

自律分散環境下における MAC レベルオフロードコントロールの実装と評価

井上 大資[†] 中嶋 拓也^{††} 重安 哲也^{††} 森永 規彦^{††}

[†] 広島国際大学大学院 情報通信学専攻 ^{††} 広島国際大学 情報通信学科

ランダムアクセス方式の MAC プロトコルは、簡単な送信制御で高いスループット性能を発揮できるが、高トラフィック時にはパケット衝突が頻繁に発生することにより、スループットが大きく低下してしまうという問題点が知られている。本論文では、ランダムアクセス方式におけるトラフィック過多状態でのパケット衝突を回避するために、MAC レベルオフロードコントロール機能を用いた方式を提案する。また、同手法をランダムアクセス方式の MAC プロトコルである pureALOHA に実装し、有効性を明らかにしたので、この結果について報告する。

A Proposal and Its Performance Evaluation of MAC-Level Offered Load Control in Distributed Transmission Control Environment

Daishi Inoue[†] Takuya Nakashima^{††} Tetsuya Shigeyasu^{††} Norihiko Morinaga^{††}

[†] Graduate School of Infrastructural Technology, Hiroshima International University

^{††} Department of Information Technology, Hiroshima International University

It is known that MAC Protocols which employ random access control sequences could get high throughput performance by its simple control sequences. However, it is also known that their throughput performance is degraded significantly in a high traffic load environment. Then, in this paper, in order to avoid collision and keep high throughput performance under above situation, we propose and implement a MAC-Level offered load control technique into pure ALOHA which is typical MAC protocol employing random access control sequence to clarify its efficiency by computer simulations.

1 はじめに

ケーブルレスでネットワークにアクセスすることのできる代表的な無線 LAN(Local Area Network)の規格は IEEE802.11 [1] であるが、その送信制御を規定する MAC(Media Access Control) プロトコルにはランダムアクセス方式が採用されている。ランダムアクセス方式は自律分散的に送信する制御方式であるため、ネットワーク中の端末の送信を集中的に制御するための基地局を必要とせず、容易にネットワークを構成することができる。そのため、現在 IEEE802.11 規格を採用する無線 LAN は、オフィスや学校、駅構内などをはじめとした公共スペースや家庭などへ急速に整備されつつある [2]。

さて、ランダムアクセス方式とは逆に、制御局により、ネットワーク中の全ての送信を制御する集中制御方式の MAC プロトコルも多く開発されている。集中制御方式では、端末局と比べて高い処理能力を備える局をネットワークに設置しなければならないという欠

点はあるものの、高トラフィック時でも、パケット衝突を完全に防ぐことができる。これに対し、ランダムアクセス方式では、ネットワーク上に特別な局を必要とせずに、通信を行なうことができるが、各端末は自端末のみの状態に従い送信を決定するために、高トラフィック時にはパケット衝突が頻繁に発生し、結果として、スループットが大きく低下してしまうという問題点を抱えている。

そこで、本論文ではこの問題点を解決し、自律分散的に制御を行うランダムアクセス方式においても、高トラフィック時に高スループットを維持することのできる手法について検討を行う。具体的には、基本的なランダムアクセス方式の MAC プロトコルである pure ALOHA 方式を取り上げ、同プロトコルにおけるトラフィック過多状態でのパケット衝突を回避するために、MAC レベルでパケットの送信・破棄を決定する MAC レベルオフロードコントロール機能を用いる手法について検討する。また、提案手法を実装する計算

機シミュレータを構築し、オフロードコントロールの条件を様々なに変化させた場合の提案手法の有効性についての評価を行ったのでこれらの結果について報告する。

以下、本稿は次のように構成される。まず、2節で pure ALOHA 方式の概要と問題点を述べ、本論文において提案を行う高スループット維持手法について説明する。次に、3節において、提案方式を実装した計算機シミュレーションについて説明する。これらを踏まえて4節では pure ALOHA 方式における高トラフィック維持の性能を同シミュレータにより評価し、5節において本稿のまとめを行う。

