

狭帯域IoT通信システムDR-IoTの周波数共同利用方法に関する検討

メタデータ	言語: ja 出版者: 情報処理学会 公開日: 2023-12-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 阿形, 航平, 岡田, 侑也, 四方, 博之, 小川, 将克, 加藤, 新良太, 井家上, 哲史, 高井, 峰生, 石原, 進 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/0002000146

狭帯域 IoT 通信システム DR-IoT の周波数共同利用方法 に関する検討

阿形 航平¹ 岡田 侑也¹ 四方 博之² 小川 将克³ 加藤 新良太⁴ 井家上 哲史⁵ 高井 峰生⁶
石原 進¹

概要：大規模災害発生等で既存通信インフラが利用できないときに、複数の災害対応組織が効率的に情報収集、共有、分析し意思決定を行うためのデジタル自営無線網実現技術として、VHF-High 帯で動作する狭帯域 IoT 通信システムの制度化が検討されている。本稿で議論する狭帯域 IoT 通信システムの一通信方式である多用途可変域 IoT 通信システム Diversified-Range IoT (DR-IoT) は、複数の占有帯域幅の異なる多数のチャンネルを利用できることを特徴とするが、これらを複数の組織で効率よく共同利用するための機構が必要である。本稿では、チャンネルの利用状況を共有する為に、共通チャンネルを導入し本システムにおけるチャンネル共同利用の戦略について議論する。

キーワード：DR-IoT, 周波数資源共同利用, 複数帯域幅・多数チャンネルアクセス制御, VHF-High 帯, 共通チャンネル

Study on frequency sharing method of narrowband IoT communication system DR-IoT

1. はじめに

現在の災害対応では、音声による情報伝達が主流である。そのため、情報の欠損や誤伝が発生するほか、人的情報処理能力の限界がボトルネックになる可能性がある。特に大規模災害時は、多数の組織が被災地で活動するため、音声による情報伝達では、複数組織間で正確な情報を収集・共有することが困難である。そこで、音声に加えて文字や画像・映像などの情報伝達を可能にし、災害情報を効率的に収集・共有・分析して意思決定につなげる、災害対応のデジタル化が求められている。現在の制度化されている災害

対応のデジタル通信システムは、公共ブロードバンド移動通信システム（公共 BB）[1] のみであり、小規模な地方自治体や外部支援組織ではシステム費用が高額であるため、導入が困難である。そのため、災害対応のデジタル化を推進する上で、新たな通信システムの開発が求められる。

加藤ら [2] [3] は、移動受信用地上基幹放送サービスの跡地である VHF-High 帯 (207.5~222 MHz) を活用し、音声に加えて文字や画像・映像などによる情報伝達を可能にする多用途可変域型 IoT 通信システム Diversified-Range IoT (DR-IoT) の開発を進めている。このシステムは、特定小電力無線機に広く利用されている IEEE 802.15.4 の技術を活用することで、比較的安価に導入・運用が可能であると期待される。本システムは、6.25 kHz から 400 kHz の狭帯域の複数の占有帯域幅をもつ多数のチャンネルを活用することによって、用途、通信範囲、収容端末数に応じて柔軟にネットワークを構築し、干渉を減らした信頼性の高い通信を目指している。現在は、公共 BB のガードバンドで DR-IoT を利用することを想定し設計を進めている。

本稿では、複数の組織が、用途や無線機の数に応じて、帯域の異なる多数のチャンネルを選択し、効率的に周波数資

¹ 静岡大学
Shizuoka University

² 関西大学
Kansai University

³ 上智大学
Sophia University

⁴ 株式会社スペースタイムエンジニアリング
Space-Time Engineering Japan, Inc.

⁵ 明治大学
Meiji University

⁶ 大阪大学
Osaka University

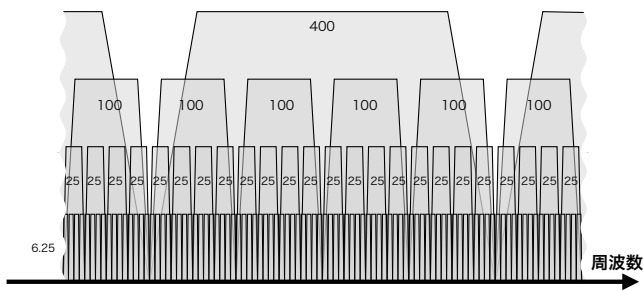


図 1 DR-IoT のチャンネルレイアウト

源を利用するチャンネル選択の方法について議論する。

2. DR-IoT の構成

筆者らは、自治体、消防、医療組織などが、自組織内外の情報共有のために自ら運用可能な自営無線システムとして、DR-IoT の設計を進めている。災害時にセルラー通信の基地局などの通信インフラが被災したとしても、それぞれの組織が他の組織に依存することなく独立して DR-IoT を利用できることを想定している。そのため、DR-IoT の無線機が、GPS など DR-IoT の通信以外の手段を使って時刻同期したり、位置測位することは必須としない。

