

# 網羅的シミュレーションによる 都市部無線LANチャンネルの性能予測モデル

梶田 宗吾<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup> 梅原 茂樹<sup>2</sup> 齊藤 文哉<sup>2</sup> 浦山 博史<sup>2</sup> 山田 雅也<sup>2</sup>  
前野 誉<sup>3</sup> 金田 茂<sup>3</sup> 高井 峰生<sup>1,4</sup>

**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、WiFiのチャン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ンネルでの干渉トラフィック量とRSSI、ならびに隣接チャンネルの占有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、各チャンネルにおける絶対性能値を推定するのではなく、複数のチャンネルから相対的に良好なチャン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、複数のアクセスポイント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ンネルを推定し、かつチャン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。

## 1. はじめに

WiFiは近年、3GやLTE通信網のオフローディングの有効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ーが都市部の至るところにWiFiアクセスポイントを設置している。例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WiFiアクセスポイントを提供しており、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WiFi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。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、例えば路肩に設置したカメラセンサー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帯を介して共有する事により、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

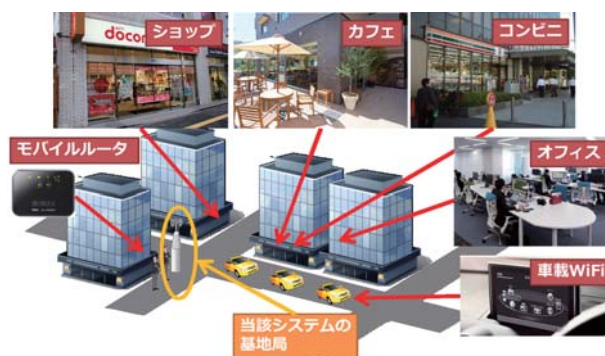


図1 都市部におけるWiFi干渉源の例

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帯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および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。例えば図1のように、都市部では干渉源となり得るオフィスのAP(アクセスポイント)、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AP、移動体としてのモバイルルータや車載WiFiなどが一過的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

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Osaka University  
<sup>2</sup> 住友電気工業(株)  
Sumitomo Electric Industries, LTD.  
<sup>3</sup> スペースタイムエンジニアリング  
Space Time Engineering  
<sup>4</sup> カリフォルニア大学ロサンゼルス校  
University of California, Los Angeles

ネッ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得る。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。

IEEE802.11 (CSMA) のような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伴うフレーム再送、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 WiFi 基地局から様々な影響を受ける。また移動 WiFi 基地局 (モバイルルータや車載 WiFi) 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、IEEE802.11b/g における 2.4GHz 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、互いに全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。特にキャリアセンスが作動しない比較的低干渉信号強度域においては空間利用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。このように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上での干渉対策が望まれる。

我々は文献 [1] において、各チャネルにおいて他システムの AP とそのクライアントがどの程度の時間あるいは空間占有率で通信しているかを IEEE802.11 のデータフレームおよび制御フレームの監視により実現し、その情報を入力として、同一チャネルあるいはその近隣の他チャネルで通信を行う場合の被干渉の程度をスコア化する基本関数を設計している。同手法では AP とクライアントの位置や通信量を変化させた網羅的シミュレーションを行ない、その結果を重回帰分析することで関数を得ている。しかし同手法では AP 単位での推定を行い、かつ AP の存在を 2 つに限定していた。したがって、3 以上の AP が存在する場合にはそのすべての位置関係をシナリオとして実現する必要があり、モデル構築のためのデータ収集コストが膨大になる。また、さらなる精度向上と環境適応のためには、実際の通信環境でデータ収集を行ない、モデルをオンラインで構築することがより望ましい。その意味でも訓練データはより少なく簡易であることが望まれる。

本稿では、当該システムにおいて観測されるチャネルの占有パターン、およびチャネル毎の時間占有率と平均信号強度を入力として当該システムが各チャネルを利用した場合に予想されるスループットおよび遅延を相対的に求める手法を提案する。提案手法では、網羅的なシミュレーションと重回帰分析を行う点では文献 [1] と共通するが、より簡易な観測データのみから性能予測が可能な点、ならびに段階的な重回帰分析によりシミュレーション総数をできるだけ削減する手法である点が大きく異なる。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 [2] 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。150m × 150m の領域でいくつかの固定 AP 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と実際の性能に基づくチャネルランキング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。

