

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

梶田 宗吾¹ 山口 弘純¹ 廣森 聡仁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}

概要: 近年, 都市部においては, ホットスポットやオフィスのアクセスポイントなど多様な 2.4GHz 帯無線 LAN 基地局が密に設置されつつあり, またモバイルルータなどの移動アクセスポイントを保有するユーザも増加している. しかし, 2.4GHz 帯においてそのように多数の基地局が限られた周波数帯を用いる場合, 無線信号の干渉の影響によるフレーム誤りや空間利用率の低下が懸念される. そこで本研究では, 基地局が密に設置されているような都市環境における, 無線 LAN 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 に基づき相対的に予測する手法を提案する. これにより, 絶対的な性能を推測するのではなく 13 チャンネルの中から相対的に良好なチャンネルを選択可能と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. 提案手法を評価するため, アクセスポイントとそのクライアントが, 面的に存在するアクセスポイント群およびそのクライアントから干渉を受ける都市部の状況を想定したシミュレーション実験を行なった結果, 最もフレーム到達率が高いチャンネルを, 観測フレームのみから予測することができた.

Estimation of Interference Effect on WLAN Channels in Urban Areas

SHUGO KAJITA¹ HIROZUMI YAMAGUCHI¹ AKIHITO HIROMORI¹ TERUO HIGASHINO¹
SHIGEKI UMEHARA² HUMIYA SAITOU² HIROFUMI URAYAMA² MASAYA YAMADA²
TAKA MAENO³ SHIGERU KANEDA³ MINEO TAKAI^{1,4}

1. はじめに

IEEE802.11 標準に代表される無線 LAN は, 携帯回線のオフローディングあるいは高速な有線網へのアクセスネットワークとして活用されており, 多くのモバイル機器に実装されるとともに近年では車両への導入も進んでいる. それに伴い屋内外の至るところに公共無線 LAN 基地局や加入者無線 LAN 基地局が設置されつつある (図 1). また, 2.4GHz 帯はライセンス不要の産業科学医療用バンドであ

ることから, 医療機器やコードレスフォンなどの非無線 LAN 通信機器もこの周波数帯を利用している. さらに商用化された Audi 社の Audi Connect を皮切りに車載器組込用 WiFi への注目が集まっており, 無線 LAN は自動車内通信プラットフォームとしての期待も高まっている. 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 2.4GHz 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, ライセンス不要である 2.4GHz 帯を活か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

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

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。したがって屋外に設置された無線 LAN 基地局において一定のサービス品質を保証するためには、都市部の屋内外に存在する多数の基地局やクライアントによる通信干渉の影響をなるべく軽減あるいは回避することが必要となる。



図 1 公衆 WiFi アクセスポイント

ここで、特に 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。これらは干渉信号強度とその干渉頻度により影響の程度も異なる。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ン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。さらに、IEEE802.11b/g における 2.4GHz 帯チャンネルは計 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ンネルは最大 3 チャンネルであり、利用チャンネルが異なる場合でも干渉が生じる（図 2）。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。その一方で、それら干渉源となるオフィスや公共ホットスポット用途の固定基地局は事前に設定された特定のチャンネルを利用し続けることも多く、各基地局のクライアント数やそのトラフィック、および干渉信号強度をある程度観測あるいは予測できれば、各干渉源による干渉の影響やそれに応じた性能低下も推測できる。またモバイルルータや車載 WiFi などの移動基地局は周辺の交通環境などにも依存した一定の時空間的な規則

性があると考えられるため、クライアント数やトラフィック変動予測も統計によりある程度の予測が可能と期待できる。したがって、これらの情報を収集し活用することで、各干渉源がどの程度の強度でどの程度の期間影響するかが判別でき、現在あるいは一定期間の将来にわたる安定したチャンネル（干渉の影響が少ないチャンネル）の予測も可能であると考えられる。

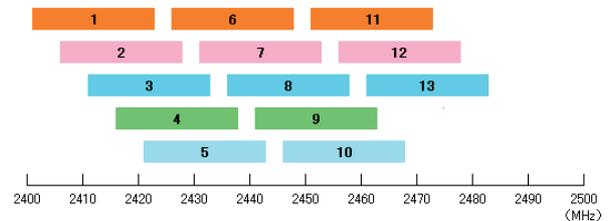


図 2 チャンネル配置

そこで本研究では、都市環境において屋外無線 LAN 基地局を設置する場合に生じる干渉の影響推定手法を提案する。例えば IEEE802.b/g では図 2 に示したように近接チャンネル間の相互干渉も加わり、干渉の影響が多岐にわたる。そこで本研究では、密に基地局が設置されているような都市環境において、各干渉源が対象基地局およびそのクライアントにおいてどの程度影響を与えるかを、信号強度とトラフィックの推定値に基づく値、ならびにチャンネル間距離を用いて、時空間的な特徴量として表現する。空間的な特徴量は対象基地局やそのクライアントがどの程度の強度で干渉信号を受けるかを推定するものであり、時間的な特徴量はどの程度のトラフィックが干渉源から発生するかを推定する。これらの推定は、対象基地局における各チャンネルの IEEE802.11 制御フレームならびにデータフレーム監視により実現し、その観測データと事前構築した性能影響モデルをもとに、各チャンネルの被干渉の程度を相対的に推定するアルゴリズムを提案する。これにより、絶対的な性能を推測するのではなく 13 チャンネルの中から相対的に良好な CHANNEL を選択可能とすることを目的とする。性能影響モデルは代表値を用いた網羅的シミュレーションを実施し、その重回帰分析によって構築する。シミュレーションには Scenargie 1.7 [1] を用いることで、中心周波数間隔が近いチャンネル間で相互干渉する状況を正確に再現している。なお、時間的な特徴量に関しては、例えばオフィスビルの基地局は業務時間内の通信量が安定的に高く、ホットスポット基地局ではユーザの滞留時間が短いためスループット時間変動が大きいといった、各干渉源における時間依存特性を推測し統計化することで精度の向上が見込まれるが、本研究では、一定時間の観測により推定される平均的なトラフィック量を時間的な特徴量とし、その影響を明確にすることに着目する。

