

学位論文

高密度スペクトラムセンシングの  
設計と実装に関する研究

提出日 平成24年6月1日

指導教員

森川 博之 教授

東京大学大学院工学系研究科

電気系工学専攻

学籍番号 37-087290

金 昊俊

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景と目的	2
1.2	本論文の構成	5
<b>第 2 章</b>	<b>高密度スペクトラムセンシング</b>	<b>6</b>
2.1	はじめに	7
2.2	周波数の利用状況の把握方法	7
2.2.1	調査票の利用	7
2.2.2	基地局情報の利用	9
2.2.3	スペクトラムセンシング	10
2.3	高密度スペクトラムセンシング	16
2.4	課題	17
2.4.1	センサのコスト	18
2.4.2	測定精度	18
2.5	おわりに	19
<b>第 3 章</b>	<b>設計</b>	<b>20</b>
3.1	はじめに	21
3.2	全体システム	21
3.3	低コストスペクトラムセンサ	22
3.3.1	設計指針	23
3.3.2	周波数変換部の設計	27
3.3.3	最終 IF 部の設計	28
3.3.4	電波検出部の設計	29
3.3.5	実装	32
3.4	動的 RBW 方式	37

---

3.5	おわりに	42
<b>第4章</b>	<b>評価</b>	<b>43</b>
4.1	はじめに	44
4.2	スペクトラムセンサの信号測定精度	44
4.2.1	周波数分解能	45
4.2.2	周波数確度	47
4.2.3	最大入力レベル	47
4.2.4	ノイズフロア	47
4.2.5	掃引時間	49
4.3	占有率の測定精度	50
4.4	動的RBW方式の評価	55
4.4.1	RBWの違いによる占有率の測定精度	55
4.4.2	掃引時間と占有率測定精度	57
4.5	おわりに	62
<b>第5章</b>	<b>屋外測定</b>	<b>63</b>
5.1	はじめに	64
5.2	実験の諸元	64
5.3	空間的な周波数の利用状況の把握	66
5.3.1	周波数の利用状況が測定地点間で同一の例	66
5.3.2	周波数の利用状況が測定場所ごとに異なる例	72
5.3.3	その他	77
5.4	動的RBWの有効性	78
5.5	おわりに	82
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>83</b>
6.1	本研究の主たる結果	84
6.2	今後の課題	85
	参考文献	<b>87</b>
	謝辞	<b>96</b>



# 目次

1.1	日本国における周波数の割り当て. . . . .	2
2.1	総務省による電波の利用状況調査. . . . .	8
2.2	時間による利用率の変化. . . . .	9
2.3	測定システム. . . . .	10
2.4	406~412 MHz におけるスペクトラム. . . . .	11
2.5	6ヶ所の測定地点における占有率の平均値 (30~3000 MHz). . . . .	12
2.6	測定システム. . . . .	13
2.7	4ヶ所における平均パワースペクトル密度の比較. . . . .	14
2.8	4ヶ所における占有された帯域の全帯域に対する比率の時間的变化. . . . .	14
2.9	高密度スペクトラムセンシング. . . . .	16
3.1	全体システムの実装. . . . .	22
3.2	FFT 方式. . . . .	23
3.3	マルチプル・フィルタ方式. . . . .	24
3.4	ダイレクトコンバージョン方式. . . . .	26
3.5	スーパー・ヘテロダイン方式. . . . .	26
3.6	周波数変換部. . . . .	28
3.7	デジタル補正フィルタの例. . . . .	30
3.8	補正前後の-40 dBm 信号の測定値. . . . .	31
3.9	広帯域スペクトラムセンサのブロック図. . . . .	32
3.10	広帯域スペクトラムセンサの周波数変換部の回路図 (1st LO, 1st/2nd Mixer). . . . .	32
3.11	実装した広帯域スペクトラムセンサ. . . . .	33
3.12	TV チューナ IC スペクトラムセンサのブロック図. . . . .	33
3.13	実装した TV チューナ IC スペクトラムセンサ. . . . .	34
3.14	TV チューナ IC スペクトラムセンサの回路図. . . . .	35

3.15	1 時間単位の周波数の占有率の変化の例. . . . .	36
3.16	広帯域スペクトラムセンサの部品と全体コストを占める割合. . . . .	36
3.17	TV チューナ IC スペクトラムセンサの部品と全体コストを占める割合. . . . .	36
3.18	動的 RBW 方式のイメージ図. . . . .	38
3.19	動的 RBW 方式のフローチャート. . . . .	38
3.20	データ形式の例. . . . .	39
3.21	測定結果の共有範囲. . . . .	41
4.1	850 MHz と 850.18 MHz の測定結果 (広帯域スペクトラムセンサ). . . . .	46
4.2	850 MHz と 850.05 MHz の測定結果 (TV チューナ IC スペクトラムセンサ). . . . .	46
4.3	センサの入力レベルと出力レベルの比較 (広帯域スペクトラムセンサ). . . . .	48
4.4	センサの入力レベルと出力レベルの比較 (TV チューナ IC スペクトラムセンサ). . . . .	48
4.5	スペクトラムセンサと FSL6 の占有率測定の実験図. . . . .	51
4.6	広帯域スペクトラムセンサの測定時間に対する占有率測定誤差の平均値. . . . .	52
4.7	TV チューナ IC スペクトラムセンサの測定時間に対する占有率測定誤差の平均値. . . . .	52
4.8	広帯域スペクトラムセンサの占有率に対する占有率測定誤差の平均値. . . . .	54
4.9	TV チューナ IC スペクトラムセンサの占有率に対する占有率測定誤差の平均値. . . . .	54
4.10	USRP2 を用いたスペクトラムセンサ. . . . .	55
4.11	信号発生器の信号の占有率測定 of 誤差. . . . .	59
4.12	858.4 MHz 帯の占有率測定 of 誤差 (A) RBW 固定 (B) チャンネルの占有帯域幅情報利用 (C) 動的 RBW 方式. . . . .	60
4.13	430.6 MHz 帯の占有率測定 of 誤差 (A) RBW 固定 (B) チャンネルの占有帯域幅情報利用 (C) 動的 RBW 方式. . . . .	61
4.14	144.48 MHz 帯の占有率測定 of 誤差 (A) RBW 固定 (B) チャンネルの占有帯域幅情報利 用 (C) 動的 RBW 方式. . . . .	61
5.1	スペクトラムセンサの配置図. . . . .	65
5.2	実験フィールド. . . . .	65
5.3	860~870 MHz 帯の測定地点ごとの平均占有率 (RBW= 50 kHz). . . . .	67
5.4	517 MHz~560 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz). . . . .	68
5.5	213 MHz~219 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz). . . . .	69

---

5.6	382 MHz~389 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).	71
5.7	144 MHz~146 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).	72
5.8	146 MHz~146.5 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).	73
5.9	147 MHz~148 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).	74
5.10	352 MHz~352.75 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).	75
5.11	398 MHz~400 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).	76
5.12	850~860 MHz 帯の平均占有率	77
5.13	271 MHz~275 MHz の平均占有率	77
5.14	352.75 MHz~356 MHz の平均占有率	77
5.15	450 MHz~452 MHz の平均占有率	77
5.16	147.86 MHz における RBW6 MHz の電力測定地 (dBm).	79
5.17	147.86 MHz における RBW50 kHz の電力測定地 (dBm).	79
5.18	147.86 MHz における RBW5 kHz の電力測定地 (dBm).	80
5.19	動的 RBW 方式の適用例.	81

# 表目次

4.1 評価項目の比較. . . . .	45
4.2 RBW による測定結果. . . . .	57
4.3 掃引時間の評価. . . . .	58
5.1 送信局からの距離. . . . .	78



# 第1章 序論

---

## 1.1 研究背景と目的

近年，無線通信デバイスの急増により，周波数の逼迫が懸念されている．その一方で，割り当てられているものの，効率的に利用されてない周波数帯が多く存在するという指摘がある [1]．周波数資源の有効利用に向けては，非効率的に利用される帯域の再割り当て [2] などの電波政策やダイナミックスペクトラムアクセス (DSA [3]~ [6]) を用いたコグニティブ無線 [7]~ [9] の導入が考えられている [10]~ [16]．

無線システム同士の干渉を避け，効率的な電波政策 [17]~ [21] および DSA [22]~ [26] を導入するには，広帯域にわたる周波数の利用状況を把握する必要がある [27]．周波数の利用状況は時空間的に変動しており，これに関する知見を得る目的で様々な研究が行われている．これに向け，市販のスペクトラムアナライザを数台用いて，長期間，広帯域にわたる周波数の利用状況を把握するスペクトラム測定が行われている [28]~ [80]．これらの研究では，市販のスペクトラムアナライザを用いて長期間にわたる観測を行っている．

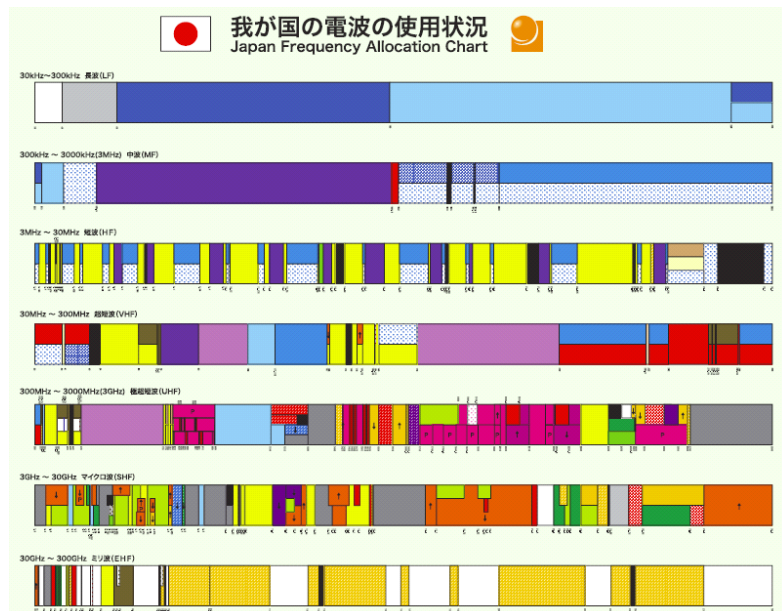


図 1.1: 日本国における周波数の割り当て.

周波数の利用状況を把握するには、利用状況の把握に有効な測定方法を知る必要がある。例えば、TV は連続的な電波の発射を行うのに対して、無線 LAN は散発的な電波の発射を行う。このため、利用状況を把握するには、後者は前者に比べて、測定器に短い掃引時間(再測定間隔)が求められる。また、電波環境が急変する都市部では、人工物や地形により送信機が測定器から隠れる可能性が高い。伝搬モデルのみで電波の空間的広がりを把握することは困難であり、測定器の適切な配置場所や数を決定する必要もある。周波数の利用状況を把握するには、帯域や場所ごとに異なる特徴を踏まえ、適切な測定方法を決めることが有効である。

しかしながら、これまでのスペクトラム測定では、周波数の利用状況の把握に有効な定量化方法や、測定の分解能、そして測定器の配置場所や数などを明確になってない。実際に従来研究においても、占有率(ある帯域において、単位時間内に電波が送出されている時間の割合 [60])をはじめ、APD(amplitude probability distribution) [41],[40], CVD(channel vacancy duration) [50], CCDF(complementary cumulative distribution function) [42], そして電力値の自己相関 [38] など、同一の周波数帯・システムを対象とする場合でも、異なる定量化方法が用いられている。また、周波数・時間分解能、電波の有無を決定する方法、そして測定地点の数など、測定パラメータも異なる。

適切な測定方法を明らかにするには、測定と議論を相互に繰り返すことが求められる。すなわち、利用状況のデータを収集し、そのデータに基づき、利用状況の把握に有効な測定方法を議論して再度測定することを繰り返すことが求められる。例えば、長時間・高密度で電波の強度を測定することで、時間・場所ごとの占有率の差異を把握する。このデータを基に、帯域ごとの空き時間および空き場所の把握 [57] や、周波数の利用状況の長期的・短期的予測 [50],[58],[59] など、電波政策や DSA の設計に有効な情報を抽出する。この情報の収集に求められる時間および空間分解能など、測定方法を議論し、次の測定に反映する。周波数の利用状況のデータを蓄積するほど、周波数を有効利用できる可能性がある。

このような観点から、筆者らは広帯域にわたり長時間・高密度で周波数の利用状

況を測定する高密度スペクトラムセンシングを進めている [61]。高密度スペクトラムセンシングでは多数のスペクトラムセンサを分散配置することで、複数地点での同時測定が可能となる。

高密度スペクトラムセンシングを実現する際の大きな課題は、センサのコストと測定精度である [28]。従来のスペクトラム測定では、多機能・高性能・高コストなスペクトラムアナライザをセンサとして用いるため [28]~ [80]、量的拡大が困難であり、同時運用台数は数台程度にとどまっている [29]。このため、場所により変化する周波数の利用状況を把握するには限界があり、センサの低コスト化が求められる。一方、周波数の利用状況を把握するには、なるべく高い精度で測定することも求められる。スペクトラム測定の測定精度は、センサの掃引時間、周波数分解能、そしてノイズフロアに依存する。例えば、時間により変化する周波数の利用状況を高い精度で測定するには、掃引時間を短くすることが求められる。掃引時間を短くするには、周波数分解能を決定する RBW (Resolution Band Width) を広く取ることで、掃引に必要な測定回数を減らすことが有効である。このため、掃引時間は周波数分解能およびノイズフロアとトレードオフ関係にある。RBW を広く取ることによるノイズフロアの増加の問題に関しては、高密度に分散配置されたセンサの協調センシング [66]~ [68] を用いて解決する。

高密度スペクトラムセンシングに向けての本論文の貢献は 3 つである。1 つ目は、センサの高密度配置に向け、低コストスペクトラムセンサの設計と実装を行い、その有効性を示したことである。2 つ目は、ハードウェアコストの増大なしに、必要な周波数分解能を確保しながら掃引時間を短縮する動的 RBW 方式を提案し、その有効性を示したことである。3 つ目は、設計したスペクトラムセンサを複数台用いて実測実験を行い、実環境において空間的な周波数の利用状況を把握できることを示したことである。

まず、本論文では、必要な機能とコストを考慮した低コストスペクトラムセンサの設計を示し、その実装と動作検証を行う。スペクトラムセンサは、様々な無線システムを対象とするため、多様な RBW を用いて広帯域を測定する機能が求められ

る．これに向け，本設計では，安価な部品で構成された周波数変換部，複数のバンドパスフィルタ，そして MCU (Micro Controller Unit) を用いることで，数百 m 間隔の配置も想定した，低コストなスペクトラムセンサを実現する．

次に，掃引時間と周波数分解能のトレードオフを考慮し，適切な周波数分解能を確保しながら掃引時間の短縮を実現する動的 RBW 方式を提案する．従来のスペクトラム測定では，RBW を固定するか [30],[40],[42],[50]，周波数を数個の区間に分けて周期的に RBW を切り替えている [41],[36]．これに対して，動的 RBW 方式では，掃引中に帯域ごとの RBW を動的に可変することで，掃引を高速化する．具体的には，数 MHz など，広い帯域幅で掃引を始め，掃引中，電波が検出された帯域においては，チャンネルの占有帯域幅などを含む周波数の割り当て情報を基に，より狭い RBW に切り替えて測定を行う．

最後に，設計した複数台のスペクトラムセンサを用いて実測実験を行う．同時多地点測定の実験を行うことで，本システムを用いて，実環境における周波数の利用状況の空間的な違いを把握できることを示す．また，RBW を変更しながら測定を行うことで，動的 RBW 方式の有効性を示す．

## 1.2 本論文の構成

本論文は以下のように構成される．2．では周波数の利用状況の把握方法を概観し，高密度スペクトラムセンシングに着目した理由を明らかにする．3．では高密度スペクトラムセンシングに向け，低コストスペクトラムセンサと動的 RBW 方式の具体的な設計を示す．4．では3．で設計した低コストスペクトラムセンサの評価を行う．また，動的 RBW 方式の有効性を示すために，チャンネルの占有帯域幅以下の広い RBW を用いる事で，占有率 [60] の測定精度が向上することを示す．5．では実環境において高密度スペクトラムセンシングの実験を行い，周波数の利用状況の空間的な変化を把握することで，本システムの有効性を示す．最後に6．でまとめとする．

## 第2章 高密度スペクトラムセンシング

---

## 2.1 はじめに

本章では、まず、周波数資源の有効利用に向け、現在の周波数の利用状況の把握方法について述べる。その上で、周波数の利用状況の収集に関する既存研究の問題点を明らかにし、高密度スペクトラムセンシングの必要性を示す。次に、高密度スペクトラムセンシングの概要を説明し、その課題として、センサのコストと測定精度に関して述べる。

## 2.2 周波数の利用状況の把握方法

現在の周波数の利用状況の把握方法には、無線局を運用する各免許人に調査票の記入を要請する方法と、基地局の通信情報を調べる方法、そしてスペクトラムアナライザなどの測定器を用いて電波を検知するスペクトラムセンシングがある。

### 2.2.1 調査票の利用

現在、我が国では、総務省によって周波数の利用状況の調査が実施されている [71] ~ [73]。利用状況調査では、総務省に届出された各免許人に調査票の記入を要請する。各免許人は調査票に対して、無線局の種類、数、運用可能時間、実運用時間帯 (30 分刻み)、通信量などを記入する。しかしながら、調査票方式では、3 年ごとにしか調査を実施できていないことから、迅速さという点では不十分である。さらに、次の 3 つの課題も存在する。

1 つ目は、免許人に調査票の記入を要請する形式のため、届け出のあった無線局のみしか調査できないことである。届出不要で利用できる無線システムについては調査が実施できない。また、1 つの免許で複数の端末の免許を取得できる包括免許で運用している無線システムにおいては、各端末ごとの周波数の利用状況を知ることはできない。

2 つ目は、1 日の運用時間帯のみを記入するので、実際に周波数帯域が占有されているかどうかは判断できないことである。例えば、散発的な通信が行われている場

合には、実際の周波数帯域の占有が少ない場合でも、無線機の電源が入っている間は常に周波数帯域を利用しているとみなされる。また、現在の調査票では、受信待機をしている場合にも周波数帯域を利用しているとみなされる。

3つ目は、免許人が運用状況を自己申告する形のため、虚偽の記入が可能である点である。利用されていない周波数帯は返却や移動が求められる可能性があるため、非効率な運用をしている免許人が運用時間を実際よりも長く見積もって調査票に記述することもありうると考える。



図 2.1: 総務省による電波の利用状況調査.



### 2.2.2 基地局情報の利用

携帯電話などの基地局にはユーザの通信開始時間や終了時間、そしてその空間情報などが保存されている。その情報に基づき、長時間、広範囲にわたる周波数の利用状況を把握することができる [56]。[56] では、携帯電話の基地局から通信開始時間、開始場所、終了時間、そして終了場所の情報を割り出し、携帯電話帯域の利用状況を把握している。例えば、図 2.2 のように、通話の利用状況の時間変化を、平日や週末に分けて把握している。

しかしながら、以上の方法では広帯域にわたる測定に限界がある。各無線システムの基地局を別々に調査する必要があるためである。携帯電話のように、外部へ情報を渡したらプライバシーに関する問題が発生したり、また業者側には情報を提供する義務がないため、情報の収集作業は困難となる。さらに、基地局などの親局が存在しない簡易無線などに対しては、その利用状況を把握することが出来ない。このように、広帯域にたわり多数の無線システムが共存する現在の電波事情では、基地局情報を利用する方法では周波数の利用状況を把握するに限界がある。

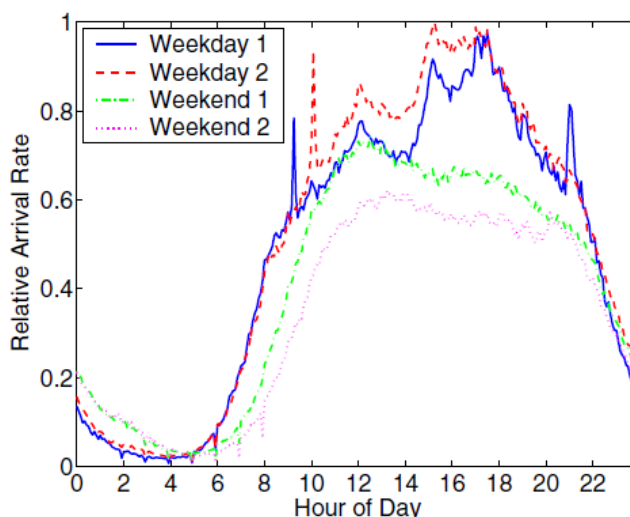


図 2.2: 時間による利用率の変化.

### 2.2.3 スペクトラムセンシング

周波数の利用状況を迅速かつ詳細に知るためには、実環境における電波の強度を測定することで、周波数帯域の占有の有無を直接判断することが必要となる。実環境での測定により、調査票の配布と集計に関わる手間を削減し、迅速な調査を実施できるようになる。また、無線システムごとの基地局を調査する必要がなく、より簡単にデータを収集可能となる。さらに、周波数帯域の占有の有無を直接判断するため、散発的な通信が行われる場合や受信待機の場合でも、周波数帯域が占有されていない時間を明らかにできる。最後に、届出の無い無線システムに関しても、周波数の利用状況を調査することができる。

これまでに、一般的な電波環境を代表する 1 地点に、1 台の測定システムを設置することによる周波数の利用状況の測定が広く行われてきた [30]~ [37]。測定システムは主にアンテナ、スペクトラムアナライザやレシーバ、データ記録用の PC で構成される。例えば、[36] では、繁華街を見渡すビルの屋上に図 2.3 のように、アンテナ、スペクトラムアナライザ、ラジオスキャナ、PC を設置して、陸上移動無線と公共無線の利用状況を測定している。図 2.3 による測定データから、図 2.4 のように、時間的な周波数の利用状況の変化を明らかにしている。

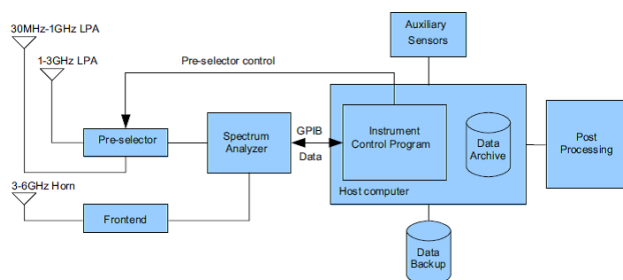


図 2.3: 測定システム。

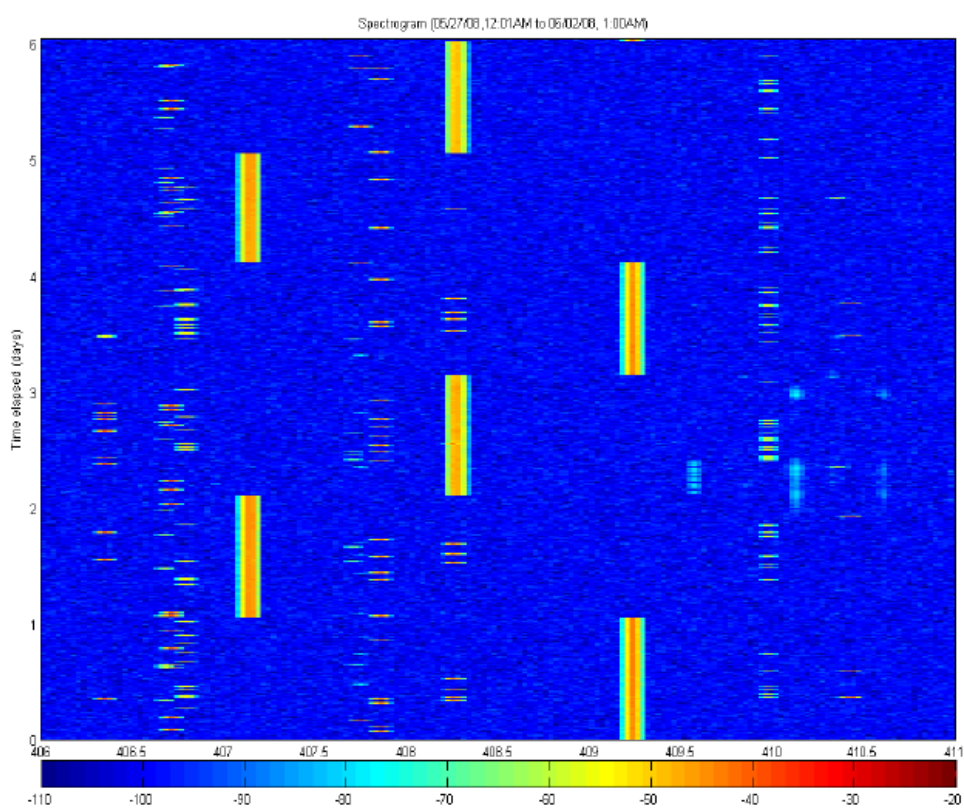


図 2.4: 406~412 MHz におけるスペクトラム.

