パケットキャプチャによる複数無線 LAN チャネルのスループット同時推定の高精度化

研究代表者　　成　枝　秀　介　　九州工業大学　情報工学部　教授

1 はじめに

IEEE 802.11[1]などの無線 LAN（WLAN）技術は多種多様な目的で広く利用されている．タブレット，スマートフォン，ノート PC など，さまざまな種類の機器が，どこでも WLAN 技術を利用してインターネットに接続できる．一方，物理センサやマイクロコントローラ，WLAN トランシーバなどで構成される膨大な数の IoT デバイスを擁する IoT アプリケーションにおいては，スマートハウスや人間中心の健康・ウェルネスモニタリング[2]など，観測データを収集するために WLAN 技術が採用されている．これらのシステムを強力にサポートするため，WLAN 用のアクセスポイントが密集して配置され，システムとそのユーザーに提供されている．しかし，このような状況は，2.4GHz の産業・科学・医療（ISM）帯などの WLAN 通信における周波数帯域の枯渇を招くため，WLAN 技術を採用したシステムの性能が低下してしまう．

この問題を解決するために，2.4 および 5GHz ISM 帯といった周波数帯におけるスペクトル管理[3]が必要となる．こうした周波数帯におけるスペクトル管理を実現する手法の一つが，無線 LAN スループットの推定である．無線 LAN スループットの推定結果に基づいて利用可能なチャネルを検索することで，周波数帯の有効活用が可能となる．WLAN スループットの推定については，これまでにいくつかの手法が報告されている．文献[4]では，仮想スロットの概念に基づき，飽和状態における無線 LAN スループットの推定手法が提案されている．文献[5]では，メディアアクセス制御層で測定されたトラフィック統計に基づく WLAN スループットの推定が提案されている．一方，無線 LAN トラヒックを分析するために，TShark[6]や tcpdump[7]など，ソフトウェアベースのパケットアナライザがいくつか開発されている．これらのパケットアナライザは，空中を伝送中のパケットから様々な情報を読み取ることができ，従来から有線／無線ネットワーク上の様々な問題の解決に用いられてきた．文献[8]では，パケットアナライザを用いた WLAN スループットの推定手法が提案されている．この手法により，Linux がインストールされたノート PC など一台のみを用いて，複数のチャネルにおける無線 LAN スループットを推定することが可能となり，監視対象のチャネル数と同じ数の機器を用いたチャネル監視を回避できる．しかしながらこの手法では，多数のチャネルを擬似同時的に監視する．例えば，2.4GHz および 5GHz ISM 帯における無線 LAN のチャネル数はそれぞれ 13 および 16 であり，このためにチャネルあたりの監視回数が減少し，推定精度が低下する．

本論文では，従来法[8]を改良したパケットアナライザに基づく無線 LAN スループット推定手法を提案する．提案法と従来法との違いは，無線 LAN スループット推定のリアルタイム処理と，その推定精度にある．リアルタイム処理の実装は，実環境での利用に備え，性能向上を図るためのものである．WLAN スループット推定の精度を向上させるため，各観測における推定結果に応じて，監視対象チャネルの監視回数を変更する．

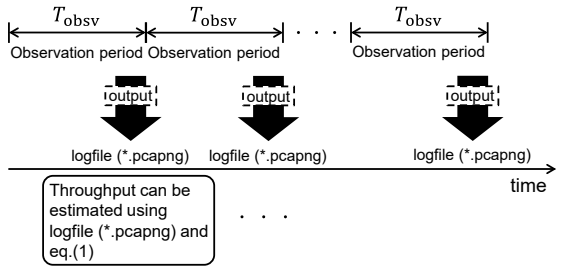
2 従来法

本章では，文献に示される 2.4GHz 帯無線 LAN における複数チャネルスループットの同時推定法について示す．従来法は，パケットアナライザの観測対象チャネルを高速に切り替えることで複数チャネルスループットの同時推定を可能としている．ここで，チャネル切替はパケットアナライザのタスクとは別に実行される．図に従来法のアルゴリズムを示す．チャネル切替は IEEE802.11 ベースの無線 LAN 機器設定のためのコマンドラインインターフェイスである iw コマンド[9]を用いる．ここで，T_{SW} をチャネル切替時間とする．2.4GHz 帯無線 LAN でのチャネル数は 13 であることから，各チャネルは$13T_{SW}$ 毎に観測されることになる．さらに，j番目の観測で得られたi番目のチャネルでのパケットの総データサイズを $B_i(j)$ とすると，従来法での推定スループット値 $R_i^C(j)$ は次式で与えられる．