提案手法を評価するため、対象アクセスポイントとその

クライアント群が、150 m × 150 m の領域に面的に存在する外部のアクセスポイント群およびそのクライアントから干渉を受ける都市部の状況を Scenargie 上で再現した。その結果、実際に最もフレーム到達率が高かったチャンネルと、提案手法により推定した最も干渉影響が小さいチャンネルが一致することが確認でき、提案手法がフレーム監視のみから適切なチャンネル選択を実現できることが示された。

2. 関連研究

2.1 干渉対策に関する研究

これまでに、無線ネットワークを対象にした研究が盛んに行われている [2-10]。例えば、セルラー網ではセル間の干渉を回避し通信品質を向上させる技術が多く研究されている。例えば GSM ネットワーク向けには Fractional Frequency Reuse (FFR) とよばれる技術があり、セル境界付近のユーザには異なる周波数を割り当てることで基地局遠方のユーザの被干渉を軽減する [11]。また、基地局をクラスター化して空間利用効率を向上させるネットワーク協調技術などが提案されている [12,13]。これらの技術はセルラー網設備に依存した技術であり、汎用の無線ネットワークを対象としたものではない。これに対し文献 [14] 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。また、文献 [15] では、チャンネル特性に基づき必要資源数と送信電力を自律分散的に調節する技術が提案されている。

別の干渉対策技術として、短期的に使用するチャンネルを切り替えるチャンネルホッピングが挙げられる。チャンネルホッピングでは、予め作成されたチャンネルシーケンスに従いチャンネルを切り替えることで、通信性能を維持する。しかし、多くのチャンネル切り替え手法は、周波数を短い間隔でランダムに切り替えることで、特定の周波数帯において被る長期的な干渉の影響を避けることを目的としているため、切り替え先のチャンネルの状態に関わらず行われる。したがって、移動先チャンネルにおける通信量が多く、干渉が発生しているような状態ではチャンネルホッピングの効果が減少し、かつチャンネル切替えのオーバーヘッドも無視できない。一般に無線 LAN においては IEEE802.11 に基づくアクセスポイントへの帰属シーケンスが必要であり、Probe フレームを受信するか Probe Request を送信してから帰属が完了するまでに数フレームを交換する必要があることから高速チャンネルホッピングに適したアーキテクチャではない。また、2.4GHz 帯のチャンネルは隣接チャンネル干渉も発生するが、例えば文献 [16] などのようにチャンネルシーケンスを動的に改良することで、なるべく通信量の少ないチャンネルに移動する手法も提案されているものの、チャンネル選択にはチャンネル状態推定が必須となる。

屋内環境では、一つの Service Set を複数のアクセスポイ

ントが担当し、それらを面的かつ重複的に配置することで広範囲のカバレッジを実現している場合もある。このような場合には、例えば複数のアクセスポイントのうち、最も状態のよいアクセスポイントを適応的に選択して移動する方法もある。一般にはこのような方法はハンドオーバーと呼ばれる [17]。現在の通信基地局の通信量の増加や、受信電波強度の低下に応じて水平ハンドオーバーでは接続する基地局を、垂直ハンドオーバーでは WiFi 通信や第 3 世代通信 (3G) 等の通信方式を切り替える。このように、複数の基地局や通信方式を状況に応じて使い分けることで、広範囲での通信や、通信性能の維持・向上を可能にしている。しかし、一般に水平ハンドオーバーにおいても無線 LAN においてはホッピングと同様に再接続のオーバーヘッドがありフレーム遅延や欠落につながる可能性があることに加え、複数のアクセスポイントが利用可能な環境に限定されるといった問題もある。提案手法では屋外型の無線 LAN アクセスポイントなどを対象としており、例えば交差点の ITS 路側機であればそのような重複配置は期待できないために、チャンネル推定を行う技術が必須となる。なお、ハンドオーバーに関する研究は盛んに行われており、例えば、文献 [18] ではリアルタイムなマルチメディアアプリケーション向けに素早く切り替えを行えるハンドオーバーフレームワークを調査、提案している。また不必要なハンドオーバーを減らすために切り替えの必要性を推定する手法 [19] や、エンドユーザのスループットやチャンネル状態から最適な基地局を選択する手法 [20] なども提案されている。

2.2 無線端末情報の推定

無線端末との通信において、RSSI 情報を用いることで、様々な端末の情報を推定することができる。従来では例えば文献 [21] などで、SNR や RSSI のみでは MAC 層の性能の推定は難しいことが指摘されているが、例えば、文献 [22] では、RSSI の変動をパルスと見なし学習することで、一般的な商用 WiFi カードから得られる情報のみを利用した場合でも、高精度な非 WiFi 端末の特定を実現する新しい技術も現れている。また、文献 [23,24] では、RSSI の強度から無線センサネットワークにおける端末間距離を推定しているなど、RSSI は様々な無線端末の状況 (コンテキスト) をその通信特性から推定することができ、測定のために追加のハードウェアも必要ないため、有効性が高い情報源であるといえる。文献 [25] では、IEEE802.11MAC におけるフレーム衝突およびチャンネルロス、隠れ端末などに起因するフレーム損失率を計算する方法を述べている。MAC 層の振る舞いから各端末のキャリアセンスにより通信を抑制している確率などを導出する簡易な式を提案している。

