

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760341

研究課題名(和文)大容量かつ多種別なフロー伝送を実現する大規模無線アクセス網の構成法

研究課題名(英文) Configuration Method of Large-Scale Wireless Access Networks for Realizing Data Communication of High-Capacity and Various Flows

研究代表者

谷川 陽祐 (Tanigawa, Yosuke)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90548497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：多様な要求品質をもつ情報フローの大量通信が可能な大規模無線アクセス網を実現するため、マルチチャネル化、ネットワークコーディング伝送、通信品質制御等の要素技術の改良強化に加え、各技術を適応的に相互連携させることで通信容量のさらなる大容量化を図った。計算機シミュレーション評価により、ネットワーク大容量化の達成を確認するとともに、各要素技術を単純に組み合わせるだけでなく各技術の特徴を考慮したインテリジェントな制御に基づく適応的連携により、さらなる性能向上が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：To realize large-scale wireless access networks where data flows with various capacities and required communication quality can be transferred, this research dealt with adaptive cooperation among usage of multiple channels, packet forwarding with network coding, and communication quality control in addition to enhancements of these technologies. Through evaluations with computer simulation, it is demonstrated that the increase of network capacity is achieved and further improvement is possible by adaptive cooperation among the technologies based on their characteristics.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：マルチチャネル ネットワークコーディング 通信品質制御 チャンネルアクセス制御 無線アクセス網

### 1. 研究開始当初の背景

無線 LAN、無線アドホックネットワーク、無線メッシュネットワーク等の無線ネットワークは、広域無線アクセス網やイベント、災害時の非常用通信網など、様々な活用が期待されている。一方、アプリケーションの増加、多様化に伴い、通信フローの大容量化や要求品質の多様化が進んでいる。しかし、現状の無線ネットワークは、通信容量の絶対的不足に加えてパケット衝突や電波干渉で実効帯域が劇的に低下し、新世代の大容量大規模な無線アクセス網実現に向けての障壁となっている。

これまで行われてきたマルチチャネル化、ネットワークコーディング (NC) 伝送、バースト伝送、通信品質 (QoS) 制御等に関する研究の成果により、個々の技術による通信容量の向上が確認されている。しかし、将来のスーパーハイビジョン、さらには高精度化や三次元化が進む医療用画像データ等の無線伝送が可能な通信容量には未だ達しておらず、各技術を効果的に相互連携させながら無線ネットワークのさらなる大容量化を図ることが必要不可欠である。

一方、これまでの研究では、無線アドホックネットワークや無線メッシュネットワークが主に想定されてきた。しかし、最も通信のボトルネックとなるのはこの2ネットワークとインターネットを接続するゲートウェイ付近のネットワークであり、このトポロジは無線アドホックネットワークや無線メッシュネットワークのそれとは大きく異なる。大容量大規模な無線ネットワークの実現には、このようなゲートウェイアクセスネットワークの大容量化が不可欠である。

### 2. 研究の目的

本研究では、将来の新世代ネットワークで求められる多様な要求品質をもつ情報フローの大量通信が可能な大規模無線アクセス網の実現を目的としている。これまで個々の技術として研究されてきたマルチチャネル化、ネットワークコーディング (NC) 伝送、通信品質 (QoS) 制御について、各方式を改良強化しつつ相互に連携させることで、ネットワーク全体と通信フローの両単位で通信容量のさらなる大容量化を図る。また、無線ネットワークとインターネットを接続するゲートウェイ付近のネットワークに直接適用可能な方式として確立する。これにより、無線ネットワーク最大の通信ボトルネックを解消する。

### 3. 研究の方法

まず、NC 伝送と QoS 制御の連携方式を確立する。具体的には、各通信フローの要求 QoS に応じたコーディングパケットの選択法や各パケットの優先度、コーディング状況に基づいて送信対象パケットや送信順序を決めるスケジューリング法について、詳細に検討

