

推薦論文

過密干渉環境における 無線LANチャネルの性能予測手法

梶田 宗吾^{1,a)} 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 梅原 茂樹² 齊藤 文哉² 浦山 博史² 山田 雅也²
前野 誉³ 金田 茂³ 高井 峰生^{1,4}

受付日 2015年4月21日, 採録日 2015年11月5日

概要: 本研究では, 基地局が密に設置されているような都市環境において, Wi-Fi のチャネルで予想される被干渉の程度を, フレーム監視により得られる各チャネルでの干渉トラフィックと RSSI, ならびに隣接チャネルの使用パターンに基づき相対的に予測する手法を提案する. これにより, 各チャネルにおける絶対性能値を推定するのではなく, 複数のチャネルから相対的に良好なチャネルを選択することを目的とする. 予測は事前に代表値を用いた網羅的シミュレーションとその重回帰分析によって得た性能影響予測モデルを用いて行うが, その際, なるべくシミュレーション総数を抑制しながら網羅性を維持する方法を提案している. 提案手法を評価するため, 複数の基地局の干渉が予想される現実的なシナリオにおいてシミュレーション実験を行った結果, 最良の性能を達成可能なチャネルを推定し, かつチャネル間の相対性能による順位が実測とほぼ一致したことを, Spearman の順位相関により確認した.

キーワード: 無線 LAN, 都市環境, 干渉, チャネル選択

An Algorithm for Estimating the Performance of WLAN Systems with Severe Interference

SHUGO KAJITA^{1,a)} HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹ SHIGEKI UMEHARA²
FUMIYA SAITOU² HIROFUMI URAYAMA² MASAYA YAMADA² TAKA MAENO³ SHIGERU KANEDA³
MINEO TAKAI^{1,4}

Received: April 21, 2015, Accepted: November 5, 2015

Abstract: This paper presents a method to estimate the performance of WLAN systems in urban areas. We consider (i) inter-channel interference where adjacent channels interfere with each other in Wi-Fi systems and (ii) urban situations where many APs in different systems are deployed in an uncoordinated way. As it is often hard to identify the channel with less interference in such a situation, we present a channel scoring function that estimates the performance level of each channel. To build the scoring function, we have conducted exhaustive simulations with a large number of scenarios, and multiple regression analysis has been applied where channel occupancy patterns, traffic volumes and RSS in those channels are used as explanatory variables. To evaluate our method, this scoring function was examined with realistic scenarios where several APs interfere with the AP of interest. We have confirmed that the scores and the actual performance are well-matched where the Spearman's rank correlation coefficient was sufficiently high.

Keywords: WLAN, urban areas, interference, channel selection

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 住友電気工業株式会社
Sumitomo Electric Industries, LTD., Osaka 554-0024,
Japan

³ スペースタイムエンジニアリング
Space Time Engineering, Chiyoda, Tokyo 101-0025, Japan

1. はじめに

Wi-Fi は近年, 3G や LTE 通信網のオフローディング

⁴ カリフォルニア大学ロサンゼルス校
University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA
90095, USA

a) s-kajita@ist.osaka-u.ac.jp

の有力な手段として注目を集めており、多くのサービスプロバイダが都市の至るところに Wi-Fi 基地局を設置している。たとえばアメリカの大都市では AT&T や Time Warner Cable などが屋外の公衆 Wi-Fi 基地局を提供しており、日本の携帯電話会社も各社が都市部の商業施設を中心に Wi-Fi 基地局を展開している。また、ライセンス不要の産業科学医療用バンド (ISM バンド) は医療機器やコードレスフォンなどの非無線 LAN 通信機器も利用している [1]。高度交通システム (ITS) の路路間通信ならびに路車間通信への応用も研究されつつあり、たとえば路肩に設置したカメラセンサなどから取得した車両感知情報と周辺信号に設置された路側機からの路車間収集情報を路側機間で ISM バンドを介して共有することにより、サービス提供者および機器導入の必要があるサービス享受者の双方に対し低コストな高度交通制御サービスを提供できる可能性もある。

このように、ISM バンドを活用した多種多様な通信システムが期待される反面、固定および移動基地局数とそのクライアント数、トラフィックは増加の一途をたどり、干渉による接続品質への影響が深刻化している [2]。たとえば図 1 のように、都市部では干渉源となり得るオフィスの基地局、コンビニやショップ、カフェに設置された公衆無線 LAN サービス用基地局、移動体としてのモバイルルータや車載 Wi-Fi などが一過のあるいは継続的にトラフィックを発生するため、その継続時間や干渉強度によっては通信品質に与える影響が無視できない。ライセンス不要の帯域、あるいはライセンス帯域だが複数のサービス提供者がコーディネートされていない帯域では無秩序的に帯域が利用されており、無線ネットワークを使った安価な新規サービス参入への障壁ともなりうる。したがって電波活用と産業や新サービス創出・促進の観点からは、このような環境下でもロバストで自律適応性の高い周波数チャネル制御を提供できることが望まれる。

IEEE 802.11 (CSMA/CA) のような自律型メディア共有型無線通信においてリアルタイム性やスループットを保持するためには、フレーム誤りとそれにとまらぬフレーム再送、ならびに空間競合による通信機会損失による影響を

できるだけ軽減することが求められる。ここで、被干渉源が同一フロア内に密集し、かつある程度利用チャネルが管理者により制御されているオフィスなどの屋内環境とは異なり、都市屋外環境では前述のように、道路沿いのコンビニエンスストアや半屋外のカフェ、オフィスビル内など広範囲にわたり面的に設置された固定 Wi-Fi 基地局から様々な影響を受ける。また移動 Wi-Fi 基地局 (モバイルルータや車載 Wi-Fi) も存在し、様々な地理的位置やクライアント数においてトラフィックを生じる。また、IEEE 802.11b/g における 2.4 GHz 帯チャネルは計 13 であるが、それらの中心周波数からの利用帯域幅を考慮した場合、物理周波数では重なりが存在するため、互いにまったく干渉しないチャネルは最大 3 チャネルであり、利用チャネルが異なる場合でも干渉が生じる。特に、異なるチャネルからの干渉など、干渉信号強度が比較的低い場合、キャリアセンスによる空間利用の排他制御がなされないため、逆にフレームエラー発生率が増加しフレーム再送によるスループット低下が生じる可能性もある。このような干渉源とその影響は一様でないため、それらの状況を把握したうえでの干渉対策が望まれる。

本論文では、当該システムにおいて観測される他システムのチャネル使用パターン、およびチャネルごとのトラフィックと平均 RSSI を IEEE 802.11 のデータフレームの監視により取得し、その情報を入力として、当該システムが各チャネルを使用した場合に予想される遅延およびフレーム到達率を相対的に求める手法を提案する。提案手法では、あらかじめ他システムの基地局とクライアントの位置、通信量および他システムのチャネル使用パターンを変化させた網羅的シミュレーションを行い、その結果を重回帰分析することで、他システムが各チャネルに与える影響の程度を数値化する関数を設計している。その際、段階的な重回帰分析を行うことでシミュレーション総数を削減する工夫をしている。シミュレーションは物理層 (OFDM サブチャネル) からアプリケーションシナリオまでを統合的にシミュレーション可能な Scenargie 1.7 [3] で実施している。

提案手法の性能評価のため、提案手法を現実的なシナリオで評価した。150 m × 150 m の領域で計 100 台の固定基地局およびクライアントが当該システムに干渉するシナリオにおいて、Spearman の順位相関を用いて、提案手法によるチャネルランキング (相対性能値に基づくチャネル順位) とシミュレーションに基づくチャネル順位の相関を調べた結果、相関係数は十分に高く、かつ最良のチャネルを選択できたことが確認できた。



図 1 都市部における Wi-Fi 干渉源の例

Fig. 1 Interference Sources in Urban Areas.

