

チャンネル棲み分けに基づく干渉測定型動的マルチチャンネル配置 アルゴリズムを搭載した無線 LAN 実験装置の試作

松村 祐輝¹ 天間 克宏¹ 熊谷 智明²
石原 浩一² B. A. Hirantha Sithira Abeysekera² 安達 文幸³

^{1,3} 東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

² 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所 〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: ¹{matsumura, tenma}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ³adachi@ecei.tohoku.ac.jp
²{kumagai.tomoaki, ishihara.koichi, hirantha.abeysekera}@lab.ntt.co.jp

あらまし 無線 LAN では、限られたチャンネルを複数のアクセスポイント(AP)で再利用しなければならないので、同一チャンネル干渉(CCI)がスループットに大きな影響を与えてしまう。干渉測定型チャンネル棲み分けに基づく動的チャンネル配置法(IACS-DCA)を用いれば、AP は強い干渉を受けないチャンネルを自律的に選択できる。しかし、IACS-DCA では、干渉が小さいチャンネルが複数ある場合でも各 AP が選択できるチャンネル数を 1 チャンネルのみとしていたため、周波数利用効率の観点からは最適とは言えなかった。そこで筆者らは先に、許容 CCI レベル以下のチャンネルを全て選択する、チャンネル棲み分けに基づく干渉測定型動的マルチチャンネル配置法(IACS-DMCA)を提案した。IACS-DMCA では、周囲の CCI 環境に応じて各 AP が自律的に複数チャンネルを選択することで、高い周波数利用効率を達成できる。本稿では、筆者らが試作した、IACS-DMCA アルゴリズムを搭載した無線 LAN 実験装置を紹介する。屋内実験評価により、IACS-DMCA は設計通りに動作することを確認した。

キーワード チャンネル棲み分け, 動的チャンネル配置, 同一チャンネル干渉, 自律制御, IEEE802.11 無線 LAN

Development of Wireless LAN Testbed Using Interference-Aware Channel Segregation Based Dynamic Multi-Channel Assignment Algorithm

Yuki MATSUMURA¹ Katsuhiko TEMMA¹ Tomoaki KUMAGAI²
Koichi ISHIHARA² B. A. Hirantha Sithira ABEYSEKERA² and Fumiyuki ADACHI³

^{1,3} Dept. of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

² NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation
1-1, Hikarinooka, Yokosuka-shi, 239-0847, Japan

E-mail: ¹{matsumura, tenma}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ³adachi@ecei.tohoku.ac.jp
²{kumagai.tomoaki, ishihara.koichi, hirantha.abeysekera}@lab.ntt.co.jp

Abstract In Wireless LAN, the reuse of limited number of channels at multiple access points (APs) leads to co-channel interference (CCI), which significantly affects the throughput performance. By using interference-aware channel segregation based dynamic channel assignment (IACS-DCA), AP can autonomously select a channel so that AP does not receive a large interference. However, the channel selection may not be optimal in terms of spectral efficiency since IACS-DCA allows each AP to use only one channel even though multiple channels are available. Recently, we proposed an interference-aware channel segregation based dynamic multi-channel assignment (IACS-DMCA) which allows AP to use all channels satisfying an acceptable CCI level. In IACS-DMCA, high spectral efficiency can be achieved by assigning each AP multiple channels based on ambient CCI environment. In this paper, we introduce a wireless LAN testbed with IACS-DMCA algorithm that we have developed. By indoor experiment, we show that the wireless LAN testbed operates in accordance with the design.

Keyword Channel segregation, Dynamic channel assignment, Co-channel interference, Autonomous control, IEEE802.11 wireless LAN

1. はじめに

利用可能な無線帯域が限られている無線ネットワークでは、空間的に離れたアクセスポイント(AP)が同

一チャンネルを再利用しなければならないので、同一チャンネル干渉(CCI)が通信品質を制限してしまう。そのため、CCI を最小化するようにチャンネルを再利用しなけ

ればならない。しかし、実際の無線ネットワークでは、ユーザ分布の変動や新規 AP の設置に伴って CCI 環境が変化してしまう。したがって、CCI 環境の変化に追従して、CCI が常に最小化するようにチャンネルを動的に割り当てる動的チャンネル配置(DCA)[1]-[3]が必要である。

