

2.4GHz 帯における Duty Cycle 閾値制御を用いた最適チャンネル選択方式

高橋由多加[†] 中村嘉隆^{††} 白石陽^{††} 高橋修^{††}

あらまし 近年、2.4GHz 帯を使用する無線機器が増加してきている。中でも、無線 LAN はオフィスや家庭、公共施設などに導入されてきているが、一定エリア内に複数の無線 LAN 機器が存在する場合、電波干渉が問題となる。電波干渉を低減するためには、空きチャンネルの検出が必要だが、全てのチャンネルが使用中であるケースも想定される。その場合、どこのチャンネルが通信に適しているのかを知ることで、通信の安定性やスループットの向上が可能になる。本研究では、Duty Cycle という観測時間における閾値を超えた電界強度の割合をチャンネルごとに解析することにより、混雑度を予測し、最適チャンネルの検出を行う。この際検出精度に大きく関わる閾値を電波環境に応じて自律的に制御する。評価として、提案方式による実環境による実験を行ない、提案方式の有効性を示す。

Optimal Channel Selection in 2.4GHz Band using Duty Cycle Threshold

YUTAKA TAKAHASHI[†] NAKAMURA YOSHITAKA^{††}
YOH SHIRAIISHI^{††} OSAMU TAKAHASHI^{††}

Abstract In recent years, many wireless devices are using the 2.4GHz band. In particular, the wireless LAN has become very popular. Wireless LAN has been used in various places such as homes and offices and schools. Radio interference occurs when there are multiple wireless devices in the same location. Therefore we have to find a free channel. But sometimes there is no available channel. In that case, we propose a method that looks for the best channel using Duty Cycle. we examined the relationship between Duty Cycle and traffic. At this time, according to autonomously control the radio environment involving large threshold detection accuracy. We conducted experiments in real environments. That the proposed method was confirmed as being valid.

1. はじめに

1.1 2.4GHz帯の周波数割り当て

近年における無線技術の進歩は目まぐるしく、身の回りの様々な機器のワイヤレス化が進んでいる。中でも無線LAN(IEEE802.11)[1]を使用する機器はここ数年で急速に増えてきている。無線LANが通信を行う周波数帯である2.4GHz帯にはチャンネルが定義されていて、特定範囲内において複数の無線LANを稼働させるために、周波数を一定の間隔ごとに区切ったものである。実際には図1のようにチャンネルが割り当てられている[2]。無線LANが通信を行う際は、使用チャンネルを中心に約20MHzの周波数帯域幅を用いる。2.4GHz帯で考えると、総チャンネル数と1つの無線LANが使うチャンネル幅から、1ch, 6ch, 11chの3つを用いることで、複数の無線LANを、使用周波数が重複することなく同時に稼働させることができる。

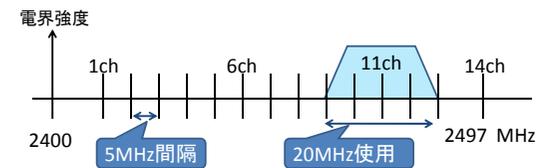


図1 無線LANのチャンネル配置図

1.2 自律分散型マルチチャンネル無線通信の問題点

2.4GHz帯を使用する無線機器や規格によって、どのチャンネルをどの程度の周波数幅で用いるかは異なる。例えばBluetoothはAFH(Adaptive Frequency Hopping: 適応型周波数ホッピング)技術により無線LAN等の出す電波との干渉を極力避けて、使用する周波数を一定間隔毎に切り替え(ホップさせ)て通信を行う。また、無線LAN機器の中には、自動的に空きチャンネルを検出できる製品も存在する。このような自律分散型マルチチャンネルの無線通信環境では各無線機器が上手く各チャンネルを分散して使用することができれば高いスループットを実現することが可能である。しかし、チャンネル数は有限であるために使用機器が増えるほど、空きチャンネルは無くなる。その結果、特定チャンネルに対して利用が集中すると、電波干渉が頻繁に発生してスループットが低下する問題がある。

