

## マルチチャネルフラッディングのシミュレーションによる評価

近藤 良久 板谷 聡子 瀧本 栄二 デイビス ピーター

鈴木 龍太郎 小花 貞夫

ATR適応コミュニケーション研究所

〒619-0228 けいはんな学研都市光台 2-2-2

E-mail: {kondo, itaya, takimoto, davis, ryutaro.suzuki, obana}@atr.jp

あらまし 安全運転のための緊急情報などをすばやく共有するために、車々間の通信を直接アドホック無線通信で行うシステムが検討されている。本稿では、複数の IEEE802.11 の無線インターフェースを持ちマルチチャネルで動作可能な無線装置を想定し、マルチチャネルフラッディングによる通信の特性を、ロバスト性とスケラビリティの視点から、シミュレーションによって明らかにする。フラッディングのロバスト性に着目したシミュレーションでは、マルチチャネルによる冗長的なパケット送信によって、パケットロスを低減できること、シングルチャネルでの冗長的なパケット送信よりもパケットの遅延を低減できることを示す。また、フラッディングのスケラビリティに着目したシミュレーションでは、マルチチャネル化および中継確率による制御の導入によって、同時通信可能ノード数が増加する効果を示す。

キーワード アドホックネットワーク、車々間通信、マルチチャネル、フラッディング

## Evaluation of Multi Channel Flooding with Simulation Test

Yoshihisa KONDO Satoko ITAYA Eiji TAKIMOTO Peter DAVIS

Ryutaro SUZUKI Sadao OBANA

ATR Adaptive Communications Research Laboratories

Hikaridai 2-2-2, Keihanna Science City, Kyoto, 619-0228 Japan

E-mail: {kondo, itaya, takimoto, davis, ryutaro.suzuki, obana}@atr.jp

**Abstract** Inter-vehicle communication with IEEE802.11 ad hoc networks is expected to achieve high speed data exchange for safe driving. In this paper, we analyze robustness and scalability of multi-channel flooding using multi-interface WLAN terminals. In simulation test of robustness against packet loss, we show that packet loss rate can be reduced with parallel-redundant packet transmission using multi-channel, and transmission delay can also be reduced compared to serial-redundant packet transmission using single-channel. In simulation test of scalability of network size, we show that the number of nodes can be increased with multi-channel flooding and relay probability control.

**Keyword** Ad Hoc Network, Inter-Vehicle Communication, Multi-Channel, Flooding

### 1. はじめに

移動通信端末同士が自律分散的にネットワークを形成し、通信を行うアドホックネットワークが注目を集めており、様々なアプリケーションが検討されている[1]。車々間・路車間の通信をアドホック無線通信で行い、安全・安心な交通システムや快適なサービスを実現しようという ITS (Intelligent Transport System) への応用はそのひとつであり、安全のための運転支援や、ユーザ同士の通信・情報サービスなどが考えられてい

る[2]。

車々間でネットワークを構成する際の特徴として、車が高速で移動するためにトポロジーの変化が激しい点が挙げられる。このため車々間のデータの転送には、ルートを構築せずにブロードキャストでパケットリレー方式にデータを転送する、フラッディング方式の有効性が指摘されている[3]。しかし、人命を預かる運転支援への応用には、確実かつ高速にデータを転送するロバストな通信性能が求められており、再送のメカニ

ムを持たないブロードキャストでデータの転送を行うフラッディング方式にとってこの点は大きな課題である。また、フラッディング方式にはネットワークのノード数の増加に伴い爆発的にトラフィックが増大してしまうことから、スケーラビリティに関する問題が指摘されている[4]。都心部や渋滞時など車が密集した状態でも快適な情報サービスを提供するためには、この点もまた大きな課題である。

一方、最近では複数の無線インターフェースを搭載した通信端末が利用可能になってきており、同時に複数のチャンネルを使用して多重的にアドホックネットワークを構成することも可能である。このマルチチャンネル化によって、同じデータを同時に複数のチャンネルから送信する冗長化や、帯域そのものを増やすことが可能となり、フラッディング方式の持つロバスト性やスケーラビリティに対する課題を改善できることが期待される。

