信が検討されており、自動車走行支援の中心的技術となることが期待されている。通信・放送機構 (Telecommunications Advancement Organization of Japan :TAO)は、路車間通信システムのためのスマートゲートウェイ技術の研究開発において、ARIB STD-T75 (Association of Radio Industries and Businesses Standard T75) に準拠する複数のDSRC基地局を道路脇に設置し、高速に移動する車両がそれらと連続して通信を行うシステム実現の検討を行っている。しかしながら、既存のTCP (Transmission Control Protocol) を利用する場合、頻繁に接続・切断を繰り返す路車間の無線通信路に対して、TCP の再送機能が過度に反応し、スループットを低下させることが懸念される。

本稿では、DSRC を利用した路車間通信におけるTCPの振る舞いの検証を行い、TCP通信のスループットについてシミュレーションにより評価した。さらに評価結果を基にTCPスループットの向上方法について検討したので報告する。

Evaluation and Improvement of TCP throughput for vehicle-road communication via DSRC

Gen Hattori[†], Chihiro Ono[†], Satoshi Nishiyama[‡] and Hiroki Horiuchi[†]

KDDI R&D Laboratories Inc.[†]

YRP Ubiquitous Networking Laboratories Inc.[‡]

In ITS (Intelligent Transport Systems), communication systems using DSRC (Dedicated Short Range Communication) are studied as one of the important way of vehicle-road communication. And TAO (Telecommunications Advancement Organization of Japan) are now developing systems where many road-side DSRC base stations based on ARIB STD-T75 (Association of Radio Industries and Businesses Standard T75) are communicating with vehicles moving fast, as a research entitled "Research and Development of Smart Gateway Technology for the future vehicle-road Communication System". However, it is worried that the re-transmission function of TCP (Transmission Control Protocol) might decrease the total system throughput. In this paper, we evaluate the TCP for vehicle-road communication by running simulation, and discuss and propose the method for throughput improvement.

1. はじめに

ITS (Intelligent Transport Systems)における車両と固定網の通信形態(以下、路車間通信と呼ぶ)の1つとして、DSRC (Dedicated Short Range Communications)を利用した通信が検討されており、車両走行支援の中心的技術となることが期待されている。通信・放送機構 (Telecommunications Advancement Organization of Japan :TAO) は、路車間通信システムのためのスマートゲートウェイ技術の研究開発(以下 SG (Smart Gateway)プロジェクトと呼ぶ)において、ARIB STD-T75 (Association of Radio Industries and Businesses Standard T75)[1] に準拠する複数の DSRC 基地局を道路脇に設置し、高速に移動する車両がそれらと連続して通信を行うシステム実現の検討を行っている。このシステムにおいて路車間に確立する無線通信路は、車両の走行に伴い、短い間隔で接続・切断を繰り返す等の特徴を持つ。ここでは、インターネット標準の通信プロトコルである TCP (Transmission Control Protocol) の再送タイムが通信路の切断中にタイムアウトしてしまい、パケット再送が生じることによるスループットの低下が懸念されている[2]。

本稿では、シミュレーションにより、SG プロジェクトが構想する通信システムにおける TCP の振る舞いの検証、および TCP 通信のスループット評価を行う。さらにスループットの向上方法について検討する。

以下、2章では SG プロジェクトのシステム概要について述べ、3章ではシミュレーションの内容と結果を示す。4章では、TCP スループットの向上方法に関する検討を行う。最後に5章で本研究のまとめを述べる。

2. SG プロジェクトのシステム概要

本稿で対象とする SG プロジェクトのシステム構成および DSRC のフレーム構成について以下

に述べる。

2.1. システム構成

SG プロジェクトが構想する路車間通信システムの構成を図 1 に示す。交通情報や運転支援情報等の ITS 関連サービスを提供するサーバ、IP ルーティングを行うルータ網、路車間通信のための DSRC 基地局、ルータ網と DSRC 基地局を接続するゲートウェイ(G/W)、および車両により構成する。車両は走行しながら複数の DSRC 基地局を介してサーバと通信を行う。