DR-IoT は、VHF 帯の周波数を使用することで広いカバレッジを確保しつつ、各組織の様々な用途（数値、テキスト、画像）や、無線機の数に応じて、図 1 のように重畳して配置された 6.25 kHz、25 kHz、100 kHz、400 kHz の狭帯域の 4 種類のチャンネルを動的に選んで使用する。例えば、400 kHz 幅の周波数帯を 400 kHz 幅のチャンネルを 1 つ利用したり、同じ周波数帯で 6.25 kHz 幅のチャンネルを 64 個同時に利用することができる。

6.25 kHz 幅のような帯域幅が狭いチャンネルは、伝送速度が小さいものの多数のチャンネルを確保でき、通信可能範囲も広いため、多数の端末の小規模数値データ等の収集や配信に利用できる。例えば、車両に取り付けた DR-IoT 端末によって自身の位置情報を拠点に送信し、多数の車両の位置座標トラッキングを行うなどの利用手法がある。一方、400 kHz 幅のような広い帯域幅のチャンネルは、確保できるチャンネルの数は少なく、通信可能範囲も狭くなるが、伝送速度が大きいため、画像・映像データの収集、交換や拠点間の電話会議に利用できる。

DR-IoT の設計では、各無線機が利用するチャンネルを選択する際に、用途や無線機の数だけを考慮だけでなく、利用時の通信対象空間におけるチャンネル利用状況を検出し、限られた周波数資源を効率的に利用することも重要である。ここで言うチャンネル利用状況とは、当該チャンネルがどの組織の無線機によって利用されているのか、またはどの無線機からも利用されていないかを示す情報である。通信要求発生時の対象空間における無線通信チャンネルの利用状況を検出するには、一般に全てのチャンネル 1 つ 1 つを

観測する方法 [4] や、エネルギー検出 (Energy Detection: ED) によって複数のチャンネルを同時に観測する方法 [5] が利用される。しかし、DR-IoT のチャンネルは、6.25 kHz 幅のチャンネルだけでも数百以上存在するため、全チャンネルを 1 つ 1 つを観測しては時間がかかりすぎる。また、DR-IoT の運用を検討している公共 BB のガードバンドでは、想定される公共 BB からの漏洩電力が大きすぎるため、ED によるチャンネル検出が動作せず、複数のチャンネルを同時に観測する方法も使えない。他にも、チャンネルの利用状況を 1 つのデータベースに集約し、データベースからの情報と無線機の位置情報や時刻から利用するチャンネルを選択する方法 [6] もあるが、DR-IoT の自営無線という特性上、他組織のデータベース参照の義務化や GPS による位置測位を運用上必須とすることはできない。

このように、チャンネルが数百以上存在し、ED によるチャンネル検出ができない環境でも、自営無線という特性を失わないで動作するチャンネル選択方法が必要である。

3. 基本的なチャンネル選択方法

3.1 チャンネルスキャンについて

本研究では、以下の要件を満たす DR-IoT のチャンネル選択方法を検討する。

- ED を使用せずチャンネルの利用状況を短時間で把握し、チャンネル利用を速やか（例えば 1 分以内）に開始する。
- 可能な限り周波数帯に未使用部分が生じないようにチャンネル利用権を獲得できるようにする。
- 自営無線として動作する無線機の動作が別組織の無線機の動作に依存することのないシステムとする。
- 公共 BB からの漏洩電力の影響を小さくするために、公共 BB が使用する周波数帯からなるべく遠いチャンネルを利用する。

チャンネル選択を行うためには、利用時の通信対象空間におけるチャンネルの利用状況を把握しなければならない。ED によるチャンネル検出ができない状況で、任意のチャンネルの利用状況を把握するためには、無線機が自身の動作パラメータを当該チャンネルに合わせたうえで、パッシブスキャン、あるいはアクティブスキャンを行うことになる。

