

複数帯域幅・多数の準狭帯域チャンネルが利用可能なマルチチャンネル型ビーコンネットワークにおける効率的な広域データ収集のためのチャンネル割り当てに関する分析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 情報処理学会 公開日: 2023-10-12 キーワード (Ja): DR-IoT, IEEE 802.15.4, TMCTP, 複数帯域幅・多数チャンネルアクセス制御, VHF-High 帯 キーワード (En): 作成者: 浅野, 心夏, 梅本, 亮介, 石原, 進, 加藤, 新良太, 高井, 峰生 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10297/0002000047">http://hdl.handle.net/10297/0002000047</a>

# 複数帯域幅・多数の準狭帯域チャンネルが利用可能なマルチチャンネル型ビーコンネットワークにおける効率的な広域データ収集のためのチャンネル割り当てに関する分析

浅野 心夏<sup>1</sup> 梅本 亮介<sup>2</sup> 石原 進<sup>3</sup> 加藤 新良太<sup>4</sup> 高井 峰生<sup>5</sup>

概要：大規模災害発生時に複数の異なる組織が災害関連情報を効率的かつ効果的に収集・共有・分析し意思決定を行うためのデジタル自営無線網の実現を目的として筆者らは準狭帯域無線通信システム DR-IoTを提案している。本システムでは、IEEE 802.15.4 のマルチチャンネルビーコンベースネットワークである TMCTP の枠組みを応用することで、複数帯域幅 (6.25 kHz–400 kHz) ・多数の準狭帯域チャンネルを利用したネットワークを構成している。また、TMCTP におけるネットワーク全体の管理無線機 (SPC) の不活性期間の間に狭帯域幅のチャンネルを使用することでチャンネル探索処理時間の短縮を可能としている。本稿では、上述のネットワークにおける効率的な広域データ収集を目的として、チャンネル割り当てに関する分析を行う。DR-IoT のネットワーク形成のシミュレーションを実施した結果、複数帯域幅・多数チャンネルを利用したネットワーク構成によって高いネットワーク接続率を維持しながらネットワークに参加している無線機の伝送速度の平均値が向上することを確認した。また、SPC のチャンネルの帯域幅を 400 kHz で固定し、第 2 階層のチャンネルの帯域幅を 6.25 kHz に固定したチャンネル構成の場合と複数の帯域幅 (6.25 kHz・25 kHz・100 kHz・400 kHz) のチャンネルを併用して構成した場合を比較すると、後者の方が高いネットワーク接続率と伝送速度を達成できることを確認した。

キーワード：DR-IoT, IEEE 802.15.4, TMCTP, 複数帯域幅・多数チャンネルアクセス制御, VHF-High 帯

## Analysis of channel allocation for efficient wide-area data acquisition in multi-channel beacon networks with multiple bandwidth and many quasi-narrowband channels available

SHINKA ASANO<sup>1</sup> RYOSUKE UMEMOTO<sup>2</sup> SUSUMU ISHIHARA<sup>3</sup> ARATA KATO<sup>4</sup> MINEO TAKAI<sup>5</sup>

### 1. はじめに

現在の日本国内の災害対応では、複数組織間及び複数地点間での情報共有に音声や FAX などのアナログの情報伝達手段を用いるのが基本である。しかしながら、これらの手段には必ず人が介在し、大幅な情報共有遅延や誤聞誤伝、情報欠損などが発生するだけでなく、人的情報処理能力が

災害対応全体のボトルネックとなる危険をはらむ。特に、大規模災害発生時には多数の組織が多地点で情報を迅速かつ正確に共有し、共有情報に基づく適切な意思決定を下すことが肝要である。そのため、災害に関わる情報を人の介在を必要とせずに効率的に収集・共有・分析できるシステムの導入、すなわち災害対応のデジタル化が急務である。

現時点で災害対応のデジタル化に利用可能、または利用可能性のある通信システムの中で、十分な伝送速度を提供可能な衛星通信や公共ブロードバンド移動通信システム (公共 BB) はシステム費用が高額であるため、小規模な