## 2. 関連研究

セルラー網においては、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。例えば、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 [3]。基地局をクラスター化するような協調的なネットワーク制御方式 [4], [5] もセルラー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 [6] 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 [7] 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、予め準備されたシーケンスに従ってチャネルホッピングを行い、特定チャネルから受ける干渉の影響を低減する。しかし、チャ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。また移動先のチャネル状態を考慮しないチャ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 WiFi はチャネルホッピングを想定した機構でないため、アクセスポイント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 [8] のように動的にチャ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。例えば、文献[9]では、L2の性能を推定する情報としてSNRやRSSIは不十分であると指摘されている。近年の研究[10]では商用のWiFiカードから得られる情報のみを利用し正確に非WiFi機器の種別判定を行う画期的な手法が提案されている。これは商用のWiFiカードから得た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いる。他にも文献[11]では、IEEE802.11 MACにおけるフレーム衝突の確率やロス確率を推定するアプローチが提案されており、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している。

過密なWiFiアクセスポイント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[12]においては、文献[13]の結果を受け、WiFiアクセスポイントが密集する環境において、多くのアクセスポイント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、アクセスポイント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、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アクセスポイント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[14]では、複数のアクセスポイント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アクセスポイント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、多くの観測情報を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、[12]、[14]はいずれもGibbsサンプリ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WiFi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を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。他システムのアクセスポイント群がどのチャンネル群を利用しているか(チャンネル間距離)、およびそのチャンネル群において、時間利用率がどの程度であるか(容量利用率)、および被干渉アクセスポイントにおける干渉電力がどの程度であるか(干渉電力)、をIEEE802.11のフレーム監視により統計化し、スコア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性能への影響度予測関数を予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簡単

に測量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

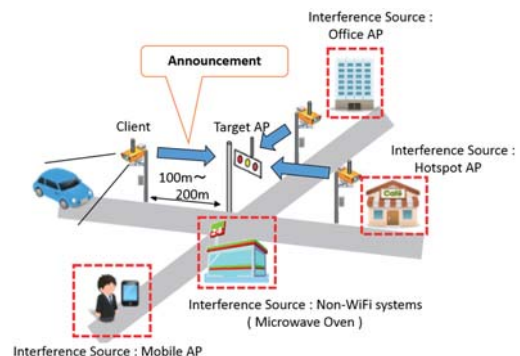


図2 想定環境

提案手法では複数のアクセスポイントやクライアント、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IEEE802.11gアクセスポイント(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スコア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層のデータフレーム遅延(以下、単に**遅延**とよぶ)、およびデータフレーム到達率(以下、単に**スループット**とよぶ)を用いる。前述のように、WiFiチャンネルの使用ポリシーが規定されている環境(例えば屋内環境)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AP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WiFi利用シナリオとして、例えば図2のように交差点付近に設置された路側機において、WiFiシステムと同じあるいは類似の周波数帯および制御方式(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可能性などが従来より検討されている。

提案手法では、対象APにおいてIEEE802.11MAC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。これには例えば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。

複数のアクセスポイントが様々なチャンネルや設置箇所で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。例えば、後述する性能評価においては、IEEE802.11gのアクセスポイントが1, 7, 11チャンネル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RSS、および同一チャンネルのトラフィックやRSSが様々な組み合わせを生みだし、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）。提案手法では、各チャンネルにおける容量占有率、RSS およびチャンネル占有パターンについての情報からチャンネル状態のレベルを決定するスコア関数を設計する。

## 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  $k$  を用いているアクセスポイント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、各チャンネルにおける IEEE802.11 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。

まず、チャンネル  $k$  において（対象 AP で観測される）平均受信信号強度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受信信号強度を正規化したものであり、これを本稿では **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 RSS ( $SS_{ave}$ ) から求められる。

$$s(k) = \frac{SS_{ave} - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (1)$$