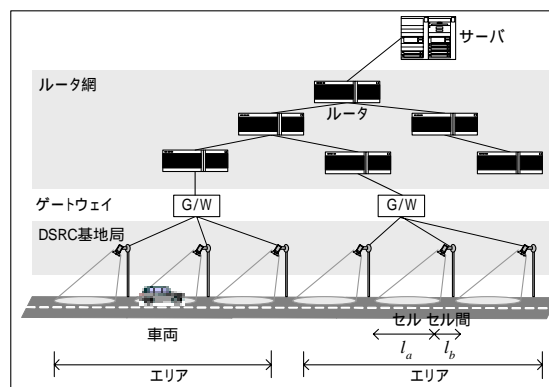


図 1 システム構成

図 1 の各要素について以下に詳細を述べる。

(ア) ルータ網

車両の移動が高速なため、高速にルーティングを切り替える必要がある。そのため、本システムでは、ルータ網は木構造のアーキテクチャとし、車両の移動に伴う IP パケットのルーティング情報の変更が必要となるルータ数を最小限にした[3]。一方、インターネット等の網目状のネットワークでは、一部の IP ルーティング情報の変更は広範囲に広報され、ルーティング情報の収束が遅い。また本システムでは、車両の IP アドレスを固定とし、モバイル IP に見られる IP アドレスの変更を管理するサーバを排除し、高速なルーティングを可能とした。

(イ) ゲートウェイ

連続する基地局をこのゲートウェイ単位のエリアに分割し、車両の近くの基地局に限定したデータのブロードキャストを行う。これによりパケ

ットのロスを低減しながら、車両数に対するシステムのスケラビリティを確保する。

(ウ) DSRC 基地局

DSRC システムは、道路側の固定ネットワークと車両の通信端末を高速の無線回線で結び、マルチアプリケーションに対応可能な短距離・小ゾーンの双方向移動通信である。DSRC システムは 30m の通信可能範囲 (以下、セルと呼ぶ) を持ち、道路沿いに設置する。パケットロスを起こさない連続した通信を実現するため、未送信パケットをバッファし、隣接する基地局に転送する機能を持つ。但し、異なるエリア間ではゲートウェイが異なるため転送しない。ここで、セルの長さを l_a [m]、セル間の長さを l_b [m] とする。

(エ) 車両

通信端末を搭載し、DSRC を介してサーバと通信を行う。

2.2. DSRC のフレーム構成

ARIB STD-T75[1] に基づく DSRC の通信フレーム構成を図 2 に示す。

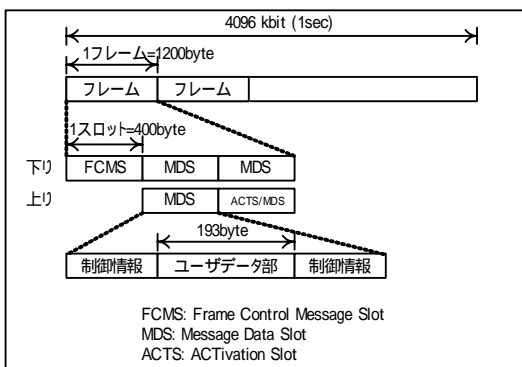


図 2 ARIB STD-T75 に基づく DSRC 通信方式

物理層(5.8GHz 帯, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying))の通信速度は、4096kbps である。ここで運ばれる信号は 1200byte のフレームに分割され、各フレームは信号の同期等を行う FCMS (Frame Control Message Slot、下りのみ)、メッセージ本体を格納する MDS (Message Data Slot)、および個々の車両に関する情報を含む ACTS (Activation Slot、上りのみ)により構成される。1 つの MDS 当たり

ユーザデータ部として 193byte を利用可能である。

1 つの MDS (Message Data Slot) 当たりのユーザデータ部の通信速度 V_u [bps] は、図 2 より 1 フレーム当たり 193byte が利用可能となることから、式 1 より、約 658773 [bps] となる。

$$V_u = 4096000 \times \frac{193}{1200} \cong 658773 \text{ [bps]} \quad \dots \text{式 1}$$