そこで本稿では、マルチチャンネルフラッディングに関するシミュレーションを行い、ロバスト性やスケーラビリティに対するマルチチャンネル化の効果を検証する。シミュレーションには二つのシナリオを用意する。ひとつはロバスト性に着目したシミュレーションで、高トラフィックな環境下でのロスや遅延に関するマルチチャンネル化の効果を検証することを目的とする。もうひとつはスケーラビリティに着目したシミュレーションで、同時に何ノードまでが安定的に通信を行うことができるかを検証することを目的とする。

## 2. ロバスト性に関する検証

急ブレーキのような緊急の情報を後方の車に伝達するような場合には、周辺の通信の状況によらず確実かつ高速にデータを転送するロバストな通信性能が求められる。本章では、高負荷なトラフィック環境下における、マルチチャンネルによる冗長的なパケット送信の効果について検証する。

### 2.1. シミュレーション概要

シミュレーションの構成を図1に示す。シミュレーターにはNS2を用いる。フラッディングノードを5ノード直線状に配置し、フラッディングを阻害するデータフローを発生させる干渉ノードを並行して配置する。各フラッディングノードには隠れ端末となる干渉ノードが存在する。それぞれのノードの最大通信範囲は250mとし、隣接のノードとのみ直接通信可能とする。フラッディングノードSは100msec間隔で、160byteのデータをフラッディングにて送信する。受信したデータは、フラッディングノードのみが中継を行う。中継処理を図2(シミュレーション1)に示す。各フラッディングノード(G1~G4)において、Sから送信され

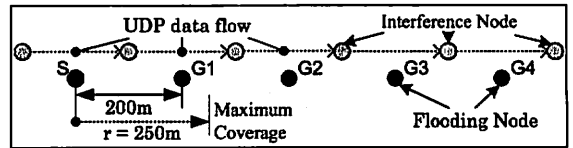


図1 シミュレーション1の構成

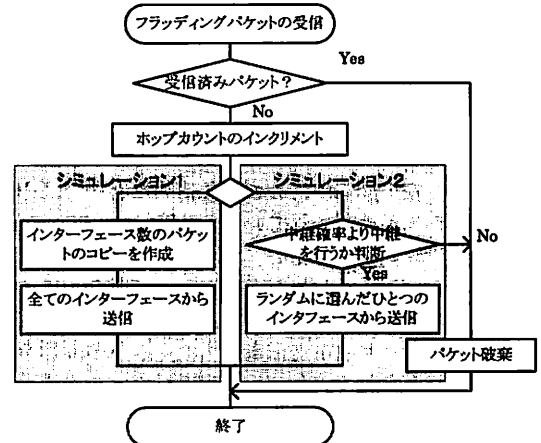


図2 フラッディングパケットの中継処理

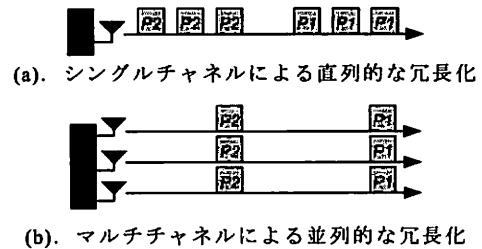


図3 冗長化パケット送信

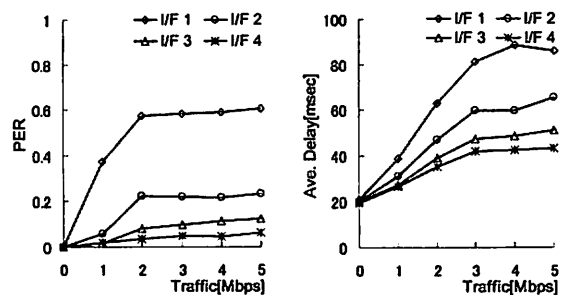


図4 パケットロス率, 平均遅延

たデータのパケットのロスおよび遅延時間を計測する。干渉ノードは、片方向のUDPデータフローを発生させることで干渉トラフィックとする。データフローのパケットサイズは1500byteとし、各データフローの送信データレートをパラメータとして、0から5Mbpsのトラフィック下におけるフラッディングパケットのパケ