しかしながら，周波数の利用状況は場所ごとに異なるため，必ずしも 1 地点での測定が他地点の周波数の利用状況を代表しない．例えば，屋内や地下において微小電力で通信する無線端末は，屋外に設置した測定システムでは検出できない可能性がある．また，発信された電波が建物や山により遮られることで，測定システムまで届かない場合も考えられる．

より正確に周波数の利用状況を把握するには，複数地点での測定と測定地点間の比較が重要となる．複数地点での測定を行う方法としては，測定システムを様々な測定地点へ持ち運ぶ方法などが挙げられる [28],[38]～ [48]．例えば [28] では，主にスペクトラムアナライザ，PC で構成される測定システムをアメリカ国内の 6 地点へ順次持ち運び，測定を行っている．測定の結果，30 MHz から 2.9 GHz の周波数帯域利用率は，最大の地点で 13.1 % ，最低の地点で 1 % ，平均して 5.2 % のみであることを明らかにしている (図 2.5) ．

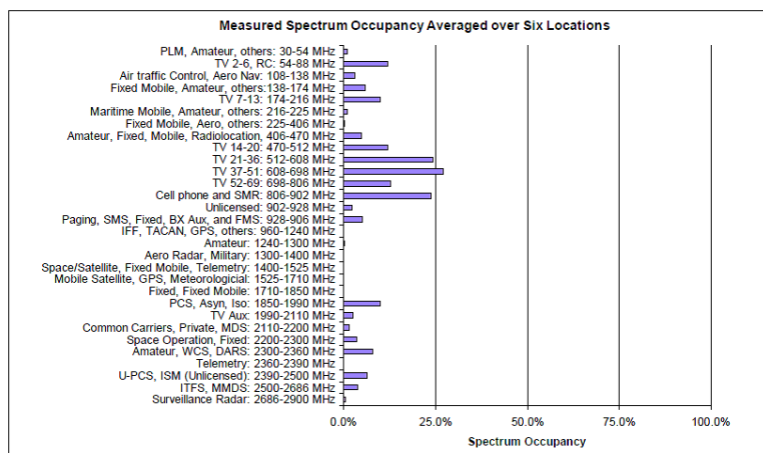


図 2.5: 6ヶ所の測定地点における占有率の平均値 (30～ 3000 MHz).

しかしながら，[38]～[48]は，測定システムが1台で，時間的な測定と空間的な測定を両立することができない．すなわち，多地点での測定を実施すれば，1地点あたりの測定時間を短くしなければならず，測定時間を延ばすには地点数を減らさなければならない．また，同時に1地点しか測定できないことから，同時刻における地点間の比較を行うことができないという課題がある．

時間的かつ空間的な測定の両立と地点間の比較を行うために，複数台の測定システムによる複数地点の同時測定が行われている[29],[49]～[53]．例えば，[29]は市街地の4地点に図2.6のような測定システムを設置して，周波数帯域の占有率が測定地点によって4%から15%までの幅があること明らかにしている(図2.7,2.8)．周波数帯域の占有率の時間的な変動は，4地点で似た傾向を示した一方で，ジャミング信号といった測定地点固有のイベントも観測されている．



図 2.6: 測定システム.

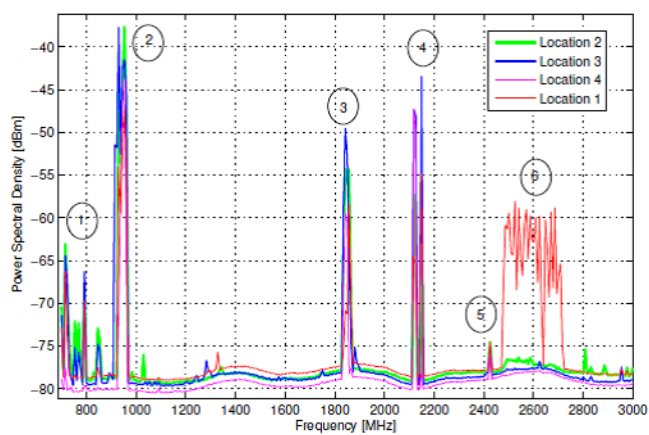


図 2.7: 4カ所における平均パワースペクトル密度の比較.

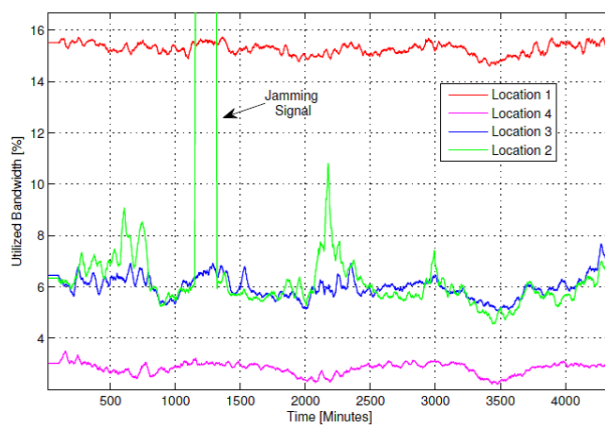


図 2.8: 4カ所における占有された帯域の全帯域に対する比率の時間的变化.

しかしながら，[29]～[53]で用いられたシステムでは，測定システムの調達コストによって測定地点を十分に拡大を実現できないと考えられる．測定システムは主にアンテナ，スペクトラムアナライザ，PCで構成されるが，価格の大部分を占めると考えられるのがスペクトラムアナライザである．一般に，スペクトラムアナライザは数十万円～数千万円ほどの価格となる．

電波の利用状況の測定という点では，スペクトラムアナライザの性能は過剰な部分が存在する．例えば，スペクトラムアナライザには，回路の線形性の確保と出力の校正がなされている．また，近年の無線機器は符号化利得の獲得や変調方式の改善をうけて，より低レベルの電力まで受信した信号を正しく復号可能となった．すなわち，周波数帯域が占有されているとみなされる電力レベルは非常に低い．そのため，受信した信号の強度のみで周波数帯域の占有を判断する場合，より高感度なスペクトラムアナライザの購入が必要になる．

電波伝搬には様々な研究があり[43],[74],[75],[76]，少数の測定地点の結果から他地点の利用状況を予測することも考えられる．しかしながら，電波は電波伝搬や測定器の配置関係，そして地理的特徴に強く依存し，実際に予測することは困難である．



## 2.3 高密度スペクトラムセンシング

時間や場所により変化する周波数の利用状況を把握するには、高い空間的分解能でスペクトラムセンサを配置する高密度スペクトラムセンシングが求められる。高密度スペクトラムセンシングでは、図 2.9 のように、数百 m 間隔で高密度かつ広範囲に配置した多数多様なスペクトラムセンサとサーバによって構成される。各スペクトラムセンサは周波数の利用状況を測定し、測定したスペクトラム情報をインターネットを通じてサーバへ収集する。収集したスペクトラム情報は可視化し、ウェブ上で公開する。また、測定周波数や RBW などは自動で設定されるが、図 2.9 のように、ユーザがサーバを通じて手動で操作することもできる。

多様な無線機・測定器を用いて測定システムを構成できれば、研究機関、企業や個人が所有する既存の測定器や無線デバイスを測定システムに転用することが可能になる。そのため、コスト負担の大きいスペクトラムアナライザを新たに購入する数を減らすことができる。また、ユーザが日常生活において端末型の無線機を持ち運ぶことで、様々な地点からのデータの収集も可能となる。

サーバはスペクトラムセンサに対する制御用のコマンドの送信と、スペクトラムセンサからの測定データの受信を行う。また、サーバはユーザに対して測定データの検索と可視化の機能を提供するために、可視化ウェブサービスを備える。

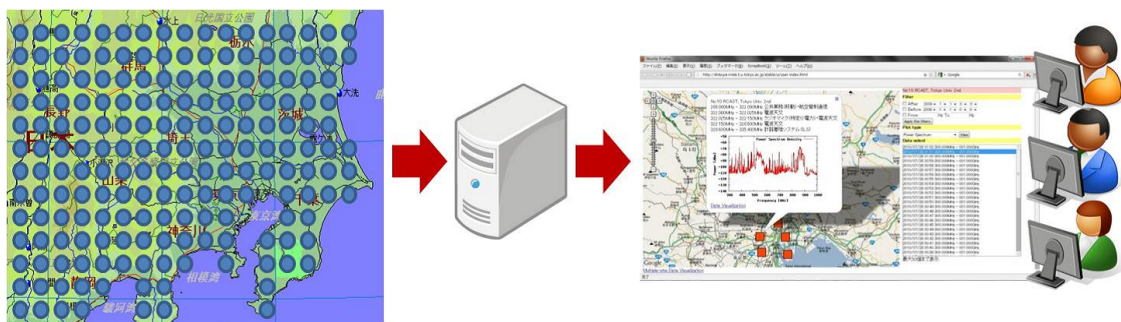


図 2.9: 高密度スペクトラムセンシング.



測定者から可視化のプロセスを分離・公開することで、より多くのユーザの要求に合致した可視化結果を提供することができる [62],[63],[48]。可視化のプロセスを分離・公開する方法としては、ウェブサービスの提供 [48],[62] と未加工データの公開 [63] が挙げられる。特に、ウェブサービスはブラウザがあれば利用可能で、かつ GUI も提供できるため、特別な機材や専門知識を持たない一般ユーザの利用を促進できる [64],[65]。

スペクトラムセンサはウェブインタフェース、データマネージャ、デバイスコントローラの3つのソフトウェアコンポーネントから成る。各コンポーネントのインタフェースを設計するにあたっては、電波の利用状況が分布する位置、時間、周波数の3軸、および電波の利用状況そのものの抽象化を行う。

ウェブインタフェースはサーバからコマンドを受信して、デバイスコントローラに通知する。また、データマネージャの保存した測定データファイルをサーバへアップロードする。その一方で、位置取得デバイス等により取得したセンシングノード位置を保持しデータマネージャに通知することで、物理的な位置を物理的な形を持たない位置情報だけに抽象化する。データマネージャはデバイスコントローラの出力とウェブインタフェースの出力を受け取り、ファイルとして保存する。デバイスコントローラは時間軸、周波数軸、電波の利用状況に関する抽象化を行う。時間軸と周波数軸に関する抽象化は、無線機・測定器を制御するための共通のコマンドを提供することで実現する。

## 2.4 課題

高密度スペクトラムセンシングを実現する際の大きな課題は、センサのコストと測定精度である [28]。従来のスペクトラムセンシングで使われたスペクトラムアナライザは高価であり、センサの量的拡大に向けては、センサの低コスト化が求められる。一方、周波数の利用状況を把握するには、なるべく高い精度で測定することも求められる。

### 2.4.1 センサのコスト

従来研究で測定器として広く用いられるハイエンドスペクトラムアナライザの性能は、周波数の利用状況の測定という点では過剰な部分が存在する。ハイエンドスペクトラムアナライザは、電力測定、変調度測定、復調、高調波測定、ひずみ測定、そしてEMI測定など、様々な機能を持つ汎用の測定器であるため、高性能で高コストになる。さらに、回路の線形性の確保と出力の校正がなされ、プリアンプなどが利用されることで、より高コストになる。一般に、スペクトラムアナライザは数十万円～数千万円ほどの価格となるため、量的拡大が困難であり、同時運用台数は数台程度にとどまっている [28]。

これに対して、本システムでは、電力を測定しチャンネル単位でその有無を判定する機能のみが求められる。このような観点から、本論文では、低コストな部品で構成されたスペクトラムセンサを示す。

### 2.4.2 測定精度

周波数の利用状況を把握するには、なるべく高い精度で測定することも求められる。スペクトラムセンシングの測定精度は、主にセンサの掃引時間、周波数分解能、そしてノイズフロアに依存する。ここで、掃引時間は、各帯域の周波数の利用状況を再測定する時間間隔を意味する。すなわち、スペクトラムセンサでは、帯域ごとに周波数の利用状況を測定できない時間が存在する。このため、時間により変化する周波数の利用状況を高い精度で測定するには、掃引時間を短くし、単位時間内に得られる標本数(データ数)を多くすることが求められる。

掃引時間はRBWの帯域幅、PLL(Phase Locked Loop)の応答速度、そしてMCUの処理速度など、ハードウェア全般によって決まる。ここでRBWは1回の掃引に必要な測定の回数を、PLLの応答速度とMCUの処理速度は各測定に要する遅延を決定する。PLLの応答速度とMCUの処理速度はハードウェアの性能に依存するため、同一のスペクトラムセンサで掃引時間を短縮するには、周波数分解能を決定す

る RBW (Resolution Band Width) を広く取ることで、掃引に必要な測定回数が減らすことが有効である。一方、RBW を広くとることは周波数分解能の低下を意味する。このため、掃引時間は周波数分解能とトレードオフ関係にある。

以上を鑑み、本論文では、必要な周波数分解能を確保しながら掃引時間を短縮する動的 RBW 方式を提案する。また、RBW を広くすることは、それを通過するノイズも増加することも意味する。このため、掃引時間はノイズフロアともトレードオフ関係にある。RBW を広く取ることによるノイズフロアの増加の問題に関しては、高密度に分散配置されたセンサの協調センシング [66]~ [68] を用いて解決する。

## 2.5 おわりに

本章では、従来の周波数の利用状況を把握する方法に関する議論を通し、多数のスペクトラムセンサを分散配置する高密度スペクトラムセンシングの重要性について議論した。従来の研究では、測定機器が高価なため、測定値点数が著しく限られている。高密度スペクトラムセンシングを実現するには、必要な機能とコストを考慮した低コストスペクトラムセンサが求められる。一方、周波数の利用状況を把握するには、スペクトラムセンサの測定精度も重要である。測定精度は掃引時間、周波数分解能、そしてノイズフロアに依存する。ここで、掃引時間と周波数分解能およびノイズフロアはトレードオフ関係にある。次章では、これらの問題点の解決に向けて、低コストスペクトラムセンサの設計を示し、動的 RBW 方式を提案する。

## 第3章 設計



### 3.1 はじめに

本章では高密度スペクトラムセンシングの実現に向け、まず、測定システムの設計と実装を行う。次に、低コストスペクトラムセンサの設計を行う。低コストスペクトラムセンサは、スーパーヘテロダイン方式を基本に、UHF帯 (300 MHz~ 3000 MHz) を測定する広帯域スペクトラムセンサと、50~870 MHz を測定周波数とする TV チューナ IC スペクトラムセンサの2つの設計を行う。最後に、測定結果やチャンネルの占有帯域幅によって RBW を可変する動的 RBW 方式を示す。

### 3.2 全体システム

本実験は図 3.1 のように、多数のスペクトラムノードとサーバで構成され、ユーザはウェブ上で測定周波数、RBW、そして測定時間などを設定、測定結果を収集できる。スペクトラムノードは、スペクトラムセンサと、データ収集用のノート PC で構成される。サーバはセンシングノードに対する制御用のコマンドの送信と、センシングノードからの測定データの受信を行う。また、サーバはユーザに対して測定データの検索と可視化の機能を提供するために、可視化ウェブサービスを備える。

以上のサーバは Apache, PHP5, HTML を利用して実装した。各スペクトラムノードは帯域ごとに電界強度を測定、その値と位置情報をサーバへ送る。具体的には、スペクトラムノードからサーバへの HTTP の POST リクエストによるポーリングを行う。管理者インタフェースはセンシングノードに向けたコマンドの発行を可能にする。発行されたコマンドはデータベースで一時的に保管され、センシングノードがアクセスした時に読みだされる。可視化ウェブサービスはデータの検索と可視化を行う。センシングノードインタフェースは、コマンドの送信や測定データの受信といったセンシングノードとの通信を行う。サーバからの収集命令がある場合、指定された周波数の測定を行い、サーバへ測定結果を送信する。サーバはスペクトラムノードからスペクトラム情報を収集し、ウェブ上で可視化を行う。

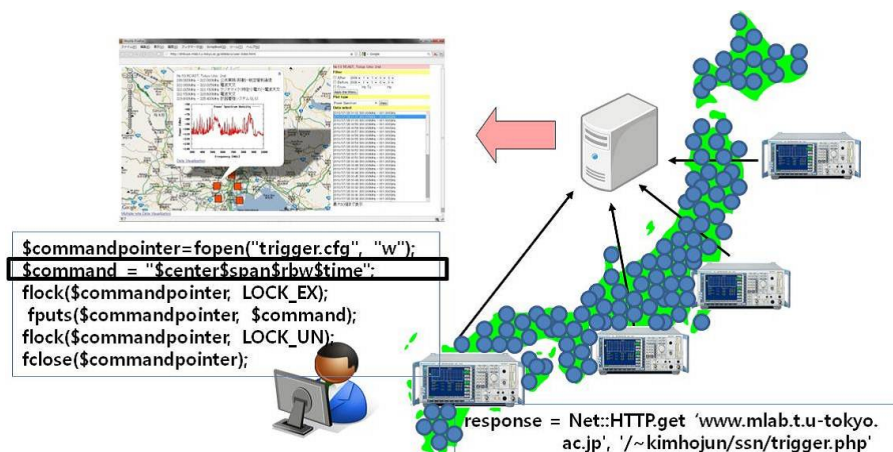


図 3.1: 全体システムの実装.

### 3.3 低コストスペクトラムセンサ

本節では安価なスペクトラムセンサの実現に向け、スペクトラムセンサの具体的な設計手順を示す。まず、占有率の測定方式について議論を行い、掃引型のスペクトラムセンサによる系統抽出法を採用する。その後、掃引方式について議論を行い、スーパー・ヘテロダイン方式を選択する。さらにスーパー・ヘテロダイン方式の周波数構成をセンサの性能と部品の価格を勘案して決定する。

以上を基に、2つの低コストスペクトラムセンサの設計を示す。1つ目のセンサとして、UHF帯を測定可能な広帯域スペクトラムセンサの設計を示す。UHF帯を測定する周波数変換部の設計と、周波数分解能となるRBWを決定する。2つ目のセンサとして、50~870 MHzを測定可能なTVチューナICスペクトラムセンサの設計を示す。TVチューナICスペクトラムセンサは、周波数変換部にTVチューナICを用いるため、広帯域スペクトラムセンサに比べて測定帯域は劣るものの、より低コストで実現できる。

2つのセンサは大きく、周波数変換部、最終IF (Intermediate Frequency) 部、そして電波検出部で構成される。周波数変換部はアンテナに集められた電波をIFへ変換する部分であり、ミキサ、バンドパスフィルタ、そして局部発振器などで構成さ

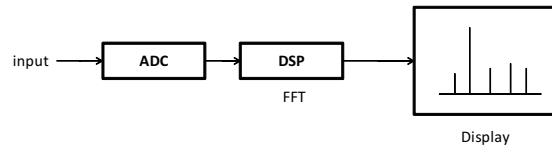


図 3.2: FFT 方式.

れる．最終 IF 部はスペクトラムセンサの周波数分解能を決定する部分であり，バンドパスフィルタとスイッチなどで構成される．電波検出部は IF 信号から，電波の強度測定と，その有無の判定を行う部分であり，ログアンプと MCU (Micro Controller Unit) などで構成される．MCU は周波数変換部，最終 IF 部，および電波検出部の制御も行う．

本節では，周波数変換部，最終 IF 部，そして電波検出部ごとに広帯域/TV チューナ IC スペクトラムセンサの設計を述べ，最後にその実装を示す．

### 3.3.1 設計指針

#### 占有率測定方式

占有率を高い時間分解能および周波数分解能で求めるには，図 3.2 のように，広帯域の信号を高速にサンプリングしてフーリエ変換により電力スペクトルを測定する FFT 方式 [81], [82] がある．しかしながら，FFT 方式では数 GHz にわたる帯域を測定可能な高性能 AD コンバータや高速な FFT プロセッサを必要とし安価に構成することは難しい．

一方，広帯域のフーリエ変換を行わない方式としては，図 3.3 のように，多数のバンドパスフィルタを用いて占有率を測定する，マルチプル・フィルタ方式 [83] がある．しかしながら，マルチプル・フィルタ方式では精度の高いフィルタが多数必要になる．

そこで，一般的には時間分解能および周波数分解能を下げ，統計的処理により占有率を求める方法が用いられる．統計的処理による占有率の測定においては，時間

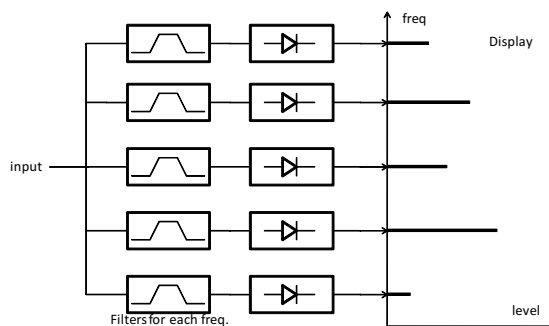


図 3.3: マルチプル・フィルタ方式.

軸および周波数軸上でサンプリングを行い，得られた標本から占有率を統計的手法により推定する．このとき，サンプリング方法として，単純無作為抽出法と系統抽出法がある．

単純無作為抽出法は時間軸および周波数軸上のサンプル点をランダムに決定する．この手法は占有率測定精度が高くできる利点があるものの，周波数軸上でのサンプル点をランダムに変化させる必要があるため，この変化に対して求められるハードウェアの応答性能が高くなる．

一方，系統抽出法 [95] は掃引型のスペクトラムアナライザを用いた測定に利用される．この手法は，周波数軸上で掃引を開始する点のみをランダムに決定し，その後は一般的な掃引動作を行って，周波数軸上での標本を収集する．系統抽出法は単純無作為抽出法に比べてハードウェアに求められる応答性能を低く抑えることができるが，バースト性を持つ信号に対しては，標本間に依存性が発生し，占有率の推定精度の面で単純無作為抽出法に劣る可能性がある．

本研究では，スペクトラムセンサを安価に実現することと，占有率の時空間的特徴を目視により理解することを目的としている．そこで，占有率測定法の選択においては，精度に固執せず，ハードウェアのコストを優先して，系統抽出法を用いる．この結果，スペクトラムセンサの方式は，一般的なスペクトラムアナライザと同様に掃引型となる．



### 周波数構成

掃引型のスペクトラムセンサを低価格で実現するに際しては、掃引部の周波数構成が重要となる。一般に、掃引部では局部発振器とミキサを用いて入力信号を所望の周波数に変換する。このとき、局部発振器の発振周波数を変化させることで、周波数軸上での掃引を行う。一方、部品の価格は、対応する周波数が低く、対応できる範囲（たとえば、発振器であれば周波数の可変範囲）が狭いほど低くなる。また、標準品として市場に多く出回っている部品ほど低価格となる。このため、スペクトラムセンサの目的に合致する性能と部品の価格のバランスがとれるように、周波数構成を決める必要がある。これに向けて、まず、掃引部の周波数変換方式の決定を行い、安価で安定な性能が得られるスーパー・ヘテロダイン方式を選択する。次に、スーパー・ヘテロダイン方式における周波数変換の段数を、使用する部品のコストを勘案して決定する。その後、占有率測定の目的と部品の入手性の観点から、周波数分解能を決定する IF フィルタの中心周波数および帯域幅を決定する。最後に、具体的な周波数構成が計算される。

周波数構成を決めるに際しては、まず、掃引部における周波数変換の方式を考える必要がある。周波数変換の方式はダイレクト・コンバージョン方式とスーパー・ヘテロダイン方式に大別できる。

ダイレクト・コンバージョン方式は、図 3.4 のように、局部発振器の周波数を受信周波数とほぼ同一にして掃引し、高周波信号からベースバンド信号に直接変換する。この方式は回路構造がシンプルになる利点があるが、使用する部品の周波数特性に求められる性能要件が高くなり、安価なスペクトラムセンサの実現には適さない。また、受信信号と同一周波数の局部発振器を使用するため、この発振器からの信号が入力へ回りこむ現象が発生し、フィルタ等の追加部品が必要となるとともに、回路設計に求められるスキルも高くなる。さらに、ベースバンド信号の検出部にはローパスフィルタが用いられるが、急峻な特性を持つローパスフィルタの実現は困難であり、スペクトラムセンサとして考えた場合には、高い周波数選択度を実現することが難しくなる。

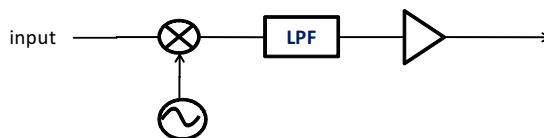


図 3.4: ダイレクトコンバージョン方式.

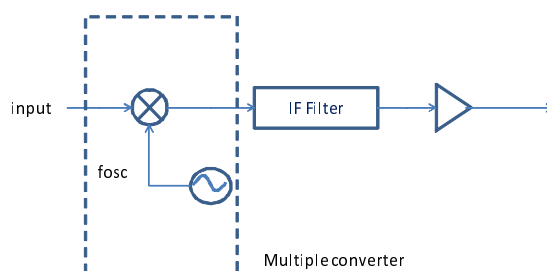


図 3.5: スーパー・ヘテロダイン方式.

