

無線 LAN 環境における CSI の位相情報を利用したフレーム送信元の推定方式

Estimation of Frame Transmitter in Wireless LAN Environments Using CSI Phase Information

玉井森彦[†]
Morihiro Tamai

長谷川晃朗[†]
Akio Hasegawa

横山浩之[†]
Hiroyuki Yokoyama

1. はじめに

工場、倉庫、病院等の屋内環境において、機器の稼働状況の把握、制御、情報共有等を目的とした無線通信の利用が進みつつある。これらの環境下では、特にデータの到達時間の保障が重視されるアプリケーションが多く存在し、通信機器間で限られた無線リソースを適切に共有する必要がある。通信要件の異なる複数のアプリケーションに対し動的に無線リソースを配分するにあたっては、まず対象となる無線環境下における無線リソースの使用状況をできるだけ詳細に把握することが求められる。また、通信品質の保障を行う際には、無線リソースの動的配分を行いつつ、同時に意図した通りの通信品質が達成できているかを常に監視しておくことも重要である。我々は監視対象の無線環境下に複数のセンサノードを設置し、物理層と Medium Access Control (MAC) 層に関するデータを収集、解析するモニタリングシステムの研究開発を行っている [1]。本モニタリングシステムには 2 種類のセンサノードが存在する。一方はソフトウェア無線機を搭載し、アンテナで受信された電波から In-phase and Quadrature (IQ) 信号を取得するものであり、他方は、tcpdump によるパケットキャプチャを行い、キャプチャデータ（各フレームに付与されているヘッダ情報の時系列）を取得するものである。各センサノードで取得されたデータは解析ノードにより収集され、同一時間軸上に同期 [2] された上で、無線リソースの使用状況の把握に利用される。

本研究では、無線リソース使用状況の把握の方法として、各通信機器から送信される各フレームについて、その送信元アドレス、送信開始時刻、およびフレームの継続時間を記録することを想定する。本稿では特に、各フレームの送信元を推定する方法に焦点を当てる。フレーム送信元を推定する方法の一つとして、キャプチャデータの利用が考えられる。キャプチャデータに含まれる各フレームの情報には、MAC 層ヘッダが含まれており、MAC 層ヘッダの送信元 MAC アドレスを参照することでフレーム送信元の特定が可能となる。しかし、フレームの情報が得られるのは、センサノードにおいてフレームのデコードが成功した場合に限られるため、例えば隠れ端末からの干渉によりフレームロスが発生した場合、無線リソース使用量の見積りの誤りにつ

ながる。我々は文献 [3] において、IQ 信号から得られる Channel State Information (CSI) [4] の位相情報を抽出し、同一送信元からの連続するフレーム間で生じる位相回転を推定する以下の方式を提案した。送信元 i の j 番目のフレームの CSI に含まれる、サブキャリア番号 k の位相 $\phi_{i,j,k}$ は次式により表される [4]。

$$\phi_{i,j,k} = \theta_{i,j,k} + \lambda_{i,j,k}k + \beta_{i,j}. \quad (1)$$

ここで、 $\theta_{i,j,k}$ は伝搬路によって生じる位相回転であり、 $\lambda_{i,j,k} + \beta_{i,j}$ は送受信機間の同期の不完全さによって生じる位相回転を表す。以下では、 $\beta_{i,j}$ を位相特性とよぶ。文献 [3] では、フレーム $j-1$ とその直後のフレーム j との間の IQ 信号上でのサンプル数間隔を $n_{i,j}$ としたとき、位相特性について、 $\beta_{i,j-1}$ と $\beta_{i,j}$ の間に以下の関係を仮定した。

$$\beta_{i,j} = \beta_{i,j-1} + m_i \cdot n_{i,j} \pmod{2\pi}. \quad (2)$$

ここで m_i は比例定数であり、次の方法で求める。同一の送信元 i から送信される連続したフレーム $\dots, f_{i,j-1}, f_{i,j}, f_{i,j+1}, \dots$ に対し、各 $f_{i,j-1}$ と $f_{i,j}$ 間で、サンプル数間隔 $n_{i,j}$ と位相特性間の差 $\beta_{i,j} - \beta_{i,j-1}$ の組を求め、この組を同一送信元に対し複数個集めた後、最小二乗法を用いて m_i を推定する。本稿では、この位相回転推定方式を用いて、フレーム送信元推定方式を構成する。また、その有効性を実験により確認する。

2. フレーム送信元推定方式

フレーム送信元推定を行うにあたって、解析ノードでは、IQ 信号から次のように信号の検出を行う。各 IQ サンプルの電力値を求め、ある閾値を超える電力値があるサンプル数以上継続した場合、その連続した IQ サンプルのひとかたまりを検出信号と呼ぶ。各検出信号に対し、その継続時間とオーバーラップする時間において、キャプチャデータ内にキャプチャされたフレームが存在するかどうかで次のように分岐する。(a) 存在する場合、キャプチャデータから送信元が特定できる。さらに、検出信号内の IQ サンプルより位相特性を求め、検出信号先端のサンプル番号とともにデータベースへ記録する。(b) 存在しない場合、データベース内に十分なデータが溜まっているならば、フレーム送信元推定を次のように行う。(i) 検出信号の IQ サンプルより、式 (1) の位相特性 (これを β とする) を求める。

[†]株式会社国際電気通信基礎技術研究所, ATR

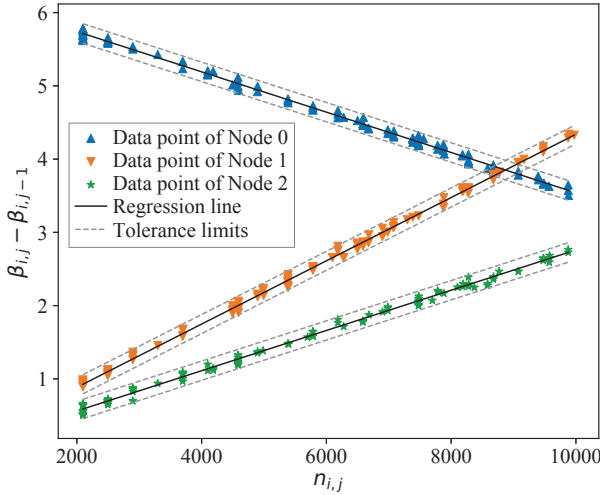


図 1: Regression line with tolerance limits.