する。この方式との連携を考慮しつつ、ゲートウェイ - 無線ノード間の通信についてマルチチャネル化により容量向上を図る。マルチチャネル化はゲートウェイが  $N$  個装備した各送受信機と各無線ノードが異なるチャネルで通信することで可能となり、ネットワークで利用可能なチャネル数も  $N$  となる。よって、本ネットワーク環境でのマルチチャネル化は、無線ノード群を  $N$  チャネルにどのように分配するかという問題に帰着できる。そこで、チャネルごとのデータ通信量の均等化、異なるチャネルを用いた同時並行通信時間の最大化、隠れ端末局問題によるチャネル干渉の最小化を目的としたチャネル分配法を詳細に検討する。その後、マルチチャネル化と NC 伝送、QoS 制御の相互連携方式を設計、確立し、想定環境を進展させた研究課題に取り組む。

### 4. 研究成果

主な研究成果として、NC 伝送と QoS 制御の連携、マルチチャネル化方式、および発展課題であるフロー発生レートが送信局によって異なる環境への対応について、以下で説明する。

#### (1) NC 伝送と QoS 制御の連携

QoS 制御方式として、無線 LAN 環境で広く用いられている IEEE 802.11e EDCA に注目し、ロスしたパケットに NC を適用する NC 再送との適応的連携方式を下記の 1) の規律に基づいて確立した。

コーディングパケットの選択と NC 再送の可否判定

EDCA の優先度クラスとして定義されている Access Category (AC) について、優先度が高い順に AC\_VO、AC\_VI、AC\_BE を想定する。ある AC がバックオフ待機を終了した場合、基地局 (ゲートウェイに相当) はまず以下の流れに基づいて NC 再送が可能か判定する。

ロスパケットの再送重要度を表すため、筆者らの先行研究<sup>1)</sup>で定義した「スコア値」を用いる。スコア値が高いほど、当該ロスパケットを再送することで QoS がより向上することを意味する。ある AC (AC\_fin と定義する) がバックオフ待機を終了した場合、基地局はまず選択候補となるロスパケットを AC に関係無くスコア値が高い順に整列する。整列後、まずスコア値が最も高いロスパケットを XOR 演算によりエンコードされる対象のパケット群である「XOR パケット群」に加える。次に、残りのロスパケットについて、整列した順に XOR パケット群内のロスパケットと NC

<sup>1)</sup> Y. Tanigawa, J.-O. Kim, and H. Tode, "Delay-Sensitive Retransmission Method based on Network Coding in Wireless LANs," IEICE Transactions on Communications, vol. E93-B, no. 12, pp. 3345-3353, Dec. 2010.

再送可能条件を満たすよう XOR エンコードが可能か逐次的に判定し、可能と判断された場合は XOR パケット群に加える。ここで、NC 再送可能と判定される条件は、XOR パケット群を構成する全ロスパケットの宛先端末局が当該ロスパケットを傍受しており、かつ当該パケットの宛先端末局が XOR パケット群内のロスパケットを全て傍受していることである。以上のような逐次判定を行い、2 つ以上のロスパケットが XOR パケット群として選択された場合、それらを XOR 演算することで XOR パケットを作成し、NC 再送が行える。ただし、EDCA のポリシーに従い、XOR パケット群に AC\_fin に属するパケットが少なくとも 1 つ含まれる場合にのみ、NC 再送を許可する。

#### 送信対象パケットの選択

NC 再送の可否を判定した後、基地局は以下に示す手順で送信対象パケットを選択する。なお、選択されたパケットは、AC\_fin を用いて送信される。

#### (i) NC 再送するか判定

上記で説明した手順により NC 再送が可能と判断された場合、作成した XOR パケットを送信する。一方、NC 再送が不可能な場合、次の(ii)に処理が移る。

#### (ii) ロスパケットを単一で再送するか判定

NC 再送が不可能な場合、あるロスパケットを XOR エンコードを行わずに単一で再送するか判定する。ここでは、バックオフ待機が終了した AC に送信権を与えるため、AC\_fin に属するロスパケットが再送対象となる。基地局は、AC\_fin に属するロスパケットについて、上記で導入したスコア値が 0 より大きいパケットがある場合、最大スコアのロスパケットを単一で再送する。この再送を DARQ (Delayed Automatic Repeat reQuest) と呼ぶ。ただし、上記条件を満たさないロスパケットが基地局に留まり続けることを防ぐため、初めてロスが検出されてから  $D_{DARQ}$  期間が経過したロスパケットについてはスコア値が 0 でも DARQ 再送される。一方、再送対象パケットが無い場合、次の(iii)に処理が移る。