2 pure ALOHA 方式の概要と問題点

2.1 pure ALOHA 方式の概要

ALOHA 方式の基本的な考え方としては、「ユーザが送信するデータを持っているときはいつでも送信させる」というものである。もちろん、複数端末が同時刻に送信を行えば衝突が起り、衝突したフレームは失われる。しかしながら、ALOHA 方式は、ランダムアクセス方式の基本形ともいえる MAC プロトコルであり、伝搬遅延に影響を受けずに通信を行うことがその特徴である。この特徴を利用し、ALOHA は、衛星通信網や、パーソナル無線通信などに使用されている。

2.2 pure ALOHA 方式の問題点

図 1 に pure ALOHA 方式のスループット・トラフィック特性の理論式 $S = Ge^{-2G}$ をプロットしたグラフを示す。

同図において、Traffic G は単位時間当たり発生した全ての送信要求量とし、Throughput S は、単位時間当たり成功した送受信量としている。なお、どちらも回線速度で正規化している。

同図において、 S は $G=0.5$ のとき最大となり、そのスループットは $1/(2e) \approx 0.184$ となる。すなわち、pure ALOHA 方式を用いると、最大で通信回線容量の約 18% 程度しか利用できないことがわかる。また、回線実際に伝送されるトラフィック量 G があまりに多くなるとスループットは急激に低下してしまう (図 1 ①の部分)。

このときの状況をより細かくみると、pure ALOHA 方式のスループット特性は、低トラフィック時はパケットの送信間隔が長いパケットを送信しても衝突が起りにくいが、高トラフィック領域に推移するに従い、パケットの生成間隔が短く、衝突確率が高くなる。そのため結果として、スループットが低下してしまうと考

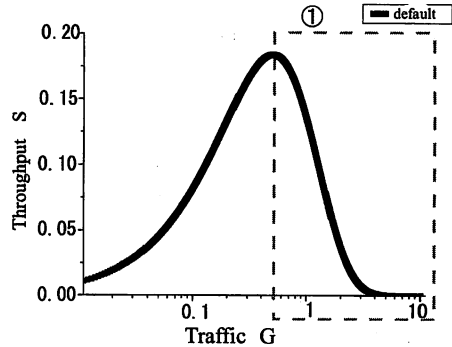


図 1: pureALOHA のスループット特性

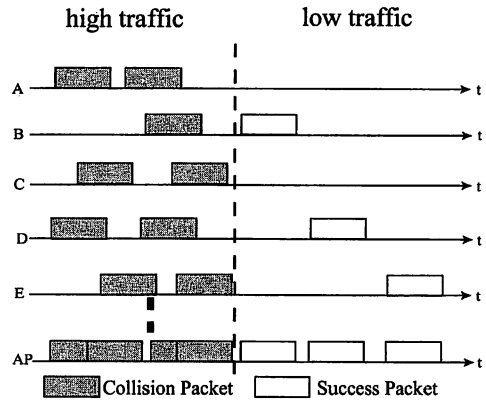


図 2: pureALOHA 方式の転送方式

えられる (図 2)。

2.3 pureALOHA 方式の問題点の解決手法

本稿では、高トラフィック時におけるスループット低下を防ぎ、高いスループットを維持するために、MAC レベルオフロードコントロールを行う方式を提案する。同方式では、ランダムアクセス方式において、高トラフィック領域でのパケット衝突を軽減するために、ある特定の端末において、短時間に多くのパケット送信要求が生じた場合には、これを適切な割合で破棄する。このように、送信間隔を長くすることで、パケット同士の衝突を軽減し、高スループットを維持する方法について検討を行う。提案手法の概要を図 3 に