<sup>1</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

<sup>2</sup> 静岡大学工学部

<sup>3</sup> 静岡大学大学院工学領域

<sup>4</sup> 株式会社スペースタイムエンジニアリング

<sup>5</sup> 大阪大学/UCLA

地方自治体や外部支援組織では導入が困難であるだけでなく、組織間での有効なデータ交換の仕組みは整備されていないため、人的情報処理に依存せざるを得ない。一方、広域省電力無線 (LPWA: Low Power Wide Area) は安価であるものの、音声伝達を目的とする簡易無線よりも伝送速度がさらに低く、少量のセンサデータなどを間欠的に送信する役割しか担えない。そのため、現在制度化されている通信システムの組み合わせでは災害対応にあたる組織の通信システムに対するニーズ、特に多地点で情報共有を行いたいとするニーズを満たせない。

筆者らは、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 MHz–222 MHz) において十分な伝送速度を実現可能な災害対応デジタル無線システムを実現することを目指し、準狭帯域無線通信システム DR-IoT (Diversified-Range/Disaster-Response Internet of Things) の開発を進めている [1] [2]。UHF 帯での特定小電力無線機に広く利用されている IEEE 802.15.4 の技術を活用すれば比較的安価に通信機を実現できる上、多数の無線機を収容することができるシステムを安価に実現できるという見込みのもと、フィールド実験やアクセス制御方式の検討を進めている。本システムでは、複数の帯域幅 (6.25 kHz–400 kHz) をもつ多数の準狭帯域チャンネルを活用することによって、用途・通信範囲・収容無線機数に応じて柔軟にネットワークを構築することを目指している。

筆者らは、IEEE 802.15.4 [3] のマルチチャンネルビーコンベースネットワークである TMCTP (TVWS Multichannel Cluster Tree PAN) [4] で複数帯域幅、多数チャンネルを活用するためのチャンネルアクセス制御方式を設計した [5]。本稿では、上述のネットワークにおける効率的な広域データ収集・共有を目的として、DR-IoT のネットワーク形成のシミュレーションに基づいて、チャンネル割り当てに関する分析を行う。

以下、2 章では、DR-IoT の無線システムの概要と同システムでのアクセス制御の土台とする IEEE 802.15.4 の TMCTP について概要を説明する。3 章では、TMCTP の枠組みを応用した複数帯域幅・多数の準狭帯域チャンネルのネットワーク構成方法と DR-IoT におけるネットワーク参加管理方法を説明する。4 章では、DR-IoT のネットワーク形成のシミュレーションの設定について述べ、シミュレーション結果に基づいて DR-IoT における効率的な広域データ収集・共有のためのチャンネル割り当てに関する分析を行う。5 章で本稿をまとめる。

## 2. DR-IoT の構成

DR-IoT では、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、6.25 kHz–400 kHz の複数のチャンネル幅をもつ多数の準狭帯域チャンネルを活用することによって、

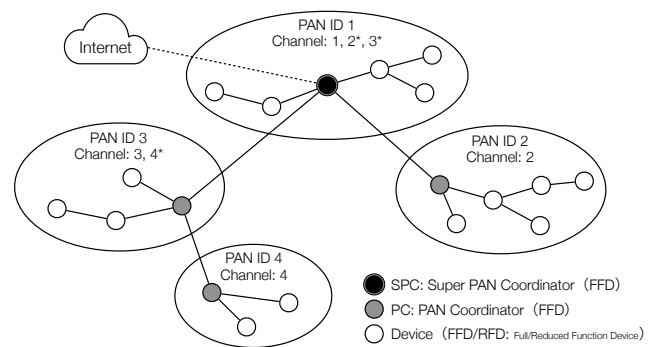


図 1: TVWS Multichannel Cluster Tree PAN の例

必要な通信量の異なる様々な用途 (数値, テキスト, 画像) や様々な規模に対応したネットワークを構築することを可能とする。帯域幅の狭いチャンネルでは伝送速度は低いものの通信可能距離は長くなるため、広範囲からの小規模数値データ等の収集, テキストデータ中心の広域情報配信に利用できる。一方, 数百 kHz 程度の広い帯域幅のチャンネルでは, 通信可能距離は短いものの伝送速度は高くなるため, 画像・映像データの収集・交換等の用途に利用できる。また, 複数の狭帯域幅/広帯域幅のチャンネルを組み合わせたマルチホップの構成によって, ネットワークのカバレッジを拡大しつつ多くの通信トラフィックを収容可能とする。