本論文の内容は 2014 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2014) シンポジウムにて報告され、モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

2. 関連研究

セルラ網においては、セル間の干渉を回避する手法についてこれまでに研究が盛んに行われている。たとえば、セル境界周辺のユーザには異なる周波数帯を割り当て、基地局周辺のユーザには同一の周波数帯を割り当てるといった Fractional Frequency Reuse (FFR) とよばれる技術がある。これにより基地局遠方のユーザの被干渉を軽減することができる [4]。基地局をクラスタ化するような協調的なネットワーク制御方式 [5], [6] もセルラ網に対しては有効であるが、汎用の CSMA/CA システムを対象としたものではない。文献 [7] では、自律分散型の無線ネットワークにおいて様々な時間、周波数、領域空間に対する必要資源数やネットワーク性能の解析が行われている。文献 [8] では自律分散的に送信電力と必要資源を調節する技術が提案されている。

Bluetooth などのシステムは、あらかじめ準備されたシーケンスに従ってチャンネルホッピングを行い、特定チャンネルから受ける干渉の影響を低減する。しかし、チャンネルホッピングは広帯域に影響を与えることが課題となる。また移動先のチャンネル状態を考慮しないチャンネルホッピングはその効果が限定的になり、ホッピングのオーバーヘッドも無視できない。また Wi-Fi はチャンネルホッピングを想定した機構でないため、基地局とクライアント間のアソシエーションがオーバーヘッドとなる。文献 [9] のように動的にチャンネルシーケンスを作成する手法もあるが、結果としてモニタリングなどによるチャンネル状態の推定が必要となる。

RSSI 情報のモニタリングはチャンネルの品質推定などにしばしば用いられるが、文献 [10] で指摘されているように、第 2 層での性能を推定するためには SNR や RSSI のみでは不十分である。文献 [11] では、キャリアセンスによりバックオフの発生を推測する確率モデルを利用することで、IEEE 802.11 MAC におけるフレーム衝突の確率やロス確率を推定している。一方で、近年の研究 [12] では商用の Wi-Fi カードから得た RSSI の情報のみを利用し正確に非 Wi-Fi 機器の種別判定を行う手法が提案されている。これは RSSI の情報を短波波形としてモデル化し機械学習させることにより実現しており、本研究でも非 Wi-Fi 機器からの干渉判別に活用できると考えられる。

過密な Wi-Fi 基地局の設置に対して動的にキャリアセンスの閾値の調整を行う手法や送信レートを調整するアルゴリズムも従来より研究されている。文献 [13] では、Wi-Fi 基地局が密集する環境において、多くの基地局は初期設定で最大出力で動作するように設定されており、不必要な干渉が発生しているといった興味深い事実を指摘している。しかし、基地局によって送信電力の調整を行うと単方向リンク化が発生してしまう可能性があるため、文献 [14] では、クロスレイヤ方式で送信電力の調整を行い、トラフィック

負荷が高い基地局の送信電力を大きくすべきであると提案している。また文献 [15] では、複数の基地局が相互干渉する環境における分散型のチャンネル選択アルゴリズムとクライアントの基地局選択方法を述べている。クライアントは干渉と送信遅延を測定するだけでよく、多くの観測情報が必要としない利点があるが、公平性を目的としている点で提案手法とは異なる。なお、[14], [15] はいずれも Gibbs サンプルングによる統計的推測を行っているが、本研究でもこれらの観測学習手法は性能影響モデルのオンライン構築などに活用できると考えられる。

これらに対し、提案手法では様々な Wi-Fi システムが混在する都市部において、同一チャンネルおよび近接チャンネルから被る干渉の影響を定量的かつチャンネル相対的にスコア化することを目指している。干渉源がどのチャンネル群を利用しているかおよびそのチャンネルをどの程度占有しているのか、それに加えて RSSI を IEEE 802.11 のフレーム監視により統計化し、数値化の入力としている。それらの観測値を用いて予測を行うために、観測値の代表値に対する通信性能への影響度予測関数をあらかじめ網羅的なシミュレーションとその重回帰分析によって作成する。提案手法では、RSSI およびトラフィックといった容易に測定可能な値のみを用いてチャンネルの通信性能のランク付けを行う点で従来手法とアプローチが異なる。

3. 提案手法の概要

提案手法では複数の基地局やクライアント、モバイルルータが密に混在するような都市環境を想定し、都市環境に設置した IEEE 802.11g 基地局（以下では対象 AP とよぶ）が各チャンネルにおいて達成可能な通信性能を相対的に数値化する手法を提案する。ここで、対象 AP の通信性能として、第 2 層において正しく到着したデータフレームの遅延時間（以下、単に遅延とよぶ）、および第 2 層においてデータフレームが正しく到達する割合（以下、単にフレーム到達率とよぶ）を用いる。なお、第 2 層ではフレーム破損や損失による再送が発生するが、再送の有無にかかわらず、そのフレームがはじめて送信された時刻とそのデータフレームがはじめて正しく到着した時刻の差を遅延と定義する。また、フレーム到着率の計算対象には、第 2 層での再送による重複フレームは含めない。なお、第 4 層 (TCP など) で再送が行われる場合、第 2 層ではそれを把握しないため、結果として再送データはフレーム到着率の計算対象となる。前述のように、Wi-Fi チャンネルの割当ポリシーが規定されている環境（たとえば屋内環境）においては、チャンネル割当の静的事前設計が可能であるが、複数基地局が制御されずに混在する屋外環境ではそのような静的割当では困難である。屋外における Wi-Fi 利用シナリオとして、たとえば図 2 のように交差点付近に設置された路側機において、Wi-Fi システムと同じあるいは類似の周波数帯およ



図 2 想定環境
Fig. 2 Situation Example.