3. TCP のスループット評価

車両が異なるエリア間を走行する場合、パケットロスが起こるため、TCP 等の再送機能を有するプロトコルが必須となる。しかしながら、セルとセルの間の通信ができない区間(以下、セル間と呼ぶ)が頻繁にあるため、再送機能が過度に作用し、スループットの低下を引き起こすことが懸念される。このため、シミュレーションにより TCP の振る舞いの検証、およびスループット評価を行う必要がある。

本稿では、ネットワークシミュレータ OPNET を利用し、シミュレーションにより上記の検証・評価を行う。

3.1. ネットワークのモデル化

TCP の検証および評価を容易にするため、図 1 のネットワークのモデル化を行う。車両内に搭載された通信端末からサーバまでの複雑なネットワークを、単純なネットワークにモデル化する。モデル化したネットワークを図 3 に示す。

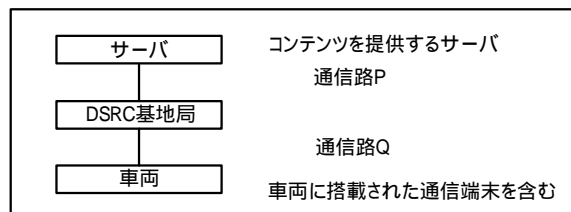


図 3 モデル化したネットワーク

図 3 における通信路 P,Q の詳細を以下に示す。

(1) 通信路 P

ルータのパケット処理遅延等を含む通信路とし、100Mbps 以上の通信速度を想定する。

常時接続した状態である。

(2) 通信路 Q

車両の移動による DSRC 基地局と車両間の通信路の断続、および異なるエリアをまたぐ場合の packet loss を模擬する通信路とする。通信速度 V [bps] は BER (Bit Error Rate) に応じて変動するため、ARIB STD-T75 に基づく 2 ビットエラー訂正機能を有する符号化および DSRC の packet loss 時の再送を加味し、式 2 より求める。

$$V = \{(1 - BER)^{63} + (1 - BER)^{62} \times BER \times 63 + (1 - BER)^{61} \times BER^2 \times 63 \times 62 + 2\}^{31} \times 658773 \text{ [bps]}$$

...式 2

3.2. シミュレーション条件

SG プロジェクトの現行の設計に基づいたシミュレーション条件を示す。

車両の速度、セルの長さ、および DSRC アンテナの設置間隔は一定とする。路車間通信の断続は、スケジュールに従う通信路 Q の断続により模擬する。スケジュールは、車両の速度、基地局配置、およびセルの長さを入力として、通信路 Q の断続時間を算出して生成する。また、エリア間の packet loss においても上記で生成したスケジュール上にフラグを指定して模擬する。基地局に進入した時点で、DSRC 基地局でバッファした packet を破棄するか否かを示すフラグをスケジュール上に設定可能とする。

シミュレーションで設定した他のパラメータを以下に示す。

セルの配置(デフォルト) : $l_a = 30$ [m], $l_b = 20$ [m], 基地局数=10 とする。5 つずつ 2 つのエリアに分割する。

アプリケーション : FTP

コンテンツのファイルサイズ : 1.5Mbyte

TCP 輻輳制御プロトコル[4] : FastRetransmit, FastRecovery, Karn's Algorithm

伝播遅延 : 2.0 msec (通信路 P+Q)

MTU(Maximum Transfer Unit) : 1500 byte(通信路 P), 193byte(通信路 Q)

BER : 0 (通信路 P), 1.0×10^{-5} (通信路 Q)

通信路の帯域 : 100 Mbps(通信路 P)、658.773 kbps(式 2 に を代入して算出, 通信路 Q)

RTO (Retransmit Time Out) : 一般に利用されている Jacobson の RTO 算出式[5] に基づき、以下の手順により算出する。

- (1) あるオクテットに着目し、オクテットを送信してからそのオクテットに対応する ACK が返ってくるまでの時間(Round Trip Time :RTT)を計測する。
- (2) 平均化した RTT(Smoothed RTT :SRTT)を算出する。これは測定した RTT と最新の SRTT の を重みとした加重平均である。
$$SRTT = (1 - \alpha) \times SRTT + \alpha \times RTT$$
- (3) 係数 β を用いて RTT の偏差(D)を算出する。
$$D = D + \beta \times (|RTT - SRTT| - D)$$
- (4) 重み係数 γ を用い、SRTT に基づいて RTO を算出する。上限値(UBOUND=64)および下限値(LBOUND=0.5)により制限する。
$$RTO = \min[UBOUND, \max[LBOUND, (SRTT + \gamma \times D)]]$$
- (5) 初期値 3.0sec、 $\alpha = 0.125$ 、 $\beta = 4.0$ 、 $\gamma = 0.25$ とする。(一般的に利用されている OS 上の設定値)