IEEE 802.15.4 [3] は, TV ホワイトスペース (TVWS) を使って複数チャンネルにまたがったクラスタツリー型 PAN (TMCTP) [4] を構成する仕様を含んでいる。DR-IoT では TVWS の使用を想定している訳ではないが, TMCTP が備えているチャンネル管理の枠組みを利用する。これによって, TMCTP の集中型の処理を用いることでチャンネル探索やチャンネル割り当てを効率化できる上, 帯域幅の異なる複数のチャンネルを組み合わせたマルチホップ構成のネットワークを構築できる。

図 1 に TMCTP の例を示す。TMCTP では, 複数の PAN (Personal Area Network) をまとめて管理する SPC (Super PAN Coordinator) を中心にネットワークを構築する。IEEE 802.15.4 の仕様では, 個々の PAN で最初に起動された FFD (Full Function Device) が PAN の中で唯一の PAN コーディネータとなり, PAN の ID を決定し, PAN 全体の通信をまとめるスーパーフレームの構造を与える。SPC は TMCTP のネットワークで 1 台だけ存在し, 自身がコーディネータとなる PAN だけでなく, 自身の子孫として接続される PAN で使用するチャンネルを決定する。

SPC が構成するスーパーフレームは  $aNumSuperframeSlots$  (=16 スロット) を単位として構成される。スーパーフレームの冒頭で SPC はビーコンフレームを送信する。スロット時間を  $\tau$  とすると, スーパーフレームの長さ (BI: Beacon Interval) は  $aNumSuperframeSlots \times \tau \times 2^{BO}$  となる。BO (Beacon Order) は  $0 \leq BO \leq 14$  の範囲で設定可能な整数である。スーパーフレームのうち実際にデータの

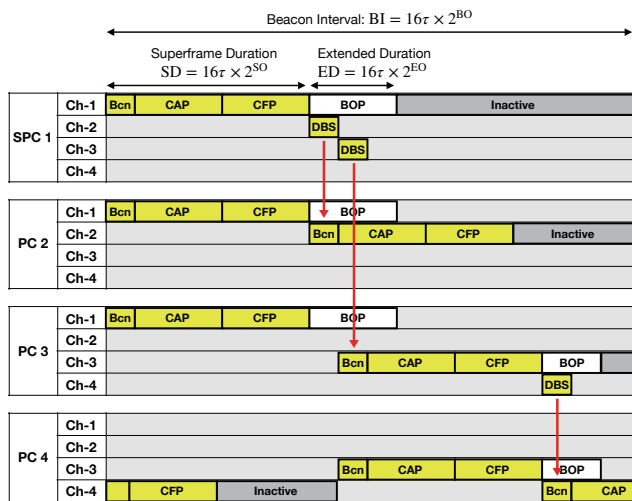


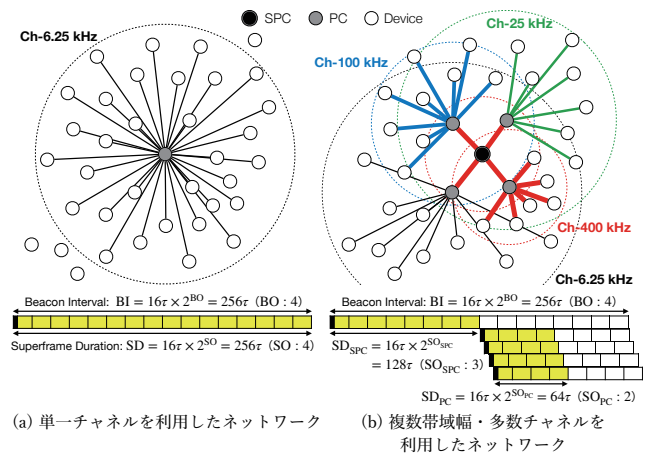
図 2: TMCTP における複数 PAN の収容

送受信がなされるのは冒頭にある活性化期間 (SD: Superframe Duration) のみである。SD は、CAP (Contention Access Period) と CFP (Contention Free Period) で構成される。CAP では、無線機は Slotted CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式に従ってチャンネルアクセスを行う。CFP では、コーディネータがビーコンで指定した無線機のみがチャンネルを利用する。SD の長さは、 $aNumSuperframeSlots \times \tau \times 2^{SO}$  で与えられる。SO (Superframe Order) は  $0 \leq SO \leq BO \leq 14$  の範囲で設定可能な整数である。SD 以外の部分は不活性期間と呼ばれ、通信には用いられない。

