

大規模 Wi-Fi ネットワークにおける パッシブ通信品質推定手法の実験的評価

石川 直樹[†] 大石 恭弘^{††} 中山 奨^{†††} 前田 香織[†]

[†] 広島市立大学大学院情報科学研究科 〒731-3166 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

[†] 株式会社インターネットイニシアティブ 〒102-0071 東京都千代田区富士見 2-10-2

[†] 広島市立大学情報科学部 〒731-3166 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: †{ishikawa,kaori}@hiroshima-cu.ac.jp, ††ohishi@iij.ad.jp

あらまし 大規模 Wi-Fi ネットワークにおけるパッシブな通信品質推定手法の推定精度について調査する。NFDF (null function data frame) は端末から定期的に送信される固定長の IEEE 802.11 フレームであり、この特性を利用した通信品質推定手法が提案されてきた。本報告では、NFDF の再送率がフレーム誤り率と相関する可能性について指摘し、その相関関係を調査する。具体的には、IEEE 802.11a/ac を対象として、NFDF カウント機能を組み込んだアクセスポイントを実装し、マルチユーザ干渉を制御した理想環境、および、アクセスポイント数 24 の大規模イベントにおいて評価する。評価実験では、理想的な環境での測定において相関係数 0.65、大規模イベント会場の測定において相関係数 0.56 が得られ、大規模 Wi-Fi ネットワークにおいても統計的に有意な指標として機能することが確認できた。
キーワード IEEE 802.11, Wi-Fi, パッシブ推定, QoS, フレーム誤り率, 大規模ネットワーク。

Passive QoS Estimation Method for a Large-Scale Wi-Fi Network and Its Experimental Evaluation

Naoki ISHIKAWA[†], Yasuhiro OHISHI^{††}, Tsutomu NAKAYAMA^{†††}, and Kaori MAEDA[†]

[†] Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University 3-4-1 Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3166 Japan.

[†] Internet Initiative Japan Inc. 2-10-2 Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0071 Japan.

[†] Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University 3-4-1 Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3166 Japan.

E-mail: †{ishikawa,kaori}@hiroshima-cu.ac.jp, ††ohishi@iij.ad.jp

Abstract In this report, we investigate the QoS estimation accuracy of a passive-monitoring-based frame count method in a large-scale Wi-Fi network. The null function data frame (NFDF) is a fixed-length IEEE 802.11 frame and is periodically emitted from a user equipment. Here, the NFDF-based QoS estimation method has been proposed in the literature. We implemented this method in an access point, and evaluated its performance both in an ideal environment and a large-scale conference. Through the real-world measurements in the ideal environment, we obtained the correlation coefficient of 0.65 between the NFDF retry ratio and the corresponding frame error rate. Furthermore, the correlation coefficient was 0.56 at the large-scale conference, which justified the efficacy of the NFDF counting method.

Key words IEEE 802.11, Wi-Fi, passive estimation, quality of service (QoS), frame error rate (FER), large-scale network.

1. はじめに

スマートフォンやタブレットの普及により無線 LAN を利用する端末が年々増加している。無料 / 有料を問わず AP (access point) が私たちの周囲に溢れ、飛行機や新幹線などの高速移動体においても無線 LAN サービスを利用できる時代となった。AP の高密度化にともない ISM (industry science medical) 帯の電波干渉も悪化し続けており、IEEE 802.11ac 以降では 5 [GHz] 以上の電波帯域のみを利用し、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) によるビームフォーミングを利用した干渉軽減技術が一般的となっている [1, 2]。また、IEEE 802.11ad/ay では直進性の強い 60 [GHz] 帯のミリ波が活用され、電波干渉を極限まで低減する方式が盛んに研究されてきた [3, 4]。

マルチユーザ通信を前提とする無線ネットワークでは、通信モジュール内部の熱雑音や位相ずれよりも、ユーザ間干渉による加法性雑音が通信品質に支配的な影響を与える [5]。ユーザ間干渉を低減するためにもっとも有効な技術は指向性の強いビームフォーミングであるが、これを実現するためには大規模なアンテナアレイが不可欠であり [6]、基地局と異なり家庭に設置されることの多い無線 AP は大きさに物理的な制約があるため干渉の除去には限界がある。つまり、どんなに研究開発が発展しようと、マイクロ波を用いる無線ネットワークにおいて電波干渉は本質的に避けられない課題である。

