

令和07年度 卒業論文

エンタープライズ無線LAN環境における通信品質
改善のためのユーザ行動支援手法

電気通信大学 情報理工学域

I類 コンピュータサイエンスプログラム

学籍番号 2210182

氏名 上川雅弘

指導教員 矢 俊志

令和08年X月XX日

概要

本論文では、エンタープライズ無線 LAN 環境における通信品質改善のためのユーザ行動支援手法に関する研究について述べる。近年、インターネット環境の質は、業務の効率や生産性、さらには顧客満足度やサービスの信頼性にまで大きな影響を及ぼす要因となっている。快適なインターネット環境の整備は、事業や活動の成果に直結する重要な要素である。企業や大学における、多数のユーザが同時にアクセスするエンタープライズ無線 LAN 環境 (以下、無線 LAN) においても、利用者に対して高品質な通信体験を提供することが求められている。

無線 LAN では、多数の AP を広範囲にわたって配置し、ユーザの移動や利用状況に応じて柔軟にネットワークを提供する必要がある。このためには、通信の品質を維持・向上させるための高度な管理が不可欠である。

従来、無線 LAN 環境の最適化においては、ネットワーク管理者側が、AP 設置位置の最適化、チャネルの割り当て調整、通信トラフィックの分散制御などを行ってきた。このような管理者による調整で無線 LAN 環境をある程度改善できる一方で、依然として不特定要素は多い。建物の構造による電波の遮蔽や反射、無線干渉、ユーザの予測困難な移動や利用行動といった、管理者の制御がおよばない要素が多数存在する。これらの要素が複雑に絡み合うことで、利用者の環境では通信品質のばらつきや一時的な接続不良といった通信不良が発生している。こうした現状を踏まえた上で、より快適な無線 LAN 環境を実現するため、従来の管理者主体のアプローチに加え、利用者側の行動を踏まえた無線 LAN 環境改善のための新たなアプローチが必要とされている。

本研究では、エンタープライズ向け無線 LAN 環境における通信品質改善のためのユーザ行動支援手法を提案する。シミュレーションツール ns-3 を使用したシミュレーションの結果、【主要な成果】が確認できた。

目次

1	はじめに	4
1.1	研究の背景	4
1.2	研究の目的	5
1.3	本論文の構成	6
2	背景知識	7
2.1	無線 LAN の基礎技術	7
2.2	無線 LAN の通信方式	7
2.3	無線 LAN のチャンネルと周波数帯域	7
2.4	無線 LAN における通信品質のパラメータ	8
2.5	チャンネル使用率	8
2.6	AP 密集環境における干渉問題	9
2.7	管理外 AP による影響	9
2.8	AP 選択方式とその課題	9
2.9	ユーザ移動と通信品質の関係	10
2.10	無線 LAN における負荷分散の考え方	10
3	提案手法	11
3.1	提案手法の概要	11
3.2	提案アルゴリズム	11
3.2.1	入力情報と前提条件	12
3.2.2	接続候補 AP の抽出	12
3.2.3	接続前後のスループット推定	12
3.2.4	評価スコアの算出	13
3.3	最適 AP および移動ベクトルの決定	13
3.4	アルゴリズムの特徴	13
3.5	実装	14
4	評価	15
4.1	評価環境	15
4.2	評価方法	15
4.3	評価結果	15

4.4 考察	15
5 おわりに	16
5.1 まとめ	16
5.2 今後の課題	16
謝辞	17
参考文献	18
A 付録	19

1 はじめに

1.1 研究の背景

現代社会において、インターネットは社会インフラとして不可欠な存在となっている。スマートフォンやタブレット、ノートパソコンなどのモバイル端末の普及に伴い、人々がインターネットに接続する機会は飛躍的に増加し、もはや日常生活のあらゆる場面でネットワーク接続が求められるようになった。特に、カフェやレストラン、図書館、商業施設、イベント会場、空港などの公共空間においては、無線 LAN 環境の提供が利用者にとっての重要な選択基準の一つとなっており、Wi-Fi 設備は事実上の標準装備として認識されるに至っている。