パッシブスキャンでは、当該チャンネルで既に動作している無線機のうち 1 台が、定期的にチャンネルの利用状況を伝えるビーコンをブロードキャストする。チャンネルの利用状況を把握したい無線機は、当該チャンネルに動作パラメータを合わせ、少なくとも 1 周期の間、ビーコンの受信を待つ。ビーコンを受信できた時は、ビーコンに含まれるチャンネル利用状況を得る。ビーコンを受信できなかった時は、当該チャンネルで動作している無線機が存在しないことを把握できる。

アクティブスキャンでは、当該チャンネルで既に動作している無線機が当該チャンネル上のプローブを受信し、応答す

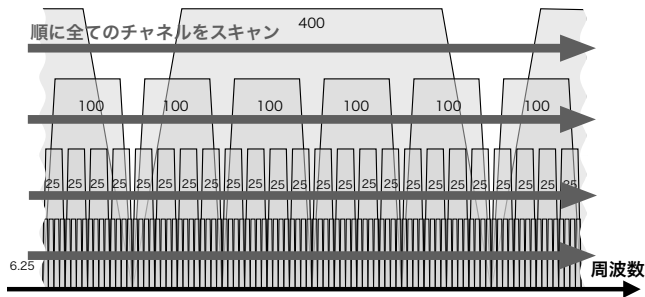


図 2 全チャンネルをスキャンする方法

必要がある。DR-IoTでは、各無線機が異なるチャンネルに移りながら動作することも想定している。そのため、アクティブスキャンするには、スキャンのタイミングと無線機が当該チャンネルを利用するタイミングを同期する必要がある。しかし、DR-IoTでは、GPSなどDR-IoTの通信以外で時刻同期をすることを許容しないため、上述した同期を伴うアクティブスキャンの実装は困難になると考えられる。

以降ではパッシブスキャンを前提として、チャンネル利用状況を把握し、DR-IoTで利用できる基本的なチャンネル選択方法を示す。

3.2 全チャンネルをスキャンする方法

最も基本的な方法として、図 2 のように、全チャンネルを順にスキャンし、全てのチャンネルの利用状況を把握して、利用するチャンネルを選択する方法が考えられる。この方法ではチャンネルを利用したい無線機が他の無線機に依存することなく、チャンネル利用を開始できる。また、公共BBの使用する周波数帯から、より遠い周波数のチャンネルを優先的に利用でき、隙間のない効率的な周波数資源の利用も可能である。しかし、チャンネルが多いとチャンネル数に比例してチャンネルスキャンに要する時間が長くなるため、チャンネル数が膨大なDR-IoTには不向きである。

3.3 利用できるチャンネルに制限を設ける方法

無線機が所属する組織に応じて、利用できるチャンネルに制限を設け、チャンネルスキャンに要する時間を短縮する方法が考えられる。以下の例は、図 3 のように、無線機が利用可能なチャンネルの候補を、自身が所属する組織の識別子（組織 ID）と希望するチャンネルの帯域幅を入力として、ハッシュ関数で絞るものである。