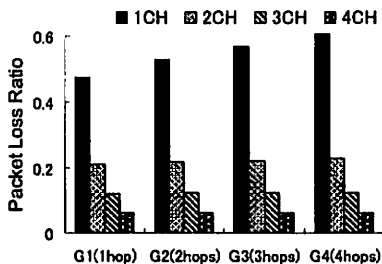


図 5 最大パケットロス率 (Multi-Channel FLD)

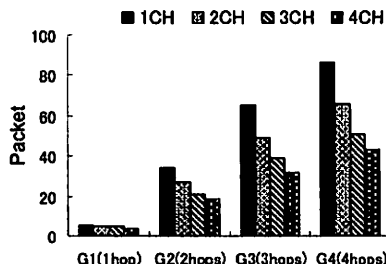


図 6 最大平均遅延時間 (Multi-Channel FLD)

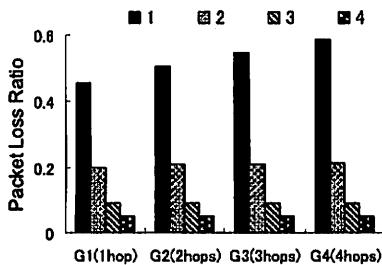


図 7 最大パケットロス率 (Single-Channel FLD)

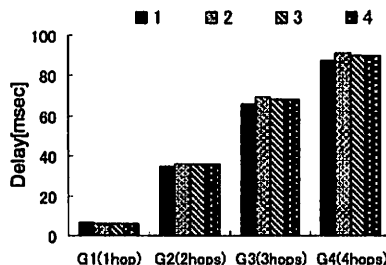


図 8 最大平均遅延時間 (Single-Channel FLD)

ットロスおよび遅延の測定を行う。複数のチャネルを使用する場合は、使用する全てのチャネルに対して同様にトラフィックを発生させる。無線通信はIEEE802.11b のアドホックモードにて行い、無線区間の送信レートは、ユニキャスト (UDP) を 11Mbps, ブロードキャスト (フラディング) を 2Mbps とする。各ノードの無線インターフェースの数は 1~4 とし、それぞれに干渉しない別のチャネルを割り当てる。

冗長性を高めてパケットロスを減らす工夫として、フラディングパケットの送信・中継時にパケットをインターフェースの数だけコピーし、全てのチャネルに対して送信を行う (図 2(1), 図 3(b))。また比較のため、シングルチャネル時にひとつのインターフェースからコピーした複数個のフラディングパケットを連続的に送信する直列的な冗長化 (図 3(a)) についても、同様にシミュレーションを行う。

急ブレーキを例にとれば、緊急の制御が必要になるのは後方の数台から多くても数十台の車であり、ネットワークの範囲を制限することで爆発的な中継パケット数の増加は抑えることができる。また緊急情報そのもののデータ量は少なく、多くの車が同時に緊急情報を送信するという状況も考え難い。このため、スケラビリティに関する検討は、このシミュレーションにおいては行わない。

## 2.2. シミュレーション結果と考察

G4 における測定結果を図 4 に示す。干渉トラフィックの増大により、パケットロス率および遅延時間が増

加する様子がわかる。トラフィックが最大の場合の各ノードでのパケットロス率と平均遅延を図 5, 6 に示す。パケットロス率は、チャネル数が 1 の場合は G4 の地点で 60% にまで達するが、チャネル数を増やし冗長化を行なうことによって半分以下のロス率に抑えることができ、4 チャネルによる冗長化によっては、7% 以下に抑えることができる。遅延時間についても同様に、マルチチャネルによる冗長化の効果が得られている。4 チャネルによる冗長化では、G4 の地点で 1 チャネル時と比較して 40msec ほど遅延を短縮できる結果となっている。

シングルチャネルによる直列的な冗長化を行った場合の結果を図 7, 8 に示す。マルチチャネルの結果と比較して、送信するパケット数が同じであれば、パケットロス率に関してはマルチチャネル化と同等の結果が得られている。しかし、遅延時間に関してはマルチチャネルによる冗長化のように遅延を短縮する効果を得ることはできず、冗長化を行わない場合とほぼ同じ結果となってしまう。シングルチャネルによる直列的な冗長化の場合は、複数個のパケットをほぼ同時に送信しても、到着時にパケットの順番が入れ替わることは少ないと考えられる。また、帯域を共有しているために後続のパケットが先のパケットの遅延の影響を受けやすく、冗長化パケット同士の独立性が低いために、パケット数を増やしても遅延を短縮させることができないと考えられる。一方、マルチチャネルによる並列的な冗長化の場合は、冗長化パケット同士がそれぞれの