$\theta_{min}$  と  $\theta_{max}$  はデータフレームを受信する閾値である最小 RSS と最大 RSS を示し、IEEE802.11g ではそれぞれ約-90dBm と-50dBm であるとする。

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  $I(k)$  における全ての干渉源から1秒あたりに送信されるデータバイト総量（データフレームバイト数総和） $d$  を IEEE802.11b/g で規定される送信レート  $b$  を用いて正規化したものである。これを本稿では **トラフィックインジケータ** とよぶ。

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

最後に、チャンネル間距離を表す指標  $c(k)$  を導入する。 $c(k)$  は、対象 AP の使用チャンネル  $k$  と少なくとも1つの干渉源が使用しているチャンネル  $h$  の間の差を正規化した値である。本稿ではこれを **チャンネル間距離インジケータ** とよび、以下で定義する。

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

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であっても互いにほとんど影響を与えないことを確認している。したがって提案手法では  $c_{max} = 3$  としており、 $|h - k| > c_{max}$  となるような干渉源は考慮する必要はない。

なお、平均 RSS や IEEE802.11b/g のビットレートは第1層の情報であるが、商用の WiFi デバイス（例えば 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（例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、RSS、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専有しており、RSS やトラフィックの組み合わ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。例えば、対象 AP が全てのチャンネルをスキャンした結果、いくつかの AP 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 RSS は小さく、逆にチャンネル5と11で複数の AP からの強い RSS 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。一般的にはどの AP 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增大する恐れもある。こういった組み合わ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。

なお、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。以下では組み合わせによるシナリオ数増大について議論する。 $n_s$  と  $n_t$  で、 $s(k)$  と  $t(k)$  それぞれに含まれる要素数を表すとす。また、 $K$  ですべてのチャンネル使用パターンの集合を表すとす。このとき、シミュレーションシナリオ総数は

$$\sum_{h \in 0..c_{max}} \left\{ {}_{(c_{max}+1)}C_h \cdot (n_s \cdot n_t)^h \right\} \quad (4)$$

で表される（ $C$  は組み合わせ（コンビネーション）を表す）。上式では、 ${}_{(c_{max}+1)}C_h$  は  $h$  チャンネルの使用パターンの数を示しており、 $(n_s \cdot n_t)^h$  は  $h$  チャンネルのそれぞ

れの使用パターンについて RSS とトラフィックのパターンの数を示している。例えば、 $n_{rs} = n_{tr} = 30$  で  $c_{max} = 3$  とした場合、その総数は 659,020,863,604 (約  $6.6 \times 10^{11}$ ) となる。これに対し、網羅性を犠牲にすることなく、総数を減らすことが望まれるが、提案手法では以下の方針に基づきそれを実現する。

- (1) 各  $c(k)$  に対して、 $s(k)$  と  $t(k)$  の全組み合わ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) と呼ぶ)。単一 ICI モデルは、仮に干渉源群が1つのチャンネルのみを使用している場合に、RSS とトラフィック量が同じあるいは別のチャンネルの対象 AP の通信性能がどの程度になるのかを表すモデルであり、RSS インジケータとトラフィックインジケータを引数とする。
- (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) RSS, トラフィック量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、 $c(k_1), c(k_2), \dots, c(k_L)$  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**完全 ICI モデル**と呼び、 $f_{multi}$  で表す。この  $f_{multi}$  を用いチャンネル選択を行う。

#### 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2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 AP に向けて定期的に情報を送信する。干渉源は AP とクライアントの組とし、AP 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 [2] 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 AP 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 AP に送信したデータフレーム到達率を示すスループット、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。シミュレーションのシナリオを図3に示す。

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

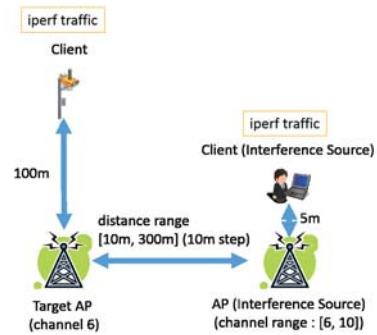


図 3 単一 ICI モデルのシミュレーションシナリオ

4つの  $c(k)$  ( $= c_{max} + 1$ ) 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 3600 となり、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。

$$f_{single}(k) = c_1 + c_2 \cdot s(k) + c_3 \cdot t(k) + c_4 \cdot s(k) \cdot t(k) \quad (5)$$