2.3 IEEE802.11 における干渉回避アルゴリズム

主に 2.4GHz 帯の過密化に対し、通信状況の観測に基づ

- (i) アクセスポイント：チャンネル 1 から 13 のうちいずれかを利用する
 - (a) 移動しないアクセスポイント．以下ではこれを与干渉固定 AP とよぶ．例えばホットスポット AP やオフィスの AP がこれに相当する．
 - (b) 移動するアクセスポイント．以下ではこれを与干渉移動 AP とよぶ．例えばバスや一般車両への車載 WiFi，歩行者が有するスマートフォンのテザリングも含むモバイルルータなどがこれに相当する．
- (ii) アクセスポイントのクライアント：対応するアクセスポイントのチャンネルで通信する
 - (a) (i)-(a) の与干渉固定 AP と通信するクライアント．これを与干渉固定クライアントとよぶ．AP が設定したチャンネルで通信する．
 - (b) (i)-(b) の与干渉移動 AP と通信するクライアント．これを与干渉移動クライアントとよぶ．
- (iii) 非 WiFi 機器

例えば電子レンジ付近では 2.4GHz 帯の特定周波数域に電磁スペクトルがみられるなどの報告がある [22]．同様に医療機器の中にも特定の周波数域に電磁スペクトルを生じる例もある．中には IEEE802.11 標準に準じない独自の通信を利用する例もあるため，これらはすべて非 WiFi 機器とする．

なお，与干渉固定 AP (分類 (i)-(a)) およびそのクライアント (分類 (ii)-(a)) を対象として得られる知見は，与干渉移動 AP (分類 (i)-(b)) やそのクライアント (分類 (ii)-(b))，および非 WiFi 機器 (分類 (iii)) にも適用可能と考えられるため，本研究ではまず基礎的な影響要因を明確にすることを目的とし (i)-(a) および (ii)-(a) の存在のみを仮定した手法設計を行う．その他の分類機器が混在する環境については今後の研究を通じて実施していくものとする．以下簡単のため，与干渉固定 AP(クライアント) を単に与干渉 AP(クライアント) とよぶ．

また，チャンネル推定を実施するアクセスポイント (被干渉 AP または対象 AP とよぶ) については，自身が利用するチャンネルのみならず，他チャンネルの IEEE802.11 フレームを観測する機能を有するものとする．ここで観測は宛先に関わらず対象 AP により復号されたすべてのフレームを対象とするものであり，その際各受信フレームの受信強度ならびに推定バイト転送量，フレーム受信に使用された時間が取得できるものとする．なお，市販の WiFi インタフェースにおいて promiscuous mode を用いると，フレームの宛先に関わらず，AP において復号できた IEEE802.11 フレームが取得できる．また WiFi インタフェースでは受信フレームの RSSI 情報を有するがこれを取得できるかは OS のドライバー等に依存する．また，Riverbed 社の AirPcap [29](図 4) などの製品では，WiFi インタフェース内蔵の小型 USB スティック機器と外付アンテナを用いて

チャンネル毎の上記の情報が取得可能であり，Wireshark などのソフトウェアで処理可能な pcap フォーマットでの記録が可能である．実際に，AirPcap を用いて，スターバックス千里中央店にて 1, 4, 7, 11 チャンネルをそれぞれ 25 分間モニタリングした．図 5 は，pcap フォーマットで記録されたモニタリング結果を Wireshark で表示したスクリーンショットであり，フレームタイプや RSSI，送受信者の MAC アドレス等が確認できた．提案手法における対象 AP はこれらの機器や技術を用いたチャンネル監視が可能とする．

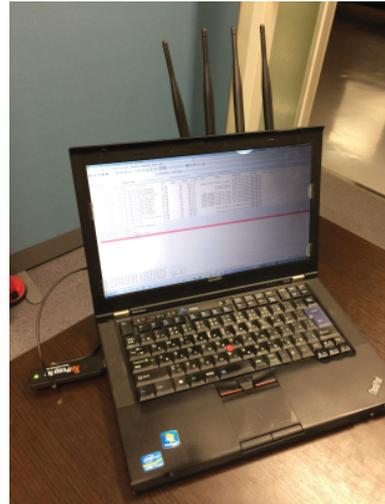


図 4 AirPcap

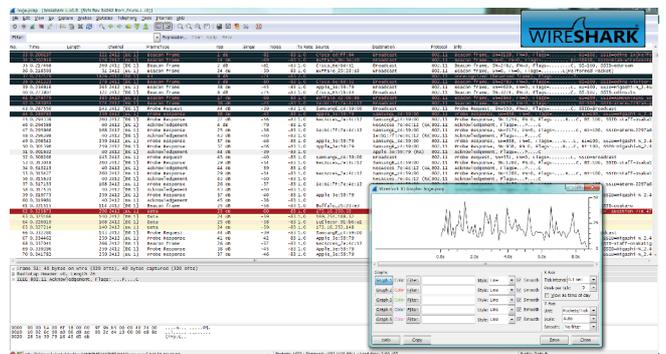


図 5 Wireshark

3.2 提案手法の概要

CSMA のような無線通信において図 3 で示したようなシステムを提供するためには，フレーム遅延や損失を一定のレベルに抑制し，適切なスループットを維持する必要がある．ここで，フレーム遅延を抑制するためには，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．これに対し，提案手法では，前節で述べた (i)-(a) の干渉源 (与干渉 AP) それぞれについてそれが対象 AP お