図 2 に TMCTP でのスーパーフレームでの複数 PAN の収容の様子を示す。TMCTP では、SD の直後にビーコン専用期間 (BOP: Beacon Only Period) が設けられている。この期間に SPC は、自身の子として接続される別のチャンネルで動作する PC (PAN Coordinator) の使用するチャンネルに順に切り替え、各 PC が送信するビーコンを受信することで、それらが SPC によって割り当てられたチャンネルで動作していることを確認する。SPC がそれぞれの PC のチャンネルでビーコンを受信する期間を専用ビーコンスロット (DBS: Dedicated Beacon Slot) と呼ぶ。BOP の長さは  $aNumSuperframeSlots \times \tau \times 2^{EO}$  で与えられる。EO (Extended Order) は  $0 \leq EO \leq (BO - SO) \leq BO \leq 14$  の範囲で設定可能な整数である。SPC と各 PC との接続方法は、さらに PC とその子の PC との接続でも使用できる。

### 3. DR-IoT のための複数帯域幅・多数チャンネルのネットワーク構成

DR-IoT では、SPC 配下の全てのネットワークに参加する無線機から SPC にデータを集約することを想定している。そのため、下位層の PAN に狭帯域幅のチャンネルを割り当てることで SPC から離れた地点にいる無線機を接続するための広いカバレッジを確保し、SPC に広帯域幅の



(a) 単一チャンネルを利用したネットワーク (b) 複数帯域幅・多数チャンネルを利用したネットワーク

図 3: 単一チャンネル/複数帯域幅・多数チャンネルを利用したネットワークの構成例

チャンネルを割り当てることで多くの通信トラフィックを収容可能なネットワーク容量を確保している。

#### 3.1 複数帯域幅・多数チャンネルのネットワーク構成とその効果

複数帯域幅・多数チャンネルのネットワーク構成によるネットワーク収容可能通信量の増加とより広いカバレッジを実現する例を示す。図 3(a) は単一の狭帯域幅のチャンネルを利用してネットワークを構成した例を示している。1 スーパーフレームの長さを BI, 通信の活性期間を SD とすると、活性期間の中でデータ通信に使用できる CAP および CFP の長さは、活性期間からビーコンフレームの送信時間を除いた時間となる。ここでの議論では簡単のためにビーコン送信時間を無視してすべてが通信に使用できると見なす。チャンネル幅が  $B_1$  の場合の伝送速度を  $b_1$  とし、単純化のためチャンネルアクセス時間に伴うオーバーヘッドを無視すると、この構成で 1 BI の間に収容可能な最大トラフィック  $T_{single}$  は  $b_1 2^{SO} / 2^{BO}$  となる。図 3(a) のように  $SO = 4$ ,  $BO = 4$ ,  $B_1 = 6.25 \text{ kHz}$  の場合  $T_{single} = b_1$  となる。

一方、図 3(b) のようにネットワークの中心となる無線機を PC とし、それが  $M$  個の PC と広帯域幅のチャンネルで接続し、さらに各 PC がエンドデバイス (ED) と様々な帯域幅のチャンネルで接続するようにすると、図 3(a) の場合よりもより多くの通信を収容できる。SPC-PC 間の通信で使用するチャンネルの帯域幅  $B_k$  を  $B_1$  の  $k$  倍とし、チャンネル帯域幅に伝送速度が比例すると仮定すると、このチャンネルの伝送速度  $b_k$  は  $kb_1$  となる。このとき、SPC-PC 間での通信に使用する通信の活性期間を  $SD_{SPC}$  とすると、1 BI の間に SPC-PC 間で収容可能な最大トラフィック  $T_{SPC-PC}$  は  $kb_1 2^{SO_{SPC}} / 2^{BO}$  となる。図 3(b) のように  $SO_{SPC} = 3$ ,  $BO = 4$ ,  $k = 64$  とすると、 $T_{SPC-PC} = 32b_1$  となる。