このような状況を受け、多くの施設運営者は Wi-Fi 環境の整備に積極的に取り組んできた。アクセスポイントの増設、高性能な通信機器の導入、広帯域な回線の契約など、設備面での投資は年々拡大している。しかし、これらの設備投資にもかかわらず、実際の利用現場では「Wi-Fi が繋がりにくい」「通信速度が遅い」「接続が頻繁に切れる」といった利用者からのクレームや不満が後を絶たない。特に、多数の利用者が同時にネットワークを利用する状況（大規模なイベント会場、セミナー会場、人気カフェの混雑時など）においては、通信品質の著しい低下が頻繁に報告されている。

現在、こうした問題に対処するため、ネットワークオペレーションセンター (NOC) をはじめとする管理者側は様々な技術的施策を講じている。帯域制御による公平な帯域分配、QoS(Quality of Service) 設定による優先制御、チャンネル割り当ての最適化、干渉源の特定と除去、アクセスポイントの動的な負荷分散など、様々なネットワーク管理技術が使われている。また、リアルタイムでのトラフィック監視やログ解析、異常検知システムの導入など、運用管理の自動化・効率化も進められてきた。しかしながら、これらの管理者側の努力にもかかわらず、通信品質の問題は根本的な解決には至っていないのが現状である。その理由の一つとして、従来のアプローチが主にネットワーク機器やインフラ側の最適化に焦点を当てており、実際にネットワークを利用する「ユーザ」の行動や振る舞いについては十分に考慮されてこなかったことが挙げられる。例えば、利用者が一箇所に集中してしまうことによるアクセスポイントへの負荷の偏り、不要なアプリケーションのバックグラウンド通信による帯域の圧迫、同時に大容量ファイルのダウンロードを開始することによる輻輳の発生など、利用者の行動パターンがネットワーク全体のパフォーマンスに大きな影響を与えている事例は数多く存在する。通信環境の問題を技術的側面からのみ捉えるのではなく、通信システムを構成する一要素として「ユーザ」を位置づけ、利用者の行動も含めた全体最適を図る必要があると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、従来のネットワーク管理の枠組みを拡張し、人間を通信環境を構成する重要な要素として明示的に捉えることで、通信品質の改善を実現することにある。具体的には、利用者に対して適切な行動を促すことにより、ネットワーク全体のパフォーマンスを向上させる手法を提案し、その有効性を検証する。

従来の通信品質改善アプローチは、ネットワーク機器の性能向上や設定の最適化といった技術的施策に依存してきた。しかし、いかに高性能な機器を導入し、精緻な制御アルゴリズムを実装したとしても、利用者の非効率的な行動や無自覚な振る舞いがボトルネックとなっている場合には、期待される効果は得られない。本研究では、この問題意識に基づき、人間を通信システムの受動的な利用者としてではなく、能動的に通信品質に影響を与える主体として位置づける。具体的には、利用者の行動を適切に誘導することで、以下のような通信品質の改善効果が期待できる。

第一に、空間的な負荷分散の実現である。特定のアクセスポイントに利用者が集中することを避け、より空いているエリアへの移動を促すことで、各アクセスポイントの負荷を均等化し、全体としての通信品質を向上させることができる。

第二に、各ユーザの通信パターンの最適化である。ユーザによって、必要とする通信帯域は異なるはずであるため、各ユーザが必要とする最低限度の帯域を利用するよう促すことで、全体の帯域利用効率を高めることができる。

第三に、ユーザの行動を最小限に抑えることである。ユーザが無駄な移動を行ったり、ランダムに移動したりすれば、ネットワーク全体の負荷が増大し、通信品質が低下する可能性がある。そのため、ユーザに対して最小限の行動で済むような誘導を行うことで、通信品質の安定化を図ることができる。さらに、この考え方に基づいたシステムを用いることで、ユーザにかかる負担が最小限度で済むため、継続してシステムを利用してもらえる可能性が高まる。