Step. 1 無線機が持つ自身の組織 ID と希望するチャンネルの帯域幅からハッシュ値を算出する。

Step. 2 ハッシュ値に対応するチャンネルをスキャンし、当該チャンネルの利用状況を把握する。

Step. 3 当該チャンネルが利用可能な場合、当該チャンネルを選択し利用を開始する。当該チャンネルが利用でき

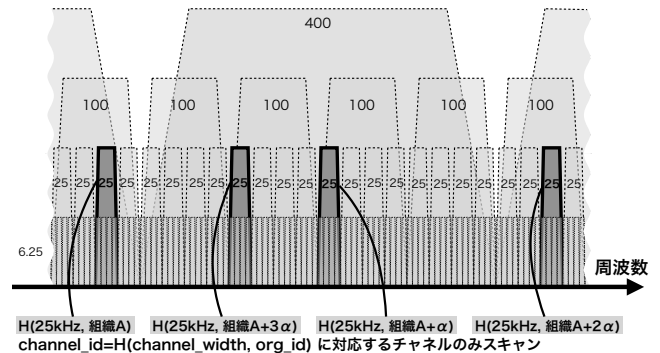


図 3 ハッシュ関数によってスキャンするチャンネルを絞る方法

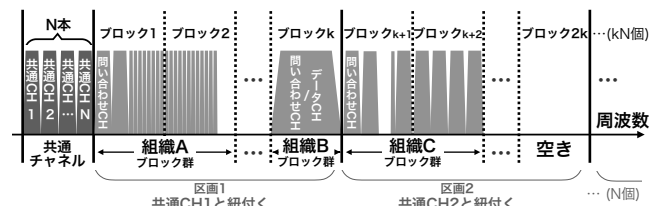


図 4 ブロックと共通チャンネル

ない場合、組織 ID に定数 α を加えた値を新しい組織 ID と仮定して、Step. 1 に戻る。

この方法は、少ないスキャン回数で、利用可能なチャンネルを発見しやすいため、チャンネルスキャンに要する時間を短縮できる。しかし、ハッシュ値の算出方法や定数 α によっては、各無線機は全てのチャンネルを利用できないため、周波数資源の利用効率が悪くなる。また、利用するチャンネルの位置がハッシュ値によって散らばるので、公共BBが使用する周波数帯から離れた周波数のチャンネルを優先的に利用するという要件にも反する。そこで第 4 章にて、これらの欠点を解決するためのチャンネル選択方法を提案する。

4. 提案するチャンネル選択方法

DR-IoT は、自営無線システムであり、それを利用する組織単位で運用される。そのため、同じ組織に所属する無線機のチャンネル利用状況を、その組織に所属する他の無線機で管理することは許容できると考える。そこで本稿では、図 4 のように、DR-IoT が利用する周波数帯を小さい固定幅の単位（ブロック）に分割し、利用されていない連続したブロック（ブロック群）を各組織が動的に選んで利用し、組織のある 1 台の端末（資源コーディネータ）がブロック群内のチャンネルの利用状況を管理する方法を提案する。

本提案方法では、動作周波数帯の低周波数側に固定の占有帯域幅を持つチャンネル（共通チャンネル）を N 本配置する。共通チャンネルは固定の中心周波数と占有帯域幅を持つため、事前情報を何も持たない無線機でもアクセスできる。共通チャンネルを複数用意する理由は、i) 共通チャンネルの混雑を防止する、ii) チャンネルスキャン時間をできるだけ短くする、ことにある。全てのブロックは、ブロック 1

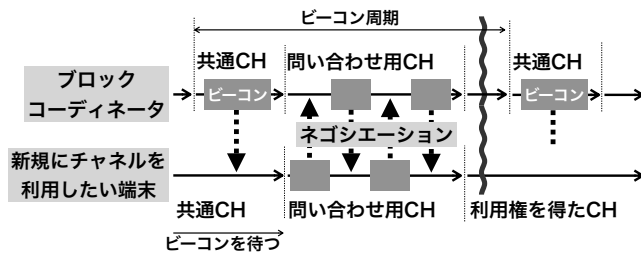


図 5 チャンネル利用開始までの流れ

から順に k ブロックずつ、 N 個の区画に分けられ、各区画内のブロックは各 1 つの共通チャンネルと静的に紐付く。各組織は、区画を跨いだブロック群を利用することはできない。資源コーディネータは、自身のブロックに紐付いた共通チャンネルで、定期的にビーコンパケットをブロードキャストする。このビーコンパケットには、以下の情報が含まれる。

- ブロック群の最初のブロック番号と最後のブロック番号
- 利用している組織の組織 ID
- 問い合わせチャンネルの中心周波数と占有帯域幅

問い合わせチャンネルとは、組織が確保したブロック群に配置されるチャンネルであり、ブロック群内のチャンネル利用状況の問い合わせや応答、チャンネルの利用要求や許可などのブロック内のネゴシエーションを行うために使用される。問い合わせチャンネルに、これらの制御用途以外の一般データトラフィックを送ることも可能とする。

図 5 に、新規にチャンネルを利用したい無線機がチャンネルの利用を開始するまでの流れを示す。新規にチャンネルを利用したい無線機は、共通チャンネルを順にパッシブスキャンする。つまり、定期的にブロードキャストされているビーコンの受信を待つ。ビーコンを受信できた場合、ビーコンに含まれる情報から、どのブロック群がどの組織に利用されているのか、ならびに、それらの組織が利用する問い合わせチャンネルの所在を知ることができる。ビーコンを 1 つも受信できなかった場合は、その共通チャンネルに紐づくグループ内のブロック全てが、空きブロックであることがわかる。