び制御方式 (CSMA/CA) によって道路上の車両との情報交換サービスを実現するような状況などがあげられる。

提案手法では、対象 AP において IEEE 802.11 MAC フレームのモニタリングおよび RSS 検出を行うことを想定する。これにはたとえば Atheros 社の WLAN チップセットを使用し、プロミスキャスモードを用いたり、あるいは Riverbed 社の AirPcap のようなコンシューマデバイスを用いることで比較的容易に実現できる。しかし、監視するチャンネルの数が増加すると必要となるチップセットやデバイスの数も増加するため、提案手法では監視するチャンネルを限定している。対象 AP では一定時間ごとに監視するチャンネルを切り替えて全チャンネルを監視し、定期的に干渉源が使用しているチャンネル群を取得する。その後、監視するチャンネルを干渉源が使用しているチャンネル群に限定して監視を行い、チャンネルごとのトラフィックおよび RSSI の情報を収集する。

複数の基地局が様々なチャンネルや設置箇所でのトラフィックを発生する都市環境において、それらからの干渉による通信性能への影響を推測することは容易ではない。たとえば、後述する性能評価においては、IEEE 802.11g の基地局がチャンネル 1, 6, 11 を利用しているシナリオを用いているが、近接チャンネルのトラフィックや RSSI、および同一チャンネルのトラフィックや RSSI が様々な組合せを生みだし、各チャンネルにおける性能推定を困難にしている。詳細な結果は 5 章で述べるが、使用されていないチャンネルであっても通信性能が良好であるとは限らず、使用されているチャンネル 1 が最も良好であるという結果が出ている。提案手法では、各チャンネルにおける Wi-Fi 干渉源によるトラフィックおよび RSSI、そしてそれらが使用しているチャンネル使用の情報から、それらの干渉源が各チャンネルに与える影響の程度を数値化する関数（以下、スコア化関数とよぶ）を設計する。

4. 提案手法の詳細設計

4.1 スコア化関数のパラメータ設計

以下では、各チャンネル k を用いている基地局またはクライアント（対象 AP とそのクライアントを除く）を干渉源とよび、その集合を $I(k)$ で表す。提案手法では、各チャネ

ルにおける IEEE 802.11 MAC のフレームモニタリングによって干渉源についての情報を得るものとする。これは、干渉源となる基地局群やそれらのクライアント群が送信するデータフレームが対象 AP の通信性能に対し大きな影響を与えるという想定に基づいている。

まず、チャンネル k において（対象 AP で観測される）平均 RSSI を指標として導入する。 $s(k)$ は一定期間に観測されるチャンネル k のデータフレームの平均 RSSI を $[0,1]$ で正規化したものであり、これを本論文では **RSS** インジケータとよぶ。 $s(k)$ は以下の式で表され、 $I(k)$ における干渉源から送信されるデータフレームの平均 RSSI ($SS_{ave}(k)$) から求められる。

$$s(k) = \begin{cases} \frac{SS_{ave}(k) - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} & \theta_{max} \geq SS_{ave}(k) \\ 1 & \theta_{max} < SS_{ave}(k) \end{cases} \quad (1)$$

θ_{min} および θ_{max} はフレーム受信時の最小 RSSI と最大 RSSI であり、本論文では θ_{min} を -90 dBm とする。これは、IEEE 802.11g における最低のフレーム受信閾値である -88 dBm を含む値として設定している。また、 θ_{max} については、実際の都市部の屋外での測定実験などもふまえ、 -50 dBm 程度で十分であると考えているが、 $SS_{ave}(k) > -50$ dBm となる場合も $s(k)$ の値が 1 を超えないように定義している。

次に、チャンネル k のトラフィックを示す指標 $t(k)$ を導入する。 $t(k)$ は $I(k)$ におけるすべての干渉源から 1 秒あたりに送信されるデータフレームのバイト総和（第 2 層における MAC ヘッダや FCS を含むデータフレームバイト数総和） $d(k)$ を IEEE 802.11g で規定されるデータレート b を用いて $[0,1]$ で正規化したものである。これを本論文ではトラフィックインジケータとよぶ。

$$t(k) = \frac{8 \cdot d(k) + b \cdot q(k) \cdot T_{preamble}}{b} \quad (2)$$

データフレームが送信される前には第 1 層の制御情報が付加されているが、第 2 層では見ることができないため補正を行う。 $q(k)$ は $I(k)$ におけるすべての干渉源から 1 秒あたりに送信されるデータフレームの受信回数の総和を表し、 $T_{preamble}$ は第 1 層の制御情報が送信される時間の長さを表す。これにより、受信した各データフレームの直前に送信されている第 1 層の制御情報による帯域の占有期間を補正している。IEEE 802.11g における $T_{preamble}$ の長さは 20μ 秒である。

最後に、チャンネル間距離を表す指標 $c(c_{target}, k)$ を導入する。 $c(c_{target}, k)$ は、対象 AP の使用チャンネル c_{target} と少なくとも 1 つの干渉源が使用しているチャンネル k との差の絶対値を $[0,1]$ で正規化した値である。本論文ではこれをチャンネル間距離インジケータとよび、以下で定義する。

$$c(c_{target}, k) = \frac{|c_{target} - k|}{C_{max}} \quad (3)$$

ここで、 c_{max} は 2 ノードが干渉の影響を受けるチャンネルの差の最大値である。事前実験により、使用チャンネルが 4 以上離れた 2 ノード間の干渉は RSS インジケータやトラフィックインジケータの値が変化してもほとんど影響を与えないことを確認している。事前実験の詳細は 4.2.2 項で述べる。提案手法では $c_{max} = 3$ としており、 $|c_{target} - k| > c_{max}$ となるような干渉源は考慮しない。

なお、平均 RSSI や IEEE 802.11g のデータレートは第 1 層の情報であるが、商用の Wi-Fi デバイス（たとえば Atheros のチップセット）などを用いれば、通常用途で提供されるドライバを用いることで得られる（たとえばそれらのパラメータ情報は `iwconfig` コマンドで確認できる）。

4.2 重回帰分析によるスコア化関数の構築

4.2.1 基本方針

各チャンネルにおいて対象 AP の通信性能を推定するためには、RSSI、トラフィック、チャンネル間距離といったパラメータが通信性能に対しどの程度の影響を与えるかを事前に理解する必要がある。しかし一般には干渉源群が複数のチャンネルを使用しており、RSSI やトラフィックの組合せ総数も膨大となるため、その事前知識の構築と整理は容易でない。たとえば、対象 AP がすべてのチャンネルをスキャンした結果、いくつかのアクセスポイントがチャンネル 2 と 8 で大容量のトラフィックを発生しているが RSSI は小さく、逆にチャンネル 5 と 11 で複数の基地局からの強い RSSI を観測しているがトラフィックはそれほど大きくないようなシナリオを考える。この場合、対象 AP においてどのチャンネルで通信することが最良かは単純に決定できない。一般的にはいずれの基地局も通信を行っていないチャンネル 3, 4, 6, 7 が良好と考えられるものの、チャンネル 2 や 8 からのトラフィックが大きい場合、その近接チャンネルでの通信はそれらのトラフィックが競合フレームではなくノイズとして干渉することになるため、結果として SNR が不足しフレーム誤り率が増大する恐れもある。