空走時間 : 各セルに進入した直後の周波数サーチや端末の認証に必要な時間であり、この間にはユーザデータを送受信できない。最初のセルでは 100msec とし、残りのセルでは 50msec とする。

コネクション要求 : 最初のセルに進入した時点から 0sec とする。最初のセルに進入して空走時間(100msec)を経過後さらに 100msec 後に、サーバに対して車両のクライアントから FTP コネクション要求を送信して通信を開始する。

3.3. シミュレーション結果

FTP サーバのデータ送信特性、平均スループット、および RTT(Round Trip Time)について、シミュレーション結果を以下に示す。なお、図中の網掛部は路車間通信が接続中であることを示す。

(ア) FTP サーバのデータ送信特性

頻繁に断続を繰り返す DSRC 無線通信区間に対する TCP の振る舞いを検証するため、走行時間に対する FTP サーバの TCP 送信シーケンス番号をプロットし、再送データ量を除く FTP サーバが送信したデータ量とした。車両の速度を 100km/h とした。走行時間に対する送信データ量を図 4 に示し、16sec 付近の拡大を図 5 に示す。

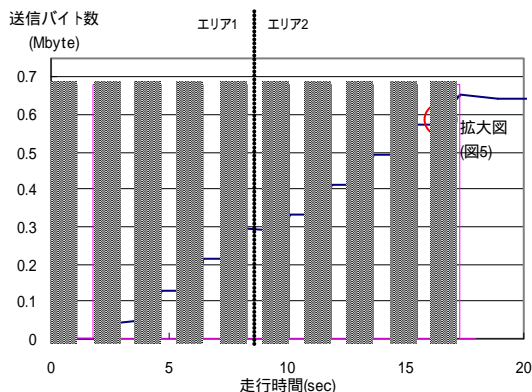


図 4 FTP サーバのデータ送信特性

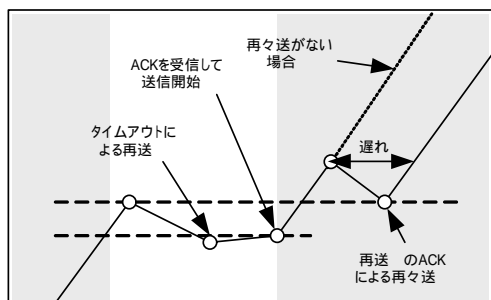


図 5 再送による再々送の発生
(図 4 の 16sec 付近を拡大)

これらの結果から得られた知見は以下の通り。

- (1) 2 番目のセルの途中までデータの送信を行うことができなかった。これは、FTP の要求を出してから、TCP のコネクション確立手順およびサーバ内における TCP のファイル

処理に時間を要しているからである。このように、DSRC セルは小さいため、サーバの応答が遅いとセルが無駄になる。

- (2) エリア 2 へ進入した最初のセルでは、データの送信が遅れた。これは、基地局のバッファに未送信パケットがないため、最初のセルでは車両は ACK を返さず、サーバの再送タイマが切れて再送が起こり、データの送信が再開したと考えられる。しかしながら、もし車両がセル内を走行している間に再送時刻が来なければ、新しいエリアに進入した最初のセルにおいて、データを送信することができない問題が起こる。
- (3) 図 5 において、再送が原因となるデータ送信の遅れが見られる。この原因は以下のように考えられる。