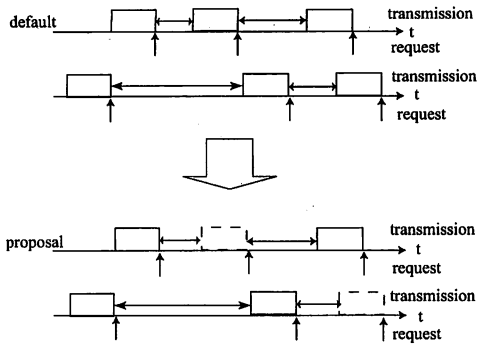


図 3: 提案方式による転送方式

示し、同手法が目標とするスループット性能を図 4 に示す。

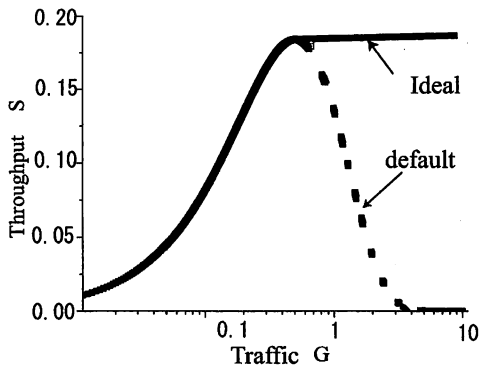


図 4: 理想的なスループット特性

以下では、適切な送信間隔について議論を行なう (図 5 参照)。

トラフィック $G=0.5$ のときの packets 発生間隔を考える。さて、送信要求は各端末に均等に発生するとし、ネットワーク中の端末数を n とすると、このときの 1 端末あたりの平均 packets 生成数は $0.5/n$ 個となる。ここで packets 生成過程がポアソン分布に従うとすると、packets の発生間隔の長さは、パラメータ G の指数分布に従うこととなる。よって、packets の発生間隔は平均 $1/G$ となることから、一端末あたりの平均 packets 発生間隔は n/G となる。つまり、 $G=0.5$ のときは、平均 $n/0.5$ の間隔で packets が生成されていることとなる。

次に pure ALOHA において、スループット上昇と下降の境となる点はトラフィック $G=0.5$ の点であること

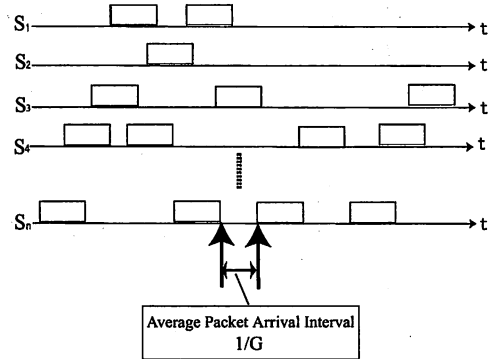


図 5: pureALOHA 方式における packets 発生間隔

表 1: シミュレーション諸元

Data Rate	2 Mbps
Packet Length	500 bytes
Packet Arrival Process	Poisson
Simulation Field	500 × 500 m
Number of Terminals	100
Terminals Initial Location	random placed
Simulation Period	50 seconds

から、平均 packets 間隔が $n/0.5$ より狭くなれば、衝突が多くなり、スループットは低下すると考えることもできる。また逆に、 $n/0.5$ より平均 packets 間隔が広ければ、スループットが低下せずに維持できるとも考えられる。

3 計算機シミュレーション法

3.1 ALOHA シミュレータの構築

提案方式の有効性を評価するために、C 言語により、pure ALOHA 方式の packets シミュレータの開発を行った。同シミュレータは、500m×500m のシミュレーション空間に、100 端末を一様にランダム配置する。また、各端末に生起する送信要求は、ポアソン過程に従うこととして構築した。詳細なシミュレーション諸元を表 1 に示す。

なお、本稿では、全ての端末が互いの通信範囲内に入っている環境 (つまり、隠れ端末 [3] やさらし端末 [4] が一切存在しない状況) に限定してシミュレーションを行なっている。

3.2 MAC レベルオフロードロードコントロール機能の実装

pure ALOHA 方式では、高トラフィック領域において、各端末の送信間隔が狭くなる状況においてパケット衝突発生が増加する。そのため、提案方式は、各端末がそれぞれ自律的にパケット送信間隔をある与えられた間隔以上に保つことでパケット衝突の軽減を図る。そこで同手法を実現するために、MAC レベルでのオフロードロードコントロール機能を実装する。