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書　第41号　2026年度

$$R_i^C(j) = \frac{B_i(j)}{T_{obsv}/M_{CH}} \tag{1}$$

ただし T_{obsv} は観測期間，M_{CH} は観測すべきチャネル数であり，2.4GHz 帯では $M_{CH} = 13$ となる．従来法では，式(1)を用いてスループット推定が行われる．具体的には，観測期間 T_{obsv} の後に TShark のログファイル（*.pcapng）と式(1)を用いてスループットを推定する．これらの様子を示したものを図 1 に示す．



Algorithm 1 Conventional throughput estimation algorithm

```
1: i = 0
2: repeat
3:   if i = 13 then
4:     i ← 1
5:   else
6:     i ← i + 1
7:   end if
8:   sudo iw dev mon0 set channel $i
9:   sleep T_SW
10: until Observations are expired
```

図 1：従来法概要（左）とアルゴリズム（右）

3 提案法

本論文では，従来法に二つの改良を加えた推定法を提案する．改良の一つは実運用を想定しての複数チャネルスループット同時推定のリアルタイム処理化であり，もう一つはスループット推定精度改善を目的とした推定結果に基づくチャネル観測パターンの決定である．図 2 に提案法の概要を示す．初めに，複数チャネルスループット同時推定のリアルタイム処理化について示す．提案するリアルタイム処理では，先ず従来法と同様に観測期間 T_{obsv} 終了後 TShark のログファイルから複数チャネルスループットを推定する．次に推定結果より，チャネル観測パターンを決定する．本論文では，高い無線 LAN トラヒックが観測されたチャネルに焦点を当て，該当チャネルの観測回数を増やすことで推定精度向上を試みる．2.4GHz 帯の場合だと，チャネル観測パターンの初期値は次式で与えられる．

$$1ch \rightarrow 2ch \rightarrow \cdots \rightarrow 12ch \rightarrow 13ch \rightarrow 1ch \rightarrow \cdots \tag{2}$$

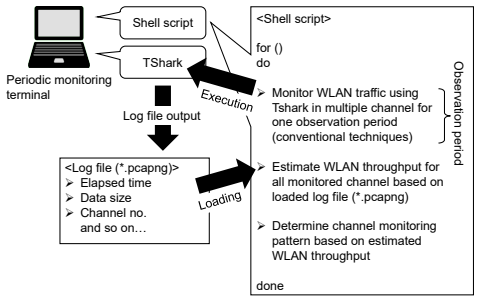
式(2)に示すチャネル観測パターンは従来法と同じであることに注意されたし．ここで，一観測期間終了後に得られたスループット推定の結果 12ch で高いトラヒックが観測されたと仮定すると，提案法でのチャネル観測パターンは次式で与えられる．

$$\begin{aligned} &1ch \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 2ch \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 3ch \rightarrow \cdots \rightarrow 11ch \rightarrow \\ &\mathbf{12ch} \rightarrow 12ch \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 13ch \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 1ch \rightarrow \cdots \end{aligned} \tag{3}$$

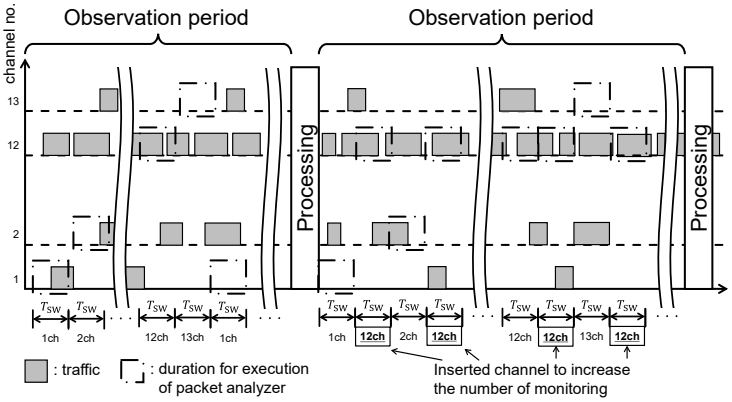
式(3)中太字で示すチャネルは推定スループット結果に基づいて式()に挿入されたチャネルである．図 3 に高い無線 LAN トラヒックが観測されたチャネルが 12ch であったときの提案法概要を示す．さらに，一観測期間終了後に得られたスループット推定結果で 5ch と 12ch で高いトラヒックが観測されたと仮定すると，このときのチャネル観測パターンは次式で与えられる．

$$\begin{aligned} &1ch \rightarrow \mathbf{5ch} \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 2ch \rightarrow \mathbf{5ch} \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 3ch \rightarrow \cdots \rightarrow 11ch \rightarrow \\ &\mathbf{5ch} \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 12ch \rightarrow \mathbf{5ch} \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 13ch \rightarrow \mathbf{5ch} \rightarrow \mathbf{12ch} \rightarrow 1ch \rightarrow \cdots \end{aligned} \tag{4}$$