原理的に RTO の値は接続中の RTT の値に徐々に近づくため、本シミュレーションでは RTO が徐々に小さくなる。そのうち RTO 値がセル間の走行時間(0.72[sec])を下回り、タイムアウトによる再送 が起こる。ここで車両がセル内に進入すると、コンテンツサーバは ACK を受信し送信開始 する。しばらくして再送 の ACK を受信するため、再々送 が生じる。このデータの送信は再々送がない場合 よりも遅れ、スループットが低下すると考えられる。

以上の結果より、スループット向上のためには、エリアの分割を最小限にすること、および セル間を走行中にタイムアウトが起こらない程度の大きさに RTO を設定することが挙げられる。

(イ) 平均スループットの測定

サーバからの送信データのバイト数を累積し、通信路 Q が切断中の走行時間を含めた単位時間あたりの送信バイト数を平均スループットとして算出した。セルの間隔 l_b を 20m から 50m の 4 段階に設定し、車両の速度に対する、同一エリア

内における平均スループットを算出した。結果を図 6 に示す。

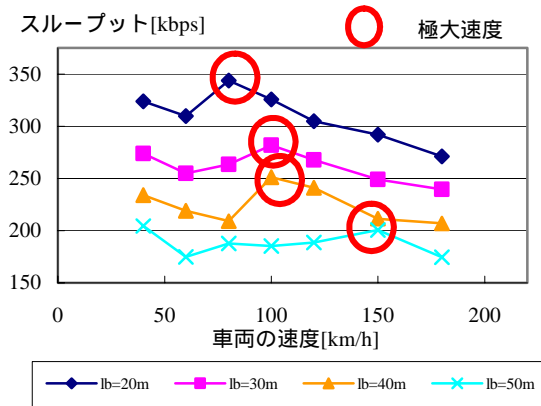


図 6 セル間隔・車速とスループット特性

図 6 の結果より得られた知見は以下の通り。

- (1) 各 l_b においてスループットが極大値となる車両の速度(以下、極大速度と呼ぶ)が存在する。この理由として以下の 2 点が考えられる。極大速度よりも車両の速度を遅くすると、再々送が発生しスループットは小さくなる。さらに速度を遅くしていくと、接続時間に対する再々送にかかる時間の割合が小さくなる。そのため徐々に平均スループットは大きくなる。
極大速度よりも車両の速度が速い領域では、各セルとの接続時間が速度に反比例して小さくなるのに対し、空走時間は一定である。そのため速度が速くなるにつれて、セル内の接続時間に対する空走時間の割合が大きくなることから、通信可能な時間が短くなり、平均スループットは徐々に小さくなる。
以上より、極大速度とは再送タイマ切れが起こらない速度のうち、最も遅い速度であるといえる。車両は、セル間隔に応じた極大速度付近の速度で走行すると高スループットで通信が可能となる。
- (2) セル間隔が短くなると、通信の切断時間も短くなることから、スループットは上がる。しかしながら、本稿では触れていないが、セルが近づくと電波干渉が起こるため、セル間隔

を極端に短くすることはできない。

(ウ) RTT の測定

サーバにおいて測定する RTT の変化をシミュレーションにより測定した。車両は時速 100km で走行する。結果を図 7 に示す。

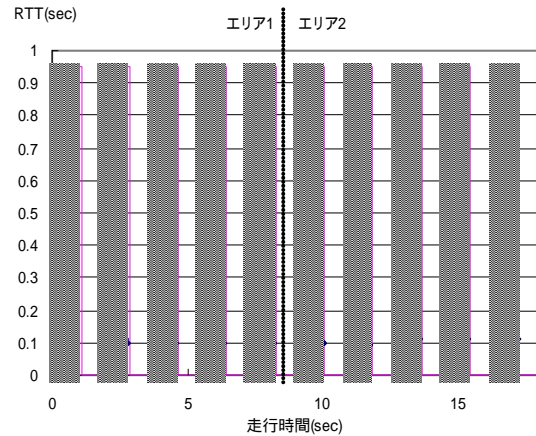


図 7 RTT の測定結果

図 7 の結果から得られた知見は以下の通り。

通信が定常状態になる 3 本目以降のアンテナに入った瞬間の RTT は、セル間を走行するため 1 秒程度と大きな値となる。アンテナ内にいる場合と比較して 10 倍以上の値の差があり、車両がセル内に入ったことをサーバが容易に認識することができるといえる。また、エリアを跨ぐと基地局バッファ内の送信待ちの packets がなくなるため、大きな値の RTT は観測されなかった。