各 PC と ED 間の通信では、SPC のビーコン間隔から SPC-PC 間通信の活性期間を除いた期間の一部を活性期間



として通信に使用できる。PC の PAN における活性期間の長さ  $SD_{PC}$  も SPC の活性期間の長さ  $SD_{SPC}$  と同様に  $aNumSuperframeSlots \times \tau$  の 2 の冪乗倍で与えられる上、 $BOP_{SPC}$  の間に SPC がチャンネルを切り替えて、順に各 PC から DBS でピーコンを受信する必要がある。SPC から  $i$  番目の DBS に割り振られている PC を  $PC_i$  とし、 $PC_i$  の DBS で使用するスロット数を  $DBS_{PC_i}$  とすると、 $PC_i$  の PAN での活性期間の長さ  $SD_{PC_i}$  を決める  $SO_{PC_i}$  は以下のようになる。

$$SO_{PC_i} = \lfloor \log_2 \frac{BI - SD_{SPC} - \sum_{1 \leq j < i} DBS_{PC_j} \tau}{aNumSuperframeSlots \times \tau} \rfloor \quad (1)$$

$PC_i$  のチャンネルの伝送速度を  $b_{PC_i}$  とすると、PC と ED 間の収容可能な最大トラフィック  $T_{PC-ED}$  は  $\sum_{1 \leq i \leq M} b_{PC_i} 2^{SO_{PC_i}} / 2^{BO}$  となる。図 3(b) のように  $M = 4$ ,  $BO = 4$ ,  $SO_{SPC} = 3$  とし、SPC の BOP の長さ  $BOP_{SPC} = \sum_{1 \leq i \leq M} DBS_{PC_i} \tau$  を仮に  $16\tau$  とすると、全ての PC において  $SO_{PC_i} = 2$  となる。したがって、 $T_{PC-ED} = (64b_1 + 16b_1 + 4b_1 + b_1)2^2 / 2^4 = 85b_1 / 4$  となる。

全 ED から SPC にデータを集約することを想定すると、SPC-PC 間の通信量と PC-ED 間の通信量のどちらかがボトルネックになるため、ネットワークで収容可能な通信量  $T_{multi}$  は  $\min(T_{SPC-PC}, T_{PC-ED})$  となる。以上より、図 3(a)(b) の場合だと、 $T_{single} = b_1$ ,  $T_{multi} = 85b_1 / 4$  となるため、複数帯域幅・複数チャンネルのマルチホップネットワーク構成の方がより多くの通信量が収容可能であることがわかる。また、SPC-ED 間の最大通信可能距離は、SPC-PC 間の最大通信可能距離と PC-ED 間の最大通信可能距離の和となる。PC-ED 間の最大通信可能距離は、単一チャンネルの場合と同じである。したがって、異なる帯域幅のチャンネルを複数使用したマルチホップ構成のネットワークは、単一チャンネル構成のネットワークに比べてより広いカバレッジを達成する。

### 3.2 Basic Channel-based Channel Assignment

前節での議論により、複数帯域幅・多数チャンネルのネットワーク構成では SPC-PC 間のチャンネル帯域幅がより広いほど、ネットワーク全体での収容可能通信量が大きくなる。しかしながら、SPC-PC 間のチャンネル帯域幅が広いと通信可能距離が短いために、図 3(a) の端に配置された無線機のように PC から遠く離れた無線機（孤立無線機）は、適当な場所に PC が存在しないとネットワークに参加できなくなる。また、新規無線機は稼働中の PAN を