#### (iii) 新規パケット送信

(i)(ii)において再送対象パケットが無い場合、基地局は EDCA に基づいて新規パケットの送信を行う。つまり、AC\_fin の送信バッファ先頭パケットが新規送信される。

#### 性能評価

本提案方式の性能を QualNet 4.5.1 を用いた計算機シミュレーションにより評価した。基地局の周りに端末局を一様に固定配置する。各端末局から基地局までの距離は全て 30 m である。基地局は、AC\_VO に属するフロー (パケットサイズ 160 Byte、送信間隔 20 msec)、AC\_VI に属するフロー (パケットサイズ 1024 Byte、送信間隔 20 msec)、または AC\_BE に属するフロー (パケットサイズ 1500 Byte、送信間隔 20 msec) の内 1 フローを 1 端末局につき 1 本ずつ送信する。無線チャンネルの伝送

レートは IEEE 802.11a を想定して 54 Mbps、伝搬距離は 38 m とする。また、最大移動速度を 3 m/s とした Rayleigh フェージングを発生させる。再送制限は IEEE 802.11 と同様に 7 回とする。また、パラメータ  $D_{DARQ}$  は 160 msec とする。この値は、端末局が受信パケットの順序制御を行う際、先に受信した後順パケットを待機させられる最大期間を基に決められている。本評価では、上述の提案方式 (Inter-class XOR) を EDCA および NC 再送を EDCA 環境に直接的かつ最も基本的に拡張した intra-class XOR 方式と比較する。intra-class XOR では、NC 再送を行う際に XOR エンコードされるロスパケット群をバックオフ待機が終了した AC\_fin からのみ選択する。つまり、Inter-class XOR のように複数 AC からロスパケット群を選択しない点が異なる。

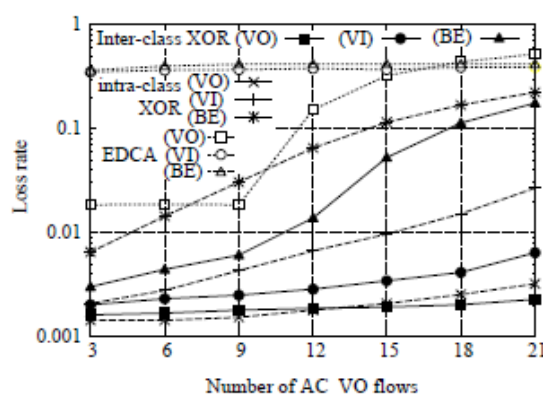


図1 パケットロス率

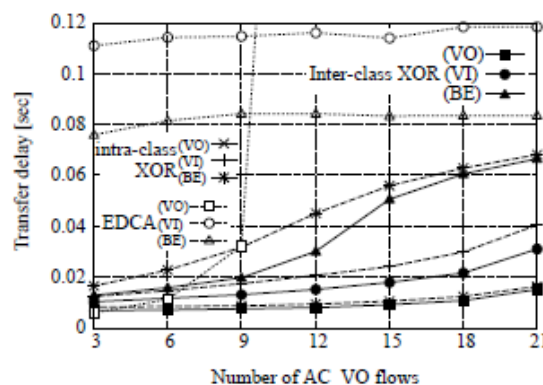


図2 パケット伝送遅延

AC\_VI と AC\_BE のフロー数とともに 12 に固定し、AC\_VI のフロー数を変化させた環境における端末局でのパケットロス率、基地局-端末局間パケット伝送遅延をそれぞれ図 1、2 に示す。

EDCA では、AC\_VO フロー数が小さい場合においても AC\_VO パケットのロス率が 1.8 % を下回ることはない。これは、フロー数に関わらず発生するフェージングによるロスが主要原因であり、EDCA はこのロスに対処できないことを示している。また、AC\_VO フロー数が増加するにつれて AC\_VO フローのパケットロス率、伝送遅延が増加し、AC\_VI および AC\_BE フローについては両指標とも AC\_VO フロー数