こういった組合せ判定の困難さを克服するため、提案手法では網羅的シミュレーションを行い、干渉の影響を推定するためのデータセットを生成し、それを線形重回帰分析することで、RSS インジケータ、トラフィックインジケータ、およびチャンネル間距離インジケータから性能の程度を表すスコアを算出する関数を構築するアプローチを採用する。ここで線形重回帰分析とは多変量解析で用いられる分析手法の 1 つであり、観測値を説明する独立変数群の線形和からなる多項式を用意し、観測値を最もよく説明するような線形係数を決定する手法である。

しかし、すべての可能性を考慮しデータセットを構築することは膨大なシミュレーションシナリオを準備・実行する必要があり現実的ではない。以下では組合せによるシナリオ数増大について議論する。対象 AP と干渉源間の設定

距離および干渉源トラフィック設定値（いずれも離散値）の総数をそれぞれ n_s および n_t と表す。このとき、シミュレーションシナリオ総数は

$$\sum_{h \in 1..2c_{max}+1} \left\{ {}_{(2c_{max}+1)}C_h \cdot (n_s \cdot n_t)^h \right\} \quad (4)$$

で表される（ C は組合せ（コンビネーション）を表す）。上式では、 ${}_{(2c_{max}+1)}C_h$ は h チャンネルの使用パターン数を示している。チャンネル使用パターンとは、対象 AP が使用しているチャンネルから干渉源が使用しているチャンネル間の相対的な距離の組を表す。たとえば、対象 AP がチャンネル 6 を使用し、干渉源がチャンネル 3, 5, 7 を使用している場合、この 3 チャンネルのチャンネル使用パターンは $(-3, -1, 1)$ と表される。 $(n_s \cdot n_t)^h$ は h チャンネルのそれぞれの使用パターンについて RSSI とトラフィックのパターンの数を示している。 $n_s = n_t = 30$ で $c_{max} = 3$ とした場合、その総数は約 4.8×10^{20} となる。これに対し、なるべく網羅性を維持しながら、総数を減らすことが望まれる。提案手法では、チャンネル使用パターンの対称性を利用しシミュレーションケースの削減を行う。これにより、前述のチャンネル使用パターン $(-3, -1, 1)$ での結果はチャンネル使用パターン $(-1, 1, 3)$ の結果と同一であると見なす。したがって、 h チャンネルの使用パターンの数は、

$$\frac{{}_{(2c_{max}+1)}C_h + c_{max} C_{\lfloor \frac{h}{2} \rfloor}}{2} \quad (5)$$

となる。また、提案手法では次の方針に基づき更なるシミュレーションケースの削減を実現する。以下では、 K ですべてのチャンネル使用パターンの集合を表すとする。

- (1) 各 $c(c_{target}, k)$ に対して、 $s(k)$ と $t(k)$ の全組合せによるシミュレーションを実施する。
- (2) 線形重回帰分析を適用し、 $s(k)$ と $t(k)$ に対して性能の予測モデルを得る（これを単一 ICI モデル（単一 Inter-Channel Interference モデル）とよぶ）。単一 ICI モデルは、仮に干渉源群が 1 つのチャンネル k のみを使用しているとした場合に、チャンネル k の RSS インジケータ $s(k)$ およびトラフィックインジケータ $t(k)$ によって、チャンネル c_{target} で通信する対象 AP が受ける干渉の影響を表すモデルである。
- (3) 干渉源によって使用されているチャンネル集合 $\{k_1, k_2, \dots, k_L\} \in K$ に対し、 $s(k_1), t(k_1), s(k_2), t(k_2), \dots, s(k_L), t(k_L)$ および $t(k_L)$ の組み合わせに対してのみシミュレーションを行う
- (4) RSSI、トラフィックおよびチャンネル間距離インジケータに対する最終的なモデルを構築するため、 $f_{single}(k_1), f_{single}(k_2), \dots, f_{single}(k_L)$ の値と、 $c(c_{target}, k_1), c(c_{target}, k_2), \dots, c(c_{target}, k_L)$ を説明変数とした線形重回帰分析を行い性能モデルを得る。この最終的な性能モデルを集約 ICI モデルとよび、 f_{multi} で表す。この f_{multi} を用い通信性能を推定する。

4.2.2 単一 ICI モデル

提案手法では、シミュレーションの結果を分析することによって単一 ICI モデルを構築する。シミュレーションの設定を図 3 に示す。対象 AP に対してそのクライアントを 100m 離れた位置に設置し、クライアントから対象 AP に向けて定期的に UDP プロトコルを用いてフレームを送信する。干渉源も同様にクライアントから基地局へ向けて送信する。これらの通信には、IEEE 802.11g の無線規格を用いており、1 度の送信時のペイロードサイズは 1,470 byte としている。本論文では、対象 AP のデータレートは固定値（シミュレーション設定では 9Mbps）としており、フォールバック機能によるレートの変更は想定していない。ただし、フォールバック機能によりデータレートが変更された場合でも、そのデータレートでの一定期間のフレーム観測が可能であれば提案手法は原理的に適用可能である。しかし頻繁にレート変更が行われる環境では、フレーム観測期間の通信状況とランキング決定時の通信状況が異なることが考えられるため、提案手法の有効性は低下すると想定される。干渉源は基地局とクライアントの組とし、基地局とクライアントの間での異なる $t(k)$ の値を表現するため、トラフィックは Scenargie シミュレータ [3] 上で実装されている iperf の `iperf-udp-rate-bps` パラメータを変化させることで生成した。異なる $s(k)$ の値を表現するため、対象 AP と干渉源基地局の距離を 10m から 300m まで 10m 刻みで変化させた。提案手法では、(i) 対象クライアントから対象 AP に送信したデータフレーム到達率を示すフレーム到達率、および (ii) フレームがクライアント側のキューに入ってから AP 側のキューに入るまでの期間である MAC レイヤにおける遅延、を計測する。

このシナリオにおいて、提案手法では 30 の $s(k)$ の値と 30 の $t(k)$ の値を用いた ($n_s = n_t = 30$)。さらに 4 つの $c(c_{target}, k)$ (式 (5) より $h = 1$) の値を干渉源の AP とクライアントの組に適用したため、シナリオ総数は 3,600 と

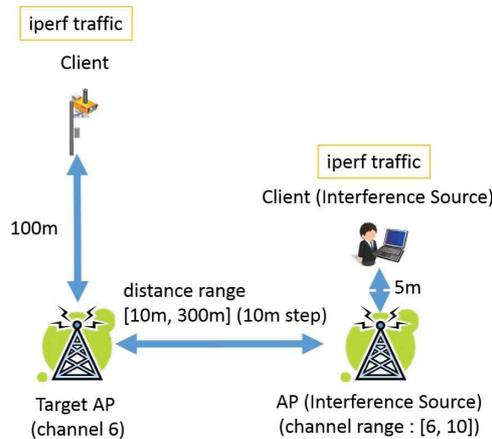


図 3 単一 ICI モデルのシミュレーションシナリオ
Fig. 3 Simulation Scenario for Single ICI Model.