一方，スーパー・ヘテロダイン方式は，図 3.5 のように，局部発振器を複数設け，入力信号を数段階に分けて目的の中間周波数 (IF, Intermediate Frequency) に変換して測定する．中間周波数に変換された信号は IF フィルタ (バンドパスフィルタ) を通過後に検波される．スーパー・ヘテロダイン方式では複数の局部発振器を必要とするため，回路規模は大きくなるが，各部品が扱う周波数範囲は狭くなるため安価で安定した周波数特性を得ることができる．また，IF フィルタは急峻な特性を実現することが可能であり，高い周波数選択度を得ることができる．このような観点から，本研究では周波数変換の方式にスーパー・ヘテロダイン方式を用いる．

スーパー・ヘテロダイン方式では複数段に分けて周波数変換を行い，イメージ周波数 (掃引において発生するスペクトルの虚像) を分離しながら，入力信号の周波数を目的の中間周波数に変換する．変換の際には高周波スイッチを用いて特定のミキサをバイパスすることも可能であり，段数を 2 段 (ダブル・ヘテロダイン) とした場合には 2 経路，3 段とした場合には 4 経路など，複数の変換経路を設けることができるようになる．これにより，ミキサや局部発振器の個数，およびそれらが扱う周波数範囲を調整することができる．ミキサや局部発振器の周波数範囲は部品の

価格に直結するため，周波数変換の段数を価格と性能のバランスを考えて決定することが重要となる．

### 3.3.2 周波数変換部の設計

安価なスペクトラムセンサを実現するに際しては，周波数変換部の構成が重要となる．各 부품の価格は，対応する周波数が低く，対応できる範囲が狭いほど低くなる．また，標準品として市場に多く出回っている部品ほど低価格となる．このため，スペクトラムセンサの目的に合致する性能と部品の価格のバランスがとれるように，周波数変換部の構成を決める必要がある．UHF 帯のような広帯域を測定するスペクトラムセンサは，標準品として市場に出回るミキサ，VCO などの個別部品を用いて設計する．測定帯域が狭くても良いスペクトラムセンサの場合は，帯域は制限されるものの周波数変換に必要な部品が 1 チップ化された標準品の IC を用いて設計する．

広帯域スペクトラムセンサの周波数変換部は，図 3.6 に示すように，3 段のミキサで UHF 帯の入力信号を IF に変換する．3 つの IF は，格段に挿入するバンドパスフィルタの中心周波数により決まる．まず，最終 IF を決める最終段のフィルタには，入手性のよい，10.7 MHz の中心周波数を持つバンドパスフィルタを用いる．次に，2 段目および 1 段目の IF は，特定省電力無線や携帯電話に利用されるためフィルタを安価に入手できることから，それぞれ 390 MHz と 930.5 MHz にする．各段の IF が決定された後は，局部発振器の発振周波数を決定する．2 段目および 3 段目の発振周波数は，各段の IF に合わせ，それぞれ 1320.5 MHz と 379.3 MHz にする．1 段目の発振周波数は，UHF 帯の最低周波数と最高周波数から，1230.5 ~ 2069.5 MHz の範囲で掃引させる．以上の設計の結果，本センサは (1) 300~1139 MHz, (2) 2161~3000 MHz, (3) 840.5~1679.5 MHz, および (4) 1620.5~2459.5 MHz の 4 つの経路に分けて UHF 帯を測定する．

これに対して，より低コスト化を行うためには周波数変換部に，標準品として市販されている TV チューナ IC を用いる．TV チューナ IC は，高周波信号の IF 変換

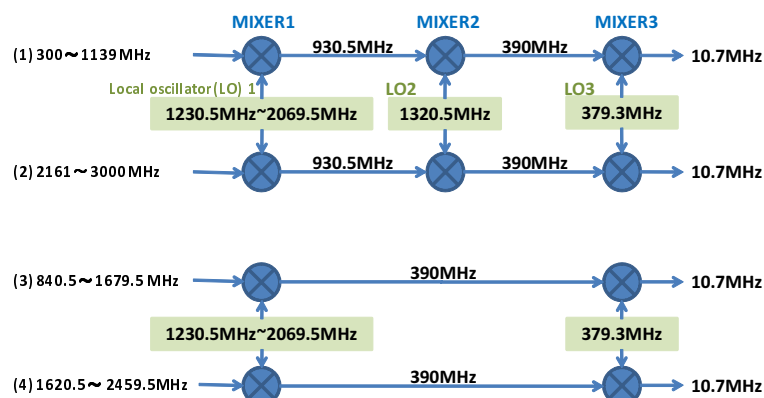


図 3.6: 周波数変換部.

Fig. 2 Frequency conversion unit.

に必要な，ミキサ，局部発振回路，PLL (Phase Locked Loop), IF フィルタ，IF 増幅回路などを 1 チップ化しているため，低コストである．TV チューナ IC は，アンテナから入ってくる微弱な電波を増幅し，IF 帯 (36 MHz) へ周波数変換をしてから固定フィルタを通す．具体的には，50~870 MHz の受信周波数範囲から任意の 6 MHz の帯域を抜き出す．

### 3.3.3 最終 IF 部の設計

最終段の IF フィルタの帯域幅はスペクトラムセンサの周波数分解能である分解能帯域幅 (RBW, Resolution Band Width) を決定する．安価な IF フィルタとしては，標準品として市販されている，中心周波数 10.7 MHz，および 455 kHz のセラミックフィルタが考えられる．それ以外の中心周波数に対しては，水晶フィルタの特注が低コスト化の観点から有効である．

広帯域スペクトラムセンサの最終段の IF フィルタには，標準品として入手しやすい 10.7 MHz のセラミックフィルタを用いる．また，広帯域スペクトラムセンサの測定周波数範囲にあたる UHF 帯ではガードバンドを含めて数十 kHz 程度の狭い帯域幅を持つ無線サービスは少数である．このため，UHF 帯に対するスペクトラム測定で

は 200 kHz 以上の周波数分解能が用いられることが一般的である [41],[36]。このような観点から、200 kHz の帯域幅に最も近いフィルタとして、中心周波数 10.7 MHz、帯域幅 180 kHz の、標準品のフィルタを IF フィルタとして用いる。なお、IF フィルタを複数用いて切り替えることで周波数分解能を可変にすることも可能である。

他方、TV チューナ IC スペクトラムセンサの最終段の IF フィルタには、特注した 36 MHz の水晶フィルタ [85] を用いる。今回用いた TV チューナ IC の出力周波数は 36 MHz 帯であるため、標準品としての 10.7 MHz のフィルタを用いるには、再度周波数変換を行う必要がある。すなわち、ミキサ、VCO、PLL などの部品が追加に必要となり、半導体の部品数が多くなるため、特注した水晶フィルタの利用が低コスト化の観点から有効である。また、水晶フィルタは共振のピークの鋭さを表す Q (Quality factor) 値が高いため、数百 kHz 以上の帯域幅を実現するのは困難である。さらに、TV チューナ IC スペクトラムセンサの測定周波数である 50~870 MHz の帯域には、UHF 帯の 900 MHz 以上の帯域に比べると、数十~数百 kHz の占有帯域幅が占める割合が大きい

このような観点から、TV チューナ IC スペクトラムセンサの最終 IF 部には、測定帯域内のチャンネルの占有帯域幅とフィルタのコストを考慮し 5 kHz/15 kHz/50 kHz/6 MHz の RBW を設ける。具体的には、5 kHz/15 kHz/50 kHz の水晶フィルタをそれぞれ通る 3 つの経路と、IF フィルタの無い素通りの経路の、計 4 つの経路を設ける。4 つ目の経路は IF フィルタを通過しないため、RBW は TV チューナ IC の IF 信号の帯域幅同様、6MHz となる。50MHz~870MHz の帯域において最も狭いチャンネルの帯域幅は 6.25kHz であるため、以上の RBW 構成を用いて、全てのチャンネルを区別して測定できる。

#### 3.3.4 電波検出部の設計

電波検出部では、両スペクトラムセンサとも、ログアンプ [88] を用いて最終 IF フィルタからの信号の強度を測定する。測定した信号は、MCU (PIC18LF2550 [87]) で AD (Analog to Digital) 変換を行う。

また，入力周波数ごとに異なる，周波数変換部での電力損失を校正するために，電力測定値に対してデジタル補正を行う．ミキサ，増幅器，そしてフィルタなどでの高周波信号の電力損失は周波数ごとに異なるため，同じ入力レベルに対して測定値は一定でない．その差を AGC (Automatic Gain Control) などで校正する方法も考えられるが，半導体部品数が増え，コストが上昇する．このため，本センサでは予め作成した校正用のファイルを用いてデジタル補正を行う．具体的には，信号発生器を用いて周波数を可変しながらスペクトラムセンサへ信号を入力し，図 3.7 のようなデジタル補正ファイルを作成する．このファイルに基づき，測定値の校正を行う．図 3.8 に，100 MHz～850 MHz の-40 dBm の入力信号を測定した補正前後の結果を示す．

電波の有無を決定する方法に関しては様々な議論があるが [77]，本論文では，実装が容易なため広く使われる，エネルギー検出法 [79] を採用する．エネルギー検出法は，測定した電力を基に，検出閾値から電波の有無を判定する [78]．電波の検出閾値を決める方法も，予め測定したノイズデータを利用し [53],[80]，目視による直感的方法から決めたり [28]，ノイズフロアの平均や標準偏差から決める [51] など，複数の方法がある．本論文では，スペクトラムセンサのノイズフロアの平均と標準偏差からノイズの 99 %信頼区間を計算し，その上限を閾値とする方法を採用する [42][53]．

Frequency (MHz)														
300	305	310	315	...	450	455	460	465	...	830	835	840	845	850
-2.86	-2.14	-2.14	-2.14		0	1.43	1.43	2.14		1.43	1.43	1.43	2.14	1.43
Compensation value (dB)														

図 3.7: デジタル補正ファイルの例.

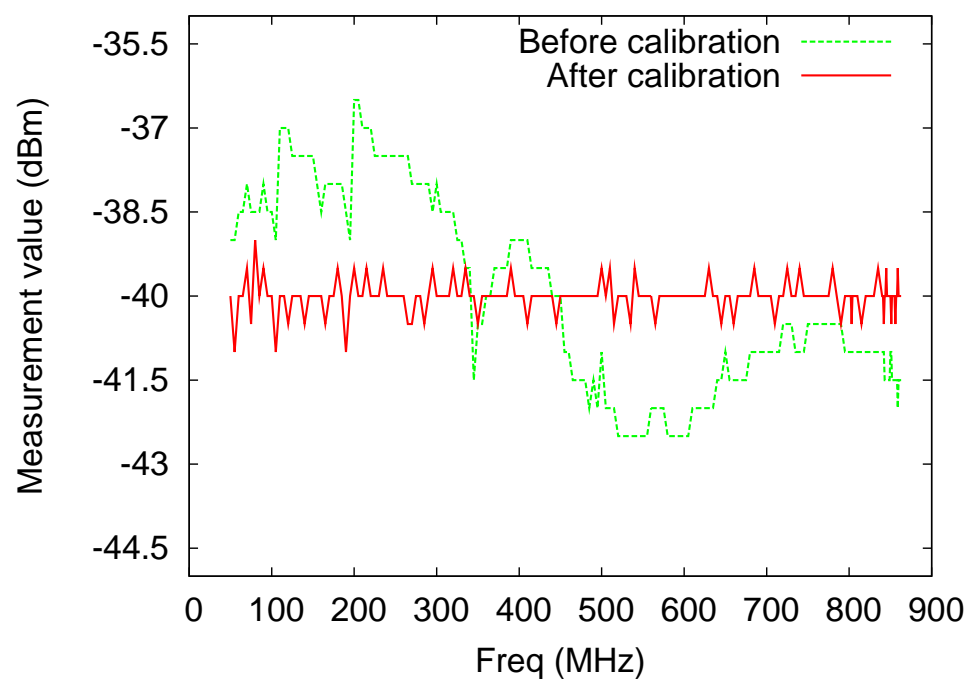


図 3.8: 補正前後の-40 dBm 信号の測定値.

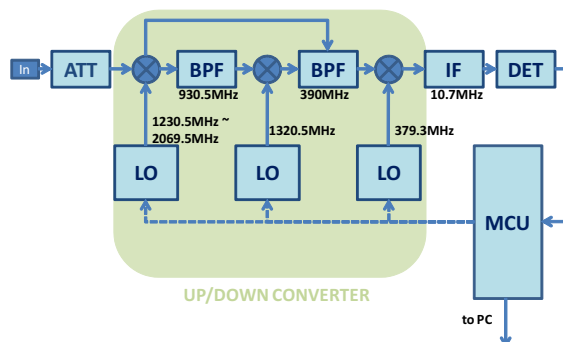


図 3.9: 広帯域スペクトラムセンサのブロック図.

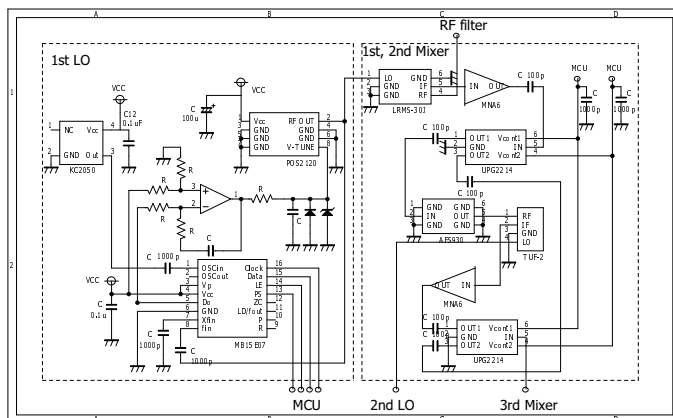


図 3.10: 広帯域スペクトラムセンサの周波数変換部の回路図 (1st LO, 1st/2nd Mixer).

### 3.3.5 実装

以上の設計を基に、スペクトラムセンサの実装を行った。実装した広帯域スペクトラムセンサのブロック図を図 3.9 に、回路図を図 3.10 に、そして実装したハードウェアを図 3.11 に示す。同じく、実装した TV チューナ IC スペクトラムセンサのブロック図を図 3.12 に、回路図を図 3.14 に、そして実装したハードウェアを図 3.13 に示す。回路図には MCU 部分を除くアナログ処理の部分のみを示している。広帯域スペクトラムセンサの回路図 (図 3.10) には、中腹する部分が多いことから、周波数変換部の 1st LO と 1st/2nd Mixer のみを表す。TV チューナ IC スペクトラムセ



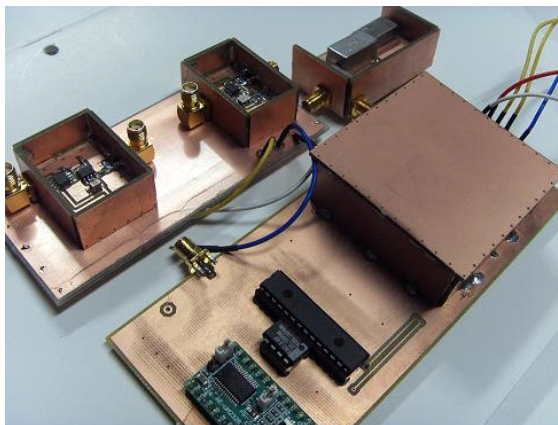


図 3.11: 実装した広帯域スペクトラムセンサ.

ンサの回路図 (図 3.14) には、周波数変換部、最終 IF 部、そして電波検出部を示す。

アンテナからの入力信号は、アッテネータを経由して周波数変換部に送られて 10.7MHz の IF 信号になる。この信号の電力は逐次検波型のログ・アンプにより測定される。測定結果は MCU により 10bit で A/D 変換され、シリアル経由で PC に送出される。参考として、実装した TV チューナ IC スペクトラムセンサを用いて、800~870 MHz の帯域を RBW=50 kHz で 24 時間実測し、1 時間単位での占有率の変化を求めた結果を図 3.15 に示す。測定結果から、時間によって占有率が変化する信号を確認できる。

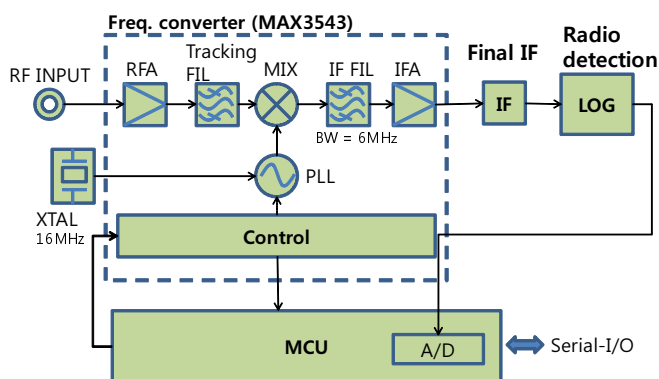


図 3.12: TV チューナ IC スペクトラムセンサのブロック図.

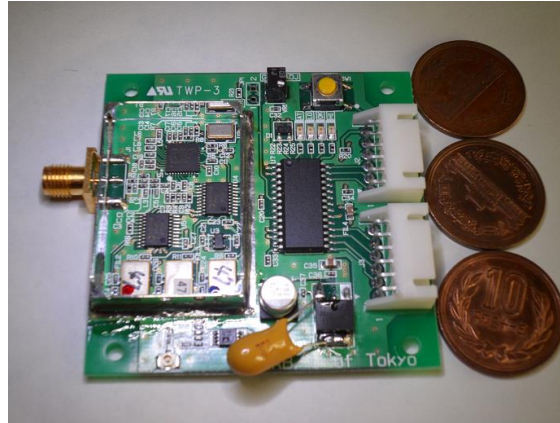


図 3.13: 実装した TV チューナ IC スペクトラムセンサ.

実装したセンサに使用した部品の価格は、広帯域スペクトラムセンサでは約20,000円、TV チューナ IC スペクトラムセンサでは約9,000円となった。使用した部品のうち、价格的に高い部品とその割合を図 3.16 と図 3.17 に示す。広帯域スペクトラムセンサの価格を支配している部品は主として周波数変換部であり、局部発振器に用いられる VCO(Voltage Controlled Oscillator) が3個で約8,500円、ミキサが3個で3,000円となっており、この部分のみで約1万4千円を占めている。それに対して、TV チューナ IC スペクトラムセンサの周波数変換部に使われる IC の価格は約1,000円と、比較的低い。TV チューナ IC スペクトラムセンサは個別部品を用いた広帯域スペクトラムセンサに比べて測定周波数範囲は制限されるものの、より低コストで実現できる。測定周波数範囲とコストはトレードオフの関係であり、測定の目的に合わせて、センサを選ぶ事が有効である。

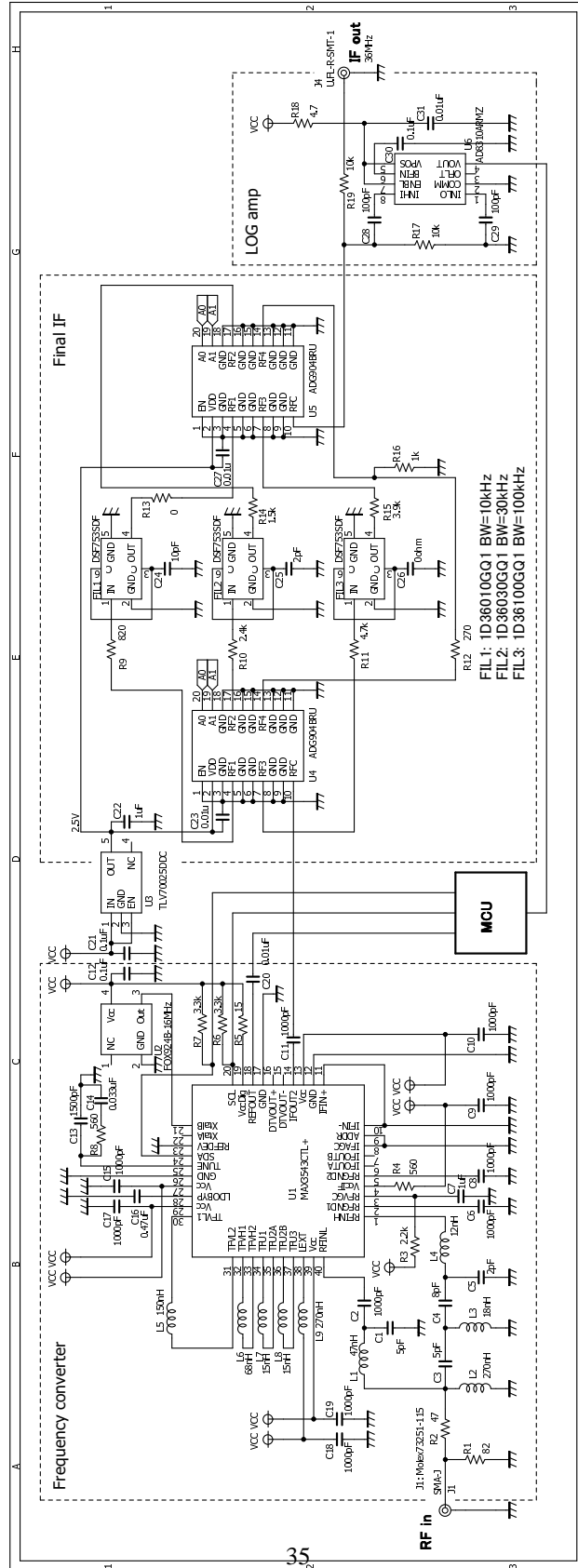


図 3.14: TV チューナ IC スペクトラムセンサの回路図。

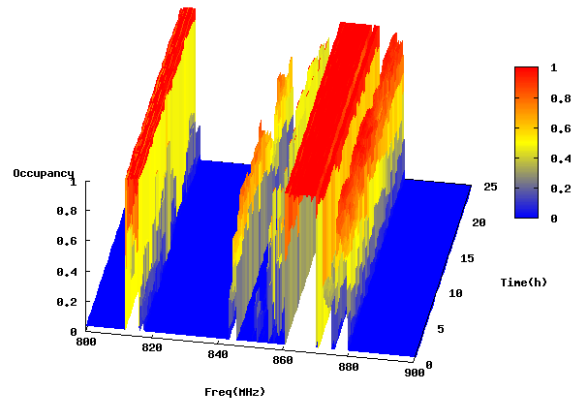


図 3.15: 1 時間単位の周波数の占有率の変化の例.

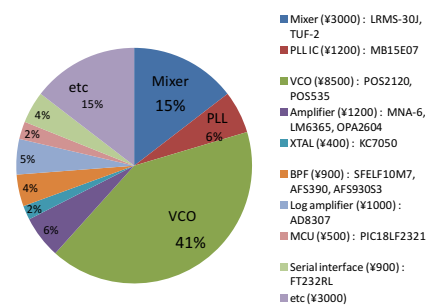


図 3.16: 広帯域スペクトラムセンサの部品と全体コストを占める割合.

Fig. 10 Percentage of the cost of components (wide band spectrum sensor).

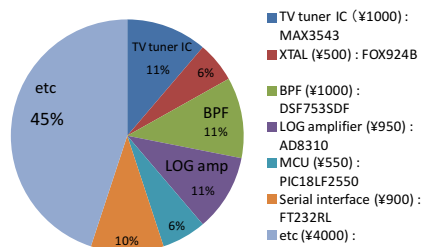


図 3.17: TV チューナ IC スペクトラムセンサの部品と全体コストを占める割合.

Fig. 11 Percentage of the cost of components (TV tuner IC spectrum sensor).

### 3.4 動的 RBW 方式

時間により変化する周波数の利用状況を高い精度で測定するには、短い掃引時間と高い周波数分解能という相反する要求をみたさなければならない。掃引時間を短くすると、時間的に変化する信号を検出できる確率が高くなるものの、検出対象とする帯域の RBW を広く取らなければならない、周波数分解能が低くなってしまう。

このような観点から、周波数の割り当て情報に着目する。具体的には、電波が検出された帯域においては、占有帯域幅  $W_i$  と中心周波数  $X_i$  の情報を活用して RBW を再設定することで、必要な周波数分解能を確保しながら掃引時間を短縮する。

スペクトラムセンサには、A, B, C, D ( $A < B < C < D$ ) の 4 つの RBW が備わっているとす。まず、スペクトラムセンサは、もっとも広い RBW である D で全ての帯域の掃引を開始する (図 3.18)。この帯域幅 D の測定区間をブロックとする。次に、電波が検出されたブロックにおいては、当該帯域の占有帯域幅  $W_i$  と A, B, C, D とを比較し、 $W_i$  より狭くかつ最も広い帯域幅に RBW を切り替える。例えば、本スペクトラムセンサ (A=5 kHz, B=15 kHz, C=50 kHz, D=6 MHz) を用いて 800 MHz 帯の MCA (Multi Channel Access) を測定する場合、 $B \quad W_i=25 \text{ kHz} < C$  であることから、RBW を B=15 kHz に切り替え、中心周波数を  $X_i$  に設定して掃引を行う。RBW を切り替えたブロックにおいて電波が検出されなくなると、RBW を D に戻す。

アルゴリズムのフローチャートを図 3.19 に示す。図 3.19 で、 $F_n$  は  $n$  番目のブロックの中心周波数であり、`RBW_original` は電波が検出されない場合の RBW を、`rbw2threshold()` は RBW に応じた閾値を得るための関数を、`center_freq()` は中心周波数を保持するテーブルを示している。このフローチャートは上記の動的 RBW 方式の手順に沿って動作する。

本システムでは、測定パラメータが動的に変化するため、ヘッダーを含めたデータ形式を決定する必要がある。動的 RBW 方式を用いたスペクトラムセンサから掃引 1 回に当たり生成されるデータ形式の例を図 3.20 に示す。ヘッダーには掃引開始時の時刻情報、位置情報、そして電波が検出されたブロックの番号  $n$  (周波数が低

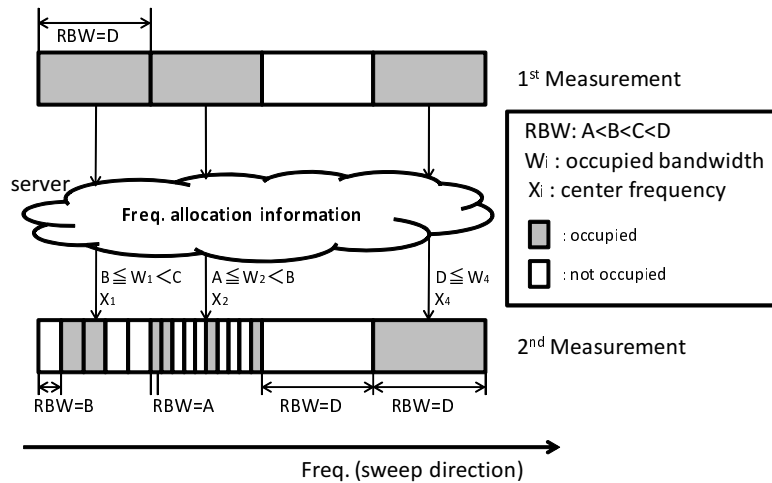


図 3.18: 動的 RBW 方式のイメージ図.