2. 関連研究

電波干渉を回避・低減し通信品質を向上させるために、無線システムが電波状況に応じて自律的に周波数選択を行う研究はコグニティブ無線[3]の分野で活発に研究さ

れている。自律分散型マルチチャネル無線通信で考えた場合、割り当てられている周波数帯の電波状況を知るためには、ダイナミックにスペクトルを検出する必要がある。一例として、ISMバンドにおいて他の無線システムが運用されていない、または局所的、一時的に利用されていないチャネル（ホワイトスペース）を検知し、通信を行うことで無線リソースの有効活用を行う研究[4]がある。

このような周波数軸上に離散的に存在するホワイトスペースを検知し周波数チャネルを選択して利用する技術はダイナミックスペクトルアクセス（Dynamic Spectrum Access）と言われ（以下DSA）、関連研究[4]では DSAを用いた通信システムの接続方式やチャネル選択方式、データ転送手順などの提案とシミュレーションによる評価を行なっている。周波数の利用状況を知るためのキャリアセンス方式としてはスペクトルセンシングを行っている。DSAシステムにおいては周波数軸上で離散的に発生するホワイトスペースを瞬時に検出する必要があるため、時間軸上だけではなく、周波数軸上においてもキャリアセンスを拡張する必要がある。このようにして得られたホワイトスペースに対して無線システムが瞬時に周波数を切り替えて利用することにより、該当周波数帯として無線リソースの利用効率が上昇することが見込まれる。実際にこのようなDSAシステムを運用するに当たっては、通信規格の仕様やハードウェアのスペックの関係から、現行のIEEE802.11 無線LANに適合させるのは難しく、独自の通信規格によるソフトウェア無線機器での運用が期待される。

IEEE802.11 無線 LAN において無線リソースの有効活用を考えた場合、時間軸上に関しては、CSMA/CA によりスペクトルを検知し、他システムとの時間軸共用を実現している。しかし仕様上、瞬時に使用するチャネルを切り替えることができず、周波数軸上に離散的に存在するホワイトスペースを検知できたとしても、利用することが難しい。よって、無線 LAN システムにおいては離散的に細かく存在するホワイトスペースを隈なく使用するのはなく、ある程度の時間観測した周波数（チャネル）ごとのスペクトルの占有率、つまりホワイトスペースと無線システムが実際に通信をしている時間の比率を求めることが重要になる。占有率はチャネルの混雑度と同義であるため、低い値を示すほど高スループットが期待できる。

関連研究[5]では、チャネルの占有率に着目し、自律分散型マルチチャネル無線通信環境において新規に通信を確立する送受信機を対象に最適チャネルを選択する手法について述べられている。提案方式としては、スペクトルセンシングにより全てのチャネルの占有率を測定した後、占有率が低かったチャネルに対してより多くの占有率測定を行う。それにより低占有率のチャネルの検出の精度を上げることができると同時に、全体としての処理時間を抑えることを実現している。この手法はチャネル毎の占有率が時間軸で安定している場合には有効であるが、ある程度流動的な環境下や、一様に分布してしまう状況においては精度が低下してしまう可能性があることも筆者らにより言及されている。

3. 研究目的

本稿では、最適チャネルの定義を極力電波干渉が発生しなく、高スループットが実現できるチャネルとする。前述の通り、実際に空きチャネルの自動検索機能を有する無線 LAN の AP 製品は存在している。しかし、IEEE802.11 ではチャネルスキャン方式に関する規定はされておらず、ベンダの各自の実装に任されているのが現状である。このため、無線 LAN 全体で言えば、チャネルのスキャン機能に関しては不十分な点が多いと言える。また、スマートフォンやモバイル Wi-Fi ルータをはじめとした今後の無線 LAN の需要拡大が容易に予想される。つまりモバイル機器が多く普及することで電波状況はより流動的になり、その状況に応じた最適チャネルを検出することが重要になる。