遅延に影響せず、独立性が高いため、平均遅延時間を冗長化パケット数に応じて短縮することができると考えられる。

パケットロス率に関しては、シングルチャネルによる直列的な冗長化であっても改善することができるが、遅延時間に関しては、マルチチャネルによる並列的な冗長化を行わなければ、改善できないことが明らかとなった。急ブレーキのような緊急の情報は、後続の運転者への危険の通知のみならず直接車の制御に用いられることが考えられるため、数 10msec のオーダーであっても遅延時間を短縮できることは有効であるといえる。

### 3. スケーラビリティに関する検証

交通渋滞や大きな交差点など、車々間通信にはノード密度が非常に高い状況が多く想定される。そこで安定した情報サービスなどのアプリケーションを実現するには、スケーラビリティに対する課題の解決は必須である。本章では高ノード密度の環境下におけるマルチチャネルフラッディングの効果について検証する。

#### 3.1. マルチチャネル化の効果の推定

まずは、スケーラビリティに対するマルチチャネル化の効果概算する。各ノードが  $M$  個の無線インターフェースを搭載しており、それぞれに干渉のないチャネルを割り当てるとすれば、使用できる帯域は  $M$  倍となる。しかし、pureフラッディングによる通信を想定すると同時通信可能なノード数は単純に  $M$  倍とはならない。あるノード  $A$  の電波範囲内に  $N$  個のノードがあり、全てのノードが等しくパケットを送出するとする。送出されたパケットは、pureフラッディングの場合、全てのノードが一度は中継を行う。このため、ノード  $A$  の電波範囲内のあるノードが 1 パケットを送出することによってノード  $A$  が受信することになるパケット数は  $N$  パケットとなる。全ノードが毎秒  $b$  バイトのパケットを送出するとすれば、 $A$  は毎秒  $bN^2$  バイトのデータを受信することになる。この帯域が許容できる最大のデータレートを毎秒  $B$  バイトとし、無線フレームの衝突やパケットロスが発生しないとすれば、この電波範囲内で同時通信可能なノード数の最大値は、

$$N_{Ch\_max} = \sqrt{\frac{B}{b}} \quad \dots(1)$$

となる。マルチチャネル化により  $M$  チャネルを同時に使うことで、帯域は  $M$  倍となるから、許容できる最大のデータレートも  $M$  倍となる。このときの最大のノード数は

$$N_{MCh\_max} = \sqrt{M} \frac{B}{b} \quad \dots(2)$$

となり、 $\sqrt{M}$  倍のノードを同一電波範囲内に許容できることが分かる。ただし、ノード  $A$  の電波範囲外にもノードがあるとすれば、このノードからのパケットを中継しなければならないため、実際に許容できるノード数は電波範囲外部のノード数に応じてさらに小さくなる。

$$N_{MCh\_max} = f(n_{all}) \sqrt{M} \frac{B}{b} \quad (0 < f \leq 1) \quad \dots(3)$$

以上の考察から、pureフラッディングそのままでは、マルチチャネル化を行ってもチャネル数の平方根倍以下の倍数でしか同時通信可能台数を増やすことができないことがわかる。この推定結果から、大きなスケーラビリティの改善効果を得るためには、マルチチャネル化以外にも総パケット数を抑える工夫を加える必要があるといえる。

#### 3.2. 中継確率によるフラッディングの制御

フラッディングのスケーラビリティを向上させるために様々な工夫がされているが、それらは、中継確率をベースにしたもの、受信パケット数をベースにしたもの、座標をベースにしたもの、トポロジーをベースにしたもの、以上を複合したものなどがある[5-10]。しかし、高速でトポロジーが変化する車々間通信においては、ノード間の複雑な情報交換を必要とする方式は現実的ではないため、本稿では最も基本的な方式である中継確率をベースとした方式に着目し、マルチチャネル化と合わせた効果を検証する。