一般的に電波干渉のモニタリングは難しい。スペクトラムアナライザを用いれば帯域ごとの信号強度を観測だが、例えば 5 [GHz] 帯には無線 LAN に加えて各種レーダー等も割り当てられているため、観測した周波数領域における信号強度が無線 LAN によるものだと断定するのは難しい。デジタル無線通信においては、送信機と受信機間の電波伝搬に関する情報 (channel state information; CSI) が極めて低い誤り率で推定され、送信機と受信機の両方で共有されている。CSI を用いれば無線リンクの通信品質を干渉成分も含めて直接的に観測可能である。ただし、CSI が一定以上の時相間を持つ時間間隔はコヒーレント時間と呼ばれ、2.4 および 5 [GHz] 帯の無線通信においては最長でも数十ミリ秒 [7] であるため、たとえ CSI を取得できたとしてもユーザの実感する通信品質とは大きく異なる可能性が高い。

以上の背景に対して、本報告では無線 LAN における電波干渉を容易に推定可能とする NFDF (null function data frame) 再送率を用いた手法について、フレーム誤り率 (frame error rate; FER) との相関関係を調査する。NFDF は IEEE 802.11 に準拠する無線端末あれば必ず送信されるため、サブ GHz 帯の無線 LAN だけでなく、802.11ad/ay 等のミリ波通信でも同様に使える可能性が高い。まず 2 章で NFDF の特性と関連技術について紹介する。次に、統計的な性質を確認するため、3 章で理想環境において評価する。4 章では JANOG41 における実証実験の結果を報告し、最後に 5 章で本報告をまとめる。

2. NFDF とその関連技術

2.1 NFDF とは

IEEE 802.11 では STA (station) の電力消費を軽減するために様々な工夫がなされている [8]。その一つに、電力管理サブフィールド (power management subfield) を用いたデータ通信のバッファ機構がある [9, p. 1599]。電力管理サブフィールドはすべての 802.11 フレームに含まれており、1 の場合は省電力モード、0 の場合は連続通信モードで動作していることを意味する。規格では STA の動作モードが変化した際は必ず AP に通知するよう定められている [9]。動作モードは通信量によって時々刻々と変化し、例えばレートが 500kbps 以下などの低速通信時に自動で省電力モードに遷移する [10]。AP は STA から電力管理サブフィールド 1 を受信した場合、STA へのパケットをバッファし、次にサブフィールド 0 を受信したらデータ送信を再開する。このように、STA が連続的にデータを受信できるよう AP 側が配慮することによって、STA の不必要な電力消費を抑制する。

AP が電力管理サブフィールド 1 のフレームを正しく受信できないと、STA へ断続的にデータが送信され、STA の電力消費が増加する。そこで、STA は省電力モードへ遷移する際に、null もしくは no data と呼ばれるデータ長 0 の固定長フレームを送信し、AP に正しく届くまで送信レートを段階的に下げて繰り返し再送する。この固定長フレームは既存の報告では NFDF (null function data frame) と呼ばれており [22, 23]、バッテリーに限りのあるモバイル端末でも積極的に送信する傾向にある。無線モジュールの省電力化に対する取り組みはベンダごとに異なり [11]、結果として NFDF の送信頻度は実装ごとに大きく異なる。802.11 の仕様書に従うと、省電力モードに遷移した際は NFDF を送信するのが正しい実装 [9] であるが、NFDF (Subtype 36) ではなく Ack (Subtype 29) を用いて動作モードの変化を通知するチップセットもあり [12]、これは仕様書に準拠していない。

2.2 関連技術

NFDF を AP に送信し、一定時間 AP からの通信を途絶えさせることで、単一の無線 LAN カードのみで複数 AP への擬似的な同時接続を実現する技術が 2004 年に Microsoft Research の研究者らによって提案された [13]。また、これに関連して、NFDF により複数 AP への接続を高速で切り替える技術も検討された [14]。さらに、802.11 フレームの電力管理サブフィールドを継続的に監視すると、特定の STA がこれから通信するかどうかを推定できる。この推定結果に基づき、ISM 帯において Wi-Fi と WiMAX の同時利用を実現する技術も提案されている [15]。