今回実装した機能は次のように動作する。まず、各端末は 1 パケットの送信を終了した時点で、送信終了時間を記録する。次に、その送信終了時間から、与えているトラフィック制限に従い、自端末の送信禁止時間を設定する。その後、送信禁止時間が経過するまで、その端末に生じた送信要求については、送信を行ったとしても、衝突の可能性が高いパケットであるとみなし、送信せずに破棄する。ただ、送信禁止時間の経過後は、通常通りにパケットが送信処理を行うこととした。

提案手法をシミュレータへ実装した際の動作の詳細を図 6 を用いて詳しく説明する。

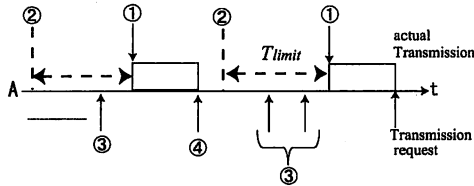


図 6: 提案方式の転送方式

- ① パケット送信後に送信完了時刻を各端末内のレジスタ *end.time* に記録する
- ② トラフィック制限値 T_{limit} に従い、 $end.time + T_{limit}$ を自端末の送信禁止時間として設定する
- ③ 送信禁止タイマ内に発生した送信要求は全て破棄する
- ④ 送信禁止タイマ終了後、はじめて発生した送信要求パケットを送信する

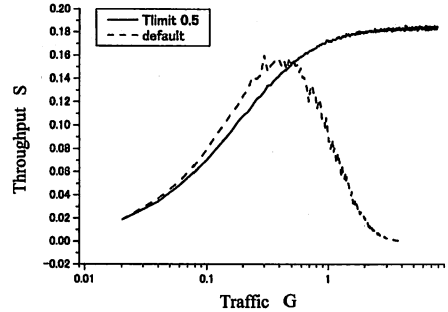


図 7: 提案方式と既存方式のスループット特性 (トラフィック制限値 0.5)

4 計算機シミュレーションによる MAC レベルオフロードロードコントロールの評価

4.1 提案方式におけるスループット特性の評価

pure ALOHA 方式は、トラフィック $G=0.5$ のときに最高スループットである 0.184 を取る。そこで、MAC レベルオフロードロードコントロール機能を実装したシミュレータに、まず T_{limit} を既存方式のトラフィック 0.5 の場合と同じ平均パケット送信間隔に設定した場合の結果を図 7 に示す。

同図から $G=0.5$ の下で T_{limit} を設定した場合は、高トラフィック領域 (トラフィック 0.4 以上) において、既存方式よりも高いスループット性能を示すことがわかる。しかしながら、逆に低トラフィック領域 (ここではトラフィック 0.4 以下) において、既存方式よりも低いスループット性能を示すことがわかる。

ここで、既存方式において、ある任意の 1 パケットが衝突せずに受信される確率について考える。pure ALOHA 方式のスループット特性理論式から、任意のパケットの送信成功確率 P は

$$P = e^{-2G} \quad (1)$$

となる。このとき、仮にトラフィックが 0.01 であるとすると、パケットの送信成功確率 $P_{0.01}$ は以下となる。

$$P_{0.01} = e^{-2 \times 0.01} = 0.98 \quad (2)$$

つまり、既存方式においても、トラフィックが 0.01 である場合はパケットの衝突はほとんど発生しないことがわかる。

さて、本論文で評価に使用するシミュレータでは、パケット生成は平均 G のポアソン分布に従う。つまり、パ

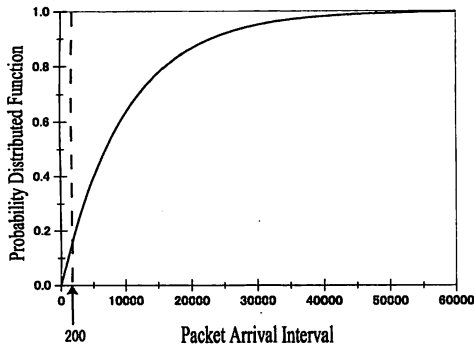


図 8: 確率分布関数

ケット生成の時間間隔は、平均 $1/G$ の指数分布に従うことになる。また、ネットワークは 100 端末から構成されているため、任意の 1 端末におけるケット生成間隔を x とするとこれに対する確率分布関数は、 $1 - e^{-Gx/100}$ となり、同式は図 8 のグラフで表すことができる。

