

無線LANネットワークモニタリングにおける 信号強度データ間の同期方式

玉井森彦 長谷川晃朗 横山浩之

株式会社国際電気通信基礎技術研究所

1 はじめに

無線通信は製造、物流、医療等の分野で急速に利用が進んでおり、それらの現場において無線品質をできるだけ詳細に把握することは、期待される通信性能を達成する上での重要な課題となっている。その支援に向け、我々はIEEE 802.11規格の無線LANを対象とし、受信信号強度の時系列（信号強度データ）と、パケットキャプチャから得られるヘッダ情報（各受信フレームのヘッダ部に含まれる送受信アドレス等の情報）の時系列（キャプチャデータ）を取得し、解析・可視化する無線モニタリングシステムの研究開発を行っている[1]。本システムは複数のセンサノードと一つの解析ノードから構成され、各センサノードは、信号強度データもしくはキャプチャデータを継続的に取得し、解析ノードへ送信する。信号強度データを取得するセンサノードについては、ソフトウェア無線機を用いて実装され、In-phase and Quadrature (IQ) 信号から信号強度を算出することを想定する。解析ノードでは、これらのデータを同一時間軸上に同期したうえで解析・可視化し、信号強度とキャプチャ結果の間の関係や、観測位置の違いによる差などを捉える。これにより、対象環境下での無線品質の詳細な把握（例えば、同一送信源からの信号がどの範囲まで干渉を及ぼすかや、それがフレームの受信にどう影響するか等の把握）に役立てることが可能である。異なるセンサノードで取得されたデータ間の同期に関し、我々は文献[2]において、キャプチャデータ間の同期方式を、また文献[3]において、信号強度データとキャプチャデータ間の同期方式を提案した。本稿では、異なるセンサノードで取得された信号強度データ間の同期方式を提案する。

2 信号強度データ間の同期方式

はじめに、各センサノードで取得されたIQ信号から信号強度データを生成する方法を説明する。IQ信号のサンプル列を a_i （ここで、 $i = 0, 1, 2, \dots$ はサンプル番号）とする。信号強度データ r_j は、 a_i の信号強度 $|a_i|^2$ について、計 N 個のサンプルごとにその最大値

をとることで生成する。すなわち、次式で計算される。

$$r_j = \max_{jN \leq i < (j+1)N} |a_i|^2, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

次に、異なる2つのセンサノードで取得された信号強度データから、それぞれ同期用のタイミングを抽出し、信号強度データのどのサンプル番号の位置で同期タイミングが抽出されたかを表すデータを生成する。以下ではこのデータについて、便宜上、一方のセンサノードから得られたものをプライマリデータ (PD)、もう一方のセンサノードから得られたものをセカンダリデータ (SD) と呼ぶ。PDの生成元となった信号強度データを r_j^{pd} 、PDを p_j と表記する。同様に、SDの生成元となった信号強度データを r_j^{sd} 、SDを q_j と表記する。各 p_j の値は、0または1の値をとり、 $p_j = 1$ となる j について、 r_j^{pd} の位置で同期タイミングが抽出されたことを意味し、 $p_j = 0$ となる j については、同期タイミングが抽出されなかったことを意味する。各 q_j の値についても同様に定義する。信号強度データからいかに同期用のタイミングを抽出するかについては後述する。提案方式では、得られたPD、SDについて、SDを平行移動し、PDと最もよく一致するオフセット値 \hat{k} を求めることで、信号強度データ間の同期を実現する。ここで、最もよく一致するオフセット値は、次式のように相互相関関数の値を最大化するオフセット値として求められる。

$$\hat{k} = \arg \max_{k \in C} \sum_j p_j q_{j+k}. \quad (2)$$

ここで、 C はオフセット値の候補の集合である。

次に、信号強度データから同期用のタイミングを抽出する方法について述べる。まず、センサノードの観測範囲に関する仮定として、同期対象のデータを取得するセンサノード間で、観測範囲にある程度オーバーラップが存在することを仮定する。すなわち、それぞれのノードが取得するデータ内に、同一送信源からの信号がある程度含まれていることを仮定する。このような状況において、単純な同期方式として、信号強度に対し、ノイズフロアから数dB上に閾値(α とする)を設け、信号強度が α を上回るタイミングを得ることで、同一送信源から送信される無線フレームの開始時点抽出し、同期に利用することが考えられる。しかしこの方法では、 α 付近で強度が上下する信号が存在する場合、フレームの開始時点とは関係のないタイミングが多数抽出されてしまい、同期が困難となる。そ

ここで提案方式では、フレームの開始時点をより高信頼に得る方法として、次のように二段階で判定を行う。すなわち、一段階目では、上記の方法で α を上回るタイミングを抽出しておき、続く二段階目では、一段階目で抽出されたタイミングについて、さらに後述の方法を用いて IQ 信号を解析することでフレームのプリアンブルを検出し、プリアンブルが検出されたもののみを最終的な同期タイミングとして残すようにする。