よびそのクライアントにおいてどの程度影響を与えるかを、対象 AP における

- (a) (干渉) 信号強度
- (b) 与干渉 AP のチャンネル占有率
- (c) チャンネル間距離
- (d) 与干渉 AP のトラフィックパターン、

の 4 指標を用い、時空間的な特徴量として表現する。ここで、空間的特徴量とは与干渉 AP と対象 AP およびそのクライアントへの空間的關係により決定される特徴量とし、提案手法では上記の (a), (b) および (c) で表現する。なお、(a) は与干渉 AP の送信電力や対象 AP、クライアントとの位置関係、それらの間の物体 (ビルや壁、窓などの信号減衰および反射要因) などにより決定される要因である。また (b) は与干渉 AP が送受信したフレームを対象 AP 受信するために必要とした時間をもとに決定され、与干渉 AP からの干渉波到来数を表現する特徴量とする。(c) については、IEEE802.11b/g における 2.4GHz 帯チャンネルは計 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ンネルは最大 3 チャンネルであり、利用チャン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ため、そのような状況を表すための特徴量とする。一方、時間的特徴量とは干渉源が対象 AP およびそのクライアントに与える干渉の時間的頻度により決定される特徴量とし、提案手法では上記 (d) で表す。

次に、(a) から (d) の推定結果と、事前構築した性能影響モデルをもとに、干渉の影響が大きいと予測されるチャンネルを推定するアルゴリズムを提案する。ここで、性能影響モデルは事前に (a) から (d) の適切な代表値を用いた組み合わせシミュレーションを実施し、それらの関係解析により性能影響を表す指標値を出力する関数としてモデル化しておく。このモデルに対し性能影響が最も小さいと推定されるチャンネルを選択することで安定的なチャンネルの選択を実現する。

なお、時間的特徴量に関しては、例えばオフィスビルの基地局は業務時間内の通信量が安定的に高く、ホットスポット基地局ではユーザの滞留時間が短いためにスループット時間変動が大きいといった、各干渉源における時間依存特性を推測し統計化することで精度の向上が見込まれるが、本稿ではまず空間的特徴量とその影響を明確にすることに着目し、(a), (b) および (c) が各チャンネルの通信性能に対して与える影響推定を対象 AP における各チャンネルの IEEE802.11 制御フレームならびにデータフレーム監視により実現する。

4. 提案手法の詳細

4.1 チャンネル干渉レベルのプロファイリング

本研究では、IEEE802.11g のフレーム監視により観測可能な値 (3.2 節で述べた (a)~(c)) を用いて、各チャンネルでの干渉波の空間使用率を示す指標をどのように表現するかが課題となる。提案手法では、与干渉 AP 毎にフレーム監視した結果をもとに、その AP が対象 AP に与える干渉レベルをプロファイルする。

プロファイリングに必要な値は以下で取得する。まず干渉源となる与干渉 AP の存在を認識する必要がある。これに対し提案手法では、SSID または MAC アドレスを干渉源の識別子として利用する。SSID と MAC アドレスは、AP から定期的送信される Beacon フレームから取得できる。Beacon フレームは、通信に必要なさまざまな情報を周辺クライアントへ報知するために用いられる管理フレームであり、Beacon フレームのアドレスフィールドには、送信者 MAC アドレスおよび SSID が格納される。この情報をフレームから得ることで保持する。ここで、Beacon フレームを送信しない Passive AP も存在する。このような AP についてはクライアントが送信する Probe Request あるいは AP からの Probe Response から取得する。Probe Request や Probe Response も管理フレームであり、Probe Request は周辺の無線基地局の有無を端末から問い合わせるために、Probe Response は、Probe Request に対する基地局の応答用に用いられる。

次に、前述の (a)~(c) に対応する以下の $p_1 \sim p_3$ を与干渉 AP 毎に分類して得る。これらは被干渉 AP において自身宛でないフレームを受信した場合、そこから送信元あるいは宛先 MAC アドレスや SSID を取得し、SSID や MAC アドレス毎に分類した上で、以下の観測により得ることができる。

- 与干渉 AP から被干渉 AP への干渉信号強度 (p_1): データフレームの RSSI の時間平均値
- 与干渉 AP のチャンネル占有率 (p_2): データフレームを受信するために要した時間の割合
- 与干渉 AP と被干渉 AP の使用チャンネル間距離 (p_3): Beacon フレーム

4.2 干渉影響推定モデルの構築

提案手法では、事前に p_1 から p_3 の代表値を組み合わせた網羅的シミュレーションを行ない干渉レベル予測モデルを構築する。具体的には、被干渉 AP とそのクライアントの組、ならびに、与干渉 AP とそのクライアントの組、の計 4 機を設置し、 p_1 から p_3 の値の組み合わせを様々に変えたシミュレーションを実施した。シミュレーションより得られた結果を重回帰分析することで、与干渉 AP が単体

で与える干渉レベルを相対的な数値化する関数を得るものとする。これを元に、複数の AP が存在する状況ではそれらの単一 AP の干渉レベル予測関数を適切に組み合わせることにより、例えば基地局が密に設置された環境に対しても適用可能なものとなるようにしている。