なり、各シナリオに対して 30 秒間のシミュレーションを実施した。

それらに対する線形重回帰分析においては以下の線形関数を用いた。

$$f_{single}(k) = c_1 + c_2 \cdot s(k) + c_3 \cdot t(k) + c_4 \cdot s(k) \cdot t(k) \tag{6}$$

また、線形重回帰分析の結果を表 1 と表 2 に示す。

$c(c_{target}, k) = 0$ は、対象 AP と干渉源が同一チャネルを使用していることを示すが、この場合、対象 AP は干渉源からのフレームの RSSI に依存するものの、多くの場合には干渉源のフレーム送信をチャネルビジーとして検出でき、結果として通信機会の抑制となる。これは実際に表 1、表 2 より、式 (6) の切片 c_1 を除いた $t(k)$ の係数である c_3 の値が遅延とフレーム到達率にかかわらず c_2 および c_4 と比べて大きいことから $t(k)$ の影響は大きいことが確認できる。逆に、 $c(c_{target}, k) = 1/3$ あるいはそれ以上の場合には、干渉源のフレーム通信は対象 AP に対するノイズとなるため、 $s(k)$ と $t(k)$ があわさって対象 AP のキャリアセンス性能や SNR に影響を与え、結果としてフレームエラーを誘発する可能性も高い。したがって、 $s(k) \cdot t(k)$ の影響が大きく、これは c_4 を見ると確認できる。なお、 $c(c_{target}, k) = 3/3$ のときを除けば自由度調整済み決定係数が 0.8 以上となり、 $c(c_{target}, k) = 3/3$ の場合でも約 0.75 となった。ここで、自由度調整済み決定係数とは、重回帰分析において構築した線形式の説明精度を示す指標であり 1 に近い値ほど目的変数の傾向をよく捉えていると判断される。そして、この結果から、各チャネル間距離 (0, 1, 2, 3) に対する $s(k)$ と $t(k)$ が通信性能に与える影響を線形重回帰分析で十分に表現できたことを示している。これに基づき、集約 ICI モデルを構築する。

表 1 $f_{single}(k)$ を用いた線形重回帰分析の結果 (遅延)

Table 1 Regression Analysis Result with $f_{single}(k)$ (Delay).

$c(c_{target}, k)$	重回帰係数				自由度調整済み 決定係数
	c_1	c_2	c_3	c_4	
0	-0.38498	-0.86602	5.89684	1.27298	0.905
1/3	1.3917	-3.7342	-12.7026	35.1980	0.9029
2/3	1.5988	-3.8891	-16.6614	40.9565	0.8895
3/3	0.4015	-0.9238	-11.2069	25.4772	0.7379

表 2 $f_{single}(k)$ を用いた線形重回帰分析の結果 (フレーム到達率)

Table 2 Regression Analysis Result with $f_{single}(k)$ (Frame Delivery Rate).

$c(c_{target}, k)$	重回帰係数				自由度調整済み 決定係数
	c_1	c_2	c_3	c_4	
0	0.86200	0.17056	-0.51439	-0.48568	0.8413
1/3	0.80081	0.14843	0.94830	-2.86823	0.8223
2/3	0.81915	0.07458	1.12194	-2.93707	0.8339
3/3	0.81033	0.05432	1.06558	-2.44258	0.7635

表 3 f_{multi} を用いた線形重回帰分析の結果
Table 3 Regression analysis result with f_{multi} .

	重回帰係数							自由度調整済み
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	決定係数
遅延	2.24359	-1.10688	0.70291	-2.66502	0.05354	0.54053	1.63336	0.8685
フレーム到達率	-0.09109	-0.29729	0.44932	-0.34902	0.34982	0.48801	0.56516	0.8064

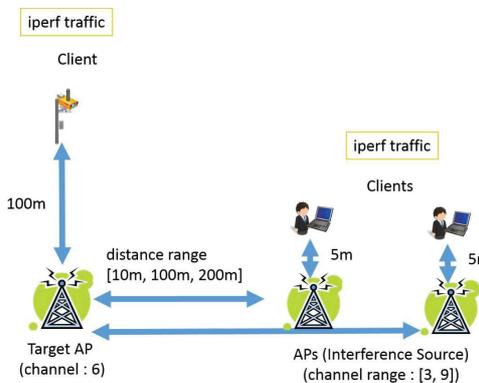


図 4 集約 ICI モデルのシミュレーションシナリオ
Fig. 4 Simulation scenario for aggregated ICI model.

ここで、 c_{max} に関する事前実験について述べる。図 3 のシナリオにおいて、対象 AP の使用チャンネルを 6 に、干渉源の使用チャンネルを 10 に設定した場合の計 900 シナリオを用意した ($n_s = n_t = 30$)。これらのシナリオについて、遅延およびフレーム到達率を確認したところ、98%の結果に対して干渉による影響がほとんどないことが確認された。影響が確認された 2% のすべての場合において、対象 AP と干渉源の距離が 10m という設定値の中で最も近い場合に限定されていることも確認している。提案手法では主要都市の交差点などといった屋外環境を想定しており、一般的な屋外環境とは異なり、きわめて近い距離に干渉源が存在することはないと想定しているため、チャンネル間の距離が 4 以上の場合には、干渉影響がないものとしている。

4.2.3 集約 ICI モデル

次に集約 ICI モデルを構築する。説明の簡単のため、本論文では使用チャンネル数が 2 のケースを取り扱っているが、3 以上の場合も同様の方法でのモデル構築が可能である。

$$\begin{aligned}
 f_{multi} = & d_1 + d_2 \cdot c(c_{target}, k_1) + d_3 \cdot f_{single}(k_1) \\
 & + d_4 \cdot c(c_{target}, k_2) + d_5 \cdot f_{single}(k_2) \\
 & + d_6 \cdot c(c_{target}, k_1) \cdot f_{single}(k_1) \\
 & + d_7 \cdot c(c_{target}, k_2) \cdot f_{single}(k_2)
 \end{aligned} \tag{7}$$

次に図 4 のシナリオに従い、前述の削減方針を適用し、冗長なシミュレーションケースを除いた計 1,134 ケースのシミュレーションを行うとともに、それらを説明変数とした線形重回帰分析を行った。なお、対象 AP や干渉源の設定は単一 ICI モデルのものと同一としている。その結果を表 3 に示す。単一 ICI の場合と同様に、自由度調整済み決

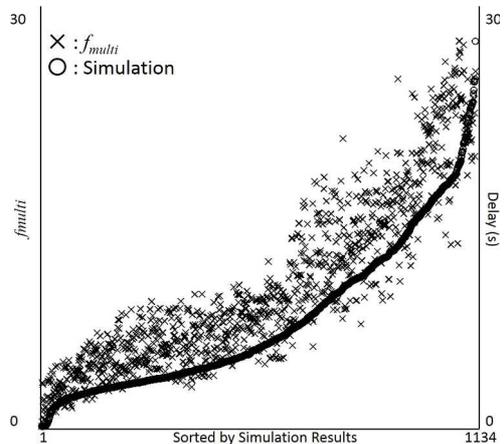


図 5 f_{multi} による遅延指標値とシミュレーションによる遅延
Fig. 5 Delay indicator values by f_{multi} and simulations.