が小さい場合から高い値を示している。これは、パケットロスによりチャネル実効帯域が低下してフローの発生レートを下回るためであり、特に衝突によるパケットロスが増加する多フロー数の領域において性能悪化が顕著である。一方、intra-class XOR では、多くの負荷領域において全 AC のパケットロス率、伝送遅延が大幅に低下している。これは、NC 再送によりロスパケットをロスの原因に関わらずより少ない再送回数で効率的に再送するとともに、再送重要度の高いロスパケットの優先的な再送が可能であるためである。Inter-class XOR では、両指標の値がさらに抑制されている。これは、バックオフ待機を終了した AC に属さないロスパケットでも再送重要度が高いものは NC 再送により優先的に再送されるためである。これにより、NC 再送機会が増加するため、必要となる再送回数もさらに減少する。ただし、Inter-class XOR および intra-class XOR では、AC\_VO フロー数が最も小さい領域において EDCA より AC\_VO の伝送遅延が悪化している。これは、NC 再送を行う場合、ロスパケットは基地局で待機する必要があり、ロス検出後直ちに再送が行われる EDCA と比較して再送に要する遅延が増加するためである。また、AC\_VO フロー数が小さい場合には、Inter-class XOR が intra-class XOR より高い AC\_VO のパケットロス率を示している。これは、NC 再送機会が増加すると特定のロスパケットがチャネル状態の悪い宛先端末局へ繰り返し再送され、再送制限により基地局で破棄される頻度が増加するためである。しかし、このような負荷領域においてパケットロス率の絶対値はアプリケーションに影響を与えないほど小さく、より高い負荷領域までパケットロス率を小さく保てる点で Intra-class XOR は有効といえる。

## (2) マルチチャネル化方式

無線 LAN 基地局（ゲートウェイに相当）が送受信機を  $N$  個装備し各送受信機に専用で使えるチャネルを 1 つずつ割り当てることで実現されるチャネルマルチチャネル ( $N$  チャネル) 環境において、下記の機能を有するマルチチャネル化法を確立した。

### 隠れ端末局の探知

各端末局（無線ノードに相当）は、自局  $X$  に対する他端末局  $Y$  の隠れ端末度  $H^{X,Y}$  を下式に基づいて算出、管理する。

$$H^{X,Y} = (CTS^{BS \rightarrow Y} - RTS^{Y \rightarrow BS}) / CTS^{BS \rightarrow Y} \quad (X, Y)$$

ここで、 $RTS^{Y \rightarrow BS}$  は自局  $X$  が端末局  $Y$  から基地局への RTS を一定期間内に傍受した数、 $CTS^{BS \rightarrow Y}$  は自局  $X$  が上記 RTS に対応する基地局から端末  $Y$  への CTS を一定期間内に傍受した数である。0  $H^{X,Y}$  1 であり、値が大きいほど隠れ端末局として影響を受けやすいことを意味する。 $H^{X,Y}$  は、一定期間ごとに指数重み付き移動平均に基づいて計算される。各端末局は、管理する隠れ端末度を基地局へ

送信する RTS に付加して通知する。

### 基地局によるチャネル切替制御

基地局は、各端末局から通知された隠れ端末度と各チャネルにおけるデータパケット通信量を基に、全チャネル分散型と省チャネル型という 2 つの制御目標に従って各端末局を適切なチャネルへ切り替える。

基本的には、両制御目標とも各端末局 ( $X$ ) に対して隠れ端末局となる局 ( $Y$ ) の  $H^{X,Y}$  の合計値が最も小さいチャネルへの切替を指示する。ここで、全チャネル分散型においてはさらに隠れ端末局から基地局へのデータパケット伝送量の小さいチャネルへの切替を、省チャネル型においてはデータパケット通信量の小さいチャネルに属する端末局に対して通信量に余裕のある別チャネルへの切替をそれぞれ促進させる。