無線ネットワークへの DCA の適用に関する検討は、これまで数多く行われてきた[4]-[6]。チャンネル棲み分けに基づく DCA(CS-DCA)[7],[8]では、各 AP は一定の時間間隔で観測した瞬時受信信号対干渉+雑音電力比(SINR)に基づいて計算したチャンネル優先順位をチャンネル優先度テーブルに記憶し、優先順位が最も高いチャンネルを選択することで、CCI を最小化するチャンネル再利用パターンを形成する。筆者らが提案した干渉測定型 CS-DCA(IACS-DCA)[9]では、各 AP は利用可能な全てのチャンネルの瞬時 CCI 電力を一定時間ごとに測定し、過去の測定値から平均 CCI 電力を計算してチャンネル優先度テーブルに相当する CCI テーブルに記憶する。そして、平均 CCI が最小のチャンネルを 1 つ選択する。これにより、周辺セルに与える CCI を最小化するようなチャンネル再利用パターンを形成できる[10]。

しかし、IACS-DCA では、CCI レベルが許容 CCI レベル以下のチャンネルが複数ある場合でも、各 AP が選択できるチャンネル数を 1 チャンネルのみとしていたため、同一チャンネルの再利用距離が必要以上に長くなり過ぎるので、周波数有効利用の観点からは最適とは言えなかった。そこで筆者らは、AP が CCI 環境の変化に追従して複数のチャンネルを選択できるチャンネル棲み分けに基づく干渉測定型動的マルチチャンネル配置法(IACS-DMCA)を提案した[11]。IACS-DMCA では、CCI テーブルに記憶されている平均 CCI 電力が許容値(本稿ではこれを閾値と呼ぶ)以下のチャンネルを各 AP が全て選択する。これにより、高い周波数利用効率を達成できる[11]。

本稿では、IACS-DMCA の屋内実験評価のために筆者らが試作した無線 LAN 実験装置の概要及びその動作について報告する。屋内実験評価により、無線 LAN 実験装置は CCI 電力が閾値以下の全てのチャンネルを自律的に選択できることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章で IACS-DMCA の原理を簡単に説明する。第 3 章では、試作した無線 LAN 実験装置を紹介する。第 4 章は屋内実験評価結果を示す。第 5 章でまとめる。

2. IACS-DMCA[11]

IACS-DMCA を適用したシステムの概念図を図 1 に示す。図 1 に示すように、各 AP は平均 CCI 電力を記憶する CCI テーブルを保有している。AP は一定間隔で CCI 電力を測定し、平均 CCI 電力を計算し、CCI テーブルを更新する。次いで、AP は CCI テーブルを参照し、平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルが存在するかどうかを確認する。該当するチャンネルが存在する場合は、該当するチャンネルを全て選択し、該当するチャンネルが存在しない場合は平均 CCI 電力最小のチャンネル

を 1 つ選択する。最後に、AP は選択した全てのチャンネルでビーコンを送信する。AP は上記の動作を一定間隔で繰り返し行う。これにより、各 AP は平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルを自律的に選択できる。

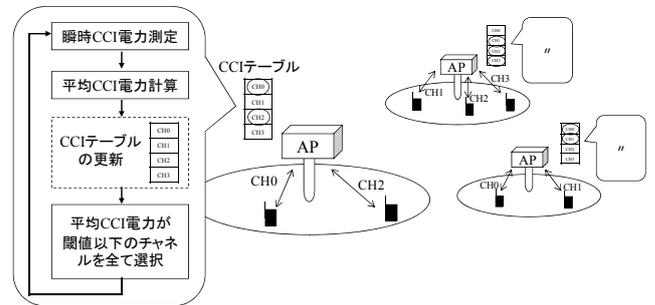


図 1 IACS-DMCA を適用したシステムの概念図

3. 無線 LAN 実験装置

図 2 に、無線 LAN 実験装置のハードウェア構成図を示す。図 2 に示すように、無線 LAN 実験装置は、IACS-DMCA を実装した PC、USB 接続された CCI 電力測定用の外付けアンテナ、およびチャンネルカードから構成される。無線 LAN 実験装置は、IACS-DMCA を搭載した 1 つの AP に相当する。無線 LAN 実験装置には 4 つのチャンネルカードが搭載され、最大 4 チャンネルを同時に使用できる。

図 3 に、無線 LAN 実験装置の外観図を示す。今回は、実装上の都合により、4 枚のチャンネルカードそれぞれに対応した 4 つの AP(バッファロー WAPM-APG300N, 本稿ではチャンネルカードとよぶ)を使用した。図 3 に示すように、無線 LAN 実験装置の天板に 4 つのチャンネルカードが固定されている。