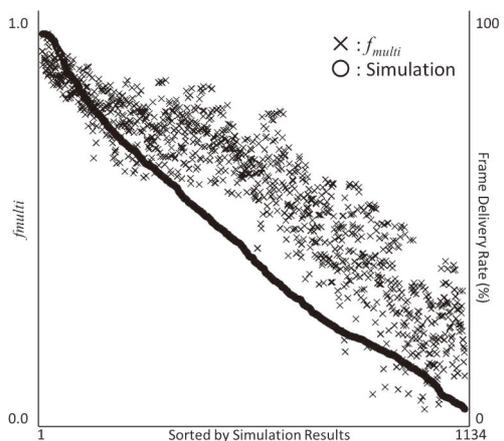


図 6 f_{multi} によるフレーム到達率指標値とシミュレーションによるフレーム到達率
Fig. 6 Frame delivery rate indicator values by f_{multi} and simulations.

定係数は 0.8 を越え、特に遅延に関しては 0.85 に近い値を示した。これらの結果より、 f_{multi} は遅延とフレーム到達率の通信性能を十分に表現しているといえる。

図 5 と図 6 に、 f_{multi} の値とシミュレーションによって得られた遅延およびフレーム到達率の値を示す。シミュレーションによる値（実性能）の順に 1,134 シナリオ分を X 軸に示している。視覚的にも提案モデルが実性能の傾向を捉えていることが確認できる。

5. 性能評価

過密環境を想定したシナリオを 4 種類使用して遅延とフ

フレーム到達率の観点から最良のチャンネルを選択できるかを調べ、 f_{multi} の性能を評価した。

いずれのシナリオにおいても対象 AP とその 1 クライアントに対して 50 組の基地局とクライアントを干渉源として設置している。干渉源は図 7 および図 8 に示したように 150 m × 150 m の範囲の中にランダムに設置している。対象 AP およびそのクライアントはそれぞれ赤色ノード (下), 赤色ノード (上) で示しており、干渉源基地局とクライアントは同じ地点に設置し、あわせて青色ノードで示している。なお、対象 AP や干渉源の設定はモデル構築時と同じものを用いている。具体的には、フレームの送信はクライアントから基地局への片方向であり、その通信には IEEE 802.11g を使い、1 度のフレーム送信に対してペイロードサイズは 1,470 byte としている。対象 AP とそのクライアントは 5 Mbps の送信レートで UDP プロトコルを用いた iperf による通信を行い、変調方式は BPSK 3/4 (したがってデータレートは 9 Mbps) としている。干渉源が使用するチャンネルは 1, 6, 11 からランダムに選択され、チャンネル 1 では 13 組、チャンネル 6 では 17 組、チャンネル 11 では 20 組の干渉源が稼働している。対象 AP は 30 秒ごとに 13

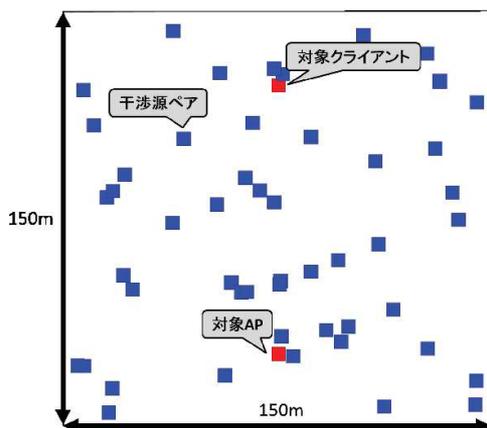


図 7 シミュレーションの設定 (sim1~sim3)
Fig. 7 Simulation settings (sim1~sim3).

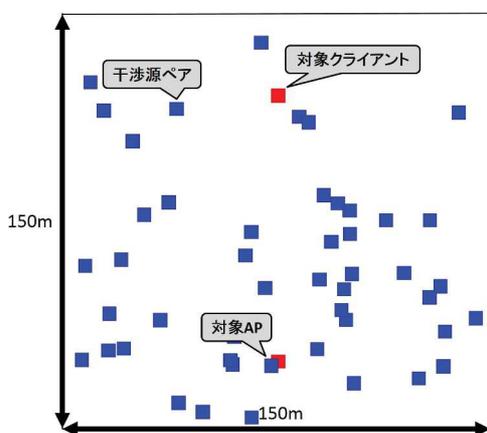


図 8 シミュレーションの設定 (sim4)
Fig. 8 Simulation settings (sim4).

チャンネルをモニタリングし、得られた情報から f_{multi} の値によるランク付けを行う。各チャンネルにおける性能を測定するため、対象 AP のチャンネルを 1 から 13 まで変更しながらシミュレーションを行い、 f_{multi} によるランク付けとシミュレーションより得た実際の性能のランクが一致していることを確かめる。

以下では、干渉源の送信電力と送信レートの設定値および干渉源の設置位置が異なる 4 つのシナリオ (sim1~sim4) を用いた。これにより対象 AP における観測値である平均 RSSI およびトラフィックがそれぞれ 4 つのシナリオで異なる。干渉源の送信電力と送信レートは表 4 に従ってランダムに干渉源の設定値を決定している。送信電力とデータレートは Scenargie シミュレーション上で dot11-tx-power-dbm パラメータおよび iperf-udp-rate-bps パラメータを変化させることで表現した。また、sim1 と sim4 では、干渉源の送信電力や送信レートの設定は同じものを用いるが、sim1 では図 7 に示した干渉源の設置位置を、sim4 では図 8 に示した干渉源の設置位置を用いる。これにより、干渉源の設置位置によらず、提案手法が機能することを確かめる。

図 9 から図 10 に実験結果を示す。いずれのシミュレーションについても図 9(a) から図 10(d) より、13 チャンネルにわたる f_{multi} の値の傾向がシミュレーションから得られた通信性能の傾向と一致していることが確認できる。sim1 に関しての順位付けの結果は表 5、表 6 に示してい

表 4 干渉源の設定値

Table 4 Settings of interference sources.