本研究では、これらの行動変容を実現するための具体的な仕組みとして、利用者へのリアルタイムなフィードバックや推奨行動の提示、ゲーミフィケーション要素の導入、インセンティブ設計などを検討する。また、提案手法の実用性を評価するため、実環境またはシミュレーション環境において実験を行い、通信品質の改善効果を定量的に測定する。

最終的に本研究は、ネットワーク管理における新たなパラダイムとして、「人間中心型ネットワーク管理」の概念を提唱し、その実現可能性と有効性を示すことを目指す。技術と人間の協調によって、より快適で持続可能な通信環境を構築するための知見を提供することが、本研究の最終的な到達目標である。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す．第 2 章では，本研究に関連する背景知識について述べる．第 3 章では，提案手法・システムについて述べる．第 4 章では，評価実験について述べる．第 5 章で本論文をまとめる．

2 背景知識

2.1 無線 LAN の基礎技術

無線 LAN(Wireless Local Area Network) は, IEEE 802.11 標準規格に基づく無線通信技術により構築されるネットワークである。システムは主にアクセスポイント (AP: Access Point) とクライアント端末から構成される。AP が 2.4GHz 帯または 5GHz 帯 (IEEE 802.11ax 以降では 6GHz 帯も利用可能) の電波を用いてクライアントとの双方向通信を実現する。近年の規格発展により, IEEE 802.11ac(Wi-Fi 5) では最大 6.9Gbps, IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6) では最大 9.6Gbps の理論スループットが達成されている。しかし, 実環境では後述する様々な要因により, 実効スループットは理論値を大きく下回ることが知られている。

2.2 無線 LAN の通信方式

無線 LAN は, CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式を採用している。この方式では, 端末が通信を開始する前にチャンネルの状態を監視し, 他の端末が通信中でないことを確認してから送信を行う。もしチャンネルが使用中であれば, ランダムなバックオフ時間を待機した後に再度チャンネルの状態を確認する。これにより, 複数の端末が同時に通信を試みた際の衝突を回避し, 効率的なチャンネル利用を実現している。さらに, ACK(acknowledgment) フレームを用いた確認応答機能により, 送信データの正確な受信を保証している。受信側は正常にデータを受信した場合に ACK フレームを送信し, 送信側はこれを受信することでデータの到達を確認する。ACK が受信されない場合, 送信側は再送を行うことで信頼性の高い通信を実現している。

2.3 無線 LAN のチャンネルと周波数帯域

無線 LAN は, 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の周波数帯域を利用して通信を行う。2.4GHz 帯は, 電波の到達距離が長く, 障害物に対する透過性が高い一方で, 他の無線機器 (電子レンジ, Bluetooth 機器など) との干渉が発生しやすい。一方, 5GHz 帯は, より広い帯域幅を提供し, 高速な通信が可能であるが, 電波の到達距離が短く, 障害物による減衰が大きいという特性がある。無線 LAN では, 複数のチャンネルが定義されており, 各チャンネルは特定の周波数範囲を占有する。2.4GHz 帯では, 通常 1~14 チャンネルが利用可能であり, 各チャンネルは 20MHz の帯域幅を持つ。5GHz 帯では, より多くのチャンネルが利用可能であり, 20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz の帯域幅を持つチャンネルが存在する。チャンネル選択は, 干渉の回避と通信品質の最適化において重要な役割を果たす。

2.4 無線 LAN における通信品質のパラメータ

無線 LAN 環境における通信品質は、以下の主要なパラメータが存在する。

1. スループット

単位時間あたりに転送可能なデータ量 (bps) であり、この値が小さくなるとユーザ体感品質が低下する。

2. 遅延 (レイテンシ)

データ送信から受信完了までの時間 (ms) を表し、リアルタイム通信において特に重要となる。この値が大きくなると、ライブ配信や Web 会議等のリアルタイム性を要する通信に支障が生じる。

3. パケットロス率

送信されたパケットのうち、正常に受信されなかった割合 (%) を示す。再送制御の増加により遅延やスループット低下の原因となる。

4. 受信信号強度 (RSSI)