図 4 に、無線 LAN 実験装置の動作を示す。図 4 に示した動作の詳細を下記に示す。

- 1)無線 LAN 実験装置は、CCI 電力測定用の USB 外付けアンテナを用いて、周辺の AP が送信するビーコンの RSSI (Received Signal Strength Indication)を測定し、全チャンネルの瞬時 CCI 電力を計測する。
- 2)忘却係数 β を用いる 1 次フィルタ[12]を用いて、各チャンネルの平均 CCI 電力を計算する。ここで、第 0 番目の無線 LAN 実験装置の第 c チャンネル($c=0\sim C-1$, C は利用可能なチャンネル数)における平均 CCI 電力(真値)は、次式のように計算される。

$$\bar{I}_0(t, c) = (1 - \beta) \cdot I_0(t, c) + \beta \cdot \bar{I}_0(t - 1, c) \quad (1)$$

ここで、 $I_0(t, c)$ は第 t タイムスロットにおいて、第 0 番目の無線 LAN 実験装置が第 c チャンネルで受信する瞬時 CCI 電力(真値)である。

- 3) T_1 周期で 1)~2)の動作を繰り返す。ここで、 T_1 間隔の離散時間をタイムスロットと定義する。本稿の実験では、 $T_1=3$ 秒に設定した。
- 4) T_2 周期で、平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルが存在するか確認する。本稿の実験では、 $T_2=90$ 秒に設定した。
- 5)平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルが存在する場合

は、無線 LAN 実験装置は該当するチャンネルを全て選択する。ただし、無線 LAN 実験装置のチャンネルカードは 4 枚のため、無線 LAN 実験装置が選択できるチャンネル数は最大 4 チャンネルに制限される。

- 6) 該当するチャンネルが存在しない場合は、無線 LAN 実験装置は平均 CCI 電力が最小のチャンネルを 1 つ選択する。
- 7) 無線 LAN 実験装置は、使用チャンネル変更命令をチャンネルカードに送信する。
- 8) チャンネルカードは使用チャンネルを変更する。ここで、無線 LAN 実験装置は、使用していないチャンネルカードがある場合は、そのチャンネルカードの電源を切る。したがって、無線 LAN 実験装置は、使用しているチャンネルでのみ、ビーコンを送信することになる。

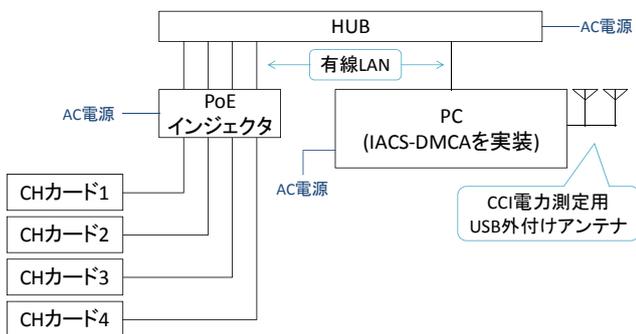


図2 無線 LAN 実験装置のハードウェア構成図 (IACS-DMCA を搭載した 1 つの AP に相当する)

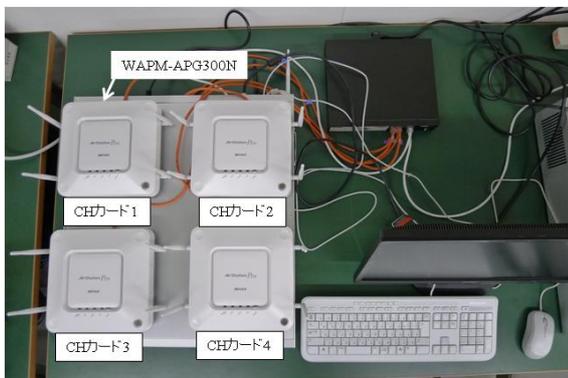


図3 無線 LAN 実験装置の外観図 (IACS-DMCA を搭載した 1 つの AP に相当する)