また、線形重回帰分析の結果を表1と表2に示す。

表 1 線形重回帰分析による単一 ICI モデルの構築 (遅延)

$c(k)$	Coefficient				adjusted $R^2$ (delay)
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	
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 線形重回帰分析による単一 ICI モデルの構築 (スループット)

$c(k)$	Coefficient				adjusted $R^2$ (Throughput)
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	
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

$c(k) = 0$  は、対象 AP と干渉源が同一チャン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受信信号強度に依存するものの) 多くの場合には干渉源のフレーム送信をチャン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。したがって  $t(k)$  の影響度は少なくないと説明できる。逆に、 $c(k) = 1/3$  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  $t(k)$  はいずれも 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

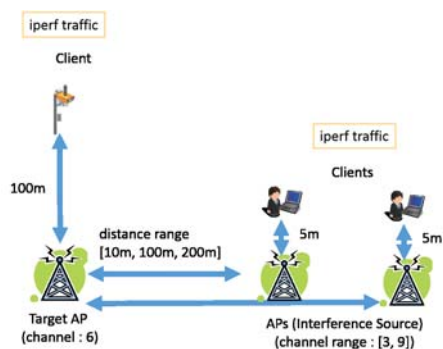


図 4 完全 ICI モデルのシミュレーションシナリオ

発する可能性も高い。したがって、 $s(k)$  の影響度は少なくないと説明できる。なお、 $c(k) = 3/3$  の時を除けば自由度調整済み決定係数が 0.8 以上となり、 $c(k) = 3/3$  の場合でも約 0.75 となった。これは各チャンネル間距離 (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、完全 ICI モデルを構築する。

#### 4.2.3 完全 ICI モデル

次に完全 ICI モデルを構築する。説明の簡単のため、本稿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。

$$\begin{aligned}
 f_{multi} &= d_1 + d_2 \cdot c(k_1) + d_3 \cdot f_{single}(k_1) \\
 &+ d_4 \cdot c(k_2) + d_5 \cdot f_{single}(k_2) \\
 &+ d_6 \cdot c(k_1) \cdot f_{single}(k_1) \\
 &+ d_7 \cdot c(k_2) \cdot f_{single}(k_2)
 \end{aligned} \tag{6}$$

次に図 4 のシナリオに従い、7 つの  $c(k_1)$  の値 \*1 ( $7 = 1 + 2 * c_{max}$ )、54 の  $f_{single}(k_1)$  の値、7 つの  $c(k_2)$  の値、および 54 の  $f_{single}(k_2)$  の値を用い、重複を取り除いた 1134 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。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、 $f_{multi}$  は遅延とスループット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スループットの値を示す。シミュレーションによる値 (実性能) の順に 1134 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。