受信電波の強度 (dBm) を表し、通信可能範囲や接続安定性の指標となる。一般に -70dBm 以上が良好、-80dBm 以下で通信品質が著しく低下する。

5. 信号対雑音比 (SNR)

信号強度と雑音レベルの比 (dB) であり、高い SNR はより高速な変調方式の使用を可能にする。

6. チャンネル使用率

チャンネルの使用状況を示すパラメータであり、通信品質に影響を与える。詳細は後述する。

2.5 チャンネル使用率

チャンネル使用率は、無線 LAN チャンネルが占有されている割合を示す指標であり、通信品質に大きな影響を与える。高いチャンネル使用率は、他の端末による通信が頻繁に発生していることを意味し、新たな通信の開始が困難になる。これにより、スループットの低下、遅延の増加、パケットロス率の上昇といった通信品質の劣化が生じる。チャンネル使用率は、通常 0% から 100% の範囲で表され、100% に近い値はチャンネルがほぼ常に占有されている状態を示す。一般に、チャンネル使用率が 70% を超えると、通信品質の低下が顕著になるとされている。チャンネル使用率の測定は、無線 LAN 機器や専用の解析ツールを用いて行われる。これらのツールは、チャンネルの占有時間を監視し、使用率をリアルタイムで算出する機能

を備えている。ネットワーク管理者は、チャンネル使用率の情報を活用して、チャンネルの最適化や負荷分散の施策を講じることが可能である。チャンネル使用率 CU は、測定の単位時間 T を用いて、一般に以下の式で計算される。

$$CU(\%) = \frac{T_{busy}}{T} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 T_{busy} は、観測期間中にチャンネルが他の端末によって使用されていた総時間を指す。

2.6 AP 密集環境における干渉問題

エンタープライズ無線 LAN 環境では、通信容量の確保やカバレッジの向上を目的として、多数のアクセスポイント (AP) が高密度に配置されることが一般的である。しかし、AP が高密度に配置される環境では、隣接チャンネル干渉や同一チャンネル干渉が発生しやすくなり、通信品質の低下を招く要因となる。

同一チャンネル干渉は、複数の AP が同一のチャンネルを使用することにより発生し、CS-MA/CA 方式に基づく送信待ち時間の増加を引き起こす。一方、隣接チャンネル干渉は、周波数帯域が部分的に重複するチャンネルを使用する場合に発生し、パケット誤り率の増加や再送の増大につながる。これらの干渉は、物理的な距離が十分に離れていない AP 間で顕著となり、結果としてスループットや遅延特性に悪影響を及ぼす。

2.7 管理外 AP による影響

近年の無線 LAN 環境では、管理者が設置・管理していない通信機器が通信品質に影響を与えるケースが増加している。具体的には、来訪者が持ち込むモバイルルータやスマートフォンのテザリング機能などが挙げられる。これらの管理外 AP は、既存の無線 LAN システムと同一または隣接するチャンネルを使用する場合が多く、予期せぬチャンネル使用率の増加を引き起こす。

管理外 AP はネットワーク管理者からは直接制御することができず、その存在や通信状況を正確に把握することが困難である。そのため、AP と端末間の距離や受信信号強度のみを基準とした接続制御では、実際の通信品質を適切に評価できない場合がある。

2.8 AP 選択方式とその課題

無線 LAN における AP 選択は、クライアント端末がどの AP に接続するかを決定する重要なプロセスである。一般的な端末では、受信信号強度 (RSSI) が最も高い AP を選択する方式が広く用いられている。この方式は実装が容易である一方で、AP の混雑状況やチャンネル使用率を考慮していないという課題がある。

その結果、多数の端末が特定の AP に集中し、通信品質の低下や負荷の偏りが発生することが知られている。このような問題は、AP の設置間隔が短いエンタープライズ環境において特に顕著であり、RSSI のみを用いた AP 選択の限界を示している。