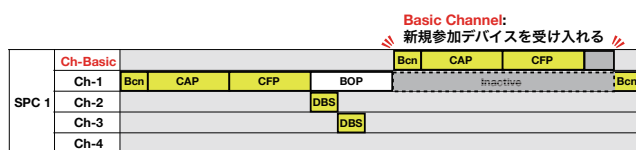


図 4: SPC の不活性期間を使用したネットワーク参加管理

知らないため、多数のチャンネルが利用可能な環境ではチャンネル探索に長い時間を要する。これらの課題を解決するために、筆者らは [5] で SPC が使用するスーパーフレームの不活性期間の間に狭帯域幅のチャンネルを使用することを提案している（図 4）。このチャンネルを基本チャンネル（basic channel）と呼び、基本チャンネルによるネットワーク参加管理を Basic Channel-based Channel Assignment (BCCA) と呼ぶことにする。BCCA を用いることで孤立無線機の収容と新規無線機のチャンネル探索時間の短縮が可能となる。

SPC は自身の本来の不活性期間の一部を使って基本チャンネルの PAN 上でスーパーフレームを構成し通信を行う。新規に参加する無線機は、既知の基本チャンネルのリストに基づいて、基本チャンネルで SPC からのピーコンの受信を試みる。新規無線機が探索すべきチャンネルは基本チャンネルのリスト内のものに絞られるため、使用可能なチャンネル数が多くても、チャンネル探索時間は短く保たれる。基本チャンネルのどれかで自身が所望する SPC からのピーコンを受信することができれば、新規無線機はその基本チャンネルで動作する PAN に参加し、SPC にネットワークへの参加を通知する。その後、新規無線機は SPC からより適切な接続先の PC に関する接続情報（PAN ID, チャンネル情報, PC の位置情報など）を通知してもらう。この接続先の候補には、SPC のメインチャンネル（SPC が主として使用するチャンネル）も含まれる。

## 4. シミュレーション評価

本章では、DR-IoT のネットワーク形成のシミュレーションを実施し、効率的な広域データ収集・共有のためのチャンネル割り当てに関する分析を行った。本シミュレーションではスロット単位の各無線機の制御や通信部分は簡略化している。シミュレーションには自作の Python プログラムを用いた。表 1 にシミュレーション諸元を示す。

表 1: シミュレーション諸元

パラメータ	値
フィールド	10,000 m × 10,000 m
シミュレーション時間	1,000 タイムステップ
利用可能帯域幅	3 MHz
BO	4
SO (1 階層のみのチャンネル構成の場合)	4
SO <sub>SPC</sub> (2 階層のチャンネル構成の場合)	3
SO <sub>PC</sub> (2 階層のチャンネル構成の場合)	2
Ch-6.25kHz の伝送速度 $b_{6.25 \text{ kHz}}$	6.25 kbps
Ch-400kHz のカバレッジ $r_{400 \text{ kHz}}$	500 m
Ch-6.25kHz 16 slots の収容無線機数の上限 $c_{6.25 \text{ kHz}}$	2 台

チャンネルの種類	伝送速度 [ $b_{6.25 \text{ kHz}}$ ]	カバレッジ [ $r_{400 \text{ kHz}}$ ]	収容無線機数の上限 [ $c_{6.25 \text{ kHz}}$ ]
Ch-400kHz	64	1	$64 \times 2^{SO}$
Ch-100kHz	16	2	$16 \times 2^{SO}$
Ch-25kHz	4	4	$4 \times 2^{SO}$
Ch-6.25kHz	1	8	$2^{SO}$
Ch-Basic	1	8	-

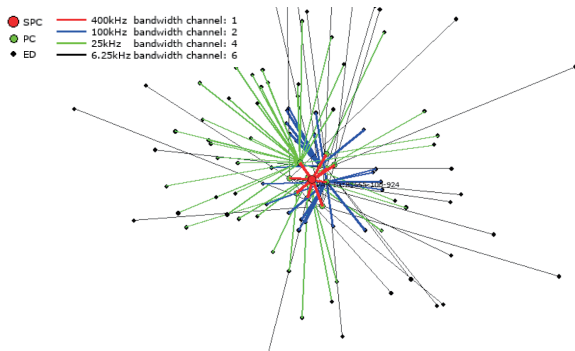


図 5: DR-IoT ネットワーク形成のシミュレーション

#### 4.1 シナリオ設定

10,000 m×10,000 m の平坦なフィールドの中心に SPC を配置し、タイムステップ毎に新規無線機を 1 台追加する。新規無線機の初期位置はフィールドの中心を平均とした正規分布 ( $\mu = 5,000 \text{ m}$ ,  $\sigma = 1,250 \text{ m}$ ) および一様分布に従ってランダムに配置し、モビリティは考慮しないものとした。タイムステップが 1,000 になったら、あるいは SPC 配下のネットワークの総無線機数が SPC のメインチャンネルの収容無線機数の上限に達したらシミュレーションを終了する。シミュレーションの様子を図 5 に示す。