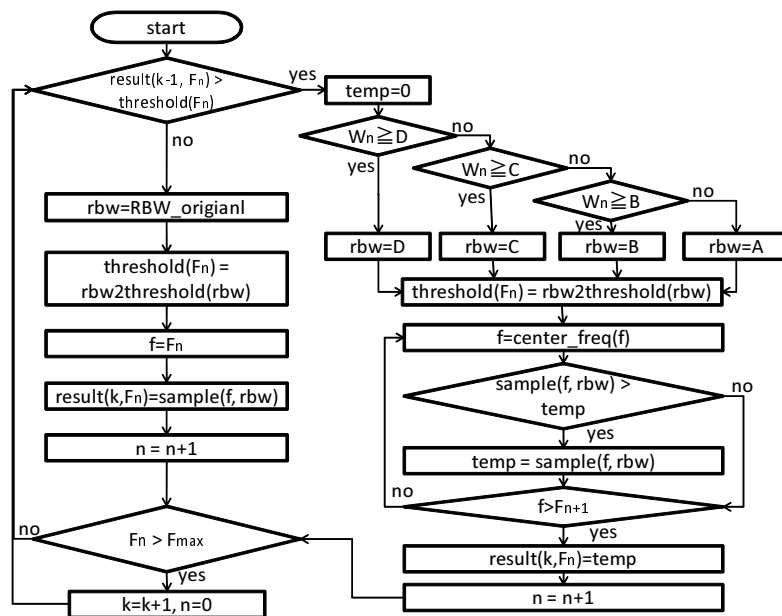


図 3.19: 動的 RBW 方式のフローチャート.

20120710105210		(time stamp)	
35.66,139.68		(location:latitude,longitude)	
n	10,11,12...		
n	f	rbw	power(dBm)
1	53	6M	-79.1
2	59	6M	-79.5
...			
9	101	6M	-79.3
10	104.25	50k	-81.2
10	104.75	50k	-73.2
10	105.25	50k	-64.3
...			

図 3.20: データ形式の例.

Fig 3 Example of data format.

い順にブロックにつけた番号)が含まれる。サーバはこれを基にデータの測定時刻や位置を把握できる。

一方、RBW を広く取ることによってノイズ量が増加するため、掃引時間とノイズフロアはトレードオフ関係にある。例えば、本スペクトラムセンサを用いて、6 MHz の RBW で測定した場合のノイズフロアは、5 kHz の RBW で測定した時に比べ約 20 dB 上昇する。本センサは 5 kHz の RBW を用いる際のノイズフロアを想定して高密度配置しているため、6 MHz の RBW で測定した場合でも 5 kHz の RBW で測定した時と同じ範囲の送信局を検出することが求められる。このため、RBW=6 MHz のスペクトラムセンサが電波を検出した場合、そのセンサでの測定電力値より電力が 20 dB 減衰する範囲内のセンサの RBW を可変させる。

サーバ側は、高密度に配置されたスペクトラムセンサのいずれかが電波を検出した場合、周辺センサにも通知し RBW を可変させる。ここで RBW を可変させる範囲に関しては後述する。サーバからスペクトラムセンサへの RBW 可変の命令は、スペクトラムセンサからサーバへの HTTP の POST リクエストによるポーリングを用いて実現する。

この範囲はローエンドスペクトラムセンサの RBW の変化によるノイズフロアの差により決まる。低コストスペクトラムセンサの場合、前述したように、最も広い RBW と最も狭い RBW を用いる際のノイズフロアの差は約 20 dB である。このため、電波を検出したスペクトラムセンサでの測定電力値より電力が 20 dB 減衰する範囲内のセンサの RBW を可変させる。

例えば、図 3.21 のように、低コストスペクトラムセンサが  $a$  m 間隔に配置され、センサから  $y$  m 離れた送信局が検出されたとする ( $y$  の最大値は  $y_{max} = a/\sqrt{2}$  になる)。スペクトラムセンサに動的 RBW 方式を実装し、送信局を検出したセンサは半径  $x$  m 内のセンサの RBW を可変させることにする。本論文では、フェージングなどを考慮せず、見通しのいい環境のパスロスの式 [76] を基に計算する。フェージングなどを考慮する場合 20 dB 減衰される距離は短くなるため、RBW を可変する範囲は狭くなり、かつ対象となるセンサの数も少なくなる。しかしながら、本論文では 1 次利用者の見逃し率 (false negative) を最小化するための安全マージンを考慮し、自由空間を想定した。

このため、送信局を検出したスペクトラムセンサより、受信電力が 20 dB (RBW の違いによるノイズフロアの差) 減衰する範囲は送信局から  $10y$  m 離れた場所である。すなわち、送信局を検出したスペクトラムセンサから最大  $11y$  m 離れた場所まで含まれるため、電波の検出結果を共有する範囲  $x = 11y_{max}$  とする。例えば、 $a = 200$  m の間隔でスペクトラムセンサを配置した場合、 $x = 1.56$  km となる。



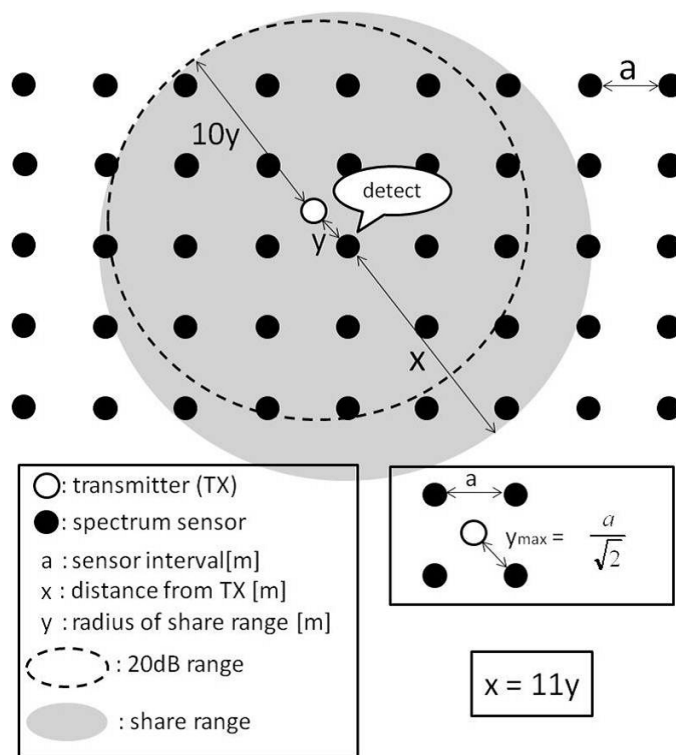


図 3.21: 測定結果の共有範囲.

### 3.5 おわりに

本章では、高密度スペクトラムセンシングに向けた低コストスペクトラムセンサの設計と動的 RBW 方式を示した。低コストスペクトラムセンサにおいては、必要な機能とコストを考慮し、周波数変換部、最終 IF 部、そして電波検出部で構成されるスーパーヘテロダイン方式を採用した。具体的には、周波数変換部、最終 IF 部、そして電波検出部において、半導体部品数を最小化するように部品の選定を行い、実装した。さらに、ハードウェアコストの増大なしに、掃引時間を短縮し測定精度を向上させる動的 RBW 方式の提案を行った。次章では、設計したスペクトラムセンサと、動的 RBW 方式の有効性の評価を行う。

## 第4章 評価



## 4.1 はじめに

本章では、まず、3章で設計した低コストスペクトラムセンサの信号測定精度の評価を行う。具体的には、周波数分解能、周波数確度、電力測定の下限と上限をそれぞれ決定する最大入力レベルとノイズフロア、そして掃引時間を評価する。表 4.1 にスペクトラムセンサと FSL6 [91] の評価項目の比較を示す。広帯域スペクトラムセンサの測定周波数範囲は 300~3000 MHz、分解能帯域幅は 180 kHz、周波数確度は 2.5ppm、レベル分解能は 0.5dB、最大入力レベルは+0 dBm、ノイズフロアは-84.6 dBm、そして周波数可変速度は約 5msec/step である。これに対して、TV チューナ IC スペクトラムセンサの測定周波数範囲は 50~870 MHz、分解能帯域幅は 5 kHz/15 kHz/50 kHz/6 MHz、周波数確度は 2.5ppm、レベル分解能は 0.5dB、最大入力レベルは-24 dBm、ノイズフロアは-99.2/-95.3/-91.2/-77.2 dBm、そして周波数可変速度は約 15.258msec/step である。

次に、低コストスペクトラムセンサを用いた周波数の占有率測定の精度を評価する。占有率測定は周波数の利用状況を表す方法としてスペクトラム測定において広く使われている [28], [36]。この評価では、3章で実装したスペクトラムセンサと市販の高性能スペクトラムアナライザ FSL6 を用いて、周波数の占有率を測定し、その結果を比較する。比較した結果から、本スペクトラムセンサは、時間的に利用状況が変化する帯域に対しては市販のスペクトラムアナライザに比べて測定精度が多少劣るものの、高密度スペクトラムセンシングにおける周波数の利用状況の把握に向けては有効であることを示す。

最後に、動的 RBW 方式の有効性を示すために、RBW を切り替え可能な TV チューナ IC を用いて評価する。動的 RBW 方式を用いることで、時間的に変化する電波に対する占有率の測定精度が向上することを示す。

## 4.2 スペクトラムセンサの信号測定精度

広帯域スペクトラムセンサと、TV チューナ IC スペクトラムセンサの信号測定精度を評価するために、周波数確度、最大入力レベル、ノイズフロア、そして掃引

表 4.1: 評価項目の比較.

	広帯域センサ	TV チューナ IC センサ	FSL6
周波数範囲	UHF 帯	50~870 MHz	9 kHz~6 GHz
RBW	180 kHz	5/15/50kHz/6MHz	1 Hz~10 MHz
周波数確度	2.5 ppm	2.5 ppm	≤ 0.1 ppm
最大入力レベル	+0 dBm	-24 dBm	0~+50 dBm
ノイズフロア	-84.6 dBm	-99.2/-95.3/-91.2/-77.2 dBm	-130 dBm (1 Hz RBW)
周波数可変速度	5 msec	15.258 msec	≤ 1 msec

時間の評価を行う．表 4.1 に広帯域スペクトラムセンサ，TV チューナ IC スペクトラムセンサ，そして FSL6 の評価個目の比較を示す．

#### 4.2.1 周波数分解能

実装したハードウェアが期待どおりの周波数分解能を持つかどうかを調べる目的で，センサの RBW 分離した 2 つの信号を分離して測定できるのかの実験を行った．この実験では，Aglient 社の信号発生器 8648C [90] を用いて，広帯域スペクトラムセンサへ 850 MHz と 850.18 MHz の信号を，TV チューナ IC スペクトラムセンサへは 850 MHz と 850.005 MHz / 850.015 MHz / 850.05 MHz / 806 MHz の信号をそれぞれ入力し，信号の測定結果を調べた．その測定結果として，広帯域スペクトラムセンサへの入力結果と，TV チューナ IC スペクトラムセンサの RBW が 50 kHz の時，850 MHz と 850.05 MHz の測定結果を図 4.1 と図 4.2 に示す．図 4.1 と図 4.2 より，各入力信号は，それぞれの入力周波数上で測定できることを確認できる．すなわち，周波数分解能以上離れた 2 つの信号は区別して測定できる．

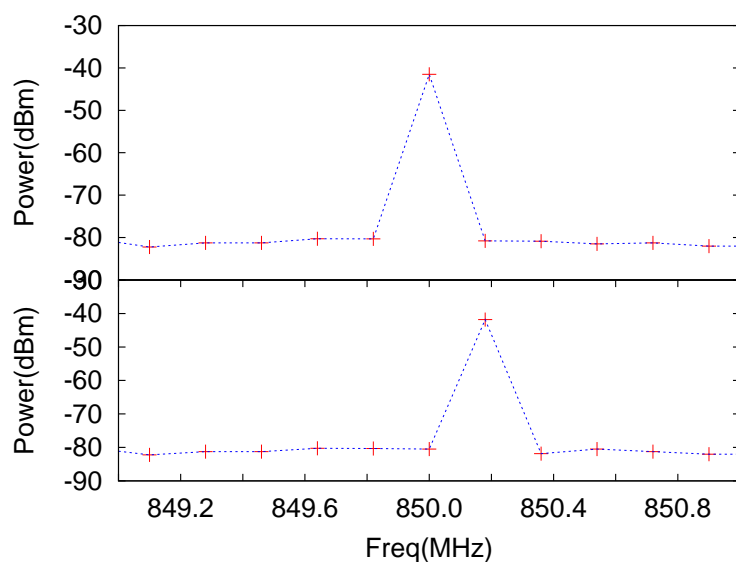


図 4.1: 850 MHz と 850.18 MHz の測定結果 (広帯域スペクトラムセンサ).

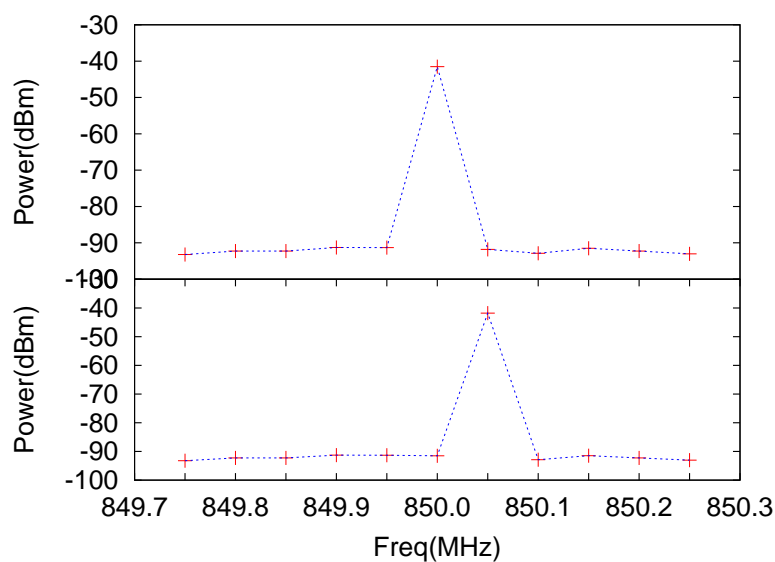


図 4.2: 850 MHz と 850.05 MHz の測定結果 (TV チューナ IC スペクトラムセンサ).

#### 4.2.2 周波数確度

周波数確度は局部発振器の長期的な安定度を表す。本センサには、2.5 ppm の確度を持つ汎用の温度補償水晶発振器を利用している。周波数確度の評価を行うために、Agilent 社の信号発生器 8648C を用いて 800 MHz の信号を入力し、1 時間後の最大誤差を計測した結果、平均誤差はそれぞれ約 850 Hz と 950 Hz であった。本センサの測定周波数範囲である UHF 帯および 50~870 MHz のうち、最も狭いチャンネルの占有帯域幅は 6.25 kHz であり、本評価の平均誤差、850 Hz と 950 kHz は 6.25 kHz の約 1/6 である。このため、本センサは、全てのチャンネルを区別して測定でき、スペクトラム測定において有効利用できる。

#### 4.2.3 最大入力レベル

最大入力レベルは、スペクトラムセンサが測定できる最大値を表す。その評価のために、信号発生器を用いて -60 dBm から +10 dBm の信号を低コストスペクトラムセンサへ入力し、電力を測定した。広帯域スペクトラムセンサへ入力した結果を図 4.3 に、TV チューナ IC スペクトラムセンサへ入力した結果を図 4.4 に示す。広帯域スペクトラムセンサでは、+0 dBm 以上の入力で測定結果に歪みが生じ、最大入力レベルは +0 dBm となる。これに対して、TV チューナ IC スペクトラムセンサでは、-24 dBm 以上の入力で測定結果に歪みが生じ、最大入力レベルは -24 dBm となる。最大入力レベル以上の電波では図 4.3 や図 4.4 のように測定値が歪むものの、本スペクトラムセンサで測定するのは電波の電力とその有無であり、最大入力レベル以上の電波が存在しても、電波の有無の判断には影響ない。なお、最大入力レベルより高い電力を測定する必要がある場合には、入力段にアッテネータを設ける。

#### 4.2.4 ノイズフロア

ノイズフロアは、スペクトラムセンサが測定できる最小の入力レベルを表す。ノイズフロアの測定においては、RBW ごとに、スペクトラムセンサの入力段を 50

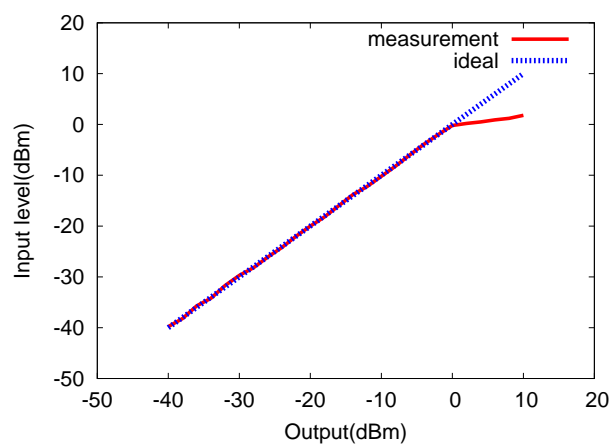


図 4.3: センサの入力レベルと出力レベルの比較 (広帯域スペクトラムセンサ).

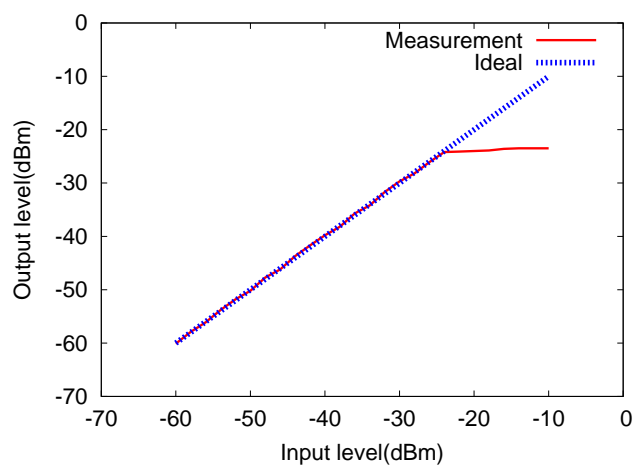


図 4.4: センサの入力レベルと出力レベルの比較 (TV チューナ IC スペクトラムセンサ).



で終端し，10 分間 peak-to-peak 法で測定した．その結果，広帯域スペクトラムセンサ (RBW=180 kHz) のノイズフロアは約-84.6 dBm，TV チューナ IC スペクトラムセンサ (RBW=50 kHz) のノイズフロアは，RBW が 5 kHz / 15 kHz / 50 kHz / 6 MHz の時，それぞれ約約-99.2 dBm / -95.3 dBm / -91.2 dBm / -77.2 dBm となる．RBW が広がるほどノイズフロアは増加するが，分散配置されたセンサからの測定結果を共有する協調スペクトラムセンシング [67], [68] を行うことで，解決できることを後述の測定実験で示す．

#### 4.2.5 掃引時間

掃引時間は，測定周波数範囲，RBW, PLL のロックアップタイムなどで決定される．1 回の測定にかかる時間の評価を行うために，各測定の開始と終了時に MCU のピンを反転させ，オシロスコープを用いてその間隔を測定することを 100 回繰り返した．

その平均は，広帯域スペクトラムセンサの場合，PLL のロックアップタイムに約 1.563 msec, AD 変換に約 30.5 usec, コマンド転送に約 953 usec, シリアル送信に約 2.36 msec となり，1 回の測定には約 4.907 msec 必要であることを確認した．このため，UHF 帯の掃引時間は約 73.605 秒となる．

一方，TV チューナ IC スペクトラムセンサの場合，PLL のロックアップタイムに約 1.72 msec, AD 変換に約 78 usec, コマンド転送に約 11.1 msec，シリアル送信に約 2.36 msec となり，1 回の測定には約 15.258 msec 必要であることを確認した．掃引時間は (15.258 msec × 測定回数) で計算できるため，50~870 MHz の掃引時間は，RBW が 5 kHz / 15 kHz / 50 kHz / 6 MHz の時，それぞれ約 2502.3 sec / 834.1 sec / 250.2 sec / 2.1 sec となる．RBW を狭くすることで掃引時間は長くなるが，動的 RBW 方式を用いて高速化できる．

TV チューナ IC は，スペクトラムセンサのように周波数を高速に切り替える用途ではないため，周波数設定に関するコマンド設定に必要な時間や，ロックアップタイムも長い．TV チューナ IC を利用するのは，個別部品を用いて設計するのに比べ

て低コスト化が可能なものの、掃引時間が長くなることも考慮する必要がある。掃引時間が長くなる影響は次の節で述べる。

### 4.3 占有率の測定精度

3章で設計したスペクトラムセンサの占有率測定誤差の評価を行うために、電波の占有率測定を行い、FSL6と比較した。占有率の算出は標本による統計的手法を用いるため、その精度は標本の大きさに大きく依存する。標本の大きさとは、占有率の算出に用いるデータの数であり、測定時間と掃引時間に依存する。

占有率測定精度の評価ではまず、信号発生器を用いて占有率を正確に把握できる信号パターンを生成し、これを「正解データ」として、実装したスペクトラムセンサとFSL6との比較を行った。この評価では、PC上で乱数生成の関数を用いて1～10までの整数の乱数を10秒ごとに発生させる。このとき、それが奇数であれば信号を発生させ、偶数であれば信号を停止させる動作を GPIB(General Purpose Interface Bus) 経由で正弦波信号発生器 (Agilent 8648C) を制御することで実現する。正弦波信号の周波数は800MHz、信号強度は-30dbmとし、生成した信号の占有率を2つの低コストスペクトラムセンサおよびFSL6で測定した。1時間の占有率を測定した結果、評価用正解データの真の占有率とFSL6の誤差は約1.5%、広帯域スペクトラムセンサとの誤差は約8.2%、そしてTVチューナICスペクトラムセンサとの誤差は約15.2%であった。スペクトラムセンサはFSL6に比べて、同じ時間に得られる標本数が少ないため、誤差が大きくなる。

次に、携帯電話やMCA(Multi Channel Access)無線などが存在する770～870MHzの帯域を測定し、占有率の測定精度を評価した。なお、UHF帯には、細かい時間単位で周波数の利用状況が急変する無線サービスも存在するため、対象とする帯域の正確な占有率を求めることは難しい。このため、FSL6を用いた占有率の測定結果にも誤差が生じる可能性は十分にある。しかしながら、本スペクトラムセンサは分散スペクトラムセンシングにおいて、既存のスペクトラムセンシングで使われる市

販のスペクトラムアナライザを代替することを目指すデバイスである．このような観点から，市販のスペクトラムアナライザを基準として，占有率測定誤差を求めることには意義があると考えている．

また，アッテネータ，プリアンプゲイン，および検波方式の設定はスペクトラムセンサと FSL6 とで同一となるようにした．770~870 MHz の掃引時間は FSL6 は約 0.9 秒であり，約 2.5 秒の広帯域スペクトラムセンサや約 30 秒の TV チューナ IC スペクトラムセンサより，それぞれ約 2.7 倍，33.9 倍早い．同じ時間に得られる標本数もそれぞれ約 2.7 倍，33.9 倍多い．また，電波の有無を決定する閾値は，ノイズフロアの平均と標準偏差から，広帯域スペクトラムセンサでは -83.5dBm, TV チューナ IC スペクトラムセンサでは -90.4dBm とした．アンテナにはコメット社のディスコーンアンテナ DS-3000 [94] (75MHz-3000MHz) を使用した．

この条件の下，FSL6 に対するスペクトラムセンサの占有率測定誤差を測定した．測定では，測定時間（すなわち得られる標本数）が変化した場合の誤差と，占有率が変化した場合の誤差を求めた．

図 4.6 と図 4.7 に，測定帯域内の携帯電話の下りと MCA の測定時間に対する占有率の平均誤差を示す．図 4.6 は広帯域スペクトラムセンサと FSL6 の誤差，図 4.7 は TV チューナ IC スペクトラムセンサと FSL6 の誤差である．標本による推定精度は大数の法則により標本数の大きさ（データの数）から決まることが知られており [95]，

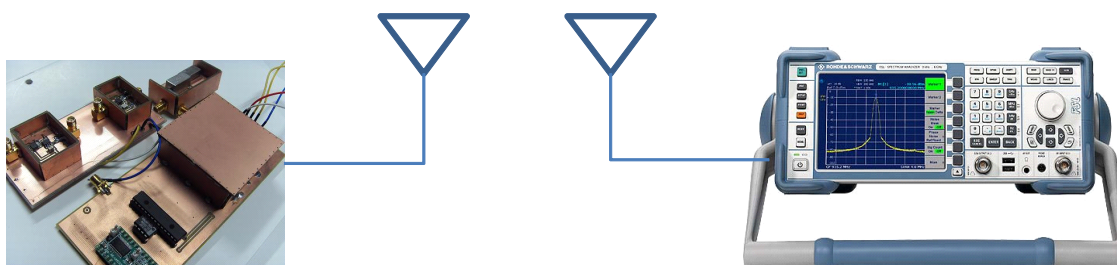


図 4.5: スペクトラムセンサと FSL6 の占有率測定の実験図.