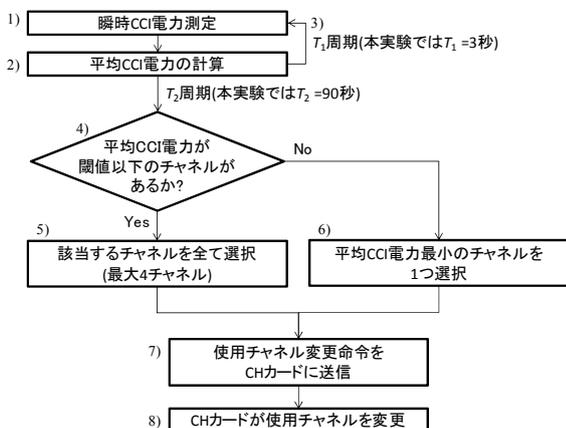


図4 無線 LAN 実験装置の動作

4. 屋内実験評価

4.1. 実験環境

東北大学青葉山キャンパスの仮設研究棟 D20 2F 209 号室にて屋内実験を行った。図 5 に、屋内実験環境を示す。図 5 に示すように、1 台の無線 LAN 実験装置を屋内実験室に配置した。また、干渉源として、固定チャンネルを使用する 4 つの AP (AP1~AP4) を無線 LAN 実験装置近傍に配置した。無線 LAN 実験装置および全ての AP は、IEEE802.11a モードまたは IEEE802.11g モードで動作するものとした。無線 LAN 実験装置は、5GHz 帯のチャンネル 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 62, 100, 104, 108, 112, 116, 120, 124, 128, 132, 136, 140 (全 19 チャンネル) または 2.4GHz 帯チャンネル 1, 6, 11 (全 3 チャンネル)のうち、平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルを選択する。一方、干渉源として使用する AP1~AP4 は、上記のうち、任意のチャンネルを強制的に配置した。平均 CCI 電力計算のための 1 次フィルタの忘却係数は、 $\beta=0.99$ とした。このとき、1 次フィルタの等価平均区間は $1/(1-\beta)=100$ タイムスロットとなり、実時間では 300 秒となる ($T_1=3$ 秒, $\beta=0.99$ の場合)。

屋内実験では、はじめに、十分な数のチャンネル(全 19 チャンネル)を利用できる 5GHz 帯において、無線 LAN 実験装置のチャンネル選択動作を観測した。まず、無線 LAN 実験装置を起動し、平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルが全て選択される(ただし、最大 4 チャンネルに制限される)ことを確認した。また、無線 LAN 実験装置が選択した全てのチャンネルに強い干渉を発生させ、強い干渉が発生した場合に無線 LAN 実験装置は適応的に使用チャンネルを再選択できることを示した。次に、直交したチャンネルが 3 チャンネルしかない 2.4GHz 帯において、同様の実験を行った。まず、無線 LAN 実験装置を起動し、平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルが全て選択される(ただし、最大 3 チャンネル)ことを確認した。次に、無線 LAN 実験装置が選択したチャンネルに順に強い干渉を発生させ、無線 LAN 実験装置は強い干渉を受けると、適応的に使用チャンネル数を減らすことを示した。

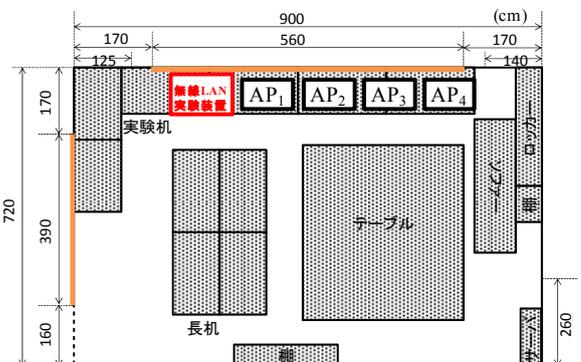
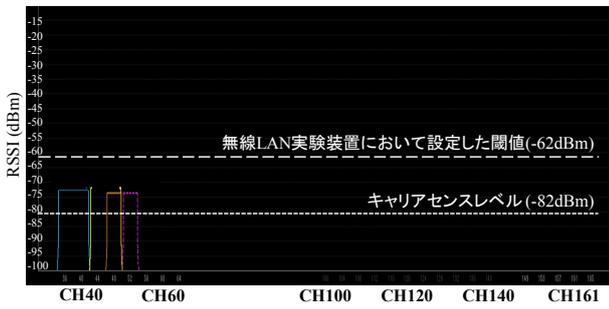