さて、 T_{limit} の長さをトラフィック 0.5 の場合と同じ平均ケット生成間隔に設定すると、各端末ではケット生成間隔が、 $N/0.5 = 100/0.5 = 200$ 以下である場合にケットが破棄されることとなる。つまり、図 8 からトラフィック 0.01 の場合には、生成ケットをそのまま送信した場合にも、98% の確率で成功するにもかかわらず、過剰な送信禁止時間の設定により、2% のケットが不必要に破棄されていたために、既存方式に比べ、低トラフィック領域でのスループットが低下してしまったと考えられる。

しかしながら、高トラフィック域においては、提案手法を実装することにより、高スループットが維持できていることから、提案手法がねらいとする性能を発揮できていることを確認することができる。

4.2 トラフィック制限値の変化と提案方式におけるスループット特性の変化

次に設定するトラフィック制限値と、スループット特性との関係を調査するために、 T_{limit} の値を様々に変化させた場合の計算機シミュレーションを行なった。この結果を図 9 に示す。同図において、 T_{limit} はそれぞれトラフィック 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 の場合の平均ケット生成間隔と同じ長さに設定した。

これらの結果から、トラフィック制限が厳しい値に設定された場合 ($T_{limit}0.5$ が一番厳しい値となる) は、高トラフィックにおいて既存方式に対して高いスループット向上幅を示すのに対し、低トラフィックでは、前

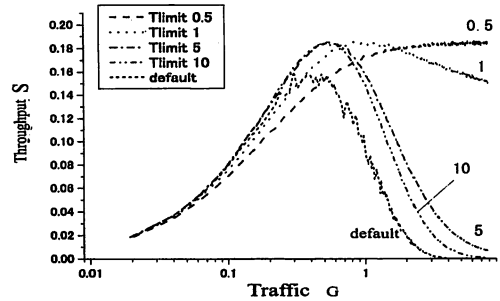


図 9: トラフィック制限を様々に変化させた場合のシミュレーション結果

述の不必要なケット破棄により、逆に既存方式よりもスループットが低下してしまうことがわかる。

これに対し、トラフィック制限が緩い値に設定された場合 ($T_{limit}10.0$ が一番緩い値となる) は、高トラフィックにおける既存方式に対するスループット向上幅が減少するものの、低トラフィックでは、既存方式と同等、もしくは、それ以上のスループット性能を示すことがわかる。

4.3 端末数の変化と提案方式におけるスループット特性の変化

次に、端末数とスループット特性との関係を明らかにするため、端末数を 10, 1000, 10000 と変化させた場合の計算機シミュレーションの結果を図 10 に示す。同図では、トラフィック制限値は、低トラフィックと高トラフィックの両方の領域で優れたスループット特性を示したトラフィック制限値 1.0 を使用した場合の結果を示している。同図から、端末数が増加することもない、提案方式の高トラフィック域でのスループットが低下していることが確認できる。

このことについて、次のように考察する。本計算機シミュレータは、ネットワーク中の各端末に均等にケットが発生するように設計されている。すなわち、ネットワーク中の端末数を n とすると、各端末には単位時間当たり平均 G/n のケットが生起することになる。そのため、端末数の相異なるネットワーク間において、ネットワーク全体でのトラフィックが同一の場合でも、 n が異なることにより各端末の平均ケット生成数は異なることとなる。つまり、少ない端末数でネットワー