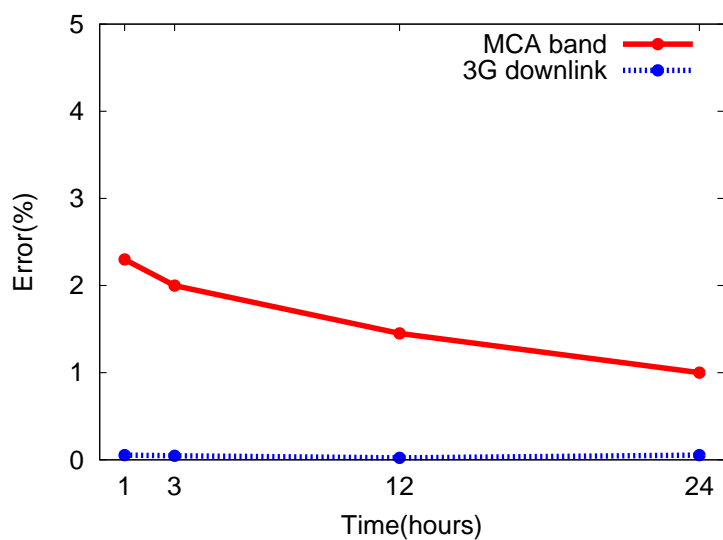


図 4.6: 広帯域スペクトラムセンサの測定時間に対する占有率測定誤差の平均値.

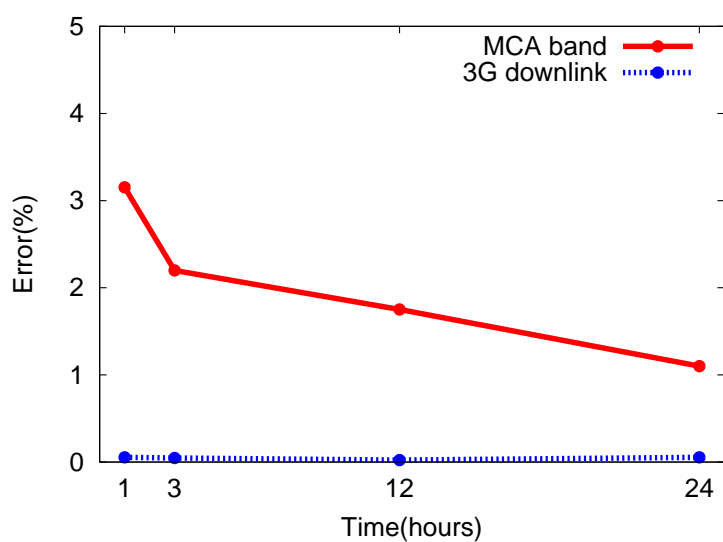


図 4.7: TV チューナ IC スペクトラムセンサの測定時間に対する占有率測定誤差の平均値.

測定時間が長いほど測定精度が向上することが予測できる。MCAにおける24時間の測定では、広帯域スペクトラムセンサの場合は最大約1.0%、TVチューナICスペクトラムセンサの場合は最大約1.1%の誤差が生じる。一方、1時間の測定では、広帯域スペクトラムセンサの場合は最大約2.2%、TVチューナICスペクトラムセンサの場合は最大約3.1%の誤差が生じる。測定時間が長くなるほど測定精度が高くなるのを確認できる。これに対して、携帯電話の下りの場合、両センサとも測定時間に係わらず、0.1%以下の誤差を維持している。これは、携帯電話の下りの場合、占有率が1に近いのに対して、ため掃引時間が測定に与える影響が小さいのに対して、携帯電話の上りやMCAの場合、占有率が0や1から遠く、MCAの場合、占有率が0や1から遠く、時間により利用状況が変化することが原因であると考えられる。

占有率による測定精度の違いを確認する目的から、図4.8と図4.9に占有率が変化した場合の誤差を示す。FSL6で測定した占有率を基準に、占有率を10区間に分け、各区間での平均誤差を求めた。電波の有無の分布は、それぞれが50%であるときに標準偏差が最大となる。図4.8と図4.9ではこれに基づき、区間推定による95%信頼度の理論値も参考として示している。図4.8と図4.9において、占有率が50%付近において誤差が最大値となっている。50%付近の占有率においては、誤差が理論値より高くなるが、1%以下の差である。

本スペクトラムセンサは、周波数の利用状況が変化する帯域において、占有率の測定精度が多少落ちるが、RBWを可変し掃引時間を高速化する動的RBW方式を用いることで、測定精度を向上できる。

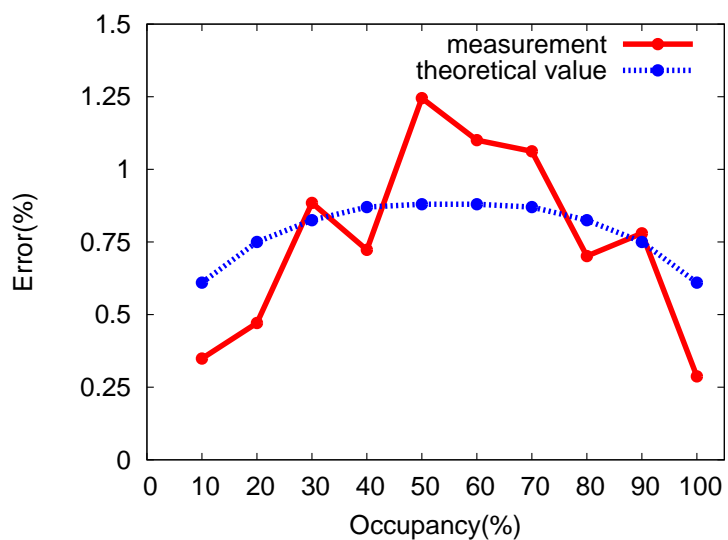


図 4.8: 広帯域スペクトラムセンサの占有率に対する占有率測定誤差の平均値.

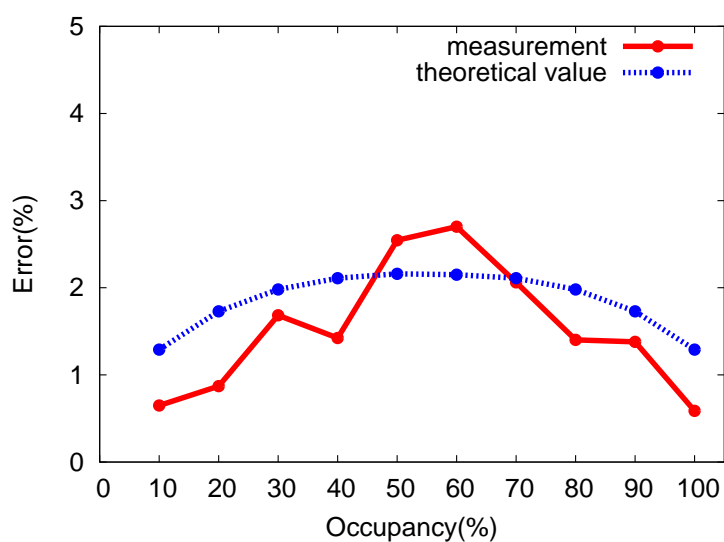


図 4.9: TV チューナ IC スペクトラムセンサの占有率に対する占有率測定誤差の平均値.

## 4.4 動的 RBW 方式の評価

動的 RBW 方式の評価に向け、まず、利用状況が時間的に変動する無線システムにおいては、各チャネル帯域幅以下の範囲で RBW を広く取る事で、占有率の測定精度が向上することを示す。次に、動的 RBW 方式を実装した低コストスペクトラムセンサを用いて、掃引時間の短縮と占有率測定精度の向上を評価する。低コストスペクトラムセンサには、RBW を可変可能な TV チューナ IC スペクトラムセンサを用いる。

### 4.4.1 RBW の違いによる占有率の測定精度

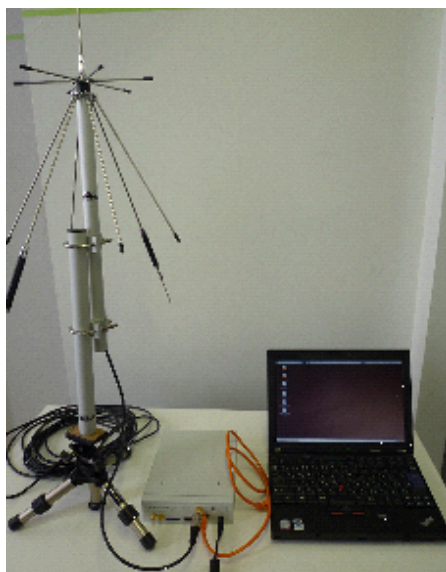


図 4.10: USRP2 を用いたスペクトラムセンサ.

動的 RBW 方式の有効性を示すために、無線 LAN など散発的な電波の送出行う (利用状況の変化が激しい) 無線システムが多い ISM バンドにおいて、RBW の異なるスペクトラムセンサを用いた占有率測定の比較を行う。以上の評価に向け、2.4 GHz 帯が測定可能であり、RBW の可変が容易な、ソフトウェア無線用のフロントエンド、USRP2 (Universal Software Radio Peripheral) [92] を用いて実装した 3 台

のスペクトラムセンサを用いる。USRP2 を用いたスペクトラムセンサにおいて、一度に得られる周波数スペクトラムの帯域幅は、ベースバンド信号のサンプリング周波数  $F_s$  に制限される。したがって、広帯域の測定を行うには、フロントエンドの中心周波数の掃引を行う。また、FFT を行う事で、 $F_s$ /FFT 点数の RBW を実現でき、RBW の変更が容易である。

以上から構成されるスペクトラムセンサ 3 台を用いて ISM 帯の同時測定を行う。1 台は、2452 MHz を中心周波数とし、25 MHz の帯域 (2449.5 MHz~2464.5 MHz) の占有率をリアルタイムで測定する。USRP2 の  $F_s$  は、掃引せずに測定可能な最大の帯域幅を意味し、最大 25MHz まで設定できる。すなわち、25 MHz の帯域幅に対してリアルタイムの電力測定が可能であり、本評価に対する占有率の真値と見なす。さらに、取得したスペクトラムに対し、FFT を行い、その FFT 点数を調整することで RBW を 195.3125 kHz にする。

残りの 2 台は、 $F_s$  を 195.3125kHz, 1.5625Mhz にして、1449.5MHz~2464.5MHz の帯域の掃引を行い、上記の占有率測定結果と比較する。ここでは、FFT を行わず、取得したスペクトラムの強度を測定することで、掃引型のスペクトラムセンサと同じ条件にする。すなわち、RBW はそれぞれ 195.3125kHz と 1.5625MHz となる。

従来の UHF 帯におけるスペクトラム測定では、200 kHz 以上の RBW を用いる例が多いため [28]~ [36]、USRP2 を用いて実現できる、200 kHz に最も近い 195.3125 kHz を RBW の 1 つとした。また、ISM バンドには、1 MHz 以上の帯域幅を持つ無線システムが多いため、USRP2 を用いて実現できる、1 MHz に最も近い値である、1.5625 MHz をもう 1 つの RBW とした。

以上の 3 台のスペクトラムセンサを用いて、30 分間、電波の有無を判定し、帯域ごとの占有率を算出した。その結果を表 4.2 に示す。RBW が 195.3125 kHz のスペクトラムセンサの占有率の測定誤差は平均 2.83 %、最大 9.58 % であり、RBW が 1.5625 MHz の場合は、平均 1.45 %、最大 6.11 % となった。RBW を 1.5625 MHz にすることで、195.3125 kHz の RBW に比べて掃引時間が短縮され、散発的な電波の発射を行う無線システムの測定精度が向上する。このような観点から、チャンネルの



占有帯域幅が広い帯域では RBW を広く取ることで，時間的に利用状況が変化する帯域の測定精度を向上させる動的 RBW 方式の有効性が示された。

表 4.2: RBW による測定結果.

RBW	ave.	max.
195.3125 kHz	2.83 %	9.58 %
1.5625 MHz	1.45 %	6.11 %

#### 4.4.2 掃引時間と占有率測定精度

低コストスペクトラムセンサ 3 台 (A=5 kHz, B=15 kHz, C=50 kHz, D=6 MHz) を用いて，東京大学駒場第 2 キャンパス内で 50~870 MHz 帯に対して測定を行い，掃引時間の短縮の評価を行った．3 台のスペクトラムセンサとして，RBW を固定したセンサ，周波数の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサ，そして動的 RBW 方式を実装したセンサを用いた．ここで，本センサの測定帯域である 50~870 MHz 帯には 6.25 kHz のチャンネル帯域幅を持つ無線システムが存在するため，RBW を固定したセンサでは，RBW を A=5 kHz に固定した．また，周波数の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサは動的 RBW 方式を実装したセンサと異なり，電波の測定結果を考慮せずにチャンネルの占有帯域幅情報のみを基に RBW を決定する手法である．

電波の検出には，実装が容易なため広く使われる，エネルギー検出法 [79] を採用する．エネルギー検出法は，測定した電力を基に，検出閾値から電波の有無を判定

表 4.3: 掃引時間の評価.

	num of slots	sweep time
fixed RBW	164,000	2,502 sec
using channel bandwidth information	45,770	698 sec
dynamic RBW	31,523	480 sec

する．電波の検出閾値の決め方は複数あるが，本論文では，スペクトラムセンサのノイズフロアの平均とその変動の標準偏差からノイズの 99 %信頼区間を計算し，その上限を閾値とする方法を採用する [42],[53]．

以上のセンサを用いて掃引時間を実装した結果を表 4.3 に示す．RBW を固定したセンサでは，50~870 MHz の測定に 164,000 スロット分の測定がなされ，約 2,502 秒を要した．また，周波数の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサでは，45,770 スロット分の測定がなされ，約 698 秒を要した．これに対して，動的 RBW 方式を実装したセンサの場合，平均 31,523 スロット分の測定がなされ，約 480 秒を要した．

次に，掃引時間の短縮による占有率測定精度の向上を評価する．これに向け，信号発生器を用いて占有率を正確に把握できる信号パターンを生成し，これを「正解データ」として，動的 RBW 方式の測定誤差を評価した．この評価では，PC 上で乱数生成の関数を用いて 0 と 1 の乱数を 1, 10, 50 秒，100~1000 秒を 100 秒ステップ，そして 1000~5000 秒を 1000 秒ステップで発生させる．以上の信号を正弦波信号発生器 (Agilent 8648C) を制御することで実現する．正弦波信号の周波数は 800MHz，信号強度は -30dBm とし，生成した信号の占有率を上記の 3 つのスペクトラムセンサで 24 時間測定した．乱数の発生間隔による占有率の測定誤差を図 4.11 に示す．図 4.11 から，動的 RBW 方式による測定精度の改善が確認できる．特に，掃引時間

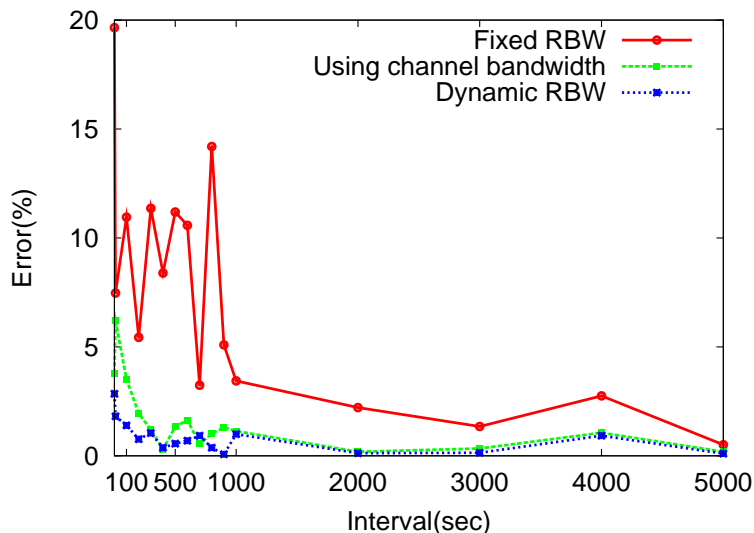


図 4.11: 信号発生器の信号の占有率測定のエラー。

より速く変化する信号は掃引時間より遅く変化する信号に対して誤差が大きく、動的 RBW 方式による測定精度の向上効果も高い。掃引時間より遅く変化する信号に対しては、周波数の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサと動的 RBW を実装したセンサの差も殆どない。

また、実測実験として、周波数の利用状況が時間により変動する 858.4 MHz の MCA 無線の帯域、430.6 MHz と 144.48 MHz のアマチュア無線帯域に対してハイエンドスペクトラムアナライザと上記の 3 台の低コストスペクトラムセンサを用いて 24 時間測定を行った。ここで、ハイエンドスペクトラムアナライザを用いて測定した占有率は約 56.6 %、31.1 %、そして 85.4 %であった。

ハイエンドスペクトラムアナライザでの測定占有率が正しいものとして、3 つのセンサでの各周波数帯における測定占有率の誤差を図 4.12、4.13、そして 4.14 に示す。まず、図 4.12 の 858.4 MHz 帯においては、RBW を固定したセンサでは約 15.6 %、周波数の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサでは約 5.2 %、そして動的 RBW 方式を実装したセンサでは約 3.4 %の誤差を確認できた。次に、図 4.13 の 430.6 MHz 帯においては、RBW を固定したセンサでは約 7.31 %、

周波数の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサでは約 2.98 % ,  
そして動的 RBW 方式を実装したセンサでは約 0.85 % の誤差を確認できた . 最後に ,  
図 4.14 の 144.48 MHz 帯においては , RBW を固定したセンサでは約 6.8 % , 周波数  
の割り当て情報に基づいて固定的に RBW を設定するセンサでは約 3.31 % , そして  
動的 RBW 方式を実装したセンサでは約 0.89 % の誤差を確認できた . また , 図 4.12 ,  
4.13 , そして 4.14 には理論的な最大誤差を参考として示す . 理論値は , 表 4.3 の各  
方式を用いた場合に得られる標本数を基に , 電波の有無 (0/1) の比率を誤差が最も  
大きくなる 50 % とし , 区間推定による 95 % 信頼度の上限値を求めたものである .  
動的 RBW 方式を実装することで掃引時間が短くなり , 誤差が小さくなることを確  
認できた .

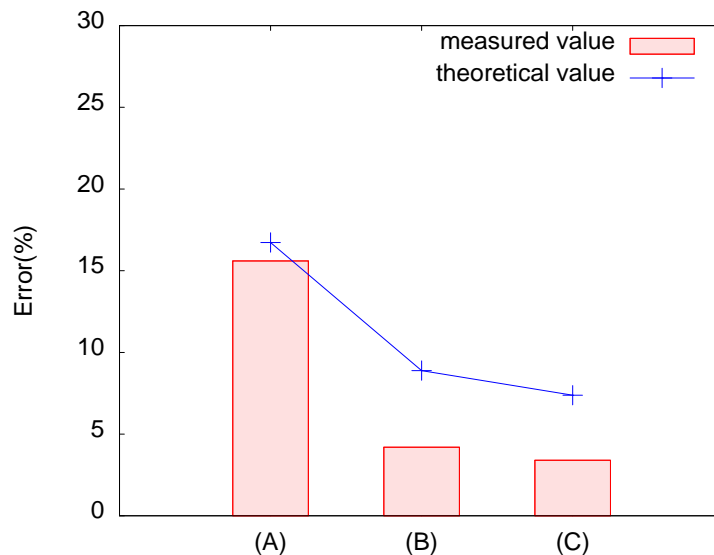


図 4.12: 858.4 MHz 帯の占有率測定誤差 (A) RBW 固定 (B) チャンネルの占有帯域幅情報利用 (C) 動的 RBW 方式.

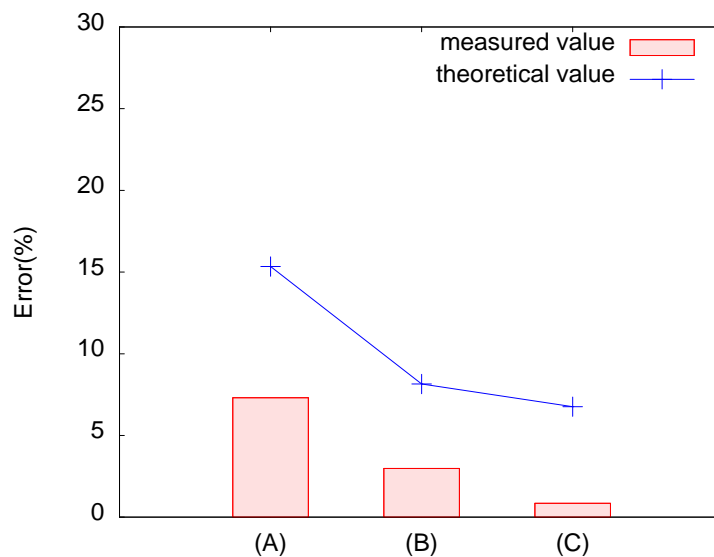


図 4.13: 430.6 MHz 帯の占有率測定誤差 (A) RBW 固定 (B) チャンネルの占有帯域幅情報利用 (C) 動的RBW方式.

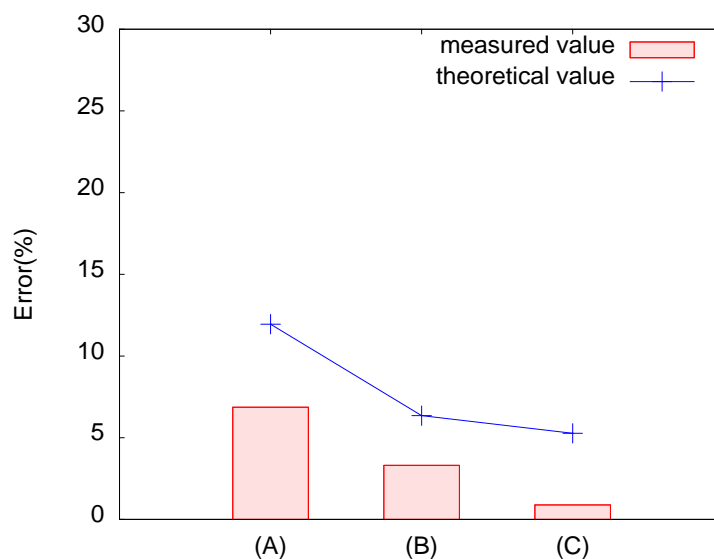


図 4.14: 144.48 MHz 帯の占有率測定誤差 (A) RBW 固定 (B) チャンネルの占有帯域幅情報利用 (C) 動的RBW方式.

## 4.5 おわりに

本章では、実装した低コストスペクトラムセンサと、動的 RBW 方式の評価を行った。まず、低コストスペクトラムセンサの評価としては、周波数分解能、周波数確度、最大入力レベル、ノイズフロア、そして掃引時間の信号測定精度を評価した。その結果、低コストスペクトラムセンサは、高密度スペクトラムセンシングにおいて有効利用できることが示された。次に、低コストスペクトラムセンサの占有率測定の評価として、FSL6 との占有率測定の比較を行った。その結果、携帯電話の下りのような、常に占有されている帯域に対しては測定精度が変わらないものの、時間的に変化する帯域に対しては、測定精度が FSL6 に比べて多少劣ることを確認できた。これに対しては、RBW を可変し掃引時間を高速化する動的 RBW 方式を用いることで、測定精度を向上できることを示した。動的 RBW 方式の有効性を示すために、RBW の違いによる測定精度の評価と、動的 RBW 方式を実装した低コストスペクトラムセンサを用いた実測評価を行った。具体的には、無線 LAN など散発的な電波の送出を行う無線システムが多い ISM バンドにおいて、RBW の異なるスペクトラムセンサを用いた占有率測定の比較を行った。また、動的 RBW 方式を実装した低コストスペクトラムセンサを用い、掃引時間の短縮と、測定精度の評価を行った。

## 第5章 屋外測定

---

## 5.1 はじめに

本章では、複数の低コストスペクトラムセンサを用い、実際に周波数の利用状況データを収集する屋外実験を行うことで、本システムが実環境で有効であることを示す。これに向け、まず、測定システムの実装を行う。次に、東京都内の 8ヶ所で同時測定を行い、その測定結果を示す。最後に、測定結果から、動的 RBW 方式の有効性を示す。

## 5.2 実験の諸元

図 5.2 のように、アンテナ、スペクトラムセンサ、そしてノート PC で構成されたセンサノードを配置した。スペクトラムセンサには、2. で実装した低コストスペクトラムセンサを用いた。図 5.1 のように東京都内の 8 箇所に展開し、50~870 MHz に対して 24 時間測定を行った。L1 は目黒区駒場周辺、L2 は世田谷区代田周辺、L3 は世田谷区下北沢周辺、L4 は世田谷区東松原周辺、L5 は渋谷区神山町周辺、L6 は中野区南台周辺、L7 は練馬区中村南周辺、そして L8 は荒川区西日暮里周辺である。L1~L5 は数百 m 間隔、L6~L8 は数 km 間隔である。各スペクトラムセンサは、図 5.2 のように、大学や住宅の屋上または見通しのいいベランダなどへ配置した。





図 5.1: スペクトラムセンサの配置図.