図5 屋内実験環境

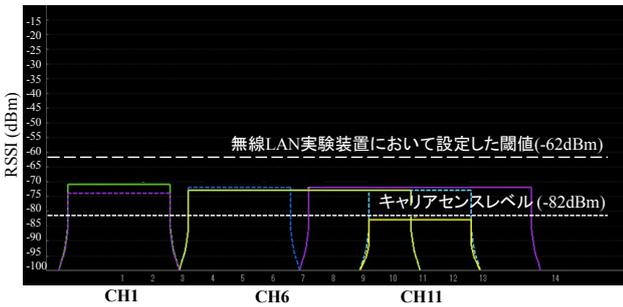
4.2. 屋内実験室におけるチャンネル利用状況

はじめに、屋内実験室において外部干渉のチャンネル利用状況を観測した。図 6 に、観測した結果を示す。

図 6 に示すように、屋内実験室では、実験系以外の複数の AP(外部干渉)を検出した。無線 LAN では、キャリアセンスレベル(-82dBm [13])以上の CCI を受けると、CSMA/CA により送信を待機するので、スループットが大きく低下してしまう[14]。そこで、無線 LAN 実験装置における平均 CCI 電力の閾値は、 $I_r=-82\text{dBm}$ に設定するのが妥当である。しかし、図 6 に示したように、今回の実験環境では、キャリアセンスレベルである -82dBm よりも大きい外部干渉が多数存在しており、それらの発生源である AP は IACS-DMCA を搭載していない。それら IACS-DMCA を搭載していない AP の影響を受けることなく、無線 LAN 実験装置の動作を確認するために、閾値をキャリアセンスレベルよりも 20dB 高い $I_r=-62\text{dBm}$ と大きな値に設定した。



(a) 5GHz 帯



(b) 2.4GHz 帯

図 6 外部干渉のチャンネル利用状況

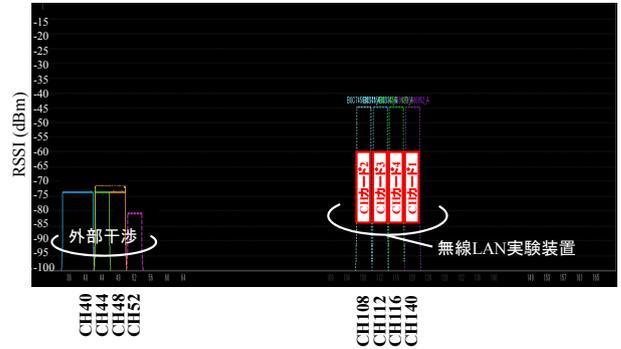
4.3. 5GHz 帯における実験結果

実験により、無線 LAN 実験装置は、平均 CCI 電力が閾値以下のチャンネルを全て選択できる(ただし、最大 4 チャンネル)ことを示す。また、強い干渉が発生した際は、強い干渉を避けて、適応的にチャンネルを再選択できることを示す。以下の手順で実験を行った。図 7 に、無線 LAN 実験装置チャンネル利用状況を示す。

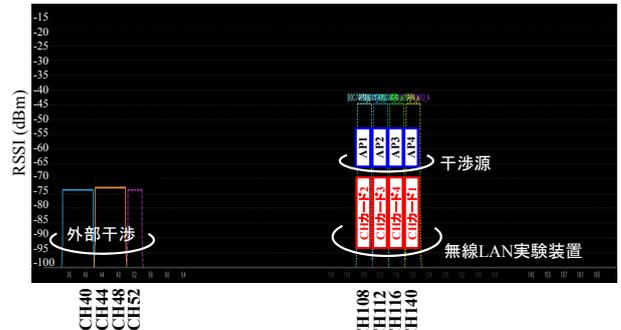
- 1)無線 LAN 実験装置を起動した。この時を、時刻 0 とした。
- 2)等価平均区間(300 秒)以上の十分な時間が経過するまで待機した。無線 LAN 実験装置を起動してから約 30 分が経過したとき、無線 LAN 実験装置はチャンネル 108, 112, 116, 120 の 4 つのチャンネルを選択した(図 7(a)参照)。
- 3)無線 LAN 実験装置を起動してから約 35 分が経過したとき、無線 LAN 実験装置が選択した全てのチャンネルに、強い干渉を発生させた。すなわち、AP1~AP4 を起動し、チャンネル 108, 112, 116, 120 を強制的に配

置した(図 7(b)参照)。

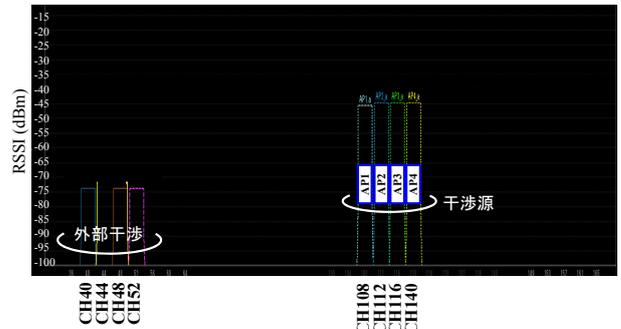
- 4)AP1~AP4 の起動後約 110 秒が経過したとき、無線 LAN 実験装置は、使用チャンネルの変更命令を発し、チャンネルカードを再起動させた(図 7(c)参照)。ここで、使用チャンネル変更命令の発令までに約 110 秒を要したのは、本実験におけるチャンネル変更周期を $T_2=90$ 秒に設定したためである。