### 性能評価

本提案方式の性能を QualNet 4.5.1 を用いた計算機シミュレーションにより評価した。基地局を中心とした半径 300 m の円内に、端末局をランダムに配置する。無線チャネルの伝送レートは 2 Mbps、チャネル数は 8、伝搬距離は約 340 m とし、各端末局はパケットサイズ 512 Byte、送信間隔 20 msec のフローを基地局へ送信する。また、最大移動速度を 1.0 m/s とした Rayleigh フェージングを発生させる。

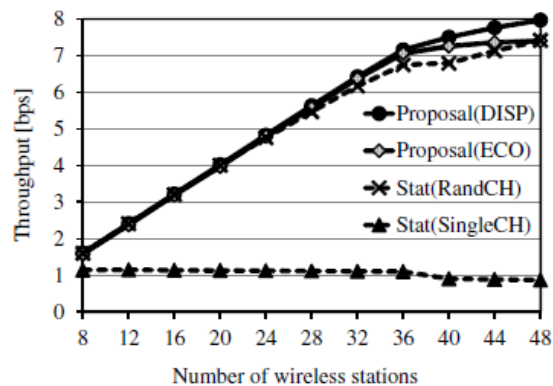


図 3 伝送スループット

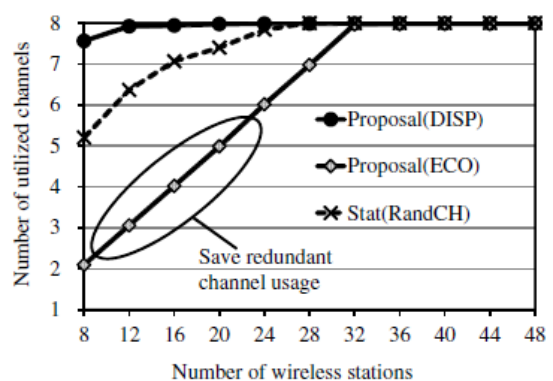


図 4 利用チャネル数

図 3、4 は、それぞれ基地局における総受信スループット、平均使用チャネル数を表している。凡例について、Proposal (DISP)、Proposal (ECO) はチャネル切替制御に全チャネル分散型と省チャネル型をそれぞれ適用



した提案方式である。Stat はチャンネル切替制御を行わない方式で、Stat (RandCH)は各端末局の利用チャンネルをランダムに設定しており、Stat (SingleCH)は全端末局に同一チャンネルを割り当てる。図 3 より、Static (SingleCH)では端末数が増加してもスループット性能は 1.1 Mbps ほどで停滞している。これは、全端末局の合計送信レートが単一チャンネルで利用できる実効帯域を超えたためである。Stat (RandCH)、Proposal (ECO)は端末局数の増加に伴い、受信スループットも向上している。しかし、端末数が 36 を超えるとその性能は頭打ちになっている。一方、Proposal (DISP)は端末局数が多い高通信負荷環境においても、他の方法に比べ安定して高いスループット性能を示している。これは、隠れ端末探知に基づき各端末局を適切なチャンネルへ切り替える制御により、干渉の少ないチャンネルの割り当てを行えたためである。一方、Proposal (ECO)ではチャンネルを最大数使用する Stat (RandCH)と同程度のスループット性能を得ているにもかかわらず、チャンネル利用数が低く抑えられている。これは、ネットワーク全体の通信負荷に応じて過不足のないチャンネル割り当てを行えるためである。

### (3) フロー発生レートが送信局によって異なる環境への発展

#### 基地局によるチャンネル切替制御

本発展では、ネットワーク全体での通信帯域に余裕がある場合、各通信フローに対して発生レートの大小に関わらず十分な通信帯域が割り当てられるよう各端末局の所属チャンネルを決定する。発生レートに応じた通信帯域の割り当てを実現するため、基地局および各端末局が送信バッファ内に保持している未送信パケットについて、パケット量の大小によらず全パケットの送信を完了するのに要する時間 ( $T_{comp}$ ) をバックオフ待機時間やパケット衝突による再送時間を考慮して算出する。さらに、各端末局からの上りフローである  $T_{comp}$  と、その端末局への下りフローである基地局の  $T_{comp}$  の和を各端末局の  $T_{compB}$  と定義し、各端末局間で  $T_{compB}$  を均等化させることを目標に各端末局の所属チャンネルを適応的に制御する。 $T_{compB}$  を算出する流れの概要は以下の通りである。