NFDF を通信の制御に活用する技術は多く提案されている一方で、無線ネットワークの通信品質推定に役立てようとする技術はあまり提案されていない。著者らが知る限り、日本国内で数件が提案されているのみである [22, 23]。芝浦工業大学の小清水らによる先駆的な評価では、無線 LAN 内の負荷率が高くなるほど NFDF 再送率が高くなるという結果が報告された [22]。

また、広島市立大学の新谷らによる評価では、NFDF の送信頻度の高い端末ほど、NFDF 再送率と負荷トラフィックが相関するという結果が報告されている [23].

無線 LAN 内の STA が到達可能な実効スループットを推定するための技術はこれまでに多く提案されている。例えば、802.11 フレームの再送率から実効スループットを推定する手法が 2011 年にリヨン大学の研究者らによって提案された [16]. この手法では、STA が自らプローブ用のパケットを送信する必要がないため、既存の通信への影響を抑えられる点が従来手法に対する利点として主張されている [16]. また、RSSI (receive signal strength indicator) に基づいた接続 AP 選択は局所最適解に陥ることが広く知られており、AP から発信されるビーコンの遅延時間から実効スループットを推定する手法 [17] や、RTS/CTS (request to send/clear to send) を観測して 2 次元マルコフ連鎖モデルにより実効スループットを推定する手法も提案されている [18]. ただし、RTS/CTS は通信オーバーヘッドを軽減するために現実にはほとんど使われていない [19]. これらに対して、NFDF 再送率を用いて通信品質を推定するアプローチは [22, 23], 既存のフレーム再送率に基づく手法と同様に [16], 測定対象ネットワークへの影響を軽減できるため、特に大規模なネットワークに適していると考えられる。

3. 理想環境における評価実験

NFDF 再送率による FER 推定の精度を検証するため、まずは 3 台の端末が AP を利用する環境を構築し評価実験を行った。CDMA2000 [20] 策定時に定義された HTTP 通信モデルを用いて、単純なマルチユーザ環境を仮定する。具体的には、他端末からの干渉を段階的に変化させ、RSSI と FER、および NFDF 再送率と FER の相関関係を調査する。RSSI は受信信号電力 [mW] をデシベル表記した指標であり、 -100 から 40 [dBm] の間で変化するよう定められている [9]. ベンダ独自の非公開の関数で平滑化されているため [9], 特性はチップセットごとに異なる。また、物理層で用いられる SNR (signal-to-noise ratio) と異なり、RSSI には雑音電力も含まれるため、これを用いて通信品質を推定するのは困難であると考えられる。

3.1 測定環境

無線 AP として Let's note CF-MX3 (FreeBSD 11.1)^(注1), 測定対象端末として iPad MD512J/A (iOS 9.3.2) を用いた。チャンネルは IEEE 802.11a の 40ch (5.20 [GHz]) に固定し、AP と STA 間の距離は 3 [m] とした。また、スペクトルアナライザにより 40ch への電波干渉がノイズフロアに埋もれることを確認した。この AP と STA 間の通信を MacBook Pro (Mac OS X 10.11.6) において Tshark により観測する。また、負荷トラフィックを流すため、AP には他 2 台の端末が接続されており、iPerf により UDP トラフィック量が 0 から最大スループットまで段階的に自動設定される。

(注1) : FreeBSD に標準で実装されているオープンソースの Wi-Fi ドライバを用いるため、モニターモード以外でも IEEE 802.11 フレームの観測が可能となる。

3.2 HTTP 通信モデル

理想環境ではユーザ端末が CDMA2000 で定義されている HTTP 通信モデル [20] に従うものと仮定した。この通信モデルは、2009 年時点での大規模データセットに対して、やり取りされるデータ通信量を典型的な確率密度関数にフィッティングしたものである。2018 年の執筆時点ではデータ容量がさらに増えているものと予想できるが、実装の容易さからこの通信モデルを採用した。