最適チャネルの検出に必要なことは、観測対象のチャネルがどの程度のトラフィックがあるかを知ることが必要になる。大量のトラフィックがあるチャネルを新たな無線機器が利用するという事は、電波干渉が非常に起こりやすい。つまり、CSMA/CA による送信機会の争奪とパケット衝突が頻繁に発生し、十分なスループットを得ることができない。逆に、トラフィックが少ないチャネルの場合では、送信機会の争奪やパケット衝突は比較的起こりにくく、トラフィック量が多いチャネルと比較すると、スループットは向上すると考えられる。つまりトラフィック量は無線リソースを利用するユーザ数とユーザによる通信量によって増減するので、混雑度として考えることができる。

本研究ではこれを踏まえ、以下のような環境において最適チャネルを検出することを目的とする。

- 全てのチャネルが占有されている
- チャネル毎にトラフィック量（混雑度）が異なる
- チャネル毎のトラフィック量（混雑度）がある程度流動的

最適チャネルの検出対象は 2.4GHz 帯の IEEE802.11 無線 LAN に用いられる 1 から 11 チャネルの範囲とする。将来的には、検出した最適チャネルを用いて IEEE802.11 無線 LAN 製品が自律的にチャネル選択を行うことを想定している。

4. Duty Cycleによる混雑度予測手法

各チャネルのトラフィック量は、対象の無線ネットワークの管理者などが測定することは可能であっても、ネットワークに参加しない外部から直接実測値を知ることは難しいのが現状である。パケットキャプチャによる測定については、ISMバンドには

様々な規格の無線システムが存在するので、全てに対応するのは現実的ではないといえる。その点、スペクトルセンシングは特定のキャリア（通信規格）に囚われないセンシングが可能であるという利点がある。つまり、2.4GHz帯を使用する無線規格ならば、無線LAN以外のものでも検出が可能である。そこで筆者らは2.4GHz帯のスペクトルを観測し、観測時間におけるスペクトルの電界強度のピーク値と平均値をもとに混雑度を予測できないかを実験した[6]。結果的にはピーク値を用いたデータでは観測時間が増大するほどノイズが強くなってしまい、短い観測時間では取りこぼしが目立った。平均値を用いたデータでは時間経過が大きくなるにつれて平坦化されてしまい、チャンネル毎の特徴が掴みにくかった。いずれの手法も、時間軸の成分が平均化されることにより消失してしまっているため、混雑度予測には不向きであることが解った。

そこで筆者らはDuty Cycleを用いて各チャンネルの通信頻度を分析することにより、混雑度を予測する手法を取る。Duty Cycleとは、設定した閾値を超えた電界強度のスペクトルの出現回数を、カウントすることで、観測時間内における閾値を超えた電界強度の割合を知ることができる値である。各チャンネルのDuty Cycleを求めることで、それぞれのチャンネルの混雑度を予測することが可能であると考えられる。例えば、ある周波数において一定時間観測を行った場合に、図2のようなスペクトルが得られたとする。そこに閾値を設定して、閾値より上の電界強度をカウントする。

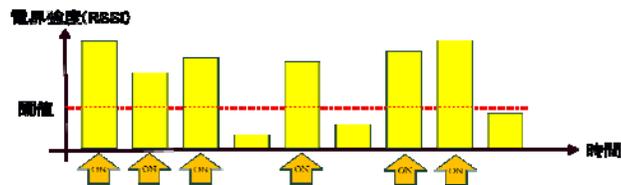


図2 Duty Cycle の仕組み

これにより観測時間内におけるスペクトルのONとOFFの割合を得ることができる。つまり観測時間内に得られたスペクトルのサンプル数を s 、時系列ごとの電界強度値を $R[s]$ とすると Duty Cycle (D) は以下のように求めることができる。

$$D = \frac{\sum_0^s R[s]}{s}$$

こうして得られたチャンネル毎の Duty Cycle が一番低いものを、最適チャンネルとして検出する。また、本研究に関しては、無線LANを使用するシステムでの利用を想定しているので、周波数帯域幅 20MHz を考慮し、中心チャンネル前後2チャンネルの Duty