チャンネル内に  $n$  個のパケット送信端末局が存在するとき、各端末局が送信したパケットが衝突する確率  $p$  は、(1)式のように表される。

$$p = 1 - (1 - 1/W_{avg})^{n-1} \quad (1)$$

ここで、 $W_{avg}$  はコンテンツンウインドウの平均長である。この式は、各送信局は常に送信バッファ内に未送信パケットを保持していることを前提としているが、本研究で想定する環境では、バッファ内のパケット数は通信状況によって変化するため、 $n$  の値も変化する。そこで、(1)式を用いて各パケットの衝突率  $p$  を算出する際、 $n$  の値については図

5 に示すように送信バッファ先頭からの「順番 ( $k$ )」が同じパケットの数を近似的に用いる。

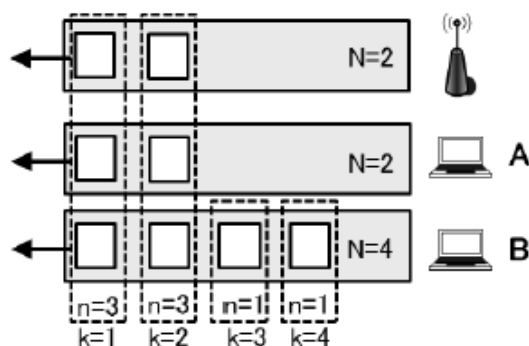


図 5 各パケットに対する  $n$  の決定指針

図 5 の例では、全ての送信局が同一チャンネルにある場合、基地局数が 1、端末局数が 2 であり、送信バッファ先頭から 1、2 番目の各パケットについては基地局および 2 端末局全てで該当するパケットが存在するため  $n = 3$  として扱われ、先頭から 3、4 番目の各パケットについては端末局 B にのみ該当するパケットが存在するため  $n = 1$  とする。パケット衝突が発生した場合、衝突したデータパケットの再送と対応する ACK 返信に要する時間およびそのデータパケット送信までのバックオフ待機時間が追加が必要となる。この追加時間とパケット衝突率より、送信局ごとに各送信バッファ内パケットを全て送信完了させるのに要する時間の期待値として  $T_{comp}$  を算出する。

#### 性能評価

本提案方式の性能を QualNet 4.5.1 を用いた計算機シミュレーションにより評価した。基地局の周りに端末局が一様に配置されており、基地局から各端末局までの距離は 1~38 m の範囲で一様に分布している無線 LAN を考える。このようなシミュレーションモデルにおいて、基地局と各端末局間で上下フロー通信が存在する環境を想定し、総チャンネル数を 4 にした条件で評価を行う。無線チャンネルの伝送レートは 54 Mbps、伝搬距離は 38 m とし、基地局および各端末局はパケットサイズ 1024 Byte の UDP フローを 1 送信局につき 1 本ずつ送信する。

各フローの発生レートが時間経過とともに変化する環境において、提案方式の性能を評価する。具体的には、各端末局は上下各フロー 3 Mbps、合計 6 Mbps のレートでパケットフローを発生させる高発生レート端末局、上下各フロー 1 Mbps、合計 2 Mbps のレートでパケットフローを発生させる低発生レート端末局、およびパケットを発生させない OFF 端末局の 3 状態に分類される。各端末局は、1 秒ごとにこの 3 状態の内の 1 つにランダムに遷移する。ただし、高発生レート端末局数および OFF 端末局数はそれぞれ常に 5 および 4 とし、低発生レート端末局数を変えることで総端末局数を変化させながら評価す

る。本性能評価では、提案方式 (Proposed) を、チャンネル切替制御法として上記(2)で述べた全チャンネル分散型を用いる DISP、各チャンネルに存在する端末局の数のみが均等になるようにチャンネルを割り当て、シミュレーション途中でのチャンネル切り替えを行わない Random と比較する。