CDMA2000 の HTTP 通信モデル [20] では、ページ容量 $S_m + N \cdot S_e$ [bytes] が閲覧時間 r [sec] の間隔で読み込まれる。ここで、メインオブジェクト容量 S_m は $\Lambda(\mu = 8.35, \sigma^2 = 1.88)$, 埋め込みオブジェクト数 N は $P(a = 1.1, k = 2)$, 埋め込みオブジェクト容量 S_e は $\Lambda(\mu = 7.53, \sigma^2 = 2.86)$, 閲覧時間 r は $\text{Exp}(\lambda = 0.033)$ に従う。なお、対数正規分布 $\Lambda(\mu, \sigma^2)$ は次式の確率密度関数

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

で定義され、パレート分布 $P(a, k)$ は次式の確率密度関数

$$p(x) = \frac{ak^a}{x^{a+1}} \quad (2)$$

で定義される。また、指数分布 $\text{Exp}(\lambda)$ の確率密度関数は

$$p(x) = \lambda \exp(-\lambda x) \quad (3)$$

である。確率変数 S_m, S_e はそれぞれ $\min(\max(S_m, 100), 2 \cdot 10^6)$, $\min(\max(S_e, 50), 2 \cdot 10^6)$ の範囲内に制限され、埋め込みオブジェクト数 N が 54 以上となった場合は 53 以下になるまでランダムに生成し直す。

3.3 測定結果

測定の結果、NFDF が送信されている間には他フレームが一切送信されないことが分かった。これより、iPad MD512J/A は IEEE 802.11 の標準仕様に準拠していることが分かる。しかし、ディスプレイがオンの状態で一切端末操作をせずに放置していると、定期的に NFDF が送信された。電力管理サブフィールドは 1 であるため、繰り返し送信する必要はない。これは、一定時間通信のない端末を自動で切断する機能が AP 側に実装されている影響だと考えられる。つまり、端末によっては AP から切断されるのを避けるために定期的に NFDF を送信する場合があります。これは通信品質の把握に役立てられる。ちなみに、この挙動は仕様書 [9] には定められていない。

図 1 に RSSI と FER の関係を示す。AP と STA の距離は 3 [m] で固定し、遮蔽により見通し内通信に影響が出ないよう配慮したため、RSSI は約 -33 [dBm] で一定となっている。これに対して、負荷トラフィック量を段階的に変化させたため、FER は 0 から 80% 程度まで変化しており、RSSI では干渉による通信品質の悪化を検出できないことが分かった。なお、AP と STA 間の距離を段階的に大きくし、負荷トラフィックのない状態で FER を観測すれば、RSSI が大きくなるほど FER が改善する傾向を観測できると思われる。ただし、このような干渉の存在しないシングルユーザ環境は現実の無線ネットワーク