無線 LAN における 2 次変調方式は、802.11b における Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) と、802.11a 以降における Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) に大きく分けられる。これに対応して、プリアンブルの種類も、大きく 2 種類が存在している。802.11b については、現在では直接データ通信に用いられることは少ないものの、ビーコンフレームの送信には依然として 802.11b が用いられており、802.11b のプリアンブルの検出にも対応した方式であることが望ましい。本稿では、802.11a/g/n 等の復調処理でよく用いられるサンプルレートである 20 Msps [4] の IQ 信号を用いて、802.11b/g および 20 MHz 幅チャネルを利用する 802.11n のフレームのプリアンブル検出を行う方式を提案する。

DSSS 変調および OFDM 変調のプリアンブルの双方に共通する特徴として、あるサンプル数ごとに信号の繰り返しが見られる点が挙げられる。そこで提案方式では、この繰り返しを自己相関関数の値を用いて検出し、最も自己相関関数の値が大きくなる際の繰り返しのサンプル数間隔が、DSSS 変調、または OFDM 変調のプリアンブルの特徴に該当する場合、プリアンブルが検出されたとみなす。自己相関関数の値を算出する際のサンプル長を L 、サンプル数間隔の最大値を d_{max} とする。上記の閾値 α を上回るタイミングのサンプルの添字を 0 とし、サンプル列を s_i とする。 $P(d)$ および $R(d)$ ($1 \leq d \leq d_{max}$) を次式で定義する。

$$P(d) = \sum_{i=0}^{L-1} s_i^* s_{i+d}, \quad (3)$$

$$R(d) = \sum_{i=0}^{L-1} |s_{i+d}|^2. \quad (4)$$

ここで、 $()^*$ は複素共役を表す。これらを用いて、正規化された自己相関関数 $M(d)$ の値を次式で計算する [5]。

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{R^2(d)}. \quad (5)$$

自己相関関数の値を最大化するサンプル数間隔 \hat{d} を次式で求める。

$$\hat{d} = \arg \max_{1 \leq d \leq d_{max}} \{M(d)\}. \quad (6)$$

ある閾値 β を設け、 $M(\hat{d}) \geq \beta$ が満たされる場合、繰り返しのある信号が検出されたとみなす。DSSS 変調のプリアンブルの場合、1 μ s ごとに繰り返しがあり、OFDM 変調のプリアンブルの場合、0.8 μ s ごとに繰り返しが存在する。サンプル数間隔にすると、20 Msps

であることを考慮して、それぞれ 20 サンプルと 16 サンプルとなる。従って、 $\hat{d} \bmod 20 = 0$ の場合、DSSS 変調のプリアンブルが、 $\hat{d} \bmod 16 = 0$ の場合、OFDM 変調のプリアンブルが検出されたとみなす。

3 実験

提案方式の有効性を確認する実験を行った。実験では、トラフィック送信ノード 2 台を用いて次のトラフィックを生成した：(a) 周期 100 ms で UDP ペイロード 100 バイトのブロードキャストフレームを 802.11b の伝送レート 1 Mbps で送信、(b) 周期 10 ms で UDP ペイロード 1000 バイトのユニキャストフレームを 802.11g の伝送レート 54 Mbps で送信。トラフィック生成中、センサノード 2 台により IQ 信号を取得し、解析ノード上で提案方式に基づき信号強度データ間を同期するオフセット値を求めた。なお、PD と SD に含まれる同期タイミングの個数は、どちらも 300 とした。また、 $\alpha = -70$ dBm、 $\beta = 0.3$ 、 $L = 200$ 、 $d_{max} = 40$ と設定した。本実験で使用したセンサノードでは、IQ 信号と同期してキャプチャデータも取得可能であるため、文献 [2] の方法に基づきキャプチャデータ間を同期するオフセット値を求め、これを真値として提案方式で求めたオフセット値との絶対誤差を求めた。10 試行における平均絶対誤差は、1.8 μ s であった。以上より、提案方式を用いることで、2 μ s 以内の精度で信号強度データ間の同期が可能であることを確認した。

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: “Comprehensive Visualization of Physical and MAC Layer Data for Wireless Network Monitoring,” *Proc. of ICCCN'20*, pp. 1–2, 2020.
- [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キャプチャデータ間の同期方式,” 信学ソ大, B-15-29, p. 199, 2020.
- [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信号強度データとキャプチャデータ間の同期方式,” 信学ソ大, B-15-26, p. 441, 2021.
- [4] K.-W. Yip, Y.-C. Wu, T.-S. Ng: “Design of Multiplierless Correlators for Timing Synchronization in IEEE 802.11a Wireless LANs,” *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 107–113, 2003.
- [5] T. M. Schmidl, D. C. Cox: “Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 45, No. 12, pp. 1613–1621, 1997.