Cycle の値を加算して最適チャンネルを導き出すものとする。

5. Duty Cycle閾値の最適値検討

5.1 閾値と検知感度

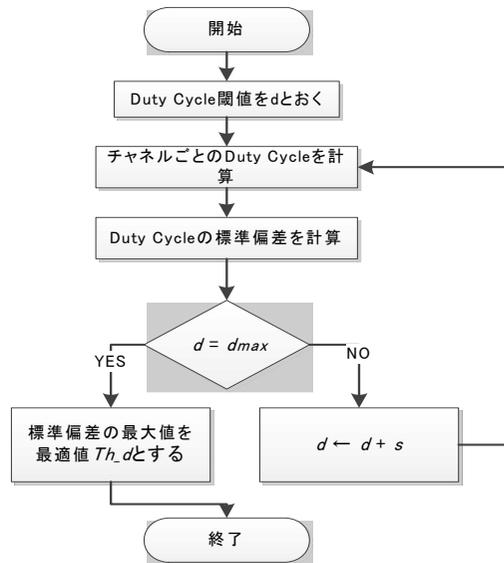
Duty Cycleに限らず、キャリアセンスレベルを設けて信号検知を行う場合に共通して言えることではあるが、閾値が大きな値になればなるほど、微弱な電界強度のスペクトルを検知することができるが、ノイズも拾いやすくなる。逆に閾値を小さな値にすればするほど、強い電界強度のスペクトルしか検知しなくなり、ノイズを除去することができるが、ノイズではない微弱な電界強度のスペクトルを見落とす可能性がある。つまり、Duty Cycle 閾値とスペクトルの検知感度はトレードオフの関係にあり、最適な閾値を発見することが必要である。また、電界強度は無線機器の送信出力や距離、障害物などの様々な要因により刻々と変化するため、Duty Cycle 閾値の最適値は環境により異なる。

5.2 閾値の最適値選択法

そこで本研究では、Duty Cycleの最適値をダイナミックにコントロールすることで、電波環境の変化に対応する。Duty Cycle最適値の計算アルゴリズムを図3に示す。このアルゴリズムは、一定の測定データが集まった状態で実行される。例として、アルゴリズムを実行し、表1のような解析データが得られたとする。縦軸はDuty Cycleの閾値を表し、 d から d_{max} までの値がステップ幅 s で並ぶ。横軸はチャンネルを表し、対応する閾値で計算したDuty Cycle値が表示されている。右端の値は、対応する閾値における、各チャンネルのDuty Cycle値の標準偏差である。得られたすべての閾値ごとの標準偏差の最大値を閾値の最適値とする。

表1 解析データの例

ch 閾値	-1	0	1	2	...	10	11	標準偏差
-20	0.12	0.10	0.14	0.14	...	0.13	0.15	0.09
-21	0.16	0.13	0.18	0.19	...	0.14	0.16	0.82
...



※ d_{max} : 探索する閾値の最大値, s : 探索ステップ幅

図 3 Duty Cycle 閾値の最適値選択アルゴリズム

標準偏差は、標本のデータの値のばらつき度合いを表す指標である。チャンネル毎のある閾値において、Duty Cycle のばらつきが大きければ大きいほど標準偏差は高くなり、各チャンネルを相対的に見た場合に特徴がよく現れていると言える。本提案手法では、特徴がよく現れている場合は、無線システムの信号とノイズを分離できている状態と仮定することで、標準偏差が最大のものを最適閾値として採用した。

実際に複数無線システムが存在する 2.4GHz帯において測定を行い、閾値とチャンネル毎のDuty Cycle標準偏差の関係を示したのが図 4になる。低い閾値の範囲ではどのチャンネルにおいても一様にDuty Cycleが低く、閾値が高い範囲では全てが最大値（1）となっている。これは 6.1 で述べた閾値と検知感度のトレードオフの関係を表しており、異なる電波環境においても似た傾向を示すことが予想できる。従って、流動性の高い電波環境の中においても標準偏差をもとに閾値を設定することで各チャンネルのDuty Cycleによる混雑度の測定精度が上がり、最適チャンネル検出を行うことが可能となる。以上の手法の提案を筆者らは関連研究[6]にて行った。