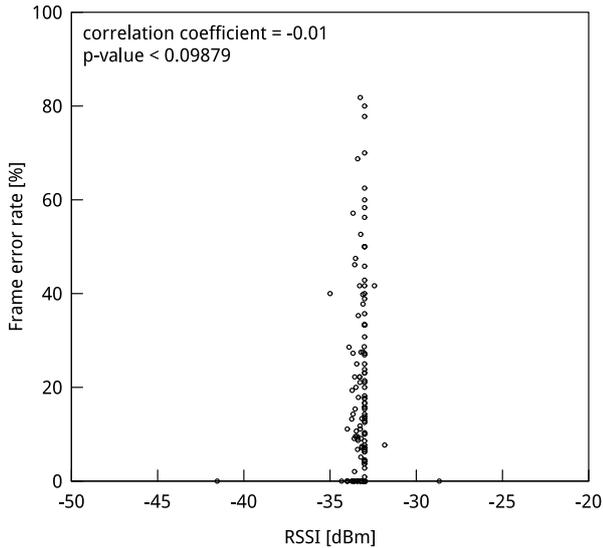


図1 RSSI と FER の関係

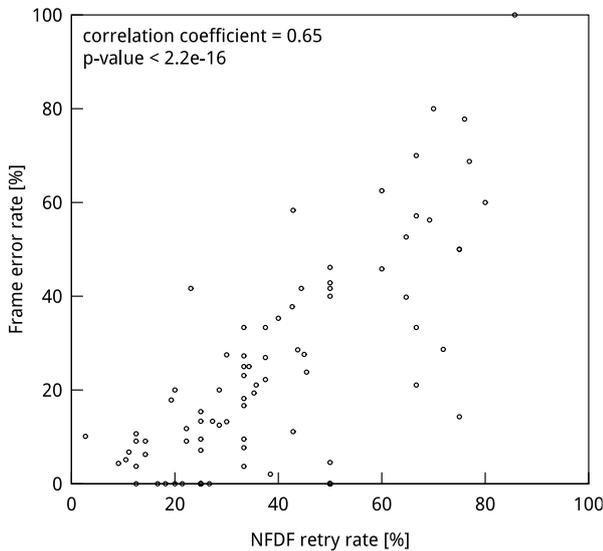


図2 NFDf 再送率と FER の関係

において非現実的であるため、本稿では考えないものとする。

図2にNFDf再送率とFERの関係を示す。図1の場合と異なり、NFDf再送率が大きくなるほどFERも悪化している。相関係数は0.65であり、p値は 2.20×10^{-16} 以下を示した。p値が0.005以下[21]であるので、統計的な有意性を主張でき、NFDf再送率はFERを推定する指標としてある程度機能することが分かった。

4. JANOG41における評価実験

NFDf再送率の有効性を実環境で確認するため、2018年1月24日から1月26日に広島国際会議場で開催されたJANOG41において実証実験を行った。

4.1 AP実装

測定用のAPにはIIJの製品であるSA-W2^(注2)を用い、NFDf



図3 JANOG41が開催された広島国際会議場のフェニックスホール

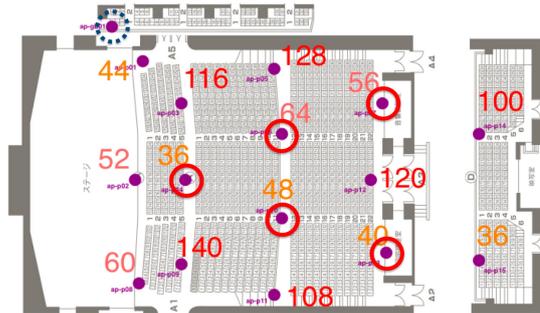


図4 会場のチャンネル割当状況

を測定するためにファームウェアを拡張した。測定用のAPでは、受信したIEEE 802.11フレームをサブタイプおよび再送フラグの有無で分類し、個別に累積フレーム数をカウントしている。このカウンタは無線インタフェース全体とクライアントのMACアドレスごとに保持しており、一定時間ごとにサーバへ送信する。今回の実験では30秒間隔で送信するものとした。また、本機器はAPモードで無線ネットワーク提供とNFDfの収集を同時に行うことが可能だが、情報収集の負荷によるネットワーク品質への影響を考慮し、測定に使うAPではモニターモードで収集した。

4.2 測定環境

JANOG41の会場において無線ネットワークはロビーを含むいくつかのホールで提供されていたが、NFDfの測定は最も広いフェニックスホール(図3)に限定して行った。フェニックスホールでは15台のSA-W2を用いてIEEE 802.11acと1台の大型APでIEEE 802.11gを提供している。図4に会場内のAP配置とIEEE 802.11acのチャンネル割当を示す。点線で丸囲みのチャンネル割当を記述していないAPがIEEE 802.11gの11chを提供している大型APである。NFDfの測定は会場ネットワーク配線の都合により図4の実線で丸囲みの、36ch、40ch、48ch、56ch、64chの5つのAPに対して行った。図5に示すように、NFDfを測定するモニタ用APをデータ通信用APの横に設置した。このAP配置とチャンネル割当は初日の来場前の状態であり、DFS(dynamic frequency selection)によるチャンネル変更を実験中に何度か確認している。また、会場ネットワークの混雑を解消するため、2日目の開始時に2台、3日目の開始時に7台APを追加し計24台で無線ネットワークを提供したため、日毎に測定条件やAPの位置がわずかに変化