4.2.1 重回帰分析による単一 AP の干渉影響予測関数の導出

被干渉 AP が単一の場合における網羅的シミュレーションは、図 3 に示したようなシステムを想定し以下のように実施した。被干渉 AP のクライアントは交差点路側機に画像から検出した車両情報を定期的に送信する車両監視カメラであると想定し、被干渉 AP とクライアント間の距離は 100m に固定した。与干渉 AP とクライアントは一般的なオフィスやホットスポットの AP とクライアントとみなし、それらの間の距離は 5m とした。被干渉 AP のクライアント（路上監視カメラ）は UDP を用いて車両感知情報（1.75ms ごとに 1Kbyte のパケット）を一定時間間隔で被干渉 AP に送信するものとした。図 6 がその概略図である。図中の下線部分を変化させることで p_1 から p_3 の値を変化させ、カメラクライアントから被干渉 AP への通信への影響を計測する。被干渉 AP と与干渉 AP の距離は 10m から 400m まで 10m 間隔で変えることで p_1 が変化する。与干渉 AP とそのクライアントには TCP ファイル転送をさせ、複数ファイルを転送する際のファイル読み出し間隔（ファイル送信が終了してから次ファイル送信開始までの時間）を 16 秒、8 秒、4 秒、1 秒、0.5 秒と変化させることで p_2 を変化させる。転送ファイルサイズは平均 2Mbyte とした。最後に、 p_3 は与干渉 AP が使用するチャンネルを変えて通信性能を計測した。被干渉 AP が使用するチャンネルを 6 に固定し、与干渉 AP には 6 から 12 の計 7 チャンネルを使用させた。これは図 2 に示したように、チャンネル間距離が 6 以上であるとチャンネル間の重畳が回避され相互に影響がなくなると考えられるため、チャンネル間距離が 7 以上の場合は考慮しないようにしたためである。通信性能指標として、被干渉 AP のカメラクライアントから UDP 送信されるデータフレームの到達率およびフレーム送信時間を用いる。

p_1 が 40 通り、 p_2 が 5 通り、 p_3 が 7 通りの全 2100 通りの組み合わせに対し、それぞれ 120 秒のシミュレーションを実施した結果について、 p_1 から p_3 を説明変数、到達率とフレーム送信時間を目的変数とした重回帰分析を行うことで、与干渉 AP 単位の性能影響推定関数を構築した。なお説明変数は単位が互いに異なるため正規化を行った値を用いている。また p_1 から p_3 の交互作用も考慮し説明変数として加え、ステップワイズ法を用いてそれらの最適選択を行なっている。

その結果、自由度調整済み決定係数の値がどちらの重回帰分析においても 0.8 を超える回帰式を得ることができた。以下の表 1, 2 にその結果を示す。

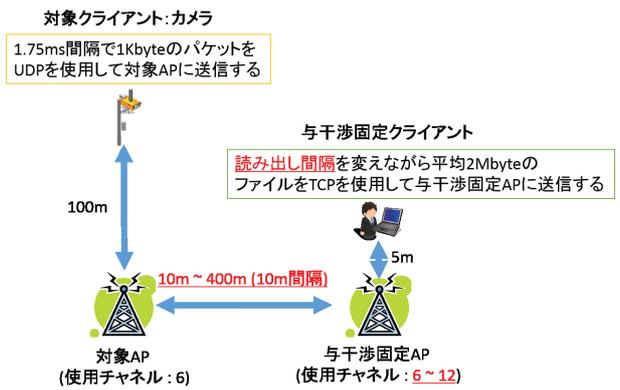


図 6 単一 AP の干渉影響予測関数構築のためのシミュレーションシナリオ

表 1 フレーム到達率を目的変数とした重回帰分析結果

	標準回帰係数
切片	-0.07169
p_1	-0.71630
p_2	-0.08459
p_3	0.61716
$p_1:p_2$	-0.39691
$p_2:p_3$	0.19120
$p_3:p_1$	0.38708
$p_1:p_2:p_3$	0.18834
自由度調整済み決定係数	0.8694

表 2 フレーム送信時間を目的変数とした重回帰分析結果

	標準回帰係数
切片	0.11519
p_1	0.70132
p_2	0.16685
p_3	-0.56666
$p_1:p_2$	0.48486
$p_2:p_3$	-0.28421
$p_3:p_1$	-0.37106
$p_1:p_2:p_3$	-0.20395
自由度調整済み決定係数	0.8337

4.2.2 複数 AP の干渉レベル推定関数の構築

次に、与干渉 AP とそのクライアントを 2 組とした場合の網羅的シミュレーションも実施した。想定されるすべての状況に対する正しい推定関数を得るためには、あらゆる AP の配置やトラフィック量について網羅的にシミュレーションを実施することが理想的であるが、組み合わせ総数を考慮した場合には現実的でない。そこで提案手法では干渉源となる AP が複数存在している環境も、単一 AP の干渉推定影響の組み合わせによりある程度推定可能であることを示し、その組み合わせ方を発見する。

単一 AP でのシミュレーションと同じ要素数で AP2 組のシミュレーションを実施すると、シミュレーション総数が膨大になるため、単一 AP 時の知見に基づきパラメータ値域を以下のように限定した（図 7 の下線部分）。具体