#### 3.3. シミュレーション概要

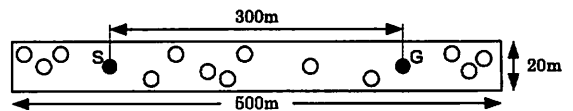


図9 シミュレーション2の構成

シミュレーションの構成を図9に示す。直線道路を想定し、長辺の長い長方形をフィールドとする。フィールド内の全てのノードは 100msec 間隔で 160byte のパケットを送信する。また、全てのノードは受信したフラッディングパケットの中継を行う。ノード  $S$  から送信されたパケットをノード  $G$  にて測定し、パケットロス率および遅延時間を記録する。通信が可能な最大の電波範囲は 250m とし、ノード  $S$  からノード  $G$  まで到達するには少なくとも 2 ホップ以上が必要である。フィールド内のノード数をパラメータとし、10~100 のノード数に対してシミュレーションを行う。インター

フェース数は1~4とし、それぞれの場合についてシミュレーションを行う。各インターフェースに割り当てられるチャンネル間の干渉はないものとする。フラッディングパケットを受信した場合の処理を図2(2)に示す。中継を行うか否かの判断は、中継確率に応じて行うものとし、中継を行う場合は送信インターフェースをランダムにひとつ選択し、そのインターフェースのみから送信を行う。2章のシミュレーション1のようにコピーを複数送信することは行わない。中継確率およびノード数を変えてそれぞれの場合に関してシミュレーションを行う。

### 3.4. シミュレーション結果

図10~12に中継確率がそれぞれ100%、20%、10%の場合のシミュレーション結果を示す。中継確率が100%の場合、チャンネル数が1のときは10ノードであっても10%のペッケットロスが発生している。一方、4チャンネル使用しているときは、10ノードでは0%、20ノードの場合では5%のペッケットロス率に留まっている。しかし、この場合であっても30ノード付近から、急激にロス率が増加してしまう。中継確率を下げることによって、ノード数が多い場合におけるペッケットロス率を減少させることができる。中継確率が20%で4チャンネル使用した場合、40ノードにおけるロス率が7%に、さらに中継確率が10%で4チャンネル使用した場合、60ノードにおけるロス率を20%にすることができる。ただし、中継確率を減らすと、ペッケットロス率が最も低いノード数におけるペッケットロス率がゼロから離れた値になってしまう。中継確率が低いことで、同時に中継を行う平均のノード数は少なくなるが、ノード数が多ければ中継を行うノード数のばらつきは大きくなる。比較的多くのノードが同時に中継を行うこともあり、このときに衝突などでロスが生じる。中継確率を減らすことで、ロス率の最低値がゼロから離れた値になってしまうのはこのためと考えられる。

今回のシミュレーションはIEEE802.11bによる無線通信を想定したが、11gや11aを想定すると、送信するパケットのサイズにもよるが、11bよりも3~5倍程度の高いスループットが得られる。(3)式に当てはめると右辺Bの値が3~5倍となるから、11bよりも概算で2倍程度のノードが同時通信可能であると推定できる。よってマルチチャンネル化と中継確率の効果を合わせれば、このシミュレーション構成における80ノードにて7%、120ノードにて20%程度のペッケットロス率を達成できると推定され、より大きなスケールビリティが得られると考えられる。

今回は中継確率に注目したシミュレーションを行ったが、前述の通りフラッディングの効率を上げる方式は多く検討されている。これらとマルチチャンネルの

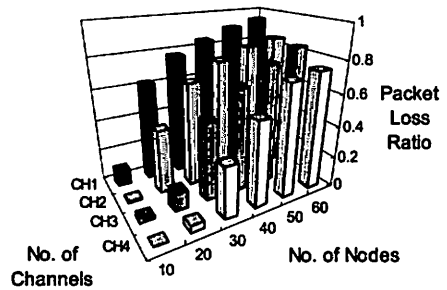


図10 ペッケットロス率 (中継確率 100%)

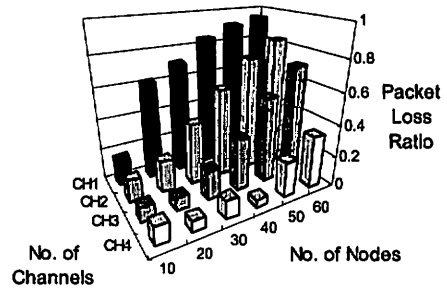


図11 ペッケットロス率 (中継確率 20%)