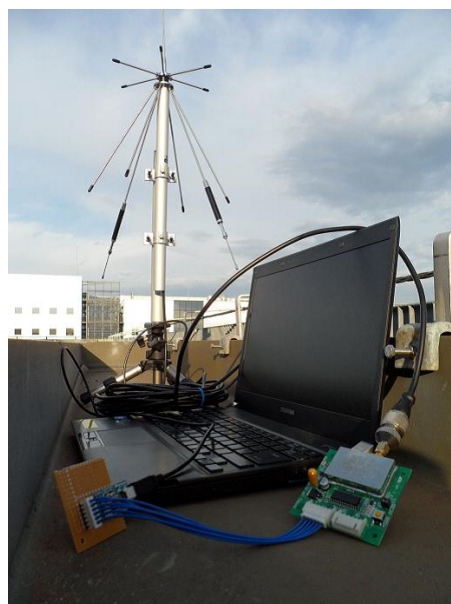


図 5.2: 実験フィールド.

### 5.3 空間的な周波数の利用状況の把握

本節では、L1~L8の測定地点ごとの24時間の平均占有率を50kHzのRBWで測定した結果を示すことで、本システムを用いて空間的な周波数の利用状況を把握できることを示す。特に、空間的な周波数の利用状況の例として、周波数の利用状況が測定地点ごとにほぼ一致している帯域と、測定地点ごとに異なる帯域に分けて示す。

ほぼ一致している帯域としては、860~870MHz帯(図5.3)、517~560MHz帯(図5.4)、213~219MHz帯(図5.5)、そして382~389MHz帯(図5.6)を示す。以上の帯域はテレビ帯域や携帯電話帯域など、常に電波が送出され、利用されている帯域である。

次に、測定地点ごとに異なる帯域としては、144~146MHz帯(図5.7)、147~148MHz帯(図5.9)、146~146.5MHz帯(図5.8)、352~352.75MHz帯(図5.10)、398~400MHz帯(図5.11)、850~860MHz帯(図5.12)、271~275MHz帯(図5.13)、352.75~356MHz帯(図5.14)、そして450~452MHz帯(図5.15)を示す。以上の帯域は、送信電力が低かったり、基地局が少なかったり、利用される地域が限定されている帯域である。

以上の空間的な周波数の利用状況の測定結果を、各帯域の無線システムと用途、そして運用方式などを基に説明をする。これから示す図の横軸は周波数(MHz)、縦軸は平均占有率である。本屋外実験により、周波数の利用状況の空間的な変化を把握できることが確認できる。

#### 5.3.1 周波数の利用状況が測定地点間で同一の例

周波数の利用状況が測定場所ごとにほぼ一致している例として、860~870MHz帯(図5.3)、517~560MHz帯(図5.4)、213~219MHz帯(図5.5)、そして382~389MHz帯(図5.6)を示す。

860~870MHz帯には携帯電話の下り、517~560MHz帯にはデジタルテレビ、213~219MHz帯には近年利用が開始されたVHF帯の携帯電話向けマルチメディア放送、そして382~389MHz帯には電気事業用無線やガス事業用無線が運用されて

いる。

まず、図 5.3 は、860~870 MHz 帯の携帯電話下りの帯域の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図 5.3 のように、色によって L1~L8 まで区別している。図 5.3 から分かるように、全ての帯域において高い占有率が記録されており、また全ての測定地点においてもほぼ同じ占有率が記録されている。すなわち、測定地点毎に周波数の利用状況の差はほぼない。

860~870 MHz 帯がこのような結果を示している理由は、携帯電話の基地局は全ての地域において通信が可能になるように、高い送信電力を持つ基地局から低い送信電力を持つ基地局が細かく展開されているためである。このため、同じ都心であれば、図 5.3 のように、その利用状況はほぼ同一である。

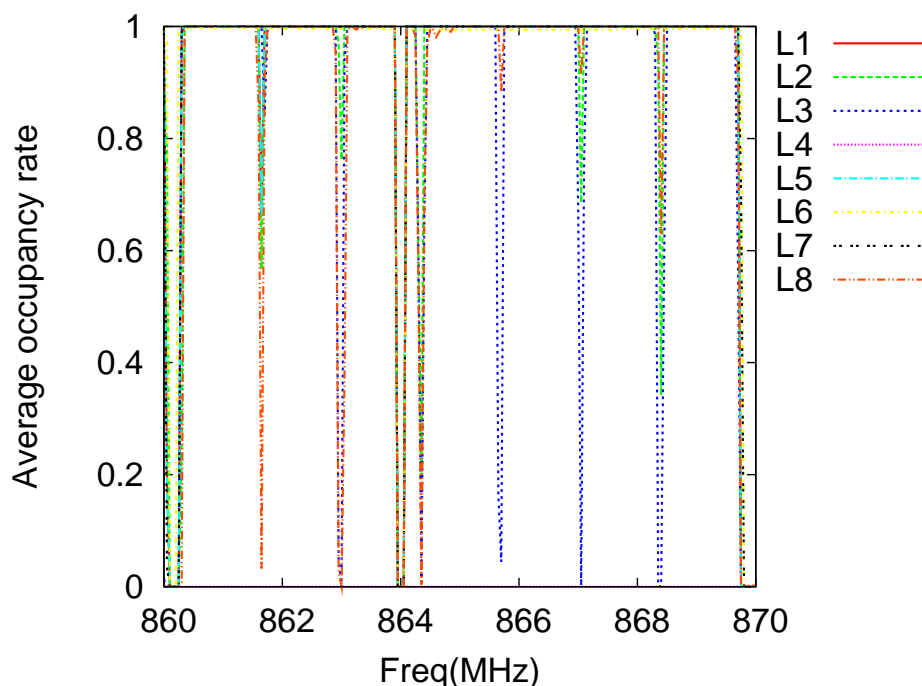


図 5.3: 860~870 MHz 帯の測定地点ごとの平均占有率 (RBW= 50 kHz).

次に、図 5.4 は、517~560 MHz 帯のデジタルテレビ帯域の測定地点毎の利用状況

を示している。横軸は周波数 (MHz), 縦軸は平均占有率である。測定地点は, 図 5.4 のように, 色によって L1~L8 まで区別している。図 5.4 から分かるように, 全ての帯域において高い占有率が記録されており, また全ての測定地点においてもほぼ同じ占有率が記録されている。すなわち, 測定地点毎に周波数の利用状況の差はほぼない。

517~560 MHz 帯がこのような結果を示している理由は, 送信電力の非常に高い送信局が全地域をカバーしているためである。デジタルテレビ帯域の送信局は東京タワーに位置しており, 送信電力は 20 kW の高く, 送信局の高さも 100 m 以上に位置している。このため, 東京の都心の殆どをカバーしている。このため, 同じ都心であれば, 図 5.4 のように, その利用状況はほぼ同一である。

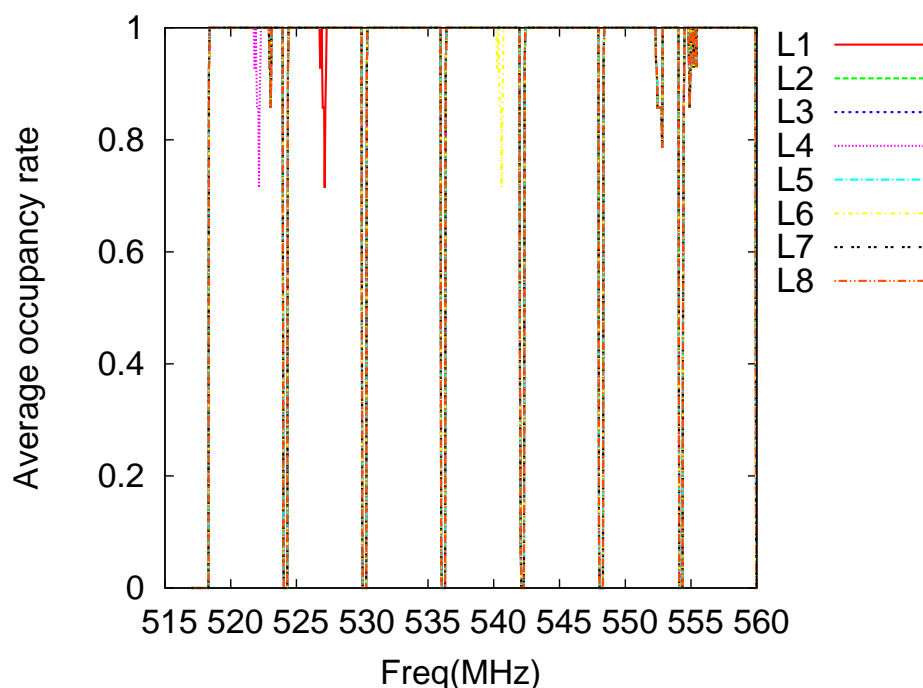


図 5.4: 517 MHz~560 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

参考に, 中心周波数が 521.14 MHz, 527.14 MHz, 533.14 MHz, 539.14 MHz, 545.14 MHz, 551.14 MHz, そして 557.14 MHz はそれぞれ, 関東地域における, フジテレビ, TBS,

テレビ東京，テレビ朝日，日本テレビ，NHK 教育，そしてNHK 総合に当たる．

また，図 5.5 は，213～219 MHz 帯の携帯電話向けマルチメディア放送の測定地点毎の利用状況を示している．横軸は周波数 (MHz)，縦軸は平均占有率である．測定地点は，図 5.5 のように，色によって L1～L8 まで区別している．図 5.5 から分かるように，全ての帯域において高い占有率が記録されており，また全ての測定地点においてもほぼ同じ占有率が記録されている．すなわち，測定地点毎に周波数の利用状況の差はほぼない．

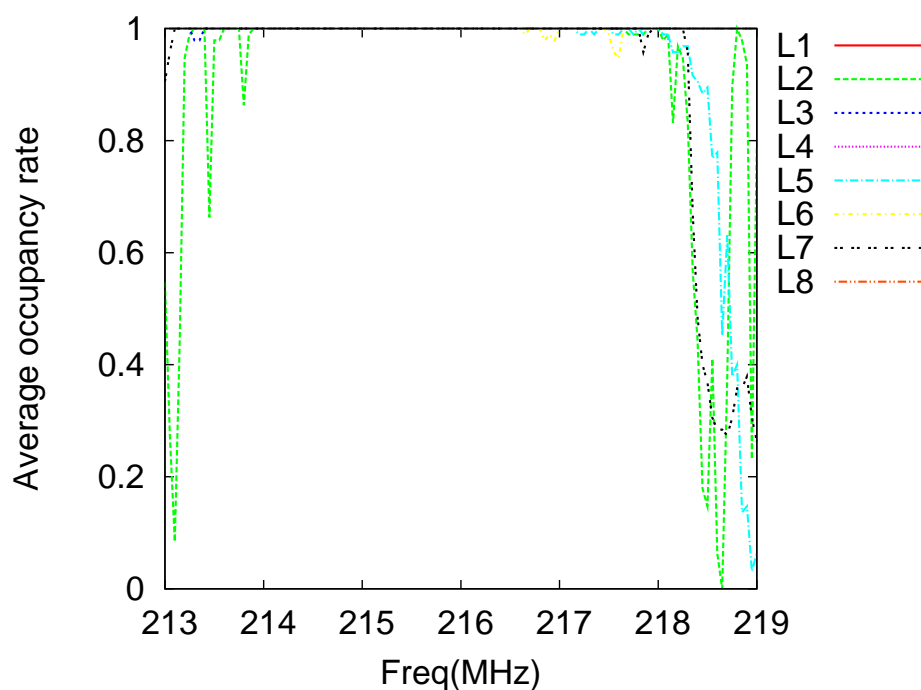


図 5.5: 213 MHz～219 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

213～219 MHz 帯がこのような結果を示している理由は，デジタルテレビの帯域同様に，送信電力の非常に高い送信局が全地域をカバーしているためである．デジタルテレビ帯域の送信局は東京タワーに位置しており，送信電力は 20 kW の高く，送信局の高さも 100 m 以上に位置している．このため，東京の都心の殆どをカバーしている．このため，同じ都心であれば，図 5.5 のように，その利用状況はほぼ同

一である。

また、図 5.6 は、382~389 MHz 帯の電気事業用無線やガス事業用無線の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図 5.6 のように、色によって L1~L8 まで区別している。図 5.5 から分かるように、全ての帯域において高い占有率が記録されており、また全ての測定地点においてもほぼ同じ占有率が記録されている。すなわち、測定地点毎に周波数の利用状況の差はほぼない。

382~389 MHz 帯がこのような結果を示している理由は、電気事業用無線やガス事業用無線は一定地域の公共業務に向けた無線であるためである。送信局は東京都心をカバーするように配置されており、同じ都心であれば、図 5.6 のように、その利用状況はほぼ同一である。

このような観点から、860~870 MHz 帯は携帯電話システム、517~560 MHz 帯と 213~219 MHz 帯デジタル放送システム、そして 382~389 MHz 帯は電気およびガス事業用無線であり、その送信局の特徴から、図 5.3、図 5.4、図 5.5、図 5.6 のように、測定地点ごとにその利用状況がほぼ一致していることを確認できる。

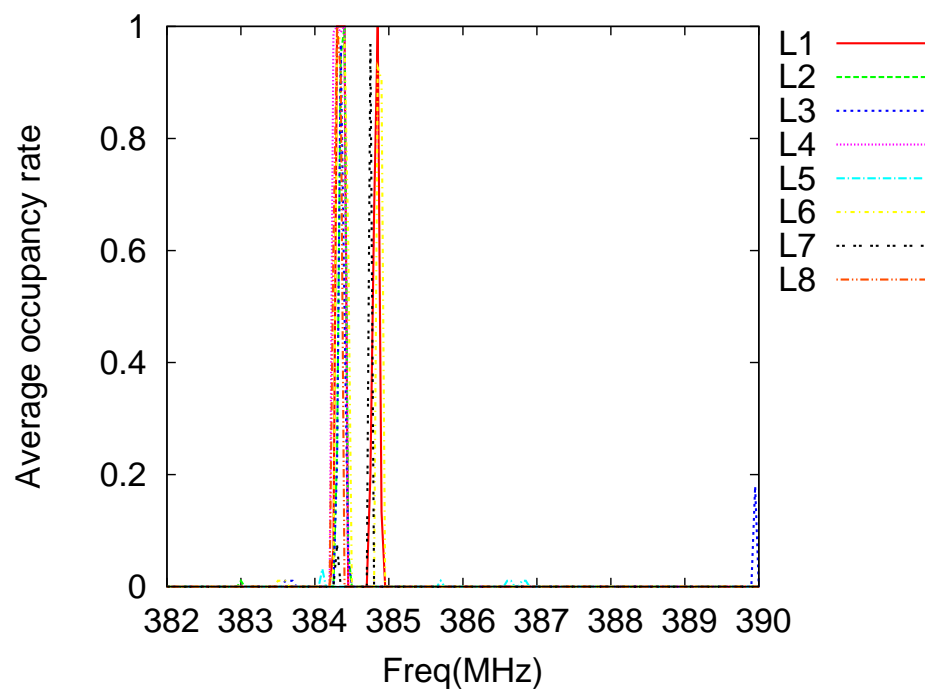


図 5.6: 382 MHz~389 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

### 5.3.2 周波数の利用状況が測定場所ごとに異なる例

周波数の利用状況が測定場所ごとに異なる例として、144~146 MHz 帯 (図 5.7)、146~146.5 MHz 帯 (図 5.8)、147~148 MHz 帯 (図 5.9)、352~352.75 MHz 帯 (図 5.10) そして 398~400 MHz 帯 (図 5.11) を示す。

144~146 MHz 帯にはアマチュア無線、146~146.5 MHz 帯にはバス無線、147~148 MHz 帯には地方鉄道無線、352~352.75 MHz 帯には JR 列車無線、そして 398~400 MHz 帯には道路管理用の無線などが運用されている。

まず、図 5.7 は、144~146 MHz 帯のアマチュア無線の帯域の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図 5.7 のように、色によって L1~L8 まで区別している。図 5.7 から分かるように、帯域毎に占有率は異なり、また、測定地点ごとにも異なることが確認できる。すなわち、測定地点ごとに周波数の利用状況が異なる。

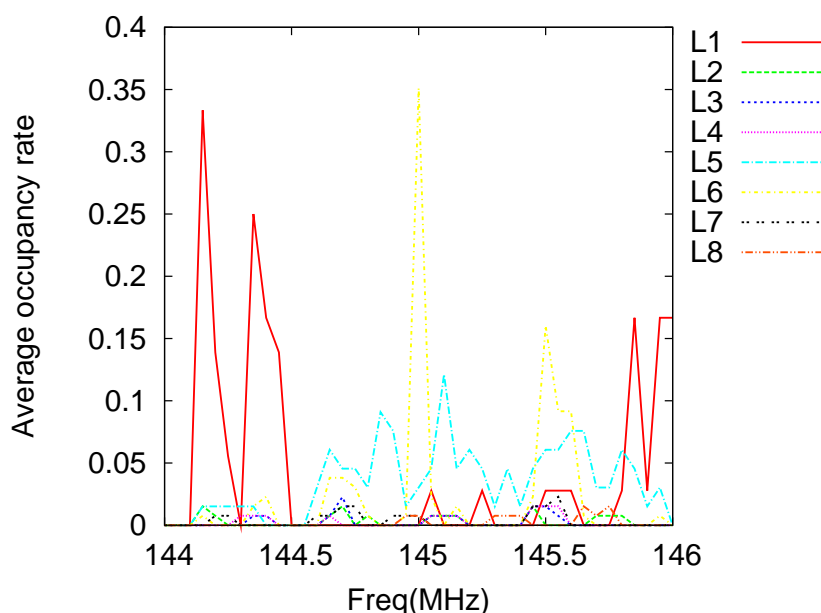


図 5.7: 144 MHz~146 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).



144~146 MHz 帯がこのような結果を示している理由は、アマチュア無線の送信局は携帯電話やデジタル放送の送信局と異なり、送信電力が 50 W 以下と低く、またその送信局がまばらに存在しているためである。また、送信局が存在しても、常に電波を発射してなく、占有されない時間帯も存在する。このため、同じ都心でも、図 5.7 のように、測定地域によって利用状況が異なる。

次に、図 5.8 は、146~146.5 MHz 帯のバス無線用の帯域の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図 5.8 のように、色によって L1~L8 まで区別している。図 5.8 から分かるように、帯域毎に占有率は異なり、また、測定地点ごとにも異なることが確認できる。すなわち、測定地点ごとに周波数の利用状況が異なる。

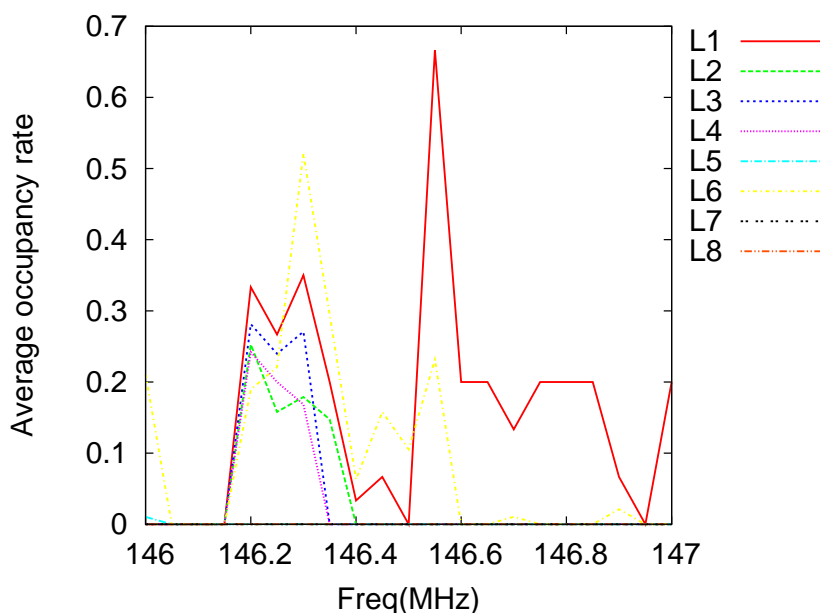


図 5.8: 146 MHz~146.5 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

146~146.5 MHz 帯がこのような結果を示している理由は、バス無線用の送信局は、送信局が密に存在する携帯電話や、広い送信範囲を持つデジタル放送の送信局と異なり、バス会社ごとに周波数が割り当てられているためである。すなわち、特定地

域でのみ使われている可能性が高い。このため、同じ都心でも、図 5.8 のように、測定地域によって利用状況が異なる。特に、146.24 MHz に対しては、L6 から比較的近い地域に基地局が存在するため、他の測定地点より高い占有率が測定される。

また、図 5.9 は、147~148 MHz 帯の地方鉄道無線用の帯域の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図 5.9 のように、色によって L1~L8 まで区別している。図 5.9 から分かるように、帯域毎に占有率は異なり、また、測定地点ごとにも異なることが確認できる。すなわち、測定地点ごとに周波数の利用状況が異なる。

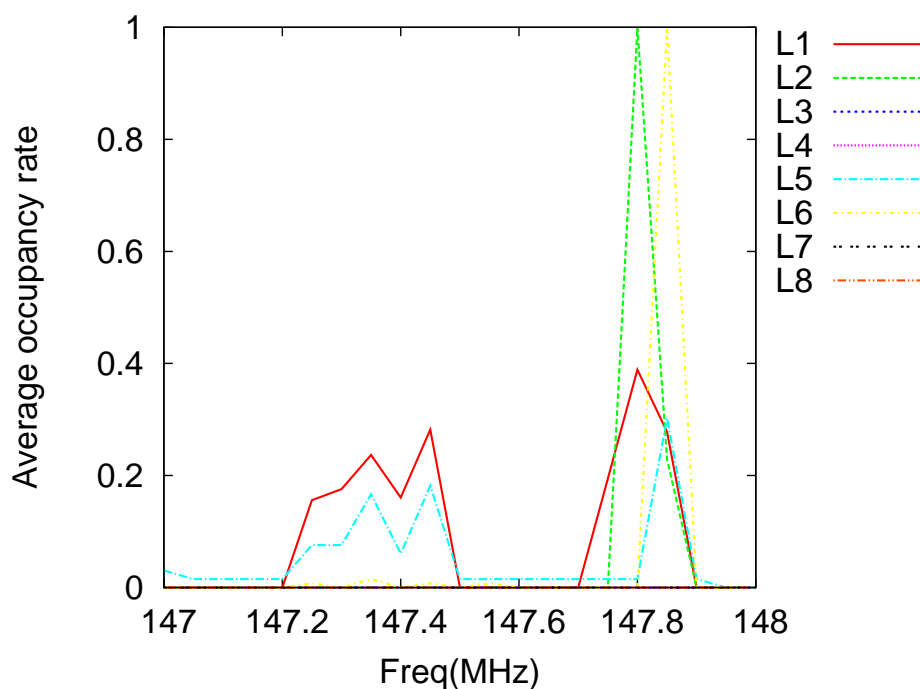


図 5.9: 147 MHz~148 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

147~148 MHz 帯がこのような結果を示している理由は、地方鉄道無線用の送信局は、送信局が密に存在する携帯電話や、広い送信範囲を持つデジタル放送の送信局と異なり、鉄道の路線ごとに周波数が割り当てられているためである。すなわち、特定地域でのみ使われている可能性が高い。このため、同じ都心でも、図 5.9 のよ

うに、測定地域によって利用状況が異なる。特に、各路線から地理的に近いL2の占有率は、図5.9のように、比較的高い占有率が観測される。

さらに、図5.10は、352~352.75 MHz帯のJR列車無線用の帯域の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図5.10のように、色によってL1~L8まで区別している。図5.10から分かるように、帯域毎に占有率は異なり、また、測定地点ごとにも異なることが確認できる。すなわち、測定地点ごとに周波数の利用状況が異なる。