的には、与干渉 AP 毎に対象 AP との距離を 10m, 100m, 250m, ファイル読出し間隔を 16 秒, 2 秒, 0.5 秒, 与干渉 AP の利用チャンネルは 3, 5, 6, 7, 9 とした。これらの組み合わせである 600 通りに対し 80 秒のシミュレーションを実施した。

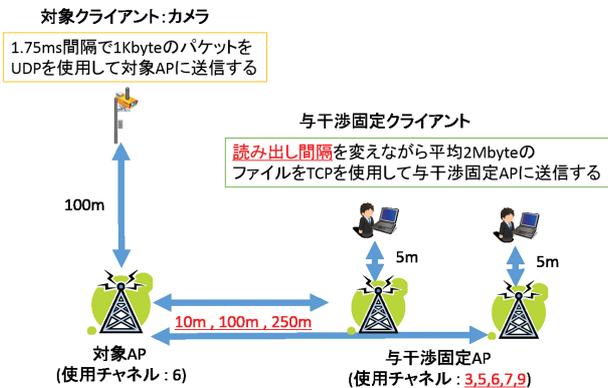


図 7 複数 AP の干渉レベル予測関数構築を目的としたシミュレーション

次に、単一 AP の推定関数として得られた回帰式 (表 1) から、与干渉 AP それぞれが被干渉 AP の使用チャンネル (チャンネル 6) に与える影響度を算出し、それらの値を加算した値と、本シミュレーションで得られたフレーム到達率の相関関係をプロットした散布図を図 8 に示す。スピアマンの順位相関係数を算出したところ、0.85 であり非常に強い正の相関があると認められた。送信遅延についても回帰式 (表 2) から影響度を算出し、同様に相関関係をプロットした散布図を図 9 に示す。スピアマンの順位相関係数は 0.77 であり、かなり強い正の相関があると認められる。これらの結果から、少なくとも与干渉 AP が 2 組ある状況では単一 AP で得た影響推定関数の加算により得られると考えてよいことが示された。

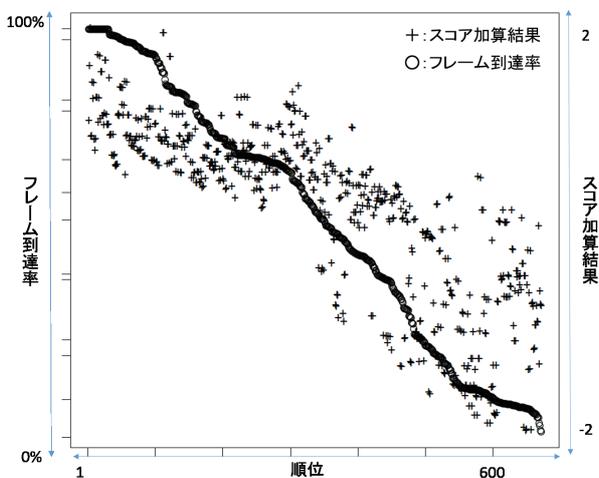


図 8 フレーム到達率と影響度加算結果の散布図

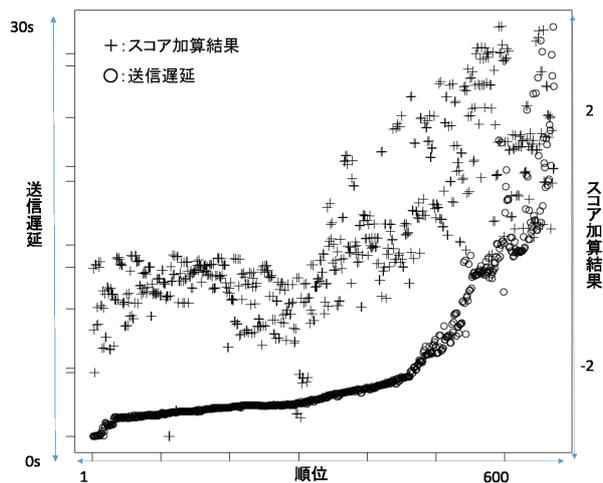


図 9 送信遅延と影響度加算結果の散布図

4.2.3 チャンネル推定方法

被干渉 AP は全チャンネルのフレーム監視を一定期間実施し、干渉環境に存在する各与干渉 AP に対して、識別子としての MAC アドレスや SSID, 性能影響モデルの入力として使用する使用チャンネルや平均 RSSI および帯域占有率といった値を把握する (図 10)。その結果から各チャンネルにおける干渉影響度を前述の方法で算出する。なお、フレーム到達率が高いチャンネルと送信遅延が短くなるようなチャンネルが異なる場合、フレーム到達率が高いチャンネルを優先して選択するものとする。

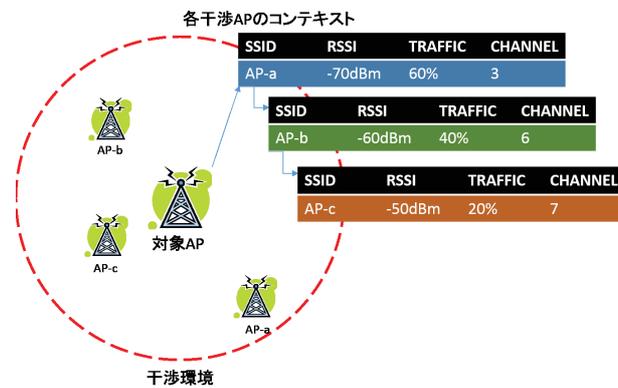


図 10 被干渉 AP においてフレーム監視より得た干渉源情報

5. 性能評価

与干渉 AP を面的に配置した状況において、対象 AP 使用チャンネルに対する影響推定を行い提案手法の性能評価を行う。最もフレーム到達率が高いチャンネルを推定することを目的としており、各 AP から干渉影響予測関数より算出されるスコアの総和からそのようなチャンネルを推定できることを確認する。