これらより，提案法での j番目の観測における i番目のチャネルでのスループット推定値 $R_i^P(j)$は次式で



：提案法概要



：提案法でのチャネル観測の様子

与えられる．

$$R_i^P(j) = \frac{B_i(j)}{T_{obsv}(N_i(j)/N_{all}(j))} \tag{5}$$

ただし $N_i(j)$と $N_{all}(j)$はそれぞれ j番目の観測での i番目のチャネルの観測回数と j番目の観測での総チャネル観測回数．さらに，提案法における一観測期間中の高トラヒックチャネルの観測率 P は次式で与えられる．

$$P = \frac{1 + sgn\left(N_{High}(j)\right) M_{CH}}{M_{CH}\left(1 + N_{High}(j)\right)} \tag{6}$$

ただし $sgn(\cdot)$と $N_{High}(j)$はそれぞれ符号関数と j 番目の観測における高トラヒックチャネル．

4 実験結果

4-1 実験諸元

図 4 に実験系概要，図 5 に実際に使用した実験系概観を示す．これら図では，通信のための端末（通信端末）とアクセスポイント，提案法を実装した観測端末が電波暗箱内に配置されており，電波暗箱裏には FTP サーバが置かれる．通信端末はトラヒック発生のため FTP サーバから 1GB のファイルをアクセスポイントを介して連続的にダウンロードする．観測端末は提案法により 2.4GHz 帯での全無線 LAN チャネルを観測し，スループット推定値を求める．

本章では，提案法の三つの特性，追従特性，処理時間特性，推定スループット特性を評価する．追従特性では，通信端末から発生する CBR トラヒックの ON/OFF を動的に切り替えたときの提案法の該当チャネル観測回数を評価する．処理時間特性では，スループット推定や一観測期間ごとのチャネル観測パターンの決定（例えば，式(2)から式(3)のチャネル観測パターンに変更など）に要する処理時間を評価する．尚，これら要因のための処理時間は，中「Processing」における経過時間に相当する．推定スループット特性とは，

提案法による無線 LAN スループットの推定結果である．処理時間特性と推定スループット特性の評価のために，観測期間

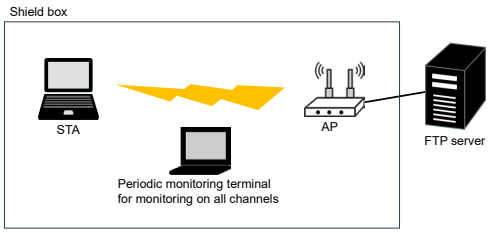


図 4：実験系概要

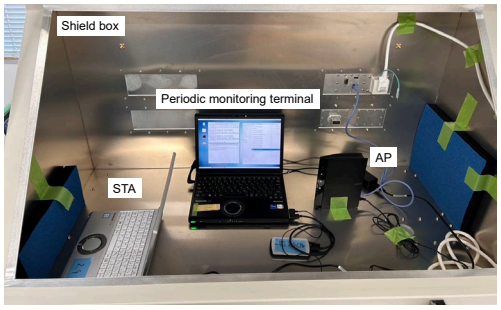


図 5：実際に使用した実験系概観

T_{obsv} における実験を複数回連続して実行する．各観測期間において，観測端末は通信端末とアクセスポイント間の通信を観測し，観測期間終了直後に出力されたログファイルからスループット推定ならびにチャネル観測パターンを決定する．このときの処理時間はシェルスクリプト上で計算する．また，表 1 に実験で使用した観測端末のパラメータを示す．

表 1：観測端末のパラメータ

CPU	Intel Core i7-1360P 3.7-5.0GHz×12 core
RAM	32GB
無線 LAN デバイス	Intel Wi-Fi 6E AX211 160MHz
Linux OS	CentOS Linux 7.9
無線 LAN 規格	IEEE 802.11n
チャネル切替時間	0.05s
通信端末・AP 間の使用チャネル	1（2412MHz）
観測（試行）回数	200
ダウンロードファイルサイズ	1GB

4-2 実験結果

初めに，図 6 に提案法の追従特性を示す．同図において，灰色部分の「Traffic ON」は通信端末がアクセスポイントと通信している期間を表している．またここでは，$T_{obsv} = 15$ 秒 とした．同図より，通信端末がアクセスポイントと通信している間，対象チャネルの平均観測回数は約 105 回であるのに対し，通信端末がアクセスポイントと通信していない間の平均観測回数は 15 回であることがわかる．これより，提案法により高トラヒックチャネルの観測回数を増加出来ていることがわかる．