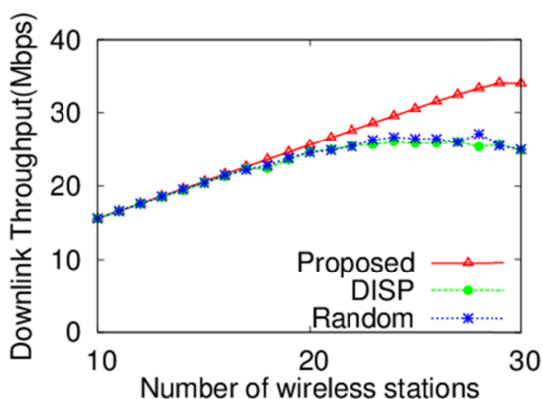


図6 下りフローの伝送スループット

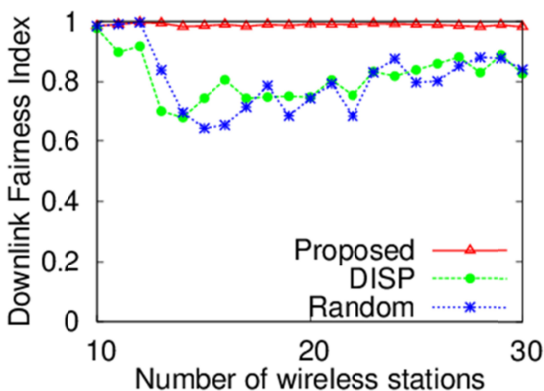


図7 下りフローの送信バッファ滞在時間に関する公平性

図6は、本環境における下りフローの伝送スループットを表している。図6において、総端末局数が増加するにしたがい、ProposedはDISPやRandomよりも高い下りフローの伝送スループットを達成している。これは、RandomやDISPでは、4チャンネルの総通信帯域に余裕があるにもかかわらず通信帯域が不足するチャンネルが発生する一方、Proposedでは、各チャンネルを有効利用できるように各フローの発生レートに応じて端末局を適切なチャンネルに所属させるためである。図7は下りフローに属するパケットの送信バッファ滞在時間に関する Fairness Index を表している。図7より、Proposedでは他の方式よりも高い公平性を維持していることがわかる。これにより、提案方式における各パケットの送信バッファ滞在時間を均等化させる制御が有効に機能していることが示されている。なお、紙面の都合上グラフの掲載は省略するが、上りフローの通信スループットは方式間で大きな差が見られず、上りフローに属するパケットの送信バッファ滞在時間に関しては全ての方式で高い公平性が達成されることを確認している。これは、全フロー

が基地局から送信される下りフローに比べ、上りフローは各端末局から分散して送信されることで通信帯域に十分な余裕があるためである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Y. Tanigawa, J.-O. Kim, and H. Tode, "QoS Control Method based on Adaptive Cooperation between Network Coding and IEEE 802.11e EDCA," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E96-B, no. 2, pp. 430-440, Feb. 2013, 査読有, DOI: 10.1587/transcom.E96.B.430.

〔学会発表〕(計17件)

T. Teramura, Y. Tanigawa, and H. Tode, "Adaptive Channel Selection Control Equalizing Sojourn Time of Sending Packets inside Wireless Stations in Wireless Access Networks," *Proceedings of IEEE CCNC 2015*, pp. 97-102, Las Vegas, USA, Jan. 2015, 査読有.

Y. Tanigawa, S. Matsuda, and H. Tode, "Adaptive Channel Selection Control Saving Its Redundant Usage Based on Hidden Stations in Wireless Access Networks," *Proceedings of IEEE LCN 2012, WLN 2012*, pp.765-770, Clearwater, USA, Oct. 2012, 査読有.

Y. Tanigawa, J.-O. Kim, and H. Tode, "QoS-Aware Retransmission with Network Coding based on Adaptive Cooperation with IEEE 802.11e EDCA," *Proceedings of IEEE Globecom 2011*, 5 pages, Huston, USA, Dec. 2011, 査読有.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

谷川 陽祐 (TANIGAWA, Yosuke)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90548497