また、データベース内に位相特性が存在する各送信元 i について、データベース内に蓄積されている送信元 i の位相特性の集合を用いて、 m_i を推定し回帰直線 f_i を求める。また、データベース内での送信元 i の最新の位相特性を β_i 、検出信号とのサンプル数間隔を n_i とする。(ii) 各送信元 i について、 $\delta_i = \beta - \beta_i \pmod{2\pi}$ と、その回帰直線からの予測値 $f_i(n_i)$ との間の距離が最も近い送信元候補 \hat{i} を次式で求める。

$$\hat{i} = \arg \min_i |\delta_i - f_i(n_i)|. \quad (3)$$

(iii) 最後に、求めた送信元候補 \hat{i} の妥当性を判定する。すなわち、 $\delta_{\hat{i}}$ と $f_{\hat{i}}(n_{\hat{i}})$ とが十分に近いかどうかを判定し、十分近い場合には送信元推定に成功、さもなければ推定失敗とする。この十分近いかどうかの判定のため、本研究では、回帰直線に対する許容区間 [5] を用いる。(1 - α , P)-許容区間 $T(n_{\hat{i}})$ は、信頼水準 $100(1 - \alpha)\%$ で、説明変数値 $n_{\hat{i}}$ に対する従属変数値が、区間 $T(n_{\hat{i}})$ に含まれる確率が少なくとも P であることを示すものであり、次式で表される。

$$T(n_{\hat{i}}) : [f_{\hat{i}}(n_{\hat{i}}) - \kappa s, f_{\hat{i}}(n_{\hat{i}}) + \kappa s]. \quad (4)$$

ここで、 κ は文献 [6] に示される方法等を用いて推定される値であり、 s は回帰モデルにおける誤差項の標準偏差の推定値である。 $\delta_{\hat{i}}$ が許容区間 $T(n_{\hat{i}})$ に含まれればフレーム送信元を \hat{i} と推定し、さもなければ推定失敗とする。

3. 実験

提案するフレーム送信元推定方式の有効性を調べるため、以下の実験を行った。実験では、3 台の送信ノード (Linux debian 4.9.0-6) から無線 LAN (802.11g, ドライバは ath9k) のブロードキャストフレームをバースト送信 (各フレームは伝送レート 54 Mbps, UDP ペ

表 1: Result of frame transmitter estimation.

		Estimated transmitter			
		Node 0	Node 1	Node 2	Est. Failure
Actual Transmitter	Node 0	99	0	0	1
	Node 1	0	100	0	0
	Node 2	0	0	100	0

イロード 100 バイトで送信) し、その間にセンサノードにより IQ 信号とキャプチャデータを取得した。各送信元 i に対し、送信開始後の計 101 個のフレームを集め、最小二乗法により回帰直線を求めた。また、その後の計 100 個のフレームについて、提案方式によるフレーム送信元の推定を行った。送信元が 3 台であるため、送信元推定の総実行回数は 300 回であり、真の送信元は各送信元につきそれぞれ 100 ずつとなる。なお、許容区間について、 $\alpha = 0.05$, $P = 0.99$ と設定し、その計算には R 言語の tolerance パッケージ (バージョン 2.0.0) [7] を用いた。各送信元について、回帰直線の算出に用いられたデータと回帰直線、および許容区間を図 1 に示す。また、推定結果を表 1 に示す。表 1 より、送信ノード 0 の 1 つのフレームで推定失敗があったことを除いて、残り全てのフレームで正しい送信元を推定できたことが分かる。以上より、提案するフレーム送信元推定方式の有効性が確かめられた。

謝辞

本研究は、総務省の「電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254)」における委託研究「リアルタイムアプリケーションを支える動的制御型周波数共用技術に関する研究開発」により実施した成果を含む。

参考文献

- [1] M. Tamai, A. Hasegawa, H. Yokoyama: "Design and Implementation of Sensing System for Quality Analysis of 802.11 Wireless Links," *Proc. of ICCCN'19*, pp. 1-2, 2019.
- [2] 玉井森彦, 長谷川晃朗, 横山浩之: "無線ネットワークモニタリングのための信号強度データとキャプチャデータ間の同期方式", 信学総大, B-15-26, p. 441, 2021.
- [3] 玉井森彦, 長谷川晃朗, 横山浩之: "無線ネットワークモニタリングのための CSI の位相情報の推定方式", 信学総大, B-15-32, p. 470, 2022.
- [4] Y. Xie, Z. Li, M. Li: "Precise Power Delay Profiling with Commodity Wi-Fi," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 18, No. 6, pp. 1342-1355, 2019.
- [5] W. A. Wallis: "Tolerance intervals for linear regression," *Proc. of Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. 1, pp. 43-51, 1951.
- [6] K. Krishnamoorthy, T. Mathew: "Statistical Tolerance Regions: Theory, Applications, and Computation," *John Wiley & Sons*, 2009.
- [7] D. S. Young, "tolerance: An R Package for Estimating Tolerance Intervals," *Journal of Statistical Software*, Vol. 36, No. 5, pp. 1-39, 2010.