シミュレーション	送信電力 (dBm)	送信レート (Mbps)
sim1, sim4	20	[0.1,0.5] で一様分布
sim2	[10,20] で一様分布	[0.1,0.5] で一様分布
sim3	20	[0.1,0.9] で一様分布

表 5 実験結果 (遅延, sim1)

Table 5 Experimental results (Delay, sim1).

Channel ID	f_{multi}		Simulation	
	Indicator	Ranking	Delay (s)	Ranking
1	-0.36543	1	1.244631	1
2	0.005587	2	1.906194	2
3	2.046134	9	3.756066	8
4	2.432525	11	4.466259	11
5	1.723872	5	3.963021	10
6	0.250092	4	2.634693	4
7	1.723872	5	3.945966	9
8	4.189695	13	5.182272	13
9	3.971627	12	4.761439	12
10	1.757880	7	3.478857	7
11	0.192882	3	2.496695	3
12	1.757880	7	3.442613	5
13	2.077132	10	3.454188	6

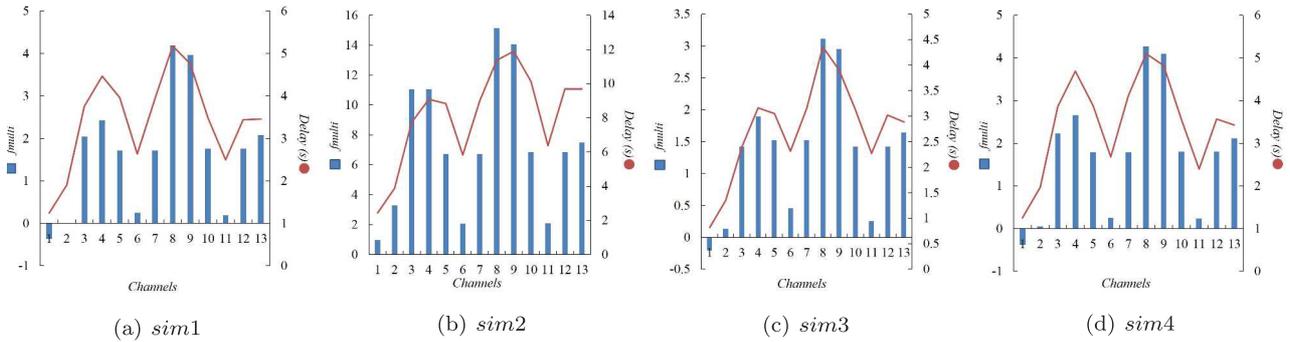


図 9 各チャネルでの f_{multi} の値 (Y1 軸に沿ったボックス図) とシミュレーションによる遅延 (Y2 軸に沿った線グラフ)

Fig. 9 f_{multi} values (Y1-axis with Boxes) and simulated delay (Y2-axis with Lines) over 13 channels.

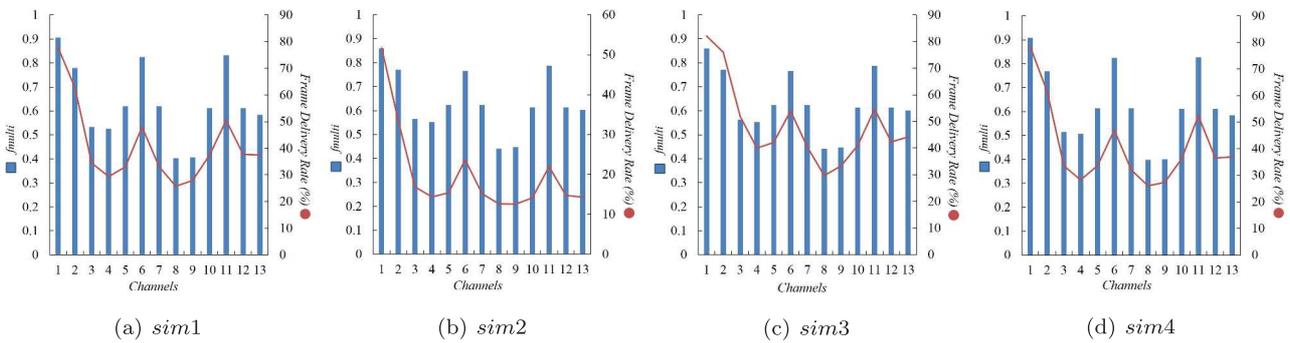


図 10 各チャネルでの f_{multi} の値 (Y1 軸に沿ったボックス図) とシミュレーションによるフレーム到達率 (Y2 軸に沿った線グラフ)

Fig. 10 f_{multi} values (Y1-axis with Boxes) and simulated frame delivery rate (Y2-axis with Lines) over 13 channels.

表 6 実験結果 (フレーム到達率, $sim1$)

Table 6 Experimental results (Frame delivery rate, $sim1$).

Channel ID	f_{multi}		Simulation	
	Indicator	Ranking	Frame Delivery Rate (%)	Ranking
1	0.905575	1	77.97019	1
2	0.779163	4	62.6963	2
3	0.532546	10	34.41564	8
4	0.524977	11	29.43684	11
5	0.619962	5	32.99166	10
6	0.824607	3	48.00905	4
7	0.619962	5	33.20000	9
8	0.402955	13	25.69994	13
9	0.407218	12	27.86288	12
10	0.611563	7	37.37542	7
11	0.832017	2	50.51788	3
12	0.611563	7	37.72920	5
13	0.583828	9	37.51464	6

表 7 Spearman の順位相関係数

Table 7 Spearman's rank correlations.

シミュレーション	順位相関係数 (遅延)	順位相関係数 (フレーム到達率)
$sim1$	0.845	0.840
$sim2$	0.931	0.820
$sim3$	0.826	0.853
$sim4$	0.787	0.801

る。これらの表から、どの基地局も使用していないチャネル (1, 6, 11 以外) よりも干渉源が密集しているチャネル 1 が最も通信性能が良好であることが確認された。この結果より、使用されていないチャネルを選択するのではなく、チャネル選択には周辺の干渉環境が大きく影響することが

分かる。表 7 より $sim1$ における遅延とフレーム到達率に対する Spearman の順位相関係数はそれぞれ 0.845, 0.840 となり f_{multi} と実際の性能の間に強い相関があることが示されている。また、 $sim2$ および $sim3$ の遅延とフレーム到達率に対する Spearman の順位相関係数も 0.8 を超える値となっており f_{multi} と実際の性能の間に強い相関があることが示されている。さらに、 $sim4$ という干渉源の位置が変化したシナリオにおいても遅延とフレーム到達率に対する Spearman の順位相関係数が 0.8 程度であり f_{multi} と実際の性能の間に強い相関があることが示されている。以上の結果から、最良性能のチャネルを推定するだけでなく、チャネル全体にわたる相対評価 (順位) においても十分な精度を達成できたことを確認できた。