共通チャンネルのスキャンによって、自身の組織が既に利用しているブロック群を発見できれば、問い合わせチャンネルを介して、そのブロック群内に配置されたチャンネルの利用状況を確認し、チャンネルの利用開始手続きを始めることができる。自身の組織が利用しているブロック群が存在しない場合は、他の組織に使われていない空きブロック群から必要なブロックを確保する。その場合は、自身がそのブロック群の資源コーディネータとなる。この方法により、他組織の無線機に依存することなく、全てのチャンネルの利用状況を把握でき、チャンネルの利用を開始できる。また、公共 BB の動作周波数帯から離れた周波数のチャンネルを優

先的に利用することもできる。

5. 議論

5.1 組織と共通チャンネル・区画との対応付け

組織を共通チャンネル・区画と対応付ける方法は、i) 組織に対して 1 つの区画を静的に対応付ける、ii) 組織に対して利用できる区画を複数対応付ける、iii) 組織がどの区画を利用しても良い、に大別できる。この区分は、コンピュータのキャッシュメモリと主記憶の間のアドレスのマッピング方法における、i) ダイレクトマップ方式、ii) セットアソシアティブ方式、iii) フルアソシアティブ方式に類似している。

周波数帯を複数の区画に分けて、それらを複数の共通チャンネルの一つ一つに対応付けることの利点は、共通チャンネル一つあたりの組織数を減らすことで、共通チャンネルに送り出されるビーコンパケットの衝突頻度を下げること、およびビーコン周期を短くしてチャンネルスキャンに要する時間を短くすることにあつた。従って、上述した区分の i) が最もチャンネルスキャンに要する時間が短くなる。ただし、組織が利用できる区画が一つだけなので、その区画のブロック群が他の組織によってすべて確保済であると、ブロック群を確保することができなくなるという問題が生じる。

ii) の場合は、自組織がブロック群を確保していないことを確認するためには、複数の区画をスキャンする必要があるが、その区画の総数は比較的少ない（たとえば 2 個）のでスキャン時間の増加は限定的である。また、自組織がブロック群を確保済の場合、早ければ 1 回目の共通チャンネルのスキャンで自組織がブロック群を確保していることを検出できる。iii) の場合、自組織がブロック群を確保していないことを確認するためには、全ての共通チャンネルをスキャンする必要があるため、長い時間が必要となる。従って、上述した複数の共通チャンネルを使用する利点が失われてしまう。現実的には、i) あるいは ii) の戦略が適当であると考えられる。

ii) における組織が利用できる区画の対応付けに関しては、組織が利用する区画をできるだけ公共 BB の使用する周波数帯から離すということを目指すと、次のように二分木を使った方法が考えられる。公共 BB の使用する周波数帯から遠い順に区画に番号を与え、これを図 6 に示すように、二分木の根から順に幅優先で対応付ける。組織が利用できる区画の候補数を d とすると、自身の組織 ID (あるいはそれと静的に対応する値) の下位 $d-1$ ビットを区画 (および共通チャンネル) の選択に用いる。最初は、根に相当する 1 番の区画についてスキャンする。次に最下位ビットの値について、2 分木の枝のいずれかを選択し、該当する区画をスキャンする。以降は、組織 ID の下位のビットから順に使用し、枝の選択を行う。新たに区画にブロック群

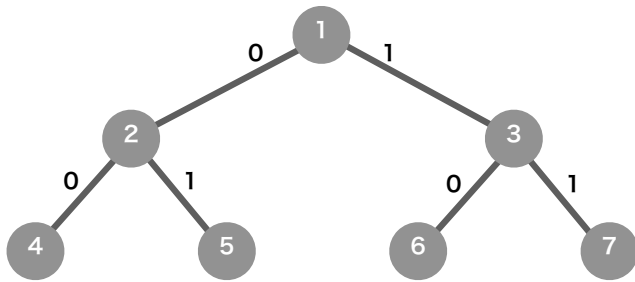


図 6 二分木に基づく共通チャンネル・区画の選択

を確保するときは、同様に二分木の根から枝をたどり、未使用のブロックが多い区画を用いるようにする。この方法を用いると、区画を選ぶときには、公共 BB の使用する周波数帯から遠い区画が利用されるほか、組織が使用する区画が分散するため、良好な配分が達成できると見込める。