5.1 Scenargie シミュレーションの設定

1組の対象 AP と対象クライアントに対し、4組の与干渉 AP とそのクライアントを面的に 150 m × 150m の領域に配置し性能評価実験を行った。図 11 に想定環境を示す。対象 AP は 100m 先の道路を撮影し車両感知情報を発信するクライアントと通信を行うが、干渉源となるようなコンビニの AP(干渉源 1)、ホットスポット AP(干渉源 2)、オフィス AP(干渉源 3, 4) が存在する。このような環境下において、提案手法を用いて相対的な干渉レベルの推定を行う。領域内に存在するそれぞれのノードの座標は表 3 に示す。与干渉 AP のクライアントは各 AP の 5m 北側に存在するものとする。対象 AP や干渉源で行われている通信は干渉レベル推定モデルの構築を行った時の通信と同じ設定を用いた。対象アクセスポイントがチャンネルを 1 から 13 まで変化させながら、各チャンネルにおいて 20 秒間通信を行ないながら、全チャンネルの監視とスコアリングを行う。算出されたスコアによるチャンネル干渉レベルと実際に観測できたフレーム到達率を比較することで提案手法の性能を評価する。

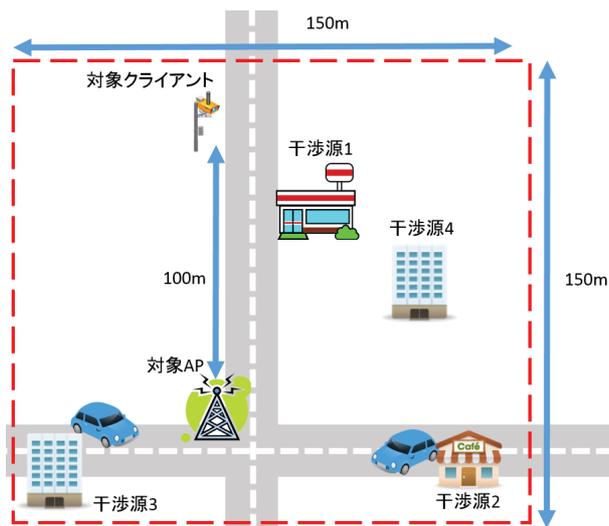


図 11 想定した環境

表 3 ノードの設定

ノード名称	座標	使用チャンネル
対象 AP	(75.000,25.000)	1~13
対象クライアント	(75.000,125.000)	1~13
与干渉 AP1	(87.220,105.632)	4
与干渉クライアント 1	(87.220,110.632)	4
与干渉 AP2	(148.151, 14.946)	4
与干渉クライアント 2	(148.151, 19.946)	4
与干渉 AP3	(3.433, 20.508)	7
与干渉クライアント 3	(3.433, 25.508)	7
与干渉 AP4	(139.297, 85.083)	7
与干渉クライアント 4	(139.297, 30.508)	7

5.2 提案手法の性能評価

性能評価実験の結果を表 4 にまとめた。結果はフレーム到達率が高いと推定されるスコア順にチャンネルを並べている。干渉源のチャンネルが 4 と 7 であることからチャンネルが 10 以降のフレーム到達率が高くなることが予想できるが、同時にスコアも大きくなっていることが確認された。スコアによる順位とフレーム到達率の順位が入れ替わる部分が存在するが、スピアマンの順位相関係数を算出したところ、0.83 となりかなり強い正の相関があると認められた。以上の結果から、フレーム監視のみから最もフレーム損失率の少ないチャンネルを予測することができ、かつチャンネルの相対的な干渉レベル順位も高い精度で予測できていることが示せたといえる。

表 4 スコアリングの結果

チャンネル番号	スコア	実際のフレーム到達率 (順位)
13	6.74	100%(1)
12	4.78	100%(1)
11	2.82	100%(1)
1	2.09	97.7%(4)
10	0.86	34.3%(7)
2	0.53	19.2%(11)
9	-0.20	69.9%(5)
3	-0.23	21.1%(10)
4	-0.78	33.0%(8)
8	-1.58	65.7%(6)
7	-1.84	31.1%(9)
5	-2.09	0%(12)
6	-2.95	0%(12)

6. あとがき

本研究では、密に基地局が設置されているような都市環境において、無線 LAN の各チャンネルに対する干渉がどの程度通信性能に影響を与えるかをフレーム監視により推測し、干渉の影響が小さいと予測されるチャンネルを推定する方法を提案した。さらに、シミュレータ Scenargie を用いて、与干渉固定 AP とクライアントを対象とした評価実験を行った結果、遅延時間が少ないチャンネルをフレーム観測情報から選択することができた。

今後は、AirPcap や Wireshark を用いた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、より実用性を高めていきたい。

参考文献

- [1] Space-Time Engineering, LLC. Scenargie. <http://www.spacetime-eng.com/>.
- [2] J E Wieselthier, C M Barnhart, and A Ephremides.