\*1 複数チャンネル使用を想定し、対象 AP のチャンネルから -3 ~ +3 のチャンネル群を想定している。

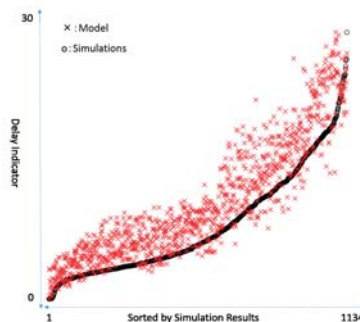


図 5 完全 ICI モデルによる遅延指標値 (Y 軸) とシミュレーションによる遅延

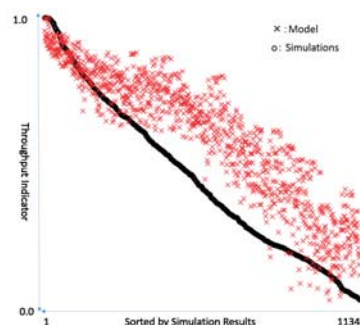


図 6 完全 ICI モデルによるスループット指標値 (Y 軸) とシミュレーションによるスループット

## 5. 性能評価

一般的なシナリオを使用して遅延とスループットの観点から最良のチャンネルを選択できるかを調べるため、 $f_{multi}$  の性能を評価した。

対象 AP とそのクライアントに対して 4 組の AP とクライアントを干渉源とし、150m × 150m の範囲の中に設置するシナリオを用いた。これは図 7 のような交差点における ITS 路側機を想定したシナリオであり、対象 AP (路側機) とそのクライアント (車両) は 5Mbps のレートで通信を行う。干渉源は AP1 をコンビニエンスストア、AP2 を公衆 WiFi アクセスポイント、残りのアクセスポイントをオフィスのアクセスポイントと想定している。干渉源であるアクセスポイントとクライアントについては、クライアントはアクセスポイントの 5m 北側に設置し、AP1, AP2, AP3, AP4 はそれぞれ 1.5Mbps, 3Mbps, 2Mbps, 3Mbps のレートで通信を発生させた。変調方式は BPSK 3/4 (したがって送信レートは 9Mbps) としている。表 4 は干渉源の座標を示している。対象 AP は 30 秒毎に 13 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。各チャンネルで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



表 3 線形重回帰分析による完全 ICI モデルの構築 (遅延)

	Coefficient							adjusted $R^2$
	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	
delay	2.24359	-1.10688	0.70291	-2.66502	0.05354	0.54053	1.63336	0.8685
Throughput	-0.09109	-0.29729	0.44932	-0.34902	0.34982	0.48801	0.56516	0.8064

一致していることを確かめる。



図 7 シミュレーションの設定

表 4 ノードの位置と使用チャンネル

Node	Coords.	Channel
Target AP	( 75.000, 25.000)	to be determined
Target Client	( 75.000,125.000)	to be determined
Interference AP 1	( 87.220,105.632)	1
Interference Client 1	( 87.220,110.632)	1
Interference AP 2	(148.151, 14.946)	7
Interference Client 2	(148.151, 19.946)	7
Interference AP 3	( 18.433, 20.508)	7
Interference Client 3	( 18.433, 25.508)	7
Interference AP 4	(139.297, 85.083)	11
Interference Client 4	(139.297, 90.083)	11

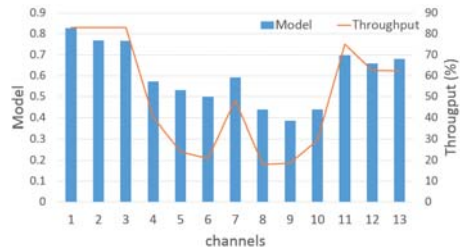


図 9 各チャンネルでの  $f_{multi}$  の値 (Y1 軸に沿ったボックス図) とシミュレーションによる遅延 (Y2 軸に沿った線グラフ)

表 5 実験結果 (遅延)

Channel ID	Model		Simulation	
	Indicator	Ranking	Delay (s)	Ranking
1	0.221914	1	0.002356	1
2	0.501899	2	0.002854	2
3	0.512307	3	0.003902	3
11	1.314429	4	1.414476	4
13	1.574846	5	1.916814	6
12	1.683511	6	1.922286	5
7	2.141591	7	2.62581	7
4	2.463841	8	3.129002	8
5	3.337122	9	5.267372	10
6	3.380002	10	6.132739	11
10	3.789207	11	4.306259	9
8	3.808662	12	7.328154	13
9	5.076176	13	6.919489	12

表 6 実験結果 (スループット)

Channel ID	Model		Simulation	
	Indicator	Ranking	Throughput (%)	Ranking
1	0.827794	1	83.08427	1
2	0.769155	2	83.08427	1
3	0.767343	3	83.06915	3
11	0.69729	4	75.08957	4
13	0.680698	5	62.3103	6
12	0.659767	6	62.61121	5
7	0.593243	7	48.34523	7
4	0.57273	8	40.40192	8
5	0.532401	9	23.92966	10
6	0.500817	10	20.76474	11
8	0.439509	11	18.02075	13
10	0.438814	12	29.57189	9
9	0.385057	13	18.61199	12