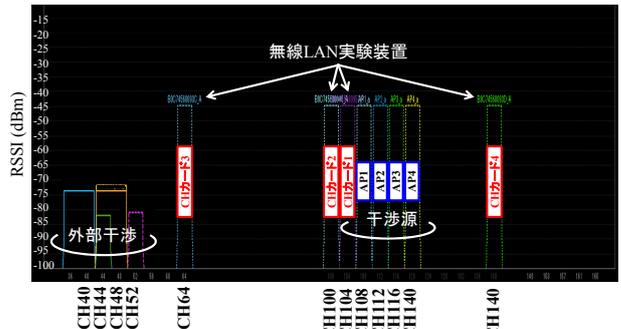
(a) 無線 LAN 実験装置を起動してから約 30 分経過



(b) AP1~AP4 起動後



(c) チャンネルカード 1~4 の再起動中



(d) チャンネルカード 1~4 の起動後

図 7 無線 LAN 実験装置のチャンネル利用状況

- 5) 使用チャンネル変更命令の発令から約 90 秒が経過した後、無線 LAN 実験装置は、干渉を避けてチャンネル 64, 100, 104, 140 を選択した(図 7(d)参照)。ここで、チャンネルカードの起動に約 90 秒を要したのは、本実験装置は 4 枚のチャンネルカードそれぞれに対応した 4 つの AP(バッファロー WAPM-APG300N)を使用しているためである。5GHz 帯を使用する無線 LAN では、AP は気象レーダなどの各種レーダと周波数を共用している。したがって、AP は、混信をさけるために、起動前に各種レーダの電波を測定しなければならず、起動に数十秒の時間を要してしまう[15]。
- 6) 時刻 60 分まで観測し、強い干渉が生じなければチャンネル変更は行われなことを確認した。

図 8 に、無線 LAN 実験装置の 1 次フィルタ出力(平均 CCI 電力計算値)の時間推移を示す。図 8 に示すように、チャンネル 40, 44, 48, 52 において、閾値以下の外部からの干渉を観測していたことがわかる。また、時刻 35 分において、チャンネル 108, 112, 116, 120 における平均 CCI 電力計算値が急峻に立ち上がっていることがわかる。これは、実験の手順 3)において AP1~AP4 を起動したためである。これにより、チャンネル 108, 112, 116, 120 における平均 CCI 電力計算値が閾値($I_r = -62\text{dBm}$)を超え、無線 LAN 実験装置は使用チャンネルの変更命令を発令した。

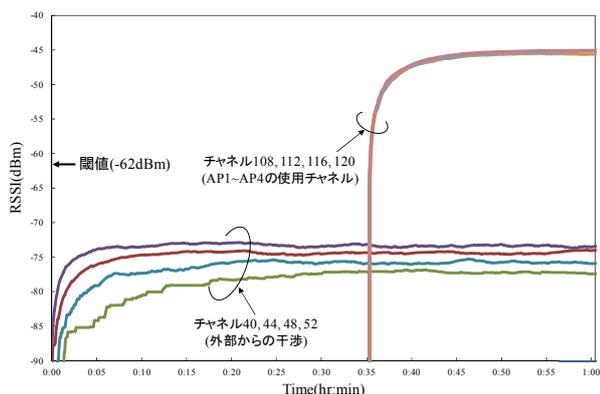


図 8 無線 LAN 実験装置の 1 次フィルタ出力(平均 CCI 電力)の時間推移

4.4. 2.4GHz 帯における実験結果

次に、2.4GHz 帯におけるチャンネル 1, 6, 11 の 3 つのチャンネルを使用して、無線 LAN 実験装置は強い干渉が発生すると、適応的に使用チャンネル数を減らすことを示す。以下の手順で実験を行った。図 9 に、無線 LAN 実験装置チャンネル利用状況を示す。

- 1) 無線 LAN 実験装置を起動した。この時を、時刻 0 とした。
- 2) 等価平均区間(300 秒)以上の十分な時間が経過するまで待機した。実験開始直後、無線 LAN 実験装置はチャンネル 1, 6, 11 の 3 つのチャンネルを全て選択した(図 9(a)参照)。
- 3) 時刻 30 分において、チャンネル 6 に強い干渉を発生させた。すなわち、AP1 を起動し、チャンネル 6 を強制的に配置した(図 9(b)参照)。