4. TCP スループットの向上方法の検討

3 章のシミュレーション結果より、以下の 2 点を確認した。

- (1) 再送タイマ切れを防止することでスループットの向上が見込めること
- (2) RTT の値を測定することにより、車両がセルに進入したことを、サーバが認識可能であること

以上の 2 点に基づき、再送タイマの制御による方法、およびスロースタートの解除による方法の 2 つの TCP スループットの向上方法について考

察する。ここでは車両の速度、セルの長さ、および DSRC アンテナの設置間隔はほぼ一定と仮定する。

4.1. 再送タイマの制御によるスループットの向上

スループットの低下の原因の一つである図 5 に示した無駄な再送を抑制するため、既存の RTO の代わりに、DSRC を利用した路車間通信を含む通信路に適した RTO 値(以下、D-RTO と呼ぶ)を導入する。算出方法および実現のための要件について以下に考察する。

4.1.1. D-RTO の算出方法

無駄な再送を抑制可能な D-RTO の算出方法について考察する。図 1 のネットワークのトラフィック特性として、図 7 に示すようなセル進入時に大きな値の RTT(以下、接続時 RTT と呼ぶ)が現れることが挙げられる。RTT の値そのものを基にして算出する Jacobson[5] 等の方式とは異なり、D-RTO は接続時 RTT が発生した時刻を基に算出する。セル外に出ると ACK が返らないため、ある待ち時間、あるいは過去のセルにおいて測定した接続時間の統計値から算出した閾値を超えた時点で、セル外に出たと認識する。

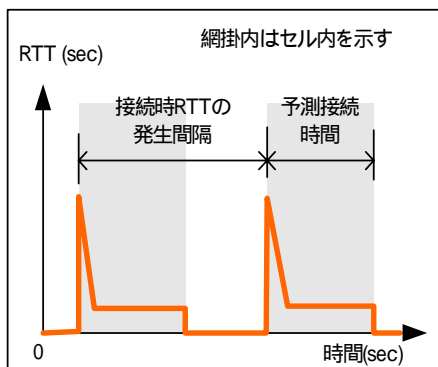


図 8 RTT の変動の概略図

図 8 に RTT の変動の概略図を示す。接続時 RTT を観測してから次の接続時 RTT が観測するまでの時間を接続時 RTT の発生間隔、および接続時 RTT の発生からセル外に出るまでの時間を予測接続時間とする。

D-RTO 値は接続時 RTT が観測された時点でリセットし、カウントを開始する。ここで、D-RTO のタイマが切れた場合に再送を行うが、再送した時点がセル外である場合には、3.3 で述べたように、次の送信開始が遅れる。接続時 RTT 発生間隔を基に、車両の速度やセルの長さ等の多少の変化による、接続時 RTT 発生間隔の揺らぎを加味し、図 9 を基に D-RTO の値を係数 r を用いて式 3 により求める。

$$D-RTO = (\text{接続時 RTT 発生間隔}) + r \times (\text{予測接続時間}) \quad (r \in [0,1]) \quad \dots \text{式 3}$$

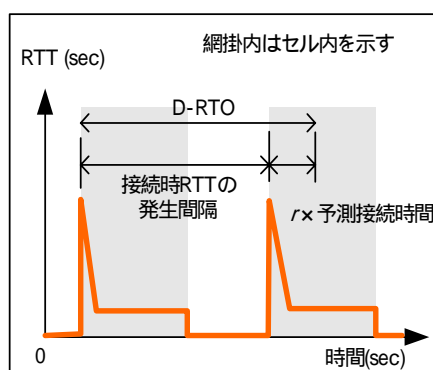


図 9 D-RTO の算出

接続時 RTT 発生間隔および予測接続時間は、セルを通過する度に、平均等の統計的方法により車両(送信先 IP アドレス)毎、または TCP コネクションごとに算出する。また、図 7 に示したように、エリアを跨ぐと大きな値の RTT が現れない場合があるが、先のセルでは現れることが確認できる。この場合、接続時 RTT の発生間隔が n 倍の値で算出するため以前の値と比較し、ほぼ同じ値になるように算出された値を n で割る、または極端に大きな接続時 RTT の発生間隔を無視すればよい。