(注2) : <http://www.sacm.jp/#saw2>



図5 会場に設置されたデータ通信用 AP (左) とモニター用 AP (右)

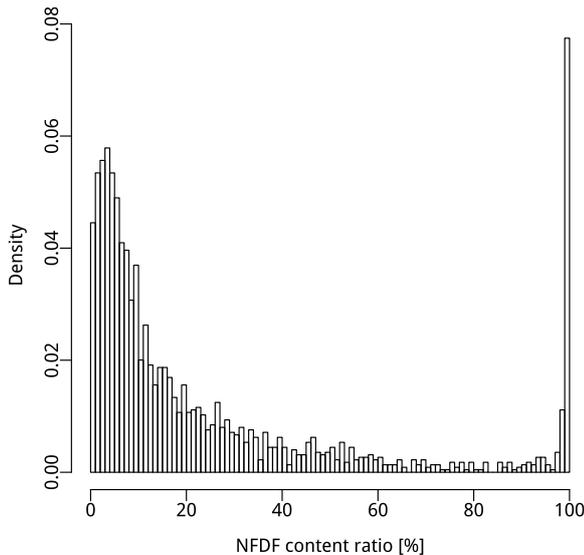


図6 NFD 送信比率のヒストグラム

している。

4.3 測定結果

3日間で収集できた総フレーム数は約48億であり、そのうち14.27%をNFDが占めていた。また、ユニークMACアドレス数は7192であった^(注3)。図6にNFD送信比率のヒストグラムを示す。7192端末のうち2246端末がNFDを1回以上送信していた。この2246端末それぞれについて、NFD送信数を全フレーム数で割った値をNFD送信比率と定義し集計した。図6に示す通り、NFDのみを送信し続けている端末の割合が最も高いことが分かる。これは、会場の無線LANに接続した後、ユーザが何も通信を行わなかった端末だと推測している。また、NFD送信比率5%にもピークが確認できる。2018年現在では、多数の無線LAN利用端末があるような大規模会議の会場ではNFDはほぼ確実に観測できるフレームであり、ネットワーク品質の把握に役立てられることが分かった。また、NFDの観測は、全フレームの14.27%のランダムサンプリングと同等であることも分かった。