2.9 ユーザ移動と通信品質の関係

無線 LAN 環境における通信品質は、ユーザ端末の位置に大きく依存する。ユーザが AP に近づくことで受信信号強度や SNR が向上し、高速な変調方式の利用が可能となる。一方で、AP 周辺は多くのユーザが集中しやすく、チャンネル使用率の増加によって必ずしも高いスループットが得られるとは限らない。

また、ユーザのわずかな移動によっても、接続 AP や利用チャンネルが変化し、通信品質が大きく変動する場合がある。このことから、ユーザの位置情報と無線環境情報を組み合わせて評価することが、通信品質の最適化において重要であるといえる。

2.10 無線 LAN における負荷分散の考え方

無線 LAN 環境では、特定の AP やチャンネルに通信負荷が集中することを避けるため、負荷分散が重要な課題となる。従来の負荷分散手法は、主に AP 側での送信制御や接続制限といった管理者主導の手法が中心であった。しかし、これらの手法はリアルタイム性や利用者体感品質の観点から限界がある。

近年では、利用者の行動や接続選択がネットワーク全体の性能に影響を与えるという観点から、ユーザを含めた負荷分散の重要性が指摘されている。このような背景から、ネットワーク側の情報を活用してユーザに適切な行動を促す手法が注目されている。

3 提案手法

3.1 提案手法の概要

本研究では、エンタープライズ無線 LAN 環境における通信品質の改善を目的として、ネットワーク管理側の制御のみに依存するのではなく、利用者自身の能動的な行動変容を促すことにより、通信環境全体の最適化を図るユーザ行動支援手法を提案する。近年、オフィスビルや大学キャンパスなどのエンタープライズ環境では、無線 LAN が業務や学習を支える基盤インフラとして広く利用されている一方で、利用者数や端末数の増加に伴い、通信品質のばらつきやスループット低下が問題となっている。

従来の無線 LAN 管理における最適化アプローチは、主にアクセスポイント (AP) の設置位置の最適化、チャネル割り当ての調整、送信出力制御といった、管理者主導の技術的施策に焦点が当てられてきた。これらの手法は、静的あるいは準静的な環境を前提とした場合には有効であるものの、実際の運用環境では必ずしも十分な効果を発揮しない場合が多い。

その要因として、建物構造による電波の遮蔽や反射、不特定多数のユーザによる予測困難な移動、さらには来訪者が持ち込むモバイルルータやテザリング端末といった管理外の通信端末による干渉など、時間的・空間的に変動する要素が挙げられる。これらの動的な要因を、管理者側の制御のみでリアルタイムに把握し、完全に解決することは困難である。

そこで本研究では、通信システムを構成する重要な要素として「ユーザ」に着目し、ネットワーク側が把握可能な環境情報と、ユーザ自身が提供する情報を組み合わせることで、ユーザに対して適切な行動指針を提示する新たなアプローチを検討する。具体的には、ネットワーク管理側から取得可能な情報に基づき、ユーザに対して最適な接続先 AP や、通信品質の向上が期待できる移動先を提示することで、高品質な通信体験の実現を目指す。

3.2 提案アルゴリズム

本研究では、エンタープライズ無線 LAN 環境において新たに接続を行う利用者に対し、通信品質の向上を目的として、最適なアクセスポイント (AP) および移動方向を提示するアルゴリズムを提案する。提案手法は、AP と利用者端末の距離に基づいて接続先を決定する従来手法を拡張し、AP が使用しているチャネルの使用率や接続ユーザ数といった無線環境の混雑状況を考慮する点に特徴がある。本研究では、通信品質 (QoE) の評価指標としてスループットを採用し、新規ユーザの接続によってシステム全体のスループットが最大化されることを目的とする。