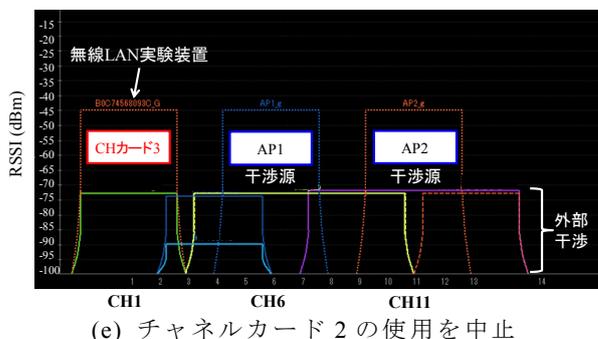
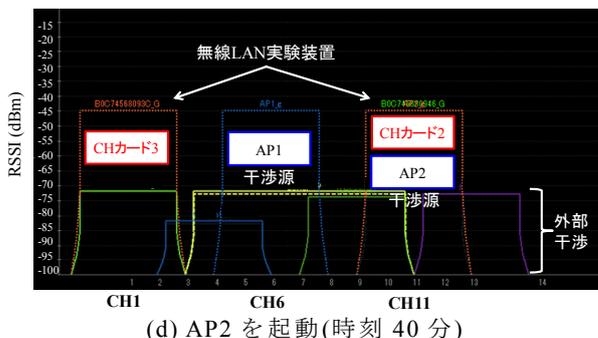
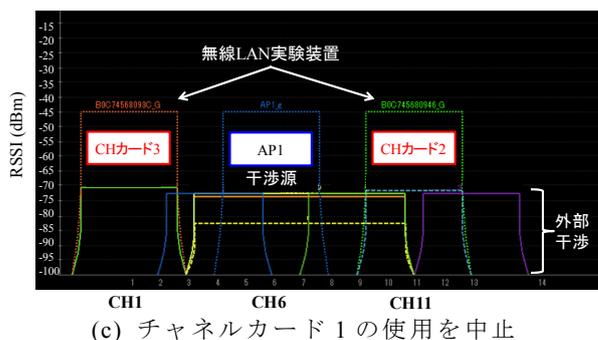
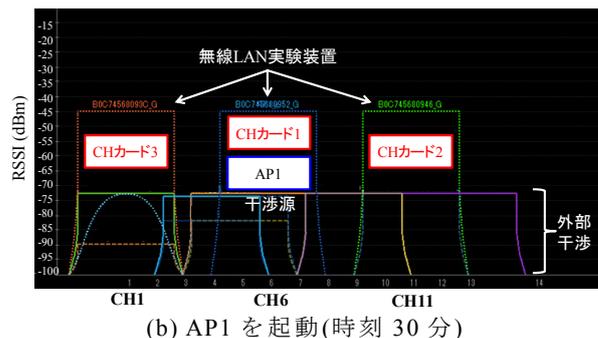
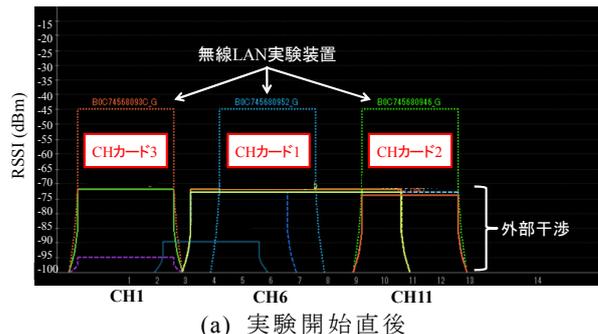


図 9 無線 LAN 実験装置のチャンネル利用状況

文 献

- 4) AP1 の起動後約 20 秒が経過したとき、無線 LAN 実験装置は、干渉を避けて、チャンネル 6 を使用しているチャンネルカード 1 の電源を切った(図 9(c)参照).
- 5) 時刻 40 分において、チャンネル 11 に強い干渉を発生させた。すなわち、AP2 を起動し、チャンネル 11 を強制的に配置した(図 9(d)参照).
- 6) AP2 の起動後約 30 秒が経過したとき、無線 LAN 実験装置は、干渉を避けて、チャンネル 11 を使用しているチャンネルカード 2 の電源を切った(図 9(e)参照).
- 5) 時刻 50 分まで観測し、大きな干渉変化が生じなければチャンネル変更は行われなことを確認した。

図 10 に、無線 LAN 実験装置のフィルタ出力の時間推移を示す。図 10 に示すように、実験開始直後から時刻 30 分まではチャンネル 1, 6, 11 の平均 CCI 電力は閾値以下であったことがわかる。また、時刻 30 分において AP1 を起動すると、チャンネル 6 の平均 CCI 電力が約 -45dBm まで急峻に立ち上がったことがわかる。このため、無線 LAN 実験装置はチャンネル 6 の使用を中止し、チャンネルカード 1 の電源を切った。また、時刻 40 分において AP2 を起動すると、チャンネル 11 の平均 CCI 電力も約 -47dBm まで急峻に立ち上がったことがわかる。このため、無線 LAN 実験装置はチャンネル 11 の使用を中止し、チャンネルカード 2 の電源を切った。