次に，図 7 に提案法の処理時間特性を示す．同図より，観測期間が長くなるにつれて処理時間が線形増加することがわかる．

最後に，推定スループット特性を図 8 に示す．同図には，いくつかの手法を用いた推定結果として，平均値と標準偏差を表すマークと棒が付いた 3 つの曲線を示している．これらは，1) 提案法，2) 従来法，3) 通常使用時（すなわち，対象チャネル（チャネル 1）のみを監視する場合）のパケットアナライザ（TShark）に基づく推定結果である．なお，3)の測定は，1)および 2)の推定結果の参照値としてのみ用いられるため，観測期間 $T_{obsv} = 200$ 秒のときのみ実行されている．まず，観測期間 $T_{obsv} = 10$ 秒を超えると，提案法と従来法は 3)の結果に向かって収束し始めることがわかる．双方の標準偏差に注目すると，提案法の標準偏差は概して従来法のそれよりも小さいことがわかる．これは，対象チャネルの観測回数を増やしているためである．さらに，参照値と提案法，従来法を比較すると，提案法の推定結果は従来法のそれよりも優れている．この結果も，対象チャネルの観測回数の増加によるものである．

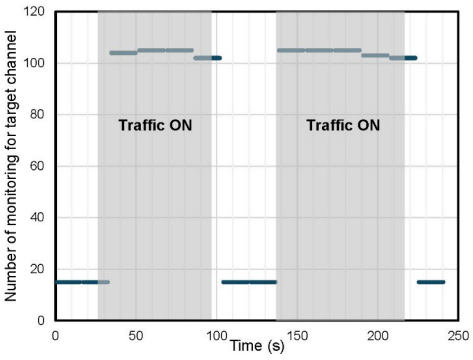


図 6：追従特性

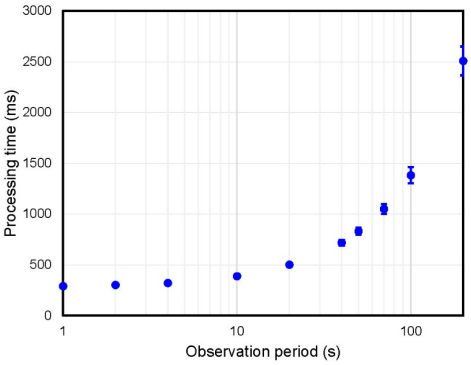


図 7：処理時間特性

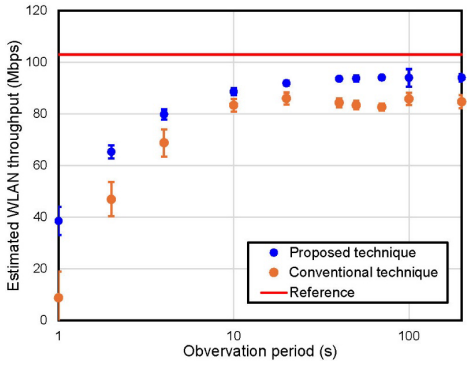


図 8：推定スループット特性

5 おわりに

本論文では，パケットアナライザを用いて無線 LAN の複数チャネルスループットを効率的に推定する手法を提案した．提案手法では，まず実運用環境での利用を目的として，無線 LAN スループット推定のリアルタイム処理を実装した．この実装に基

づき，従来法[8]の性能向上手法を提案した．提案手法では，推定結果に基づいて観測チャネルを変更し，観測頻度を高めることで推定精度を向上させることができる．実験結果により，提案手法の有効性が実証された．今後の課題としては，無線 LAN トラヒックの多いチャネルを検出するための閾値設計の開発が挙げられる．

【参考文献】

[1]. “IEEE Standard for information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE Std802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), pp. 1–3534, 2016.

[2]. H. Zhu, C. K. Wu, C. H. Koo, Y. T. Tsang, Y. Liu, H. R. Chi, and K.-F. Tsang, “Smart Healthcare in the Era of Internet-of-Things,” IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 8, no. 5, pp. 26–30, 2019.

[3]. S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.

[4]. X. Dong and P. Varaiya, “Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11 Wireless LANs for A Lossy Channel,” IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 100–102, 2005.

[5]. H. Yoon and J. Kim, “Measurement-Based Achievable Throughput Estimation in IEEE 802.11a WLANs,” IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 9, pp. 714–716, 2007.

[6]. https://www.wireshark.org/.

[7]. https://www.tcpdump.org/.

[8]. K. Shibata, S. Narieda, and H. Naruse, “Throughput Estimation of WLAN in Multiple Channels Using a Software Based Packet Analyzer,” IEEE Networking Letters, vol. 4, no. 3, pp. 123–126, 2022.

[9]. https://wireless.wiki.kernel.org/en/users/documentation/iw.

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
Improved Throughput Estimation of WLAN in Multiple Channels Using Packet Analyzer	IEEE Vehicular Technology Conference 2026 (IEEE VTC2026-Fall)	2026 年 9 月（掲載決定）
パケットキャプチャによる Wi-Fi の複数チャネルリアルタイムモニタリングの基礎検討	2026 年電子情報通信学会総合大会, B-17-28,	2026 年 3 月