次に、図7にNFD再送率の時系列変化を示す。図7では、

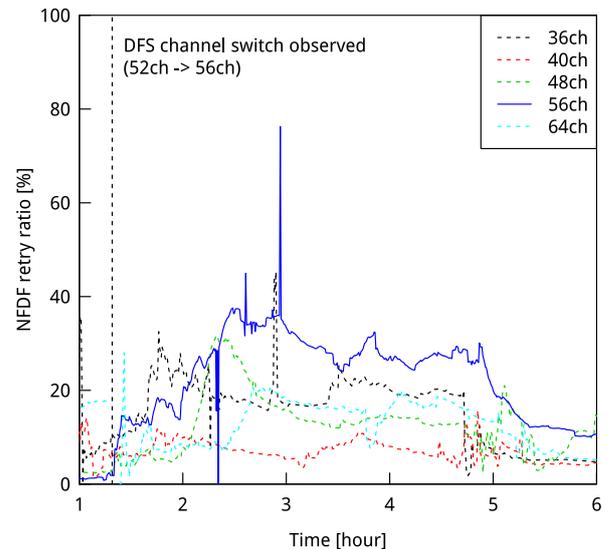


図7 NFD 再送率の時系列変化とDFSによるチャンネル再割当ての影響

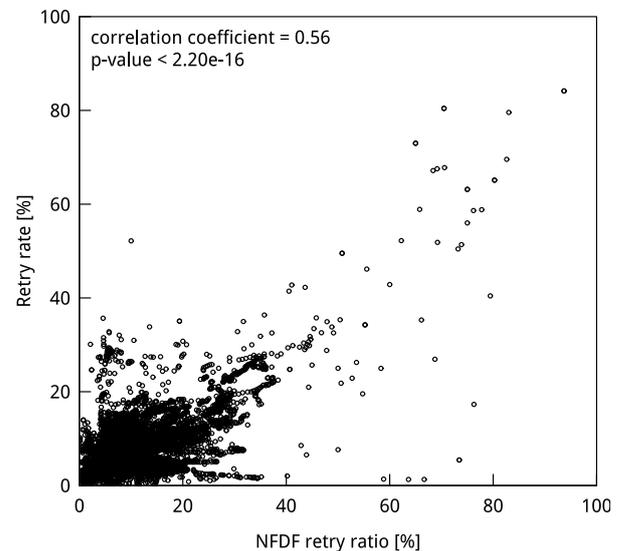


図8 JANOG41におけるNFD再送率と全フレーム再送率の関係

観測対象チャンネルそれぞれについて一定の時間間隔(30秒)内のNFD再送率を描いている。イベントが開始されてから1時間20分後にあるAPのDFS機能が働き、52chが56chに自動で変更された。イベント1日目はこの自動変更気づかなかったため、56chのみ終日通信品質が劣化していた。図7から読み取れるように、NFD再送率はこの通信品質の劣化を正確に検出できている。2日目以降はこの情報を用いてチャンネル割当てを元に戻し、NFD再送率の減少が確認できた。なお、イベント開始5時間後以降にNFD再送率が減少しているのは、1日目のイベントが終了に近づき会場の端末が少なくなったためである。

最後に、図8にNFD再送率と全フレーム再送率の関係を示す。ユーザ端末が送信したフレームをもなく収集するのは不可能であるため、FERは集計できず、代わりに全収集フレームの再送率と比較した。図7と同様に、測定対象チャンネルごとに

(注3)：端末のMACアドレスを秘匿するため、Windows10ではランダムハードウェアアドレス機能が実装されている。この数値はユニーク端末数よりも大きい値となっている可能性が高い。

2変数の関係を調査している。会場では安定したネットワーク環境が提供されていたため、理想環境の結果と異なり、フレーム再送率がおおむね20%以下に抑えられている。NFDF再送率と全フレーム再送率の相関係数は0.56、p値は0.005以下[21]であったため、図2と同様にNFDF再送率は全フレームの再送率を推定するための指標として機能することが分かった。

5. まとめ

本報告では、NFDF再送率がフレーム誤り率、および、全フレームの再送率と相関する可能性について指摘し、その相関関係を調査した。理想環境ではIEEE 802.11aを対象に評価し、NFDF再送率とフレーム誤り率の相関係数は0.65であった。また、大規模イベント会場においてはIEEE 802.11acを対象に評価し、NFDF再送率と全フレーム再送率の相関係数は0.56であった。なお、両者ともにp値は0.05以下であった。以上の結果から、NFDF再送率はWi-Fiの通信信頼性を評価する指標としてある程度有効であることが確認できた。

謝 辞

JANOG41における実証実験に全面的に協力して下さったIJJネットワーク本部IoT基盤開発部の皆さま、JANOG41スタッフの皆さま、および、会場におけるデータ収集に同意して下さった参加者の皆さまに深くお礼申し上げます。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費助成金16H02808, 17H07036の支援を受けて実施しました。

文 献

- [1] G. Hiertz, D. Denteneer, and L. Stibor, "The IEEE 802.11 universe," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, pp. 62–70, 2010.
- [2] L. Verma, M. Fakharzadeh, and S. Choi, "Wi-Fi on steroids: 802.11ac and 802.11ad," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 30–35, 2013.
- [3] T. Nitsche, C. Cordeiro, A. B. Flores, E. W. Knightly, E. Perahia, and J. C. Widmer, "IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz communication for multi-gigabit-per-second Wi-Fi," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 12, pp. 132–141, 2014.
- [4] Y. Ghasempour, C. R. C. M. Silva, C. Cordeiro, and E. W. Knightly, "IEEE 802.11ay: Next-generation 60 GHz communication for 100 Gb/s Wi-Fi," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 12, pp. 186–192, 2017.
- [5] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. McGraw-Hill, 2008.
- [6] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, 2010.
- [7] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.
- [8] A. Anastasi, M. Conti, E. Gregori, and A. Passarella, "A performance study of power-saving policies for Wi-Fi hotspots," *Computer Networks*, vol. 45, no. 3, pp. 295–318, 2004.
- [9] IEEE Standards Association, *802.11-2016 - 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) sp. IEEE, 2016.