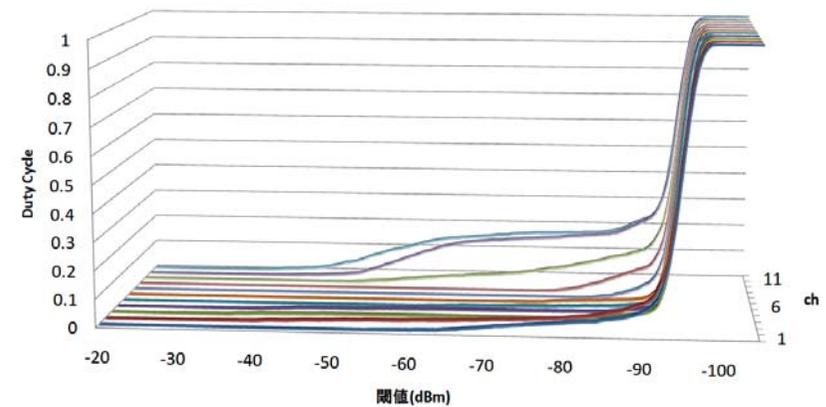


図 4 閾値ごとの各チャンネルにおける Duty Cycle

6. 最適チャンネル検出の実験と評価

6.1 実験手順

提案手法による最適チャンネル検出の実環境での実験を行った。電波環境としてはパケットキャプチャにより全てのチャンネルが使用中であることを確認した。チャンネルを使用中の各無線機器に関しては、実験者の管理下には無く、各自が自由に通信している状態にある。実験の手順として、はじめにキャリアセンスを行い提案手法による最適チャンネルを検出する。次に実験対象の全チャンネルにおいて、無線 LAN でアドホック通信によるスループット計測を行う。実験の詳細は表 2 のとおりである。

表 2 実験の詳細

実験場所	大学構内 研究実験室 329
キャリアセンス時間	60sec
スループット計測の通信方式	IEEE 802.11b/g
スループット計測の通信容量	16Mbyte
スループット計測の試行回数	3
無線 LAN 機器が使用中のチャンネル	1, 4, 6, 11

6.2 実験結果

実験した結果、閾値の最適値は-93.5dBmで、各チャンネルのDuty Cycleは図 5 のようになり、最適チャンネルは5と検出された。また、スループットの計測結果は図 6 の

通りである。これを見ると、5チャンネルにおいて最も高いスループットが出ていることがわかる。実測スループットが最高のチャンネルと提案手法による最適チャンネルの一致により提案手法による最適チャンネル検出の有効性を示すことができた。

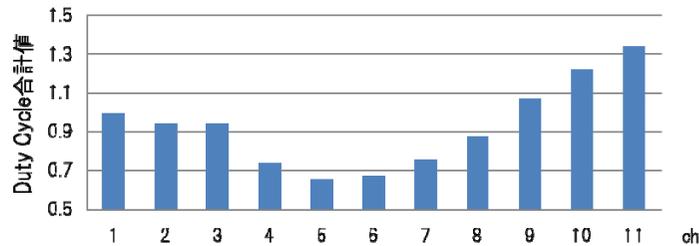


図 5 最適閾値における各チャンネルの Duty Cycle

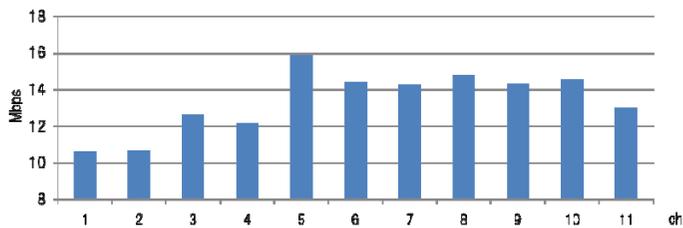


図 6 チャンネルごとのスループット

6.3 評価・考察

まず、最適閾値とチャンネルごとのスループットの関係を見ると、最適チャンネルの検出には成功したが、その他のチャンネルで見ると必ずしも対応が取れているわけではないことがわかる。例えば、2番目に Duty Cycle が低いチャンネルは6であるが、2番目にスループットが高いチャンネルは8である。この点に関しては、最適チャンネル検出の際に中心チャンネルの前後2チャンネルの Duty Cycle を単純に合計していることが主な原因だと推測される。中心チャンネルから外に行くほど加算する値に補正をかける等の対策が考えられる。また、スループット計測を行う機器も含めた、各無線機器の位置関係によるものも考えられるので、今後は複数の異なる状況下での実験を検討している。