6. まとめ

本論文では都市部における Wi-Fi チャンネルの性能推定手法を提案した。提案手法は Wi-Fi システム内で隣接チャンネルの相互影響が発生している環境および異なるシステムの基地局群が異なる方法によって制御されているような都市環境を想定し、一般的な商用 Wi-Fi デバイスから得られる、各チャンネルでの一般的な IEEE 802.11 フレーム情報や RSSI などから、各チャンネルを利用した場合の相対的な通信性能を数値化して出力するスコア化関数を設計した。その関数は、物理層からアプリケーション層までを精密にシミュレーション可能なネットワークシミュレータ Scenargie を用いて網羅的に行ったシミュレーション結果を解析データとみなした重回帰分析により実現している。提案手法を評価するため、複数の基地局の干渉が予想される現実的な都市環境シナリオにおいてシミュレーション実験を行い、設計した関数による性能スコアが実際の性能と Spearman の順位相関係数においてきわめて強い相関が得られることを確認するとともに、最良のチャンネルも選択できることも示した。

今後は実環境における実証実験を行い、その結果をフィードバックすることで、より高精度なチャンネル性能予測アルゴリズムを設計したいと考えている。また、時間的特徴量に対応するように提案手法を拡張し、実用性を更に高めていきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15H02690 および 26220001 の支援により実施しております。

参考文献

- [1] Hithnawi, A., Shafagh, H. and Duquennoy, S.: TIIM: Technology-independent interference mitigation for low-power wireless networks, *Proc. ACM 14th Annual Int. Conf. Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2015)*, pp.1–12 (2015).
- [2] Gollakota, S., Adib, F., Katabi, D. and Seshan, S.: Clearing the RF smog: Making 802.11 robust to cross-technology interference, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.41, No.4, pp.170–181 (2011).
- [3] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, available from <http://www.spacetime-eng.com/>.
- [4] Giuliano, R., Monti, C. and Loreti, P.: WiMAX fractional frequency reuse for rural environments, *Wireless Communications, IEEE*, Vol.15, No.3, pp.60–65 (2008).
- [5] Sheng, J., David, N.C.T., Joseph, B.S., Jilei, H., John, E.S., Roberto, P., et al.: Multicell downlink capacity with coordinated processing, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol.2008 (2008).
- [6] Karakayali, M.K., Foschini, G.J. and Valenzuela, R.A.: Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems, *IEEE Wireless Communications*, Vol.13, No.4, pp.56–61 (2006).
- [7] Jindal, N., Andrews, J.G. and Weber, S.: Band-

- width partitioning in decentralized wireless networks, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.7, No.12, pp.5408–5419 (2008).
- [8] Veronesi, R., Tralli, V., Zander, J. and Zorzi, M.: Distributed dynamic resource allocation with power shaping for multicell SDMA packet access networks, *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004)*, Vol.4, pp.2515–2520 (2004).
- [9] Mishra, A., Shrivastava, V., Agrawal, D., Banerjee, S. and Ganguly, S.: Distributed channel management in uncoordinated wireless environments, *Proc. ACM 12th Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 2006)*, pp.170–181 (2006).
- [10] Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G. and Morris, R.: Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network, *Proc. ACM 2004 Conf. Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2004)*, pp.121–132 (2004).
- [11] Malone, D., Clifford, P. and Leith, D.: MAC Layer Channel Quality Measurement in 802.11, *IEEE Communications Letters*, Vol.11, No.2, pp.143–145 (2007).
- [12] Rayanchu, S., Patro, A. and Banerjee, S.: Airshark: Detecting non-WiFi RF devices using commodity WiFi hardware, *Proc. 2011 Internet Measurement Conference (IMC 2011)*, pp.137–154 (2011).
- [13] Akella, A., Judd, G., Seshan, S. and Steenkiste, P.: Self-management in Chaotic Wireless Deployments, *Proc. ACM 11th Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*, pp.185–199 (2005).
- [14] Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, *Proc. 26th IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.535–543 (2007).
- [15] Kauffmann, B., Baccelli, F., Chaintreau, A., Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Diot, C.: Measurement-Based Self Organization of Interfering 802.11 Wireless Access Networks, *Proc. 26th IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM 2007)*, pp.1451–1459 (2007).

推薦文

本論文は、普及著しい無線 LAN における普及したがゆえに起こる切実かつ重要な問題を取り扱った研究であり、提案の新規性、論文構成、および本分野への波及効果、いずれにおいても非常に優れた論文であることから、情報処理学会論文誌に相応しい論文として推薦いたします。

(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査
渡邊 晃)



梶田 宗吾 (学生会員)

平成 26 年大阪大学基礎工学部情報科学研究科卒業。同年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程進学。Wi-Fi におけるチャンネル干渉に関する研究に従事。



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティングに関する研究に従事。

電子情報通信学会, IEEE 各会員。



東野 輝夫 (正会員)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在, 同大学大学院情報科学研究科教授。工学博士。分散システム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。

電子情報通信学会, ACM 各会員。IEEE Senior Member。本会フェロー。



梅原 茂樹

平成 23 年奈良先端科学技術大学院大学修士課程修了。同年住友電気工業 (株) 入社。以来, ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



齊藤 文哉

平成 22 年北海道大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年住友電気工業 (株) 入社。以来, ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



浦山 博史

平成 12 年名古屋大学工学部電気電子情報工学科卒業。平成 14 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株) 豊田自動織機入社。平成 20 年住友電気工業 (株) 入社。以来, ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



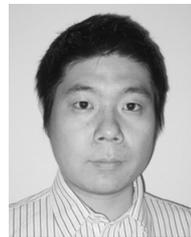
山田 雅也

昭和 61 年神戸大学工学部システム工学科卒業。同年住友電気工業 (株) 入社。以来, ITS 向け移動体通信の研究・開発に従事。



前野 誉

平成 20 年新潟大学大学院修士課程修了。同年 (株) スペースタイムエンジニアリング入社。以来, 移動通信システムに関する研究・開発に従事。



金田 茂 (正会員)

平成 13 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。平成 15 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年株式会社 NTT ドコモ入社。平成 26 年大阪大学大学院情報科学研究科博士課程修了。現在, 米国法人スペースタイムエンジニアリング Director of Engineering。博士 (工学)。

移動通信システム, 性能評価手法に関する研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。



高井 峰生 (正会員)

平成 9 年早稲田大学大学院博士後期課程修了。平成 19 年米国法人スペースタイムエンジニアリング設立。現在, カリフォルニア大学ロサンゼルス校主幹開発研究員ならびに大阪大学大学院情報科学研究科招へい准教授。モバイル通信システムおよびその評価方法についての研究に従事。

ACM, IEEE 各会員。