3.2.1 入力情報と前提条件

提案アルゴリズムは，新規ユーザ u に対して以下の情報が与えられていることを前提とする．

- 現在位置 P_u
- 許容最大移動距離 d_{th}
- 最低要求スループット θ_{th}

また，無線 LAN 環境内に存在する AP の集合を A とし，各 AP $a \in A$ に対して以下の情報が既知であると仮定する．

- AP の位置座標 P_a
- 接続中のユーザ数 n_a
- 使用チャネルの使用率 U_c
- 接続前の平均スループット θ_a^{before}

なお，本研究では位置情報の取得方法や入力インタフェースについては議論せず，ユーザが自己申告により現在位置を入力できるものと仮定する．

3.2.2 接続候補 AP の抽出

新規ユーザが移動可能な範囲内に存在する AP のみを接続候補として抽出する．ユーザの移動は移動ベクトル m により表され，移動後のユーザ位置は $P_u - m$ とする．このとき，移動後のユーザと AP a との距離 $d_{u,a}$ は以下の式で定義される．

$$d_{u,a} = |P_a - (P_u - m)| \quad (2)$$

距離 $d_{u,a}$ が許容最大移動距離 d_{th} 以下となる AP の集合を，接続候補 AP 集合 A_{cand} とする．

3.2.3 接続前後のスループット推定

次に，各接続候補 AP に対して，新規ユーザ接続前後のスループットを推定する．AP a に接続されている既存ユーザの平均スループット θ_a^{before} は，接続ユーザのスループットの調和平均として与えられているものとする．

新規ユーザが AP a に接続した場合のスループット $\theta_{a,m}^{after}$ は、AP とユーザ間の距離およびチャンネル使用率 U_c を考慮して推定される。このとき、新規ユーザのスループットが最低要求スループット θ_{th} を下回る場合、または移動距離が許容最大移動距離 d_{th} を超える場合には、当該 AP を接続候補から除外する。

3.2.4 評価スコアの算出

残った接続候補 AP に対して、以下の 4 つの評価指標を用いて総合スコアを算出する。

1. 接続後スループットに基づくスループットスコア
2. ユーザと AP の距離に基づく距離スコア
3. AP が使用するチャンネルの使用率に基づくチャンネル使用率スコア
4. AP に接続されているユーザ数に基づく接続ユーザ数スコア

各スコアは正規化された値として算出され、重み係数 w_i を用いて以下の式により総合スコア $Score(a)$ を計算する。

$$Score(a) = \sum_i w_i \cdot score_i(a) \quad (3)$$

3.3 最適 AP および移動ベクトルの決定

提案アルゴリズムでは、総合スコアが最大となる AP を単純に選択するのではなく、総合スコア上位の複数 AP を候補として扱う。その上で、各候補 AP に対して、新規ユーザ接続後のシステム全体のスループットを算出し、これが最大となる AP a^* と移動ベクトル m^* を最終的な出力とする。

システム全体のスループット $\Theta_{a,m}^{after}$ は、以下の式で表される。

$$\Theta_{a,m}^{after} = \theta_{a,m}^{after} + \sum_{i \neq a} \theta_i^{before} \quad (4)$$

3.4 アルゴリズムの特徴

提案アルゴリズムの特徴を以下にまとめる。

- AP とユーザ間の距離に加え、チャンネル使用率および接続ユーザ数を考慮した AP 選択を行う点

- ユーザの許容移動距離および最低要求スループットを制約条件として明示的に導入している点
- 新規ユーザ単体ではなく，システム全体のスループット最大化を目的としている点

これにより，実環境における電波干渉や負荷の偏りを考慮した，現実的かつ合理的な AP 選択および移動誘導が可能となる．

3.5 実装

【実装の詳細について記述】

4 評価

4.1 評価環境

【評価環境について記述】

4.2 評価方法

【評価方法について記述】

4.3 評価結果

【評価結果について記述】

4.4 考察

【評価結果に対する考察を記述】

5 おわりに

5.1 まとめ

本研究では,【研究内容の要約】について述べた.

5.2 今後の課題

今後の課題として,【今後の課題や展望】が挙げられる.

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究テーマや方針について多大なるご指導を賜りました矢俊志先生に心より感謝申し上げます。また、日頃より支えてくださった家族に対しても、ここに感謝の意を表します。

参考文献

A 付録

【必要に応じて付録を記述】