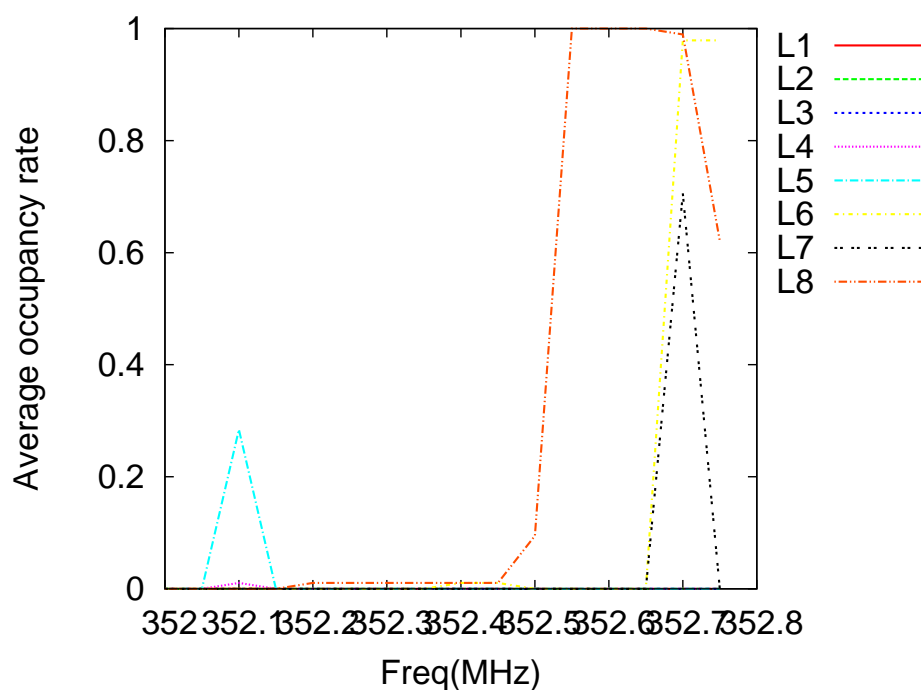


図 5.10: 352 MHz~352.75 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

352~352.75 MHz帯がこのような結果を示している理由は、JR列車無線用の送信局は、送信局が密に存在する携帯電話や、広い送信範囲を持つデジタル放送の送信局と異なり、JR列車の路線ごとに周波数が割り当てられているためである。すなわち、特定地域でのみ使われている可能性が高い。このため、同じ都心でも、図5.10のように、測定地域によって利用状況が異なる。特に、複数のJR路線が近接する

L8においては、図 5.10 のように、広い帯域に渡って高い占有率が観測される。

最後に、図 5.11 は、398~400 MHz 帯の道路管理用の無線の帯域の測定地点毎の利用状況を示している。横軸は周波数 (MHz)、縦軸は平均占有率である。測定地点は、図 5.11 のように、色によって L1~L8 まで区別している。図 5.11 から分かるように、帯域毎に占有率は異なり、また、測定地点ごとにも異なることが確認できる。すなわち、測定地点ごとに周波数の利用状況が異なる。

398~400 MHz 帯がこのような結果を示している理由は、道路管理用の無線の送信局は、送信局が密に存在する携帯電話や、広い送信範囲を持つデジタル放送の送信局と異なり、高速道路などを中心に割り当てられているためである。すなわち、特定地域でのみ使われている可能性が高い。このため、同じ都心でも、図 5.11 のように、測定地域によって利用状況が異なる。特に、比較的高速道路から近い L4 では、図 5.11 のように、比較的高い占有率が観測される。

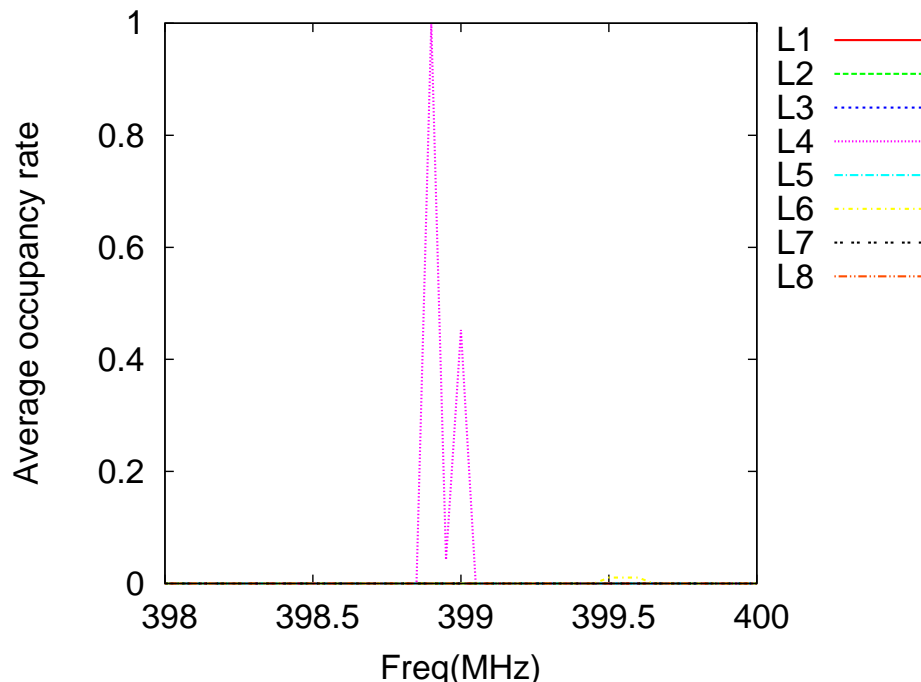


図 5.11: 398 MHz~400 MHz の測定地点ごとの平均占有率 (RBW=50 kHz).

## 5.3.3 その他

前述した帯域以外に、測定場所により周波数の利用状況が変化する例として、850～860MHz帯、271～275MHz帯、352.75～356MHz帯、そして450～452MHz帯をそれぞれ図5.12、図5.13、図5.14、図5.15に示す。850～860MHz帯にはMCA無線、271～275MHz帯には消防庁のデジタル実験局、352.75～356MHz帯には移動警電の警察用無線、そして450～452MHz帯にはタクシー用無線などが運用されている。以上の帯域では、送信局の位置や運用方法などが明らかでないため、測定地点ごとに測定結果が異なる理由を明確にするのは困難である。地域ごとに、利用されるチャンネルや時間などが異なることが測定地点ごとに測定結果が異なる原因だとは予測できる。

このように、本高密度スペクトラムセンシングの屋外実験により、周波数の利用状況の空間的な変化を把握できることが確認できる。

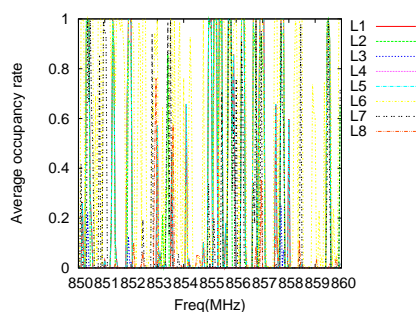


図 5.12: 850～860 MHz 帯の平均占有率

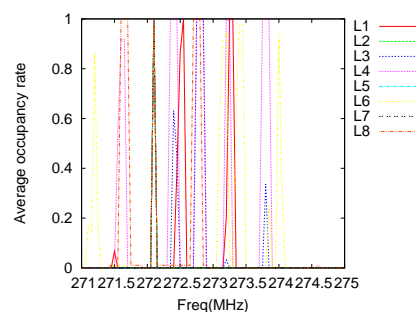


図 5.13: 271 MHz～275 MHz の平均占有率

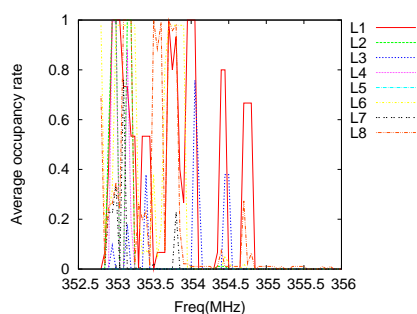


図 5.14: 352.75 MHz～356 MHz の平均占有率

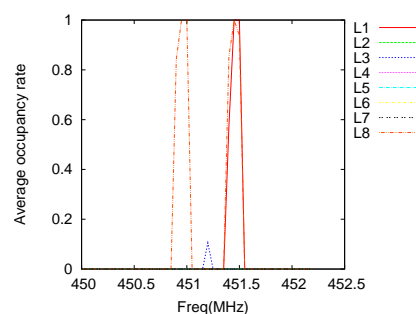


図 5.15: 450 MHz～452 MHz の平均占有率

## 5.4 動的 RBW の有効性

高密度に配置したスペクトラムセンサ同士で測定結果を共有することで、RBW を広く取ることによるノイズフロア増加の影響を最小化できることを実測例を用いて示す。

高密度測定の実測を行うために、50~870 MHz 帯に対して東京都内 8ヶ所で 24 時間測定を行った (図 5.1)。その結果から、147.86MHz の地方鉄道用無線 (占有帯域幅：12.5 kHz) に対して、それぞれ 6 MHz, 50 kHz, そして 5 kHz の RBW で電力を測定した。各測定地点での 147.86 MHz の信号源からの距離は表 5.1 のようになる。近い順に、L2 (約 50 m), L4 (約 290 m), L1 (約 310 m), L3 (約 430 m), L5 (約 570 m), L6 (約 2.2 km), L7 (約 5.4 km), そして L8 (約 10.2 km) である。

これを基に、147.86 MHz の帯域を RBW6 MHz で測定した電力測定値 (dBm) を図 5.16 に、RBW50 kHz で測定した時の電力測定値を図 5.17 に、RBW5 kHz で測定した時の電力測定値を図 5.18 に示す。図 5.16, 5.17, そして 5.18 の x 軸は時間 (24 時間), y 軸は電力値 (dBm) である。図 5.16, 5.17, そして 5.18 から、RBW を広く取ることによってノイズフロアが増加し、信号を検出できなくなる場所が存在することを確認できる。一方、送信局から地理的に近い L2 では、受信した電力値が比較的高く、RBW を広く取った場合でも信号を検出している。周辺センサは、L2 の測定結果を共有することで、信号がノイズフロアに埋もれた場合でも信号を検出できる。このように、センサを高密度で配置することで、送信局から地理的に隣接したセンサが信号を検出し、ノイズフロアの増加の影響を最小化できる。

また、周辺のセンサからの測定データを共有することで、RBW を広く取ることによるノイズフロア増加の影響を最小化し、動的 RBW 方式を実現できることを図 5.19

表 5.1: 送信局からの距離.

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
distance	310 m	50 m	430 m	290 m	570 m	2.2 km	5.4 km	10.2 km

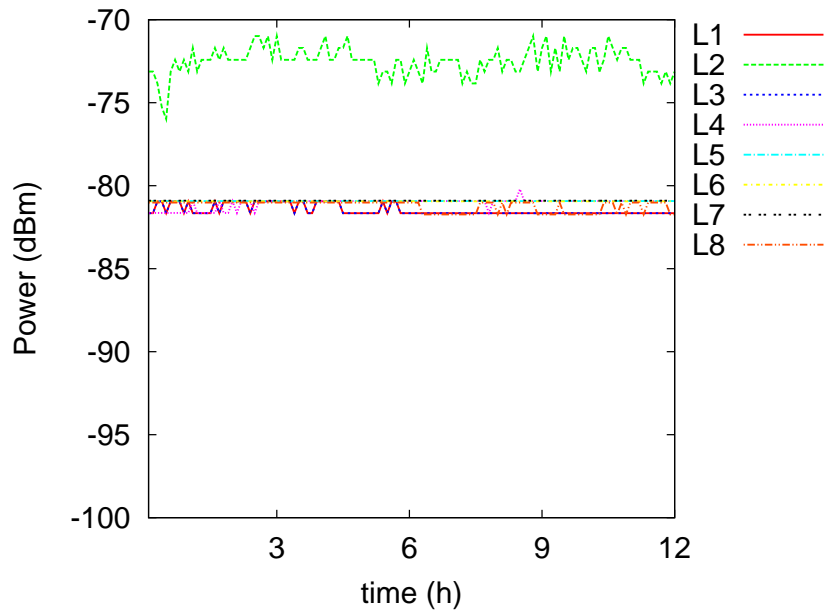


図 5.16: 147.86 MHz における RBW6 MHz の電力測定地 (dBm).

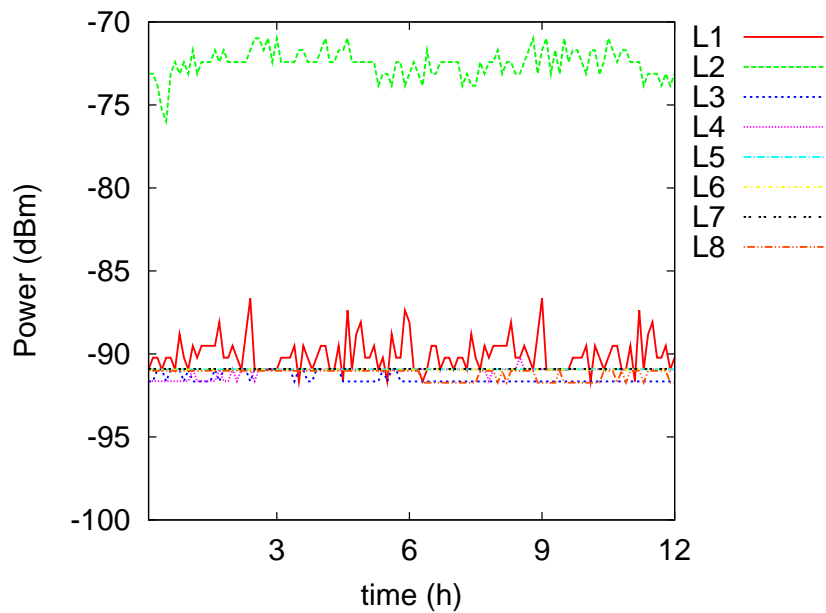


図 5.17: 147.86 MHz における RBW50 kHz の電力測定地 (dBm).

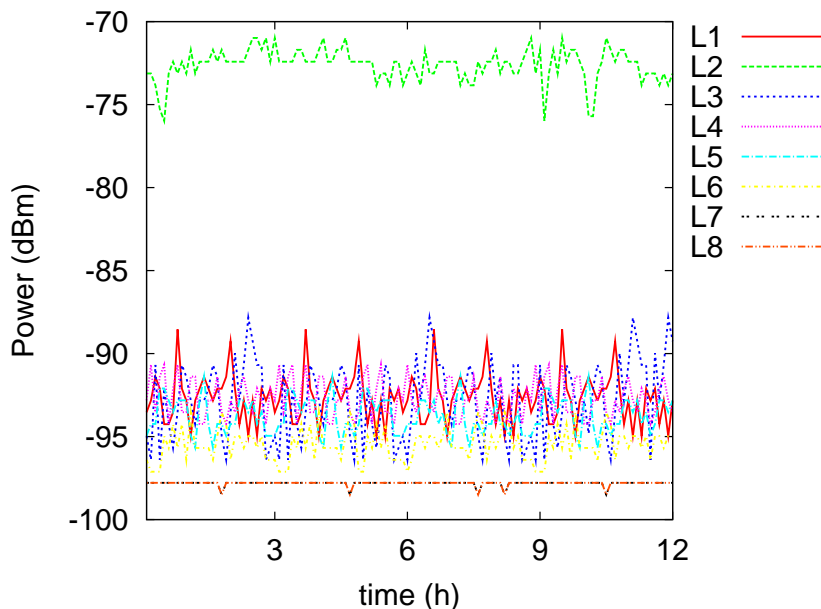


図 5.18: 147.86 MHz における RBW5 kHz の電力測定地 (dBm). .

の測定例を用いて示す．まず，6 MHz で掃引をはじめめる．147 MHz 帯において，占有率が高い地域は，L2 であり，これを基に，L2 の周辺のセンサ，L1～L6 は RBW を 50 kHz に切り替えて測定を行う．50 kHz の RBW で測定した結果，147.8 MHz 帯において，L2 や L1 の占有率が高いことが確認できる．同じく，周辺の L1～L6 は RBW を 5 kHz に変換し，その帯域を測定する．RBW を 5 kHz にした結果，L1～L6 のすべての地域において，147.65～147.75 MHz は殆ど利用されず，147.86 MHz 帯は頻繁に利用されてることを確認できる．すなわち，地域ごとの周波数の利用状況を，高速かつ詳細に把握することができる．

一方，図 5.19 において，RBW が 6 MHz, 50 kHz の時に L1 および L2 以外の測定地点で電波が検出されなかったのは，図 5.16，5.17，そして 5.18 のように，RBW を広く取ることでノイズフロアが増加したためである．しかしながら，センサが高密度に配置されていれば，送信局から近いセンサが比較的強い電力を受信するため，ノイズフロアが高くて電波を検出できる．



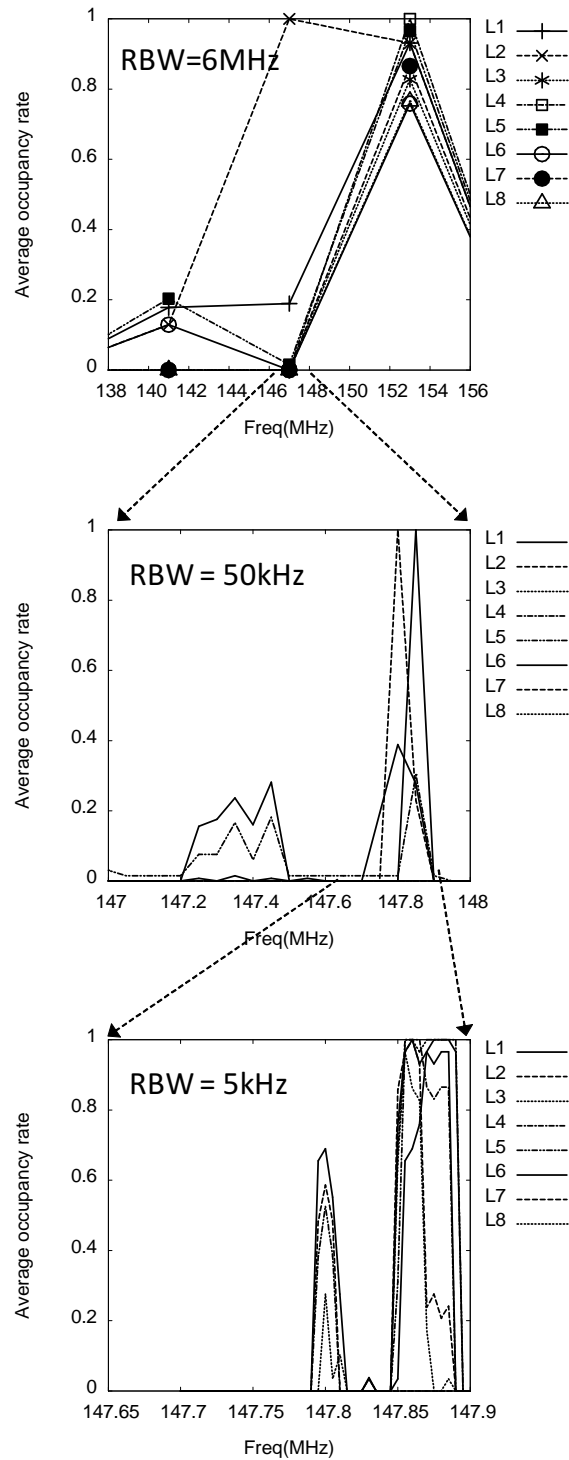


図 5.19: 動的 RBW 方式の適用例.

このような観点から、動的 RBW 方式が有効であることを確認できた。しかしながら、周辺センサからの測定データの共有方法については、今後の検討が必要である。今は、共有したデータからの判定方法として OR ルール [97] を想定しているが、例えば、AND、M-out-of-N、そして half-voting ルールなどの他の判定方法 [97] や、データを共有するセンサの数や範囲なども検討する必要がある。

## 5.5 おわりに

本章では、3章で実装した低コストスペクトラムセンサ 8 台を用いて、実測実験を行い、その結果を示した。例えば、携帯電話下りの帯域では、送信局(携帯電話の基地局)が空間的に細かく配置されているため、どの地域でも占有率が高く測定される。それに対して、送信電力が比較的低く、送信局がまばらに存在するアマチュア無線帯域では空間的に利用状況が異なることが確認できる。また、路線ごとにチャンネルが割り当てられる地方鉄道無線に対しても、測定地点によって占有率が異なることが確認できる。このように、周波数の利用状況の空間的な変化を把握できることが確認できる。最後に、実測実験の結果から、周辺のセンサからの測定データを共有することで、RBW を広く取ることによるノイズフロア増加の影響を最小化し、動的 RBW 方式を実現できることを示した。

## 第6章 結論

---

## 6.1 本研究の主たる結果

本論文では、周波数資源の有効利用に向けた高密度スペクトラムセンシングシステムの設計・実装・評価を行った。まず、周波数資源の有効利用に向けて、周波数の利用状況の把握が必要であることを示した。従来の周波数の利用状況の把握方法を概観し、高密度スペクトラムセンシングの必要性を述べた。高密度スペクトラムセンシングの実現に向けては、センサの低コスト化および測定精度の向上が必要であることを指摘した。これに向け、筆者らは、低コストスペクトラムセンサの設計と実装を示し、動的 RBW 方式の利用を提案した。

次に、具体的な低コストスペクトラムセンサの設計と、動的 RBW 方式の提案を行った。スペクトラムセンサは、様々な無線システムを測定するため、多様な RBW を用いて広帯域を測定する機能が求められる。これに向け、半導体部品数を最小化し、標準品の市販の部品を用いることで、低コストスペクトラムセンサを実現した。また、掃引時間と周波数分解能のトレードオフを考慮し、適切な周波数分解能を確保しながら掃引時間の短縮を実現する動的 RBW 方式を提案した。

次いで、設計した低コストスペクトラムセンサと、動的 RBW 方式の有効性の評価を行った。低コストスペクトラムセンサの信号測定の精度は、実験評価により、高密度スペクトラムセンシングに向けて有効利用できることが示された。また、周波数が占有された時間の割合を意味する占有率を測定、市販のスペクトラムアナライザと比較した結果、占有率の時間的変化が少ない帯域では市販のスペクトラムアナライザとほぼ同精度の測定が可能であることを確認した。時間的に利用状況が変化する帯域においては占有率の測定精度が多少落ちるものの、RBW を可変し掃引時間を高速化する動的 RBW 方式を用いることで、測定精度を向上できることを述べた。

最後に、実装した低コストスペクトラムセンサを用いて実測実験を行い、その結果を示した。具体的には、低コストスペクトラムセンサを 8 台分散配置し、同時測定を行った。送信局 (携帯電話の基地局) が空間的に細かく配置されている携帯電

話下りの帯域などでは，どの地域でも占有率が高く測定された．これに対して，送信電力が比較的 low，送信局がまばらに存在するアマチュア無線帯域や，路線ごとにチャンネルが割り当てられる地方鉄道無線帯域では，空間的に利用状況が異なることが確認できた．さらに，実測実験の結果から，周辺のセンサからの測定データを共有することで，RBW を広く取ることによるノイズフロア増加の影響を最小化し，動的 RBW 方式を実現できることを示した．

## 6.2 今後の課題

今後の課題としては，スペクトラムセンサの広域への展開と運用問題の解決，そして動的 RBW 方式に向けた周辺センサからの測定データを共有する協調センシングの検討が挙げられる．

まず，実装したシステムを実環境に展開し，実際に運用を行うことで，運用上の課題の発見と問題解決が必要である．予想される課題としては，膨大な測定データの蓄積を長期間にわたって行うことによるデータサイズに関するスケーラビリティの確保がある．解決方法としては，電波の性質を応用して，効率の良いスペクトラムの記述・圧縮の手法や，古いデータは統計的な情報のみを残して削除することを想定している．圧縮が非可逆である場合や統計的な情報を残す場合に，どのような情報を残せば電波政策上有益であるのかを，実際に測定したスペクトラムを基に検討する．以上に加えて，膨大なスペクトラムセンサの管理を行うためのスペクトラムセンサの収容数に関するスケーラビリティの確保も課題と考えられる．解決方法としては，複数のサーバを用いて，スペクトラムセンサの分散管理する方法を想定している．この場合，サーバをまたいで，分散して保存された情報をシームレスにアクセスする機構を検討する必要がある．

さらに，動的 RBW 方式の実現に向け，周辺センサからの測定データを共有する協調センシングの検討を行う．動的 RBW 方式が有効であることを確認できたが，周辺センサからの測定データの共有方法については，今後の検討が必要である．今

は、共有したデータからの判定方法として OR ルール [97] を想定しているが、例えば、AND、M-out-of-N、そして half-voting ルールなどの他の判定方法 [97] や、データを共有するセンサの数や範囲なども検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] “FCC Spectrum Policy Task Force: Report of the spectrum efficiency working group,” November 2002.
- [2] 総務省 , <http://www.soumu.go.jp>.
- [3] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty, “NeXt generation/ dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey,” *Comput. Netw.*, vol. 50, no. 13, pp. 2127-2159, Sep. 2006.
- [4] Q. Zhao and B. M. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79-89, May 2007.
- [5] Q. Zhao, L. Tong, and A. Swami, “Decentralized cognitive MAC for dynamic spectrum access,” in *Proc. 1st IEEE Int. Symp. DySPAN*, Nov. 2005, pp. 224-232.
- [6] Z. Ji and K. J. R. Liu, “Cognitive radios for dynamic spectrum access - Dynamic spectrum sharing: A game theoretical overview,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 5, pp. 88-94, May 2007.
- [7] J. Mitola, III, “Software radio architecture: A mathematical perspective,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 514-538, Apr. 1999.
- [8] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [9] S.-Y. Tu, K.-C. Chen, and R. Prasad, “Spectrum sensing of OFDMA systems for cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3410-3425, Sep. 2009.
- [10] M. Cave, C. Doyle, W. Webb, *Essentials of modern spectrum management*, Cambridge University Press, 2007.
- [11] J. M. Peha, “Sharing spectrum through spectrum policy reform and cognitive radio,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 4, pp. 708-719, 2009.