- [10] Y. He, R. Yuan, X. Ma, and J. Li, "The IEEE 802.11 power saving mechanism: An experimental study," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2008.
- [11] E. Rozner, V. Navda, R. Ramjee, and S. Rayanchu, "NAP-man: Network-assisted power management for WiFi devices," in *International conference on Mobile systems, applications, and services*, 2010.
- [12] K. N. Gopinath, P. Bhagwat, and K. Gopinath, "An empirical analysis of heterogeneity in IEEE 802.11 MAC protocol implementations and its implications," in *ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization*, 2006.
- [13] R. Chandra, P. Bahl, and P. Bahl, "MultiNet: Connecting to multiple IEEE 802.11 networks using a single wireless card," in *IEEE INFOCOM*, 2004.
- [14] D. Giustiniano, E. Goma, A. L. Toledo, and P. Rodriguez, "WiSwitcher: An efficient client for managing multiple APs," in *ACM SIGCOMM workshop on Programmable routers for extensible services of tomorrow*, 2009.
- [15] J. Kim, D. E. Kim, S. Park, H. R. Seung, K. Han, and H. Kang, "Use of vestigial power management bit within Wi-fi frame structure of access point for coexistence of Wi-Fi and WiMAX systems in shared bands," in *International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 2009.
- [16] N. V. Nguyen, I. Guerin-Lassous, V. Moraru, and C. Sarr, "Retransmission-based available bandwidth estimation in IEEE 802.11-based multihop wireless networks," in *ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, 2011.
- [17] S. Vasudevan, K. Papagiannaki, C. Diot, J. Kurose, and D. Towsley, "Facilitating access point selection in IEEE 802.11 wireless networks," in *ACM SIGCOMM conference on Internet measurement*, 2005.
- [18] 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.
- [19] E. Magistretti, B. Sheva, and E. W. Knightly, "802.11ec: Collision avoidance without control messages," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 22, no. 6, pp. 1845–1858, 2014.
- [20] 3GPP, *CDMA2000 Evaluation Methodology Revision A*, 2009.
- [21] D. J. Benjamin, J. O. Berger, M. Johannesson, B. A. Nosek, E. J. Wagenmakers, R. Berk, K. A. Bollen, B. Brembs, L. Brown, C. Camerer, D. Cesarini, C. D. Chambers, M. Clyde, T. D. Cook, P. De Boeck, Z. Dienes, A. Dreber, K. Easwaran, C. Efferson, E. Fehr, F. Fidler, A. P. Field, M. Forster, E. I. George, R. Gonzalez, S. Goodman, E. Green, D. P. Green, A. G. Greenwald, J. D. Hadfield, L. V. Hedges, L. Held, T. Hua Ho, H. Hoijsink, D. J. Hruschka, K. Imai, G. Imbens, J. P. Ioannidis, M. Jeon, J. H. Jones, M. Kirchler, D. Laibson, J. List, R. Little, A. Lupia, E. Machery, S. E. Maxwell, M. McCarthy, D. A. Moore, S. L. Morgan, M. Munafó, S. Nakagawa, B. Nyhan, T. H. Parker, L. Pericchi, M. Perugini, J. Rouder, J. Rousseau, V. Savalei, F. D. Schönbrodt, T. Sellke, B. Sinclair, D. Tingley, T. Van Zandt, S. Vazire, D. J. Watts, C. Winship, R. L. Wolpert, Y. Xie, C. Young, J. Zinman, and V. E. Johnson, "Redefine statistical significance," *Nature Human Behaviour*, vol. 2, no. 1, pp. 6–10, 2018.
- [22] 小清水 郁, 上岡 英史, "無線 LAN の MAC 層情報を用いたスループット推定方式," 映像情報メディア学会技術報告, vol. 109, no. 204, 2009.
- [23] 新谷 隆文, 前田 香織, "無線 LAN の通信品質推定における MAC 層情報の有効性調査," 情報処理学会論文誌, vol. 58, no. 3, pp. 664–671, 2017.