5.2 共通チャンネルの数

共通チャンネルの数 N についても議論する。共通チャンネルの数が少ないと、同一の共通チャンネルを利用する組織の数が増え、送られるビーコンパケットの数が多くなるので、ビーコンパケットの衝突頻度が増加する。ビーコンパケットの衝突頻度を抑制するためには、ビーコン周期を長くする方法が考えられるが、ビーコン周期を長くすると、より長い間ビーコンを待たなければならず、共通チャンネル当たりのスキャン時間は長くなる。

一方、共通チャンネルの数が増えると、各共通チャンネルに紐づくブロックの区画の大きさ（ブロックの数 k ）が小さくなる。区画の大きさが小さくなると、組織は区画を跨いでブロック群を利用できないため、チャンネル利用効率が低下する。

5.3 ブロックの幅

ブロックの幅を、例えば 25 kHz など狭く設定すると、組織が利用するブロック群の大きさを細かく指定できるため、組織の利用したいチャンネルに適したブロック群の大きさを指定でき、周波数資源の利用効率が上がる。しかし、6.25 kHz 幅や 25 kHz 幅などの狭帯域幅のチャンネルを、その特性上、数本だけ利用するユースケースはほぼない。したがって、6.25, 25 kHz 単位など、小さい単位でブロック群の大きさを指定できる意義は実用上少ない。ある程度の広いブロック幅を設定して、狭帯域幅のチャンネルをまとめて管理した方が、制御の単純化を図ることができる。しかし、ブロック幅を、例えば 500 kHz など広く設定しまうと、組織が利用するブロック群の大きさを細かく指定できず、利用したいチャンネルが少ない組織では、ブロック群の中に未使用部分が生じ、周波数資源の利用効率が下がる。実用上、100 kHz 幅のブロックが適当と考える。

6. おわりに

本稿では、VHF-High 帯で動作する狭帯域 IoT 通信システムの一通信方式である多用途可変域 IoT 通信システム DR-IoT のチャンネル選択方法について議論した。DR-IoT では、隣接周波数帯のサービスの漏洩電力によってエネルギー検出によるチャンネル検出ができないうえ、チャンネルが数百以上存在するため、チャンネルスキャンを繰り返す既存のチャンネル選択方法では、チャンネル利用開始までに時間が多くかかる。このような条件下でも、組織ごとの自営無線システムという DR-IoT の特性を失わないで動作するチャンネル選択方法を提案した。提案方法では、周波数帯をブロックという単位に分け、各組織が利用するブロック群を確保し、内部のチャンネルを管理する。さらに、固定の中心周波数と帯域幅を持つ共通チャンネルを配置し、共通チャンネルでブロック群と組織の情報を定期的に配信することで、事前情報を持たない無線機が、自組織の利用しているブロック群を短時間で把握できるようにした。

今後は、第 5 章で述べた議論を進めつつ、具体的な制御用メッセージの定義をし、実用的なシステムになるよう目指す。そして、提案した方法のシミュレーションモデルを実装し、性能評価を行っていく。

謝辞 本研究は科学研究費補助金 22H03579 の助成による。

参考文献

- [1] ARIB STD-T119 1.2 版：200MHz 帯 広帯域移動無線中継通信用無線設備（可搬型）、https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/desc/std-t119.html (2023/10/20 確認)。
- [2] 加藤、石原、井家上、山本、梶田、高井：準狭帯域無線システム DR-IoT の提案、情処研報, vol. 2022-MBL-105, no. 16 (2022)。
- [3] 大和田、高井、梶田、井家上、石原、加藤、山本：災害対応 IoT (Disaster Response IoT: DR-IoT) 無線システムの検討、信学技報, vol. 121, no. 333, SeMI2021-79, pp. 109-113 (2022)。
- [4] 小國、前山、吉岡、鈴木、長谷川、横山：動的・自律分散を指向した周波数共用システムの一検討、信学技報, vol. 120, no. 341, pp. 9-14 (2021)。
- [5] R. Abdelrassoul, E. Fathy, M. S. Zaghoul : Comparative Study of Spectrum Sensing for Cognitive Radio System Using Energy Detection over Different Channels, 2016 World Symposium on Computer Applications & Research, pp. 32-35 (2016)。
- [6] I. Jang, K. Hwang : Multi-channel cluster PAN for TVWS band, 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications, pp. 1076-1080 (2014)。