- [12] J. McMillan, "Selling spectrum rights," *Journal of Economic Perspectives*, pp. 145-162, 1994.
- [13] H. B. Chang, and K. C. Chen, "Auction Based Spectrum Management for Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 1923-1935, Spr. 2009.
- [14] M. R. Kelley, "The Spectrum Auction: Big Money and Lots of Unanswered Questions," *Internet Computing, IEEE* , vol.12, no.1, pp.66-70, Jan.-Feb. 2008.
- [15] M. J. Marcus, "Wireless research topics with spectrum policy significance," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 4-4, Dec. 2010.
- [16] M.J. Marcus, "Basics of spectrum policy for the wireless engineer," *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 4-5, Jun. 2006.
- [17] O. Aftab, "Economic mechanisms for efficient wireless coexistence," *Mass. Inst. Technol., Press, Cambridge, MA, MIT Tech. Rep. MIT-LCSTR- 876*, Aug. 2002.
- [18] C. Kloeck, H. Jaekel, and F. K. Jondral, "Dynamic and local combined pricing, allocation and billing system with cognitive radios," in *Proc. 1st IEEE Int. Symp. DySPAN*, Nov. 2005, vol. 2, no. 1, pp. 73-81.
- [19] H. R. Varian and J. K. MacKie-Mason, *Generalized Vickrey auctions*, Univ. Michigan Press, Ann Arbor, MI. [Online]. Available: <http://ssrn.com/abstract=975873>
- [20] E. M. Noam, "Taking the Next Step Beyond Spectrum Auctions: Open Spectrum Access," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 33, no. 12, Dec. 1995, pp. 66-73.
- [21] C. Cordeiro, K. Challapali, and D. Birru, "IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios," *Journal of communications*, vol. 1, no. 1, Apr. 2006.
- [22] K.-C. Chen, Y.-J. Peng, N. R. Prasad, Y.-C. Liang, and S. Sun, "Cognitive radio network architecture: Part I - General structure," in *Proc. ACM ICUIMC*, Seoul, Korea, 2008, pp. 114-119.
- [23] K.-C. Chen and R. Prasad, *Cognitive Radio Networks*. Hoboken, NJ:Wiley, 2009.
- [24] C.-K. Yu and K.-C. Chen, "Radio resource tomography of cognitive radio networks," in *Proc. IEEE 69th VTC-Spring*, Apr. 26-29, 2009, pp. 1-5.
- [25] S.-Y. Lien, N. R. Prasad, K.-C. Chen, and C.-W. Su, "Providing statistical quality-of-service guarantees in cognitive radio networks with cooperation," in *Proc. 2nd Int. Workshop Cognitive Radio Adv. Spectr. Manage.*, May 18-20, 2009, pp. 6-11.



- [26] S.-Y. Lien, C.-C. Tseng, and K.-C. Chen, "Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks," in Proc. IEEE ICC, May 19-23, 2008, pp. 3208-3214.
- [27] D. Datla, A. M. Wyglinski, and G. J. Minden, "A spectrum surveying framework for dynamic spectrum access networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 58, no. 8, pp. 4158-4168, Oct. 2009.
- [28] M.A. McHenry, P.A. Tenhula, D. McCloskey, D.A. Roberson, and C. S. Hood, "Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal," Proc. 1st international workshop on Technology and policy for accessing spectrum (TAPAS 2006), Boston, MA, USA, Aug. 2006.
- [29] K.A. Qaraqe, H. Celebi, A. Gorcin, A. El-Saigh, H. Arslan, and M.s. Alouini, "Empirical results for wideband multidimensional spectrum usage," IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2009), Tokyo, Japan, Jul. 2009.
- [30] M. Islam, C. Koh, S. Oh, X. Qing, Y. Lai, C. Wang, Y.C. Liang, B. Toh, F. Chin, G. Tan, and W. Toh, "Spectrum survey in Singapore: occupancy measurements and analyses," Proc. 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), pp. 1-7, Singapore, May. 2008.
- [31] M. Lopez-Benitez, A. Umbert, and F. Casadevall, "Evaluation of spectrum occupancy in Spain for cognitive radio applications," IEEE 69th Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2009), Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [32] V. Valenta, Z. Fedra, R. Marsalek, G. Baudoin, and M. Villegas, "Towards cognitive radio networks: spectrum utilization measurements in suburb environment," IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS '09), San Diego, California, Jan. 2009.
- [33] A. Martian, I. Marcu, and I. Marghescu, "Spectrum occupancy in an urban environment: a cognitive radio approach," Sixth Advanced International Conference on Telecommunication (AICT 2010), Barcelona, Spain, May 2010.
- [34] Y. Han, Y. Wen, W. Tang, and S. Li, "Spectrum occupancy measurement: focus on the TV Frequency," 2nd International Conference on Signal Processing System (ICSPS 2010), Dalian, China, Jul. 2010.
- [35] R. de Francisco and A. Pandharipande, "Spectrum occupancy in the 2.36-2.4 GHz band: measurements and analysis," European Wireless Conference (EW), Lucca, Italy, Apr. 2010.

- [36] R.B. Bacchus, A.F. Fertner, C.S. Hood, and D.A. Roberson, "Long-term, wide-band spectral monitoring in support of dynamic spectrum access Networks at the IIT Spectrum Observatory," Proc. 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2008), pp.1-10, Chicago, IL, USA, Oct. 2008.
- [37] R.B. Bacchus, T. Taher, K. Zdunek, and D.A. Roberson, "Spectrum utilization study in support of dynamic spectrum access for public safety," IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2010), Singapore, Apr. 2010.
- [38] O. Holland, P. Cordier, M. Muck, L. Mazet, C. Klock, and T. Renk, "Spectrum power measurements in 2G and 3G cellular phone bands during the 2006 football world cup in germany," Proc. 2nd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2008), pp.575-578, Dublin, Ireland, Apr. 2008.
- [39] T. Renk, C. Kloeck, F.K. Jondral, P. Cordier, O. Holland, and F. Negredo, "Spectrum measurements supporting reconfiguration in heterogeneous networks," 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Budapest, Hungary, Jul. 2007.
- [40] M. Wellens, J. Wu, and P. Mahonen, "Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of cognitive radio," Proc. 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2007), pp. 420-427, Orlando, FL, USA, Aug. 2007.
- [41] R. Chiang, G. Rowe, and K. Sowerby, "A quantitative analysis of spectral occupancy measurement for cognitive radio," Proc. 65th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2007), pp. 3016-3020, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [42] V. Blaschke, H. Jaekel, T. Renk, C. Kloeck, and F.K. Jondral, "Occupation measurements supporting dynamic spectrum allocation for cognitive radio design," Proc. 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2007), pp.50-57, Orlando, FL, USA, Aug. 2007.
- [43] M. Wellens, J. Riihijarvi, M. Gordziel, and P. Mahonen, "Spatial statistics of spectrum usage: from measurements to spectrum models," IEEE International Conference on Communications (ICC '09), Dresden, Germany, Jun. 2009.
- [44] M. Biggs, A. Henley, and T. Clarkson, "Occupancy analysis of the 2.4 GHz ISM band," IEE Proc. Communications, Vol.151, No.5, pp.481-488, Oct. 2004.

- [45] A. Petrin and P.G. Steffes, "Analysis and comparison of spectrum measurements performed in urban and rural areas to determine the total amount of spectrum usage," 2005 International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder, Colorado, Mar. 2005.
- [46] S. Pagadarai, A.M. Wyglinski, and R. Vuyyuru, "Characterization of vacant UHF TV channels for vehicular dynamic spectrum access," First IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2009), Tokyo, Japan, Oct. 2009.
- [47] "Office of Communications." Available: <http://www.ofcom.org.uk/>.
- [48] Y. Li, T. Quang, Y. Kawahara, T. Asami, and M. Kusunoki, "Building a Spectrum Map for Future Cognitive Radio Technology," Proc. ACM International Workshop on Cognitive Radio Networks (CoRoNet 2009), Beijing, China, Sep. 2009.
- [49] J. Riihijarvi, P. Mahonen, M. Wellens, and M. Gordziel, "Characterization and modelling of spectrum for dynamic spectrum access with spatial statistics and random fields" IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008), Cannes, France, Sep. 2008.
- [50] D. Chen, S. Yin, Q. Zhang, M. Liu, and S. Li, "Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study," Proc. 15th ACM international conference on Mobile computing and networking (MobiCom 2009), pp. 13-24, 2009.
- [51] S.W. Ellingson, "Spectral occupancy at VHF: Implications for frequency-agile cognitive radios," IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2005), Dallas, Texas, Sep. 2005.
- [52] S.D. Jones, E. Jung, X Liu, N. Merheb, and I. Wang, "Characterization of spectrum activities in the U.S. public safety band for opportunistic spectrum access," 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007), Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [53] F. Weidling, D. Datla, V. Petty, P. Krishnan, and G. Minden, "A framework for RF spectrum measurements and analysis," Proc. 1st IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), pp.573-576, Baltimore, MD, USA, Nov. 2005.
- [54] 総務省, "電波利用状況の实地調査結果について," 2010.
- [55] D. Datla, R. Rajbanshi, A.M. Wyglinski, and G.J. Minden, "Parametric adaptive spectrum sensing framework for dynamic spectrum access networks," Proc. 2nd

- IEEE Int. Symp. New Frontiers Dyn. Spectrum Access Netw., pp. 482-485, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [56] D. Willkomm, S. Machiraju, J. Bolot, A. Wolisz, “Primary users in cellular networks: a large-scale measurement study,” Proc. 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2008), pp.1-11, Chicago, IL, USA, Oct. 2008.
- [57] D.A. Roberson, C.S. Hood, J.L. LoCicero, and J.T. MacDonald, “Spectral occupancy and interference studies in support of cognitive radio technology deployment,” Proc. IEEE Workshop Networking Technologies SDR, pp. 26-35, Sept. 2006.
- [58] D.J. Percival, M. Kraetzl, and M.S. Britton, “A markov model for HF spectral occupancy in Central Australia,” Proc. 7th Int. Conf. High Frequency Radio Syst. Tech., pp. 14-18, Nottingham, U.K., Jul. 1997.
- [59] S. R. Fleurke, H. G. Dehling, H. K. Leonhard, A. D. Brinkerink, and R. den Besten, “Measurement and statistical analysis of spectrum occupancy,” European Trans. Telecommun., vol. 15, no. 5, pp. 429-436, 2004.
- [60] A.D. Spaulding, and G.H. Hagn, “On the definition and estimation of spectrum occupancy,” IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol.19, no.3, pp.269-280, Aug. 1977.
- [61] J. Naganawa, H. Kim, S. Saruwatari, H. Onaga, and H. Morikawa, “Distributed Spectrum Sensing Utilizing Heterogeneous Wireless Devices and Measurement Equipment,” Proc. IEEE 5th Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2011), Aachen, Germany, May. 2011.
- [62] 長縄潤一, 西村亨輔, 金昊俊, 猿渡俊介, 翁長久, 森川博之, “広範囲・高密度に展開可能な分散スペクトラムセンシングの設計と実装,” 信学技報, RCS2009-342, Mar. 2010.
- [63] RWTH Aachen University Static Spectrum Occupancy Measurement Campaign, <http://download.mobnets.rwth-aachen.de/index.php>
- [64] Microsoft Research WhiteSpaceFinder, <http://whitespaces.msresearch.us/WSWebGUI/whitespaces.aspx>
- [65] U.S. Interactive TV White Space Map, <http://www.spectrumbridge.com/products-services/whitespaces/interactive-map.aspx>

- [66] 村田 英一, 大野 卓人, 山本 高至, 吉田 進, “協力スペクトルセンシングを用いたコグニティブ無線システムの開発と屋外伝送実験,” 電子情報通信学界論文誌. B, 通信 J93-B(7), 928-936, 2010-07-01.
- [67] A. Ghasemi and E.S. Sousa, “Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments,” Proc. 1st IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN2005), pp. 131-36, Baltimore, MD, USA, Nov. 2005.
- [68] A. Ghasemi and E.S. Sousa, “Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs,” IEEE Communications Magazine, vol.46, no.4, pp.32-39, Apr. 2008.
- [69] G. F. Gott, S. K. Chan, C. A. Pantjiaros, and P. J. Laycock, “High frequency spectral occupancy at the solstices,” Proc. Inst. Elect. Eng. Commun., vol. 144, no. 1, pp. 24-32, Feb. 1997.
- [70] C. A. Pantjiaros, P. J. Laycock, G. F. Gott, and S. K. Chan, “Development of the Laycock-Gott occupancy model,” Proc. Inst. Elect. Eng. Commun., vol. 144, no. 1, pp. 33-39, Feb. 1997.
- [71] 総務省, “平成 20 年度電波の利用状況調査 (770MHz 以下の周波数帯) の調査結果及び評価結果の概要,” 2008.
- [72] 総務省, “平成 22 年度電波の利用状況調査 (770MHz を超え 3.4GHz 以下の周波数帯) の調査結果及び評価結果の概要,” 2010.
- [73] 総務省, “平成 21 年度電波の利用状況調査 (3.4GHz を超える周波数帯) の調査結果及び評価結果の概要,” 2009.
- [74] H. Hashemi, “Simulation of the urban radio propagation channel,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 28, no. 3, pp. 213-225, 1979.
- [75] S.C. Kim, B.J. Guarino, T.M. Willis, V. Erceg, S.J. Fortune, R.A. Valenzuela, L.W. Thomas, J. Ling, and J.D. Moore, “Radio propagation measurements and prediction using three-dimensional ray tracing in urban environments at 908 MHz and 1.9 GHz,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 3, pp. 931-946, 1999.
- [76] R.E. Ziemer, and W.H. Tranter, *Principles of Communications*, 5th ed., New York: Wiley, 2002.

- [77] D. Cabric, S.M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios, " Proc. 38th Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput., vol. 1, pp. 772-776, Pacific Grove, CA, Nov. 2004.
- [78] R. Tandra and A. Sahai, "Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty," Proc. Int. Conf. Wireless Netw., Commun. Mobile Comput., vol. 1, pp. 464-469, 2005.
- [79] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 11, no.1, pp. 116-130, 2009.
- [80] S. D. Jones, N. Merheb, and I.-J.Wang, "An experiment for sensing-based opportunistic spectrum access in CSMA/CA networks," Proc. IEEE Int. Symp. New Frontiers Dyn. Spectrum Access Netw., Baltimore, MD, pp. 593-596, Nov. 2005.
- [81] T. Sansaloni, A. Perez-Pascual, V. Torres, V. Almenar, J.F. Toledo, and J. Valls, "FFT spectrum analyzer project for teaching digital signal processing with FPGA devices," IEEE Trans. Education, vol.50, no.3, pp.229-235, Aug. 2007.
- [82] M. Abdallah, and O. Elkeelany, "A low-cost stand-alone real-time multi-channel frequency monitoring system," Proc. IEEE SoutheastCon (SoutheastCon 2010), pp.1-4, Concord, NC, USA, Mar. 2010.
- [83] J.S. Chang and Y.C Tong, "A micropower-compatible time-multiplexed SC speech spectrum analyzer design," IEEE J. Solid-State Circuits, vol.28, no.1, pp.40-48, Jan. 1993.
- [84] Maxim Electronics, "MAX3543," Available: <http://japan.maxim-ic.com/>.
- [85] DAISHINKU CORP., Available: <http://www.kds.info/>.
- [86] FOX Electronics, "FOX924," Available: <http://www.foxonline.com/>.
- [87] Microchip Technology Inc., "PICmicro Microcontrollers," Available: <http://www.microchip.com/>.
- [88] ANALOG DEVICES, "AD8310," Available: <http://www.analog.com/>.
- [89] Future Technology Devices International Ltd., "FT232RL," Available: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.thm>.
- [90] Aglient Technologies, "8648C", Available: <http://www.home.aglient.com/>.
- [91] Rohde & Schwartz, Available: <http://www2.rohde-schwarz.com/en/products>.

- [92] Ettus Research LLC, Available: <http://www.ettus.com/>.
- [93] GNU Radio, Available: <http://gnuradio.org/>.
- [94] "COMET." Available: <http://www.comet-ant.co.jp/products/mobile/05.html>.
- [95] A. Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1994.
- [96] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. Brodersen, "Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection," Proc. 3rd IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2006), pp. 1-7, Washington, D.C., USA, Oct. 2006.
- [97] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, "Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks," Cambridge University Press, New York, 2009.

## 謝辞

まず、研究においても日常生活においても、いつも心から支えてもらった両親に感謝いたします。私の留学および研究生活は両親なしには考えられません。感謝と尊敬の意を表したいと思います。

本研究を進めていく過程で直接・間接的にご指導いただき、さまざまな知識や研究生活に対する心構えをご指導ください、日頃から適切かつ有益な指導鞭撻をいただいた森川 博之教授、長谷 良裕特別研究教授に深く感謝いたします。

講師の李 斗煥さんには研究を進める中で工学的な知識はもちろん研究者としての姿勢や人生の先輩としての助言をください、非常に良い研究環境を作ってくださいました。ここで深く感謝の意を述べたいと思います。

また、助手の鈴木 誠さんは私の修士課程から上司としてセンサネットワークおよび無線の細かい知識だけでなく、この研究を進めていく過程で先生の代わりと言っても過言ではないほどご指導鞭撻をください、また論文の書き方から研究者としての姿勢など、時には厳しく叱っていただいたり時には褒めていただいたり、幅広くご指導いただきました。本当に感謝いたします。

研究環境の整備にご尽力下さった林 幸秀特別研究教授、翁長 久特別研究助教授、森戸 貴特別研究員、川北 敦子秘書、石崎 智子秘書に深く感謝いたします。

博士過程の石田 繁巳さん、諸橋 知雄さん、浅井 光太郎さん、加美 伸治さん、劉 進志さん、黒岩 拓人さん、ギョーム プロジさん、彭 園園さん、岩元 啓くん、井上 知洋さんには森川研究室での研究生活において様々な相談相手となってくださり、励ましの言葉をかけていただきました。深く感謝いたします。

修士課程のベク ソンヘさん、奥井 寛樹くん、田代 諭拡くん、下城 拓也くん、デイビッド ゴンザレスくん、米川 慧くん、井上 雅典くん、サクデーシャヨン ティラットくん、卒論生の山下 靖貴くん、坂本 敬太くんにも感謝の気持ちをお送りいたします。

今は本研究室を卒業したイム ソヨンさん、オク ジェウクさん、ジャン ソクジンさん、キム スンジンさんは、研究室の韓国人の先輩として、研究指導はもちろん、



留學生活での悩みの相談や日常の雑談の相手もしていただき、大変こころ強かったです。深く感謝いたします。

同じく同研究室に所属していた今泉 英明さん、猿渡 俊介さん、Kunitake Kaneko さん、川西 直さん、松本 延孝さん、荒木 靖宏さん、司 化さん、上條 浩一さん、Pavel Poupyrev さん、John Lane さん、Andreas Darmawan さん、山田 直治さん、Hairej Younes さん、Udana Bandara さん、神田 敦さん、小澤 政博さん、渡部 克弥さん、Tuan Nguyen さん、Pedro Morales さん、力武 紘一郎くん、Nguyen Phi Le さん、町田 啓太くん、高木 衛くん、林 敏樹くん、大原 壮太郎くん、西村 亨輔くん、岡村 悠貴くん、Fernando Panjaitan くん、Drajat Eko Rianto くん、Timothy Lawrence Sitorus くん、長縄 潤一くん、高木 潤一郎くん、陳 宇くん、Hui Li さん、毅彰 中嶋くん、高超 くん、菅沼 久浩くん、李 睿智くん、小坂 良太くん、吉田 早人くん、Kusumine Enami くん、にも感謝の気持ちを送りたいです。

森川研究室での生活は私にとって忘れられない思い出になると思います。研究室の皆さんにこの面を借りて深く感謝の気持ちをお送りいたします。ありがとうございました。

## 発表文献

### 学術雑誌等

[1] 金 昊俊, 鈴木 誠, 長谷 良裕, 李 斗煥, 石田 繁巳, 森川 博之, “高密度スペクトラム測定に向けたスペクトラムセンサの設計と屋外実験,” 電子情報通信学会論文誌, Feb. 2013. (投稿中)

[2] 金 昊俊, 李 斗煥, 鈴木 誠, 長谷 良裕, 森川 博之, “高密度スペクトラム測定に向けた動的RBW方式の設計と実装,” 電子情報通信学会論文誌 . (投稿中)

### 国際会議

[3] D. Lee, H. Kim, Y. Tashiro, Y. Hase, M. Suzuki, and H. Morikawa, “Implementation of low cost sensor and data base for high-density spectrum measurement,” will appear in Proc. the 9th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS 2012), Aug. 2012.

[4] H. Kim, M. Suzuki, M. Minami, and H. Morikawa, “Spectrum sensor for distributed spectrum sensing,” IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp. 44-45, Jan. 2012.

[5] J. Naganawa, H. Kim, S. Saruwatari, H. Onaga, and H. Morikawa, “Distributed Spectrum Sensing Utilizing Heterogeneous Wireless Devices and Measurement Equipment,” Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'11), pp. 173-184, May 2011.

[6] J. Naganawa, H. Kim, S. Saruwatari, H. Onaga, and H. Morikawa, “Distributed Spectrum Sensing Utilizing Heterogeneous Wireless Devices and Measurement Equipment,” Internet of Things 2010 Conference (IoT 2010), Tokyo, Japan, Dec. 2010.

[7] J. Naganawa, H. Kim, K. Nishimura, S. Saruwatari, M. Suzuki, M. Minami, and H. Morikawa, “Radio Information Management for Distributed Spectrum Sensing,” in Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2009), pp.335-336, November 2009.

[8] H. Kim, M. Suzuki, S. Saruwatari, K. Nishimura, M. Minami, and H. Morikawa, “Design of a Low-cost Sensor Node for Distributed Spectrum Sensing,” in Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2009), pp.397-398, November 2009.

[9] H. Kim, “Design of a Low-cost Spectrum Sensor for Distributed Spectrum Sensing,” Asian Workshop on Ubiquitous and Embedded Computing (AWUEC 2009), Beijing, China, Aug. 2009.

[10] J. Naganawa, K. Nishimura, H. Kim, S. Saruwatari, M. Suzuki, M. Minami, and H. Morikawa, “Towards realizing distributed spectrum sensing,” The 2nd Asia-Europe Workshop on Ubiquitous Computing 2009 (AEWUC 2009), Shizuoka, Japan, Aug 2009.

## 研究会

[11] 金 昊俊, 長縄 潤一, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 翁長 久, 南 正輝, 森川 博之, “分散スペクトラムセンシングに向けたスペクトラムセンサの設計,” 電子情報通信学会技術研究報告, 無線通信システム研究会, RCS2011-40, Jun. 2011.

[12] 長縄 潤一, 西村 亨輔, 金 昊俊, 猿渡 俊介, 翁長 久, 森川 博之, “広範囲・高密度に展開可能な分散スペクトラムセンシングの設計と実装,” 電子情報通信学会技術研究報告, 無線通信システム研究会, RCS2009-342, Mar. 2010.

## 全国大会

[13] 金 昊俊, 李 斗煥, 鈴木 誠, 長谷 良裕, 森川 博之, “高密度スペクトラムセンシングに向けた動的 RBW 方式の実装と評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Sep. 2012. (発表予定)

[14] 金 昊俊, 長縄 潤一, 石田 繁巳, 鈴木 誠, 翁長 久, 森川 博之, “可変 RBW を用いた周波数占有率の測定精度の向上の初期的評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-17-8, Sep. 2011.

[15] 長縄 潤一, 金 昊俊, 猿渡 俊介, 翁長 久, 森川 博之, “分散スペクトラムセンシングにおける異種電波取得機器の統一操作方法,” 電子情報通信学会ソサイエティ大

会, B-5-94, Sep. 2010.

[16] 金 昊俊, 長 縄潤一, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 翁長 久, 南 正輝, 森川 博之, “低コストスペクトラムセンサを用いた周波数占有率測定,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-113, Mar. 2011.

[17] 金 昊俊, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 西村 亨輔, 南 正輝, 森川 博之, “分散スペクトラムセンシングに向けたセンサノードの初期的検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-68, Sep. 2009.

[18] 西村 亨輔, 金 昊俊, 長 縄潤一, 猿渡 俊介, 鈴木 誠, 南 正輝, 森川 博之, “分散スペクトラムセンシングのための電波情報管理に関する検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-69, Sep. 2009.

[19] 金昊俊, 鈴木誠, 猿渡俊介, 倉田成人, 南正輝, 森川博之, “地域規模の高密度地震モニタリングに向けた同期サンプリング機構の初期的評価”, 情報通信学会ソサイエティ大会, 2008.

[20] 鈴木誠, 倉田成人, 金昊俊, 猿渡俊介, 南正輝, 森川博之, “地震モニタリングセンサネットワークのための同期サンプリング機構,” 情報通信学会ソサイエティ大会, 2008.