- A neural network approach to routing without interference in multihop radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 42, No. 1, pp. 166–177, January 1994.
- [3] R.G. Ogier and D.A. Beyer. Neural network solution to the link scheduling problem using convex relaxation. In *Proc. of GLOBECOM '90.*, IEEE, pp. 1371–1376 vol.2, Dec 1990.
- [4] C. M. Barnhart, J. E. Wieselthier, and A. Ephremides. A neural network approach to solving the link activation problem in multihop radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 43, No. 234, pp. 1277–1283, February 1995.
- [5] N. Funabiki and S. Nishikawa. A binary neural network approach for link activation problems in multihop radio networks. *IEICE Transactions on Networking*, Vol. E79-B, No. 8, pp. 1086–1093, August 1996.
- [6] A. A. Bertossi and M. A. Bonuccelli. Code assignment for hidden terminal interference avoidance in multihop packet radio networks. *IEEE Transactions on Networking*, Vol. 3, No. 4, pp. 441–449, August 1995.
- [7] N. Funabiki and J. Kitamichi. A gradual neural-network algorithm for jointly time-slot/code assignment problems in packet radio networks. *IEEE Transactions on Networking*, Vol. 9, No. 6, pp. 1523–1528, November 1998.
- [8] B. Hajek and G. Sasaki. Link scheduling in polynomial time. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 34, No. 5, pp. 910–917, September 1988.
- [9] U. Mukherji. A periodic scheduling problem in flow control for data communication networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 35, No. 2, pp. 436–443, March 1989.
- [10] V. S. Anil Kumar, Madhav V. Marathe, Srinivasan Parthasarathy, and Aravind Srinivasan. Algorithmic aspects of capacity in wireless networks. *Proceedings of the SIGMETRICS*, Vol. 33, No. 1, pp. 133–144, June 2005.
- [11] Romeo Giuliano, Cristiano Monti, and Pierpaolo Loretì. WiMAX fractional frequency reuse for rural environments. *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 15, No. 3, pp. 60–65, 2008.
- [12] Jing Sheng, Tse David NC, Soriaga Joseph B, Hou Jilei, Sme John E, Padovani Roberto, et al. Multicell downlink capacity with coordinated processing. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2008, , 2008.
- [13] M. Kemal Karakayali, Gerard J. Foschini, and Reinaldo A. Valenzuela. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems. *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 13, No. 4, pp. 56–61, 2006.
- [14] Nihar Jindal, Jeffrey G. Andrews, and Steven Weber. Bandwidth partitioning in decentralized wireless networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, Vol. 7, No. 12, pp. 5408–5419, 2008.
- [15] R. Veronesi, V. Tralli, J. Zander, and M. Zorzi. Distributed dynamic resource allocation with power shaping for multicell SDMA packet access networks. In *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004)*, Vol. 4, pp. 2515 – 2520, march 2004.
- [16] Arunesh Mishra, Vivek Shrivastava, Dheeraj Agrawal, Suman Banerjee, and Samrat Ganguly. Distributed channel management in uncoordinated wireless environments. In *Proc. of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobi-com 2006)*, pp. 170–181. ACM, 2006.
- [17] Yue Chen. Soft handover issues in radio resource management for 3G WCDMA networks. 2003.
- [18] S. Pack, Jaeyoung Choi, Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi. Fast-handoff support in IEEE 802.11 wireless networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, Vol. 9, No. 1, pp. 2–12, 2007.
- [19] Riaz Hussain, Shahzad A. Malik, Shafayat Abrar, Raja A. Riaz, Hassan Ahmed, and Shahid A. Khan. Vertical handover necessity estimation based on a new dwell time prediction model for minimizing unnecessary handovers to a WLAN cell. *Wireless Personal Communications*, Vol. 71, No. 2, pp. 1217–1230, 2013.
- [20] Karthikeyan Sundaresan and Konstantina Papagiannaki. The need for cross-layer information in access point selection algorithms. In *Proceedings of the 6th ACM Special Internet Measurement Conference (IMC '06)*, pp. 257–262. ACM, 2006.
- [21] Daniel Aguayo, John Bicket, Sanjit Biswas, Glenn Judd, and Robert Morris. Link-level measurements from an 802.11b mesh network. In *Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, SIGCOMM '04, pp. 121–132, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [22] Shravan Rayanchu, Ashish Patro, and Suman Banerjee. Airshark: detecting non-WiFi RF devices using commodity WiFi hardware. In *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference*, pp. 137–154. ACM, 2011.
- [23] A. Awad, T. Frunzke, and F. Dressler. Adaptive distance estimation and localization in WSN using RSSI measures. In *10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools (DSD 2007)*, pp. 471–478, Aug 2007.
- [24] K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic, and Z. Cucej. Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee. In *Proc. of 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 2008.*, pp. 303–306, June 2008.
- [25] D. Malone, P. Clifford, and D.J. Leith. Mac layer channel quality measurement in 802.11. *Communications Letters, IEEE*, Vol. 11, No. 2, pp. 143–145, Feb 2007.
- [26] V.P. Mhatre, K. Papagiannaki, and F. Baccelli. Interference mitigation through power control in high density 802.11 WLANs. In *Proc. of 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 535–543, May 2007.
- [27] Aditya Akella, Glenn Judd, Srinivasan Seshan, and Peter Steenkiste. Self-management in chaotic wireless deployments. In *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '05, pp. 185–199, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [28] B. Kauffmann, F. Baccelli, A. Chaintreau, V. Mhatre, K. Papagiannaki, and C. Diot. Measurement-based self organization of interfering 802.11 wireless access networks. In *Proc. of 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 1451–1459, May 2007.
- [29] Riverbed. <http://www.riverbed.com/>.