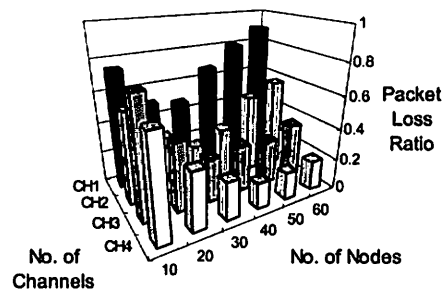


図12 ペッケットロス率 (中継確率 10%)

効果を組み合わせることによって、より効率的なフラッディングを行うことができると考えられる。また、チャンネル毎に異なるフラッディングの制御を行なうといったような、より高度なフラッディングも可能であるが、その方式の提案および効果の検証は今後の課題である。

### 4. まとめ

マルチチャンネルフラッディングを用いたロバスト性に関するシミュレーションを行い、マルチチャンネルによる並列的なパケットの冗長化によって、高負荷環境下でのフラッディングのパケットロス率を、冗長化

を行わない場合と比較し、2チャンネル使用で約1/2、4チャンネル使用で約1/10に抑えられることを示した。また、シングルチャンネルでパケットを直列的に冗長化した場合と比較し、4チャンネルによる冗長化では4ホップの地点で40msec程度、遅延時間を低減できることを示し、遅延の改善にはマルチチャンネルによる並列的な冗長化が有効であることを示した。

スケーラビリティに対するマルチチャンネル化の効果の推定を行い、チャンネル数の増加に伴う同時通信可能なノード数の増加は、概算で、チャンネル数の平方根倍以下の倍数に留まることを示し、マルチチャンネル化のみでは大きなスケーラビリティを得るのが難しいことを示した。シミュレーションを行い、4チャンネル使用によって20ノードで60%以上だったロス率を5%以下に抑えることができること、さらに中継確率を導入することにより40ノードで7%、60ノードで20%のパケットロス率を達成できることを示した。

ロバスト性およびスケーラビリティの観点からするとマルチチャンネルフラッディングは有効である。マルチチャンネルの特性を生かしたフラッディング方式の提案が今後の課題である。

#### 謝辞

本研究は情報通信機構(NICT)の研究委託により実施したものである。

#### 文 献

- [1] 小菅昌克, 板谷聡子, Peter Davis, 梅田英和, "アドホックネットワークが開く新しい世界(後編)," 情報処理, Vol.44, No.11, pp.1060-1063, 2003.
- [2] 間瀬憲一, "車々間通信とアドホックネットワーク," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.6, pp.824-835, 2006.
- [3] Sung-Ju Lee, William Su, Julian Hsu, Mario Gerla, Rajive Bagrodia, "A performance comparison study of ad hoc wireless multicast protocols," Proc. INFOCOM, pp.565-574, 2000.
- [4] Sze-Yao Ni, Yu-Chee Tseng, Yuh-Shyan Chen, Jang-Ping Sheu, "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network," Proc. MobiCom, pp.151 - 162, 1999.
- [5] 島津義嗣, 村田英一, 吉田進, "ITS 車々間通信における自律的パケット中継制御法," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J82-B, No.11, pp.2018-2025, 1999.
- [6] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, "Optimized Link State. Routing Protocol (OLSR) ", RFC 3626, October 2003.
- [7] Valery Naumov, Rainer Baumann, Thomas R. Gross, "An evaluation of Inter-Vehicle Ad Hoc Networks Based on Realistic Vehicular Traces," Proc. MobiHoc, pp.108-119, 2005.
- [8] Harshavardhan Sabbineni, Krishnendu Chakrabarty, "Location-Aided Flooding: An Energy-Efficient Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor

Networks," IEEE Trans. Computers 54(1), pp.36-46, 2005.

- [9] Shinji Motegi, Hiroki Horiuchi, "Relay Control for Data Dissemination of Spontaneous Vehicular Networks," Proc. ITST2006, pp.1098-1101, 2006.
- [10] 萩谷展之, 増田修士, 阪田史郎, "アドホックネットワークにおけるノード密度に基づいた効率的フラッディング制御," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2006) シンポジウム, pp.413-416, 2006.