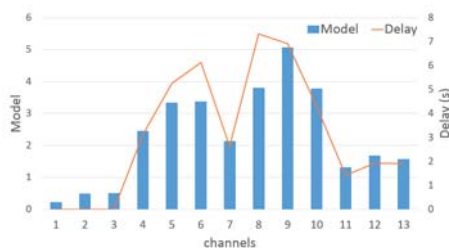


図 8 各チャンネルでの  $f_{multi}$  の値 (Y1 軸に沿ったボックス図) とシミュレーションによる遅延 (Y2 軸に沿った線グラフ)

図 8, 図 9 および表 5, 表 6 に実験結果を示す。図 8, 図 9 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実際の性能と一致していることが確認できる。順位付けの結果は表 5, 表 6 に示している。遅延とスループットに対する Spearman の順位相関係数はそれぞれ 0.965035, 0.9352028 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。以上の結果から, 最良性能のチャンネルを推

定するのみならず，チャン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

本稿では都市部における WiFi チャンネルの性能推定手法を提案した。提案手法は WiFi 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アクセスポイント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 WiFi デバイスから得られる，各チャンネルでの一般的な IEEE802.11 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スコア化して出力する関数を設計した。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，複数のアクセスポイント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極めて強い相関が得られることを確認すると共に，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ない，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選択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，総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）No.145007002 の支援により実施しております。

## 参考文献

[1] 梶田宗吾，山口弘純，廣森聡仁，東野輝夫，梅原茂樹，齊藤文哉，浦山博史，山田雅也，前野 誉，金田 茂，高井峰生：都市部における無線 LAN チャンネルの相対的な干渉レベルの推定手法，マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO 2014) シンポジウム論文集，pp. 595–604 (2014).

[2] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, <http://www.spacetime-eng.com/>.

[3] 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).

[4] Sheng, J., David NC, 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).

[5] Karakayali, M. K., Foschini, G. J. and Valenzuela, R. A.: Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems, *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 13, No. 4, pp. 56–61 (2006).

[6] Jindal, N., Andrews, J. G. and Weber, S.: Bandwidth partitioning in decentralized wireless networks, *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, Vol. 7, No. 12, pp. 5408–5419 (2008).

[7] Veronesi, R., Tralli, V., Zander, J. and Zorzi, M.: Distributed dynamic resource allocation with power shaping for multicell SDMA packet access networks, *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004)*, Vol. 4, pp. 2515–2520 (online), DOI: 10.1109/WCNC.2004.1311484 (2004).

[8] Mishra, A., Shrivastava, V., Agrawal, D., Banerjee, S. and Ganguly, S.: Distributed channel management in uncoordinated wireless environments, *Proc. of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2006)*, ACM, pp. 170–181 (2006).

[9] Aguayo, D., Bicket, J., Biswas, S., Judd, G. and Morris, R.: Link-level Measurements from an 802.11B Mesh Network, *Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, SIGCOMM '04*, New York, NY, USA, ACM, pp. 121–132 (online), DOI: 10.1145/1015467.1015482 (2004).

[10] Rayanchu, S., Patro, A. and Banerjee, S.: Airshark: detecting non-WiFi RF devices using commodity WiFi hardware, *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, ACM, pp. 137–154 (2011).

[11] Malone, D., Clifford, P. and Leith, D.: MAC Layer Channel Quality Measurement in 802.11, *Communications Letters, IEEE*, Vol. 11, No. 2, pp. 143–145 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2007.061289 (2007).

[12] Mhatre, V., Papagiannaki, K. and Baccelli, F.: Interference Mitigation Through Power Control in High Density 802.11 WLANs, *Proc. of 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 535–543 (online), DOI: 10.1109/INFCOM.2007.69 (2007).

[13] Akella, A., Judd, G., Seshan, S. and Steenkiste, P.: Self-management in Chaotic Wireless Deployments, *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '05*, New York, NY, USA, ACM, pp. 185–199 (online), DOI: 10.1145/1080829.1080849 (2005).

[14] 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. of 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 1451–1459 (online), DOI: 10.1109/INFCOM.2007.171 (2007).