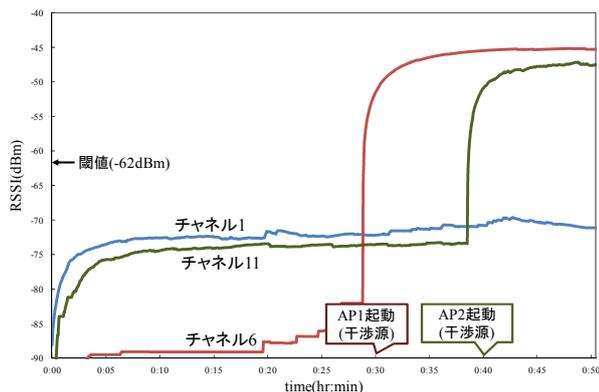


図 10 無線 LAN 実験装置の 1 次フィルタ出力 (平均 CCI 電力)の時間推移

5. むすび

本稿では、IACS-DMCA の屋内実験評価のために筆者らが試作した無線 LAN 実験装置の概要とその動作を報告した。屋内実験評価により、無線 LAN 実験装置は、平均 CCI 電力が閾値以下の全てのチャンネルを自律的に選択できることを示した。

今後は、試作した無線 LAN 実験装置を複数台使用してスループット特性評価の実験を行い、IACS-DMCA のスループット改善効果を示してゆく予定である。

謝辞

本稿の一部は、総務省「災害時の確実な情報伝達を実現するための技術に関する研究開発(被災地への緊急運搬及び複数接続運用が可能な移動式 ICT ユニットに関する研究開発)」による委託を受けて実施した研究開発による成果である。

- [1] I. Katzela and M. Naghshineh, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: a comprehensive survey," *IEEE Personal Commun.*, Vol. 3, No. 3, pp. 10-31, Jun 1996.
- [2] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, Aug 2005.
- [3] H. Skalli, S. Ghosh, S. K. Das, L. Lenzini, and M. Conti, "Channel assignment strategies for multiradio wireless mesh networks: issues and solutions," *IEEE Commun. Magazine*, Vol. 45, No. 11, pp. 86-95, Nov 2007.
- [4] D. Goodman, S. A. Grandhi, R. Vijayan, "Distributed dynamic channel assignment schemes," *Proc. IEEE 43th Vehicular Technology Conference (VTC1993-Spring)*, May 1993.
- [5] G. Cao and M. Singhal, "Distributed fault-tolerant channel assignment for cellular networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, Vol. 18, No. 7, pp. 1326-1337, July 2000.
- [6] H. Luo and N. K. Shankaranarayanan, "A distributed dynamic channel allocation technique for throughput improvement in a dense WLAN environment," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2004)*, Vol.5, pp. 345-8, May 2004.
- [7] Y. Furuya and Y. Akaiwa, "Channel segregation, a distributed adaptive channel assignment scheme for mobile communication systems," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E74-B, No. 6, pp. 1531-1537, June 1991.
- [8] Y. Akaiwa and H. Andoh, "Channel segregation-a self-organized dynamic channel allocation method: application to TDMA/FDMA microcellular system," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, Vol. 11, No. 6, pp. 949-954, Aug 1993.
- [9] R. Matsukawa, T. Obara, and F. Adachi, "A dynamic channel assignment scheme for distributed antenna networks," *Proc. IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC2012-Spring)*, May 2012.
- [10] Y. Matsumura, S. Kumagai, T. Obara, T. Yamamoto, and F. Adachi, "Channel Segregation Based Dynamic Channel Assignment for WLAN," *IEEE The 13th International Conference on Communication Systems (ICCS2012)*, Nov 2012.
- [11] 松村祐輝, 天間克宏, 石原浩一, ヒラントアベアーセーカラ, 熊谷智明, 安達文幸, "干渉測定型チャンネル棲み分けに基づく動的マルチチャンネル配置法," *信学技報*, RCS2013-181, pp. 43-48, 2013 年 11 月.
- [12] S. W. Roberts, "Control chart tests based on geometric moving averages," *Technometrics*, Vol. 1, No. 3, pp. 239-250, Aug 1959.
- [13] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std. 802.11, Mar. 2012.
- [14] 守倉正博, 久保田 周治, "改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書," *インプレス R&D*, 2008.
- [15] NEC, Wi-Fi ルータ・WiMAX 製品情報, <http://121ware.com/product/atermstation/special/new5ghz/page4.html>.