次に、Duty Cycle閾値と検出される最適チャンネルの関係性について調べた。実験デ

ータを用いて、閾値ごとの最適チャンネルの変化を表したのが図7になる。同一閾値で最適チャンネルが複数プロットされている場合は、最適チャンネルの判定が不能になっていることを表す。実際に閾値が-30dBm前半までの範囲では信号検出が出来ていないことがわかる。スループットの測定結果による最適チャンネルは5であるが、提案手法が最適チャンネルを5と検出できた範囲は閾値が-89~-97dBmであることがわかった。

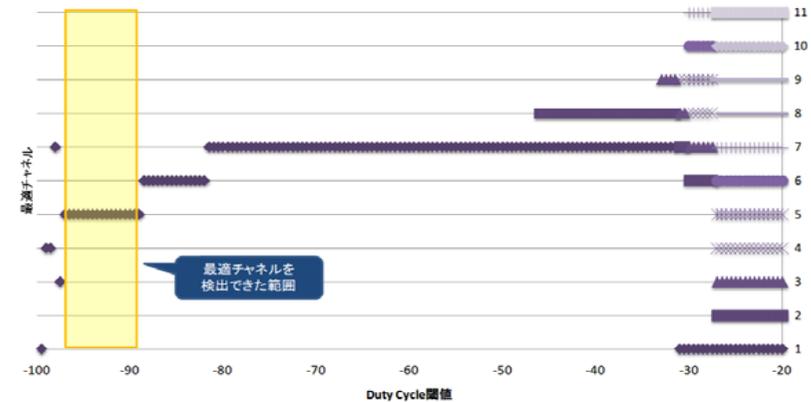


図 7 閾値ごとの最適チャンネルの変化

さらに図8 閾値ごとの標準偏差の変化を見てみると、最適チャンネルを検出できた範囲では標準偏差がピークの部分に対応しており、最適チャンネルの検出することができた閾値の最小値と最大値を堺に、標準偏差が急上昇、急下降しているのが読み取れる。つまりDuty Cycleの標準偏差と最適チャンネルを検出することができる閾値の範囲には関係性があり、Duty Cycleの標準偏差を用いて最適閾値を判断することの有効性の裏付けを取ることができた。

また、今回の実験はキャリアセンス時間を60秒で行ったが、キャリアセンス時間の変化に着目し、提案手法が導きだす最適チャンネルをプロットしたものが図9である。この結果を見ると、キャリアセンス時間が約13秒を超えてからは、5チャンネルを検出している。つまり、ある一定の時間が経過した後は、最適チャンネルの検出が振れずに安定すると考えられる。これはキャリアセンス時間が短いほど、より瞬間的なスペクトルが強く反映されるためであり、一時的なトラフィックの増加やノイズの影響を受けやすくなる。Duty Cycleの特性を活かすためにも、キャリアセンス時間は単に短ければ良いというわけではなく、ある程度長期的なスパンで決めるべきだと考えられ、今後検討すべき課題の一つであると認識している。