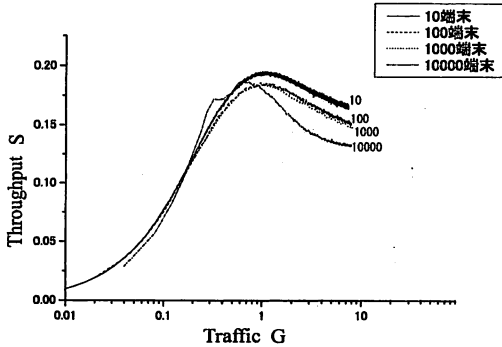


図 10: 端末数の増減とスループット特性の変化

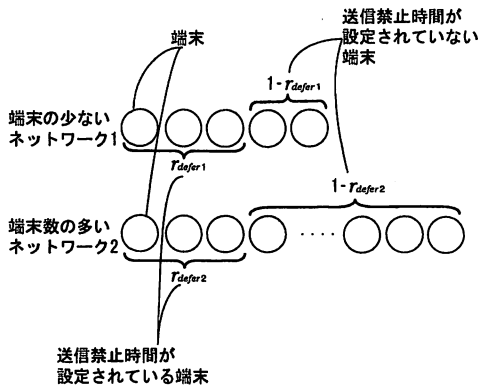


図 11: 端末数の違いによるネットワーク構成図

クが構成される場合の方がそうでない場合と比べ、トラフィックが同一であったとしても、ネットワーク中のより多くの割合の端末に送信禁止時間が設定されていると考えることができる(ここでは、送信禁止時間が設定されている端末の割合を r_{defer} とする)(図 11)。

従って、このような状態で任意の端末がパケットを送信した場合、このパケットと衝突を起こす可能性のある端末がネットワークに占める割合は当然のことながら $1 - r_{defer}$ となる。結果として、この値が小さくなるのは、ネットワーク中の端末数が少ない場合であるから、端末数の少ないネットワークの方が衝突が少なくなり、より高いスループット性能を示したものと考えることができる。

5 まとめ

本稿では基本的なランダムアクセス方式の MAC プロトコルである pure ALOHA 方式におけるトラフィック過多状態でのパケット衝突を回避するために MAC

レベルでのパケットの送信・破棄を決定する MAC レベルオフロードロードコントロール機能を用いた手法を提案し、同手法を計算機シミュレーションにより、その有効性を確認した。

MAC レベルでのトラフィック制限とスループット特性との関係を調査するために行なった計算機シミュレーション結果から、トラフィック制限を厳しく設定すると、高トラフィック域では、既存方式よりも十分に高いスループット性能を発揮することができる一方、低トラフィック域において、既存方式よりもスループットが低下してしまうことが確認された。逆に、トラフィック制限を緩くすると、提案手法は低トラフィック域においても、既存方式と同等のスループットを確保できるが、高トラフィック域での既存方式に対する、スループット向上幅が減少してしまうことも確認した。

次に、提案手法を考慮した計算機シミュレータを用い端末数を 10, 100, 1000, 10000 と変化させた場合のスループットの変化を評価した。その結果、端末数が増加するにつれ、高トラフィック時のスループットが低下していくことを確認し、その理由についての考察を行った。

今後は、提案手法をさらに改良することにより、ネットワークトラフィックに応じて適応的にトラフィック制限値を変化させることのできる手法について検討を行い、計算機シミュレータへの実装と評価を行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 若手研究 (B) (No.18700075) の援助を受けている。

参考文献

- [1] Matthew S. Gast, "802.11 Wireless Networks The Definitive Guide," O'REILLY 2002
- [2] 情報通信白書平成 16 年度版
- [3] F. A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II - The Hidden Terminal Problem in CSMA and Busy-Tone Solution," IEEE Trans. on Communications, COM-23, pp. 1417-1433, 1975.
- [4] P. Karn, "MACA - a new channel access method for packet radio," ARRL/CRRL Amateur Radio 9th, Computer Networking Conference, pp. 134-140, 1990.