セル間隔を走行中に速度が遅くなる等の原因により、D-RTO タイマが切れた場合は再送を行う必要がある。再送間隔は短いほうが送信を再開できる可能性が高いと考えられるが、無駄な再送を増やすことになる。また、長くすると、次のセルを越えてしまい、セルを無駄にする可能性もあ

る。そのため、図 10 に示すように、予測接続時間を最大値として再送間隔を設定する。D-RTO の利用により、2 回目の再送で通信が再開できる可能性が従来よりも高くなる。

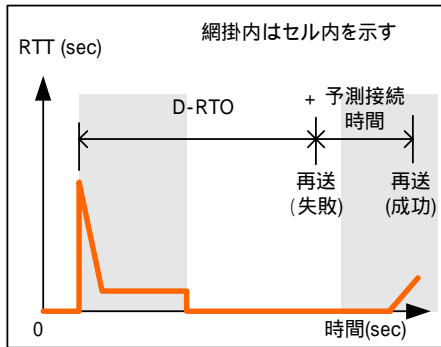


図 10 再送間隔の算出

4.1.2. D-RTO 算出機能実現のための要件

車両に情報を提供するサーバが、DSRC を利用した路車間通信専用として導入する場合は、サーバは全ての接続に対し、常に D-RTO を利用すればよいため、サーバ側の TCP の変更だけで済む。しかしながら、既存のネットワークでも利用可能な汎用サーバとして導入する場合は、DSRC を利用した通信かどうかをサーバが認識し、処理を区別する必要がある。そのため、TOS フィールドの未使用ビット、またはオプションフィールドに DSRC フラグを規定し、TCP の接続を要求するメッセージにおいて付加する。これによりサーバは DSRC を利用していることを認識し、フラグが立っている場合のみ、D-RTO を利用する。

4.2. RTT に基づくウィンドウ制御によるスループットの向上

DSRC を利用した路車間通信において、スループットを向上するもうひとつの方法として、RTT に基づくウィンドウ制御を挙げる。

DSRC のセルが 30m 程度と短いため、僅かな接続時間を有効に活用するために、スロースタートによるウィンドウ制御を行わず、ウィンドウサイズを設定可能な最大値に設定して送信を開始

する。これにより、最大限にセルを活用する。

5. おわりに

本稿では、シミュレーションにより DSRC を利用した路車間通信に対する、既存の TCP の振る舞いの検証を行い、無駄な再送のためにスループットが低下する問題点を示した。この問題を解決するため、スループット向上のための TCP の設定について検討し、RTT の値の変化に着目した DSRC のための RTO(D-RTO)の算出方法、およびスロースタートを行わないウィンドウ制御方法について考察した。今後の課題として、D-RTO 算出機能をシミュレータ上に実装し、有効性を検証することや、D-RTO の算出式における係数 r の値を見積もること等が挙げられる。なお、本研究は通信・放送機構による路車間通信システムのためのスマートゲートウェイ技術の研究開発の一環として行われている。最後に日頃ご指導頂く KDDI 研究所浅見代表取締役所長、松島代表取締役副所長、および水池執行役員に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 電波産業振興会, “狭域通信(DSRC)システム標準規格, ARIB STD-T75, 2001.
- [2] 服部, 小野, 西山, 堀内, “DSRC を利用した路車間通信における TCP スループットの評価”, 情報処理学会全国大会, 2002.
- [3] 鄒, 狩野, 須堯, 水越, “DSRC 網における IP ハンドオーバーのソフトウェアシミュレーション”, 情報処理学会 MBL 研究会, 2001.
- [4] K. Fall and S. Floyd, “Simulation-based Comparisons of Tahoe, Reno, and SACK TCP”, Computer Communication Review, V. 26 N. 3, 1996.
- [5] Jacobson, V., “Congestion Avoidance and Control”, SIGCOMM '88, Stanford, CA., 1988.