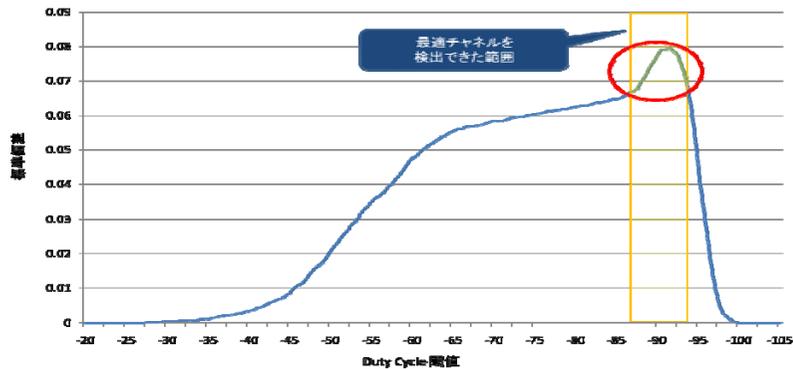


図 8 閾値ごとの標準偏差の変化

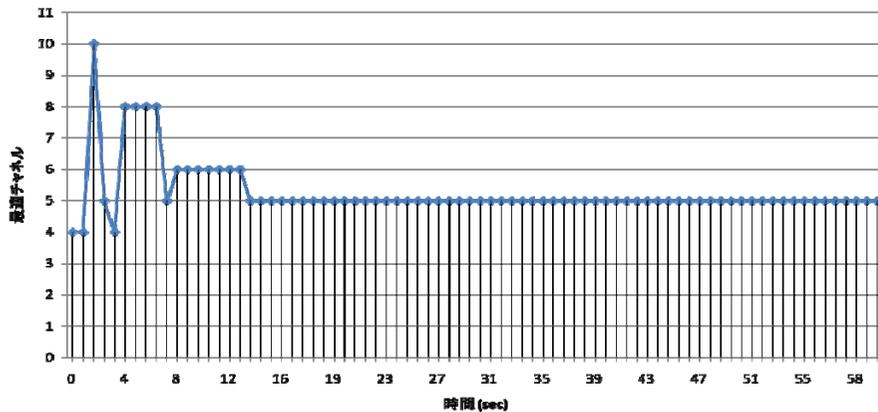


図 9 キャリアセンス時間と最適チャンネル

7. まとめ

本研究では、2.4GHz 帯などに代表される自律分散型の無線環境において無線 LAN システムが通信を行う際に最適なチャンネルを検出することを目的とした。そこで

ペクトルセンシングを行い、Duty Cycle を計算することでチャンネル毎の混雑度を計測することで最適チャンネルを検出する方法を提案した。課題となったのは信号検出のための閾値の設定で、それに対し、各チャンネルの Duty Cycle の標準偏差を用いることにより、閾値の最適値を検出するアプローチを取った。実環境での実験を行い、提案手法によって検出された最適チャンネルをスループットの実測値と比較評価した。結果的には提案手法によって検出された最適チャンネルでは最も高いスループットを示し、提案手法の有効性を示すことができた。さらに閾値ごとの検出された最適チャンネルの推移と、閾値ごとの標準偏差には相関が見られた。また、キャリアセンス時間と検出された最適チャンネルの関係を見ると、ある一定の時間を超えると最適チャンネルが一定値に定まり安定する可能性があることが解った。

今後の展望としては、異なる環境においても同様のことが起こるかを検証する必要があると考えている。その上で有効性が確認できた場合、提案手法の中で最適なキャリアセンス時間の検討と閾値検出のための計算コストの削減を行う予定である。また、提案方式を搭載したシステムが複数存在する状況において、最適チャンネルの分布がどのようになるのかを調査する必要がある。最終的にはソフトウェア無線への提案システムの実装を行い、よりリアルタイム性の高い実環境での実験・評価を行うことを検討している。

参考文献

- [1] IEEE, “Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, 2007.
- [2] 守倉 正博, 久保田 周治, “802.11 高速無線 LAN 教科書”, 株式会社インプレス R&D, 2008.
- [3] J.Mitola et al, “Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal”, IEEE Personal Com., Vol.6, No.4, pp.13-18, Aug.1999.
- [4] 中本 成洋, 矢野 一人, 鈴木 康夫, 相河 聡, 宇野 雅博, 上羽 正純, “DSA システムのセンシングストラテジの違いが無線 LAN と Bluetooth に与える影響”, 信学技報, SR2010-98, pp.69-76, Mar. 2011.
- [5] 田久 修, 岸 拓也, 藤井 威生, 榎田 洋太郎, “マルチチャンネル無線アクセスにおける学習型占有率測定法と高速ランデブチャンネルの実現”, 信学技報, Vol. 111, No. 13, SR2011-4, pp. 19-24, Mar. 2011.
- [6] 高橋 由多加, 白石 陽, 高橋 修, “2.4GHz 帯における Duty Cycle を用いた最適チャンネル選択方式” 信学技報, SR2010-67, pp. 193-198, Oct.2010.