#### 4.2 チャンネル構成

本シミュレーションでは PC-ED の 1 階層のみ、SPC-PC と PC-ED の 2 階層のみのチャンネル構成を対象とする。また、各 PAN 内におけるマルチホップ構成は考慮しないものとした。表 2 にシミュレーションを実施したチャンネル構成を示す。ビーコン間隔は  $BO = 4$  とし、PC-ED の 1 階層のみの場合は PC の活性期間は  $SO = 4$  とする。SPC-PC と PC-ED の 2 階層のみの場合は SPC の活性期間は  $SO_{SPC} = 3$  とし、PC の活性期間は  $SO_{PC} = 2$  とする (図 3 に対応)。ここで、PC の数が多い場合には SPC の BOP の期間が長くなり、BOP の後半の DBS に割り当てられた PC は  $SO_{PC} = 2$  分の活性期間を確保できなくなる可能性が生じるが、本シミュレーションでは考慮しないものとした。表 1 に示すように、各 PAN のチャンネルの帯域幅と SO に応じてその PAN の収容無線機数の上限が決まる。

表 2: シミュレーションを実施したチャンネル構成

ラベル	第 1 階層のチャンネルで利用する帯域幅 [kHz]	第 2 階層のチャンネルで利用する帯域幅 [kHz]
6.25 kHz	6.25	-
25 kHz	25	-
100 kHz	100	-
400 kHz	400	-
25 kHz-6.25 kHz	25	6.25
100 kHz-6.25 kHz	100	6.25
100 kHz-25 kHz	100	25
400 kHz-6.25 kHz	400	6.25
400 kHz-25 kHz	400	25
400 kHz-100 kHz	400	100
100 kHz-6.25~100 kHz	100	6.25, 25, 100
400 kHz-6.25~400 kHz	400	6.25, 25, 100, 400

DR-IoT で利用可能な帯域幅を 3 MHz (基本チャンネルは除く) とし、各シミュレーションにおけるチャンネル構成に含まれるチャンネルをこの帯域幅の中に配置する。図 6 に示すような Ch-400kHz×1, Ch-100kHz×2, Ch-25kHz×4, Ch-6.25kHz×8 (チャンネル構成に含まれない帯域幅のチャンネルは 0) の組み合わせを 1 つのチャンネルセットとし、利用可能な帯域幅を超えない範囲でこのチャンネルセットを複数個配置する。利用可能な帯域幅の余剰は最も小さい帯域幅のチャンネルを可能な限り配置するものとした。

#### 4.3 チャンネル割り当て

新規参加無線機が SPC のメインチャンネルに接続した場合、この無線機は PC になることができる。本来では SPC が各 PAN の参加無線機やトラフィック状況を把握し、必要に応じて新たな PC の任命を行う必要があるが、本シミュレーションでは SPC のメインチャンネルに新たな無線機が接続したら即座に PC になるものとした。また、本来では PC に割り当てられるチャンネルはチャンネルの割り当て状況やその PAN の通信需要などに応じて決めるべきであるが、本シミュレーションでは割り当てられるチャンネルは以下に示す順番に従うものとした。本シミュレーションにおけるチャンネル割り当ての優先順位を図 7 に示す。ここでは、シミュレーション終了までに一部の帯域幅のチャンネルが割り当てられない事態を防ぐために、第一にチャンネルセット単位で優先度が付けられており、第二にチャンネルセット内で各帯域幅のチャンネルが 1 つは優先して割り当てられるように優先度が付けられている。

#### 4.4 無線機のネットワーク参加手順

無線機はまず SPC の基本チャンネルに接続を試み、接続できたら SPC から稼働中の PAN の情報 (PAN ID, チャンネル情報, PC の位置情報) を含む PAN リストを受信する。無線機は PAN リストの中から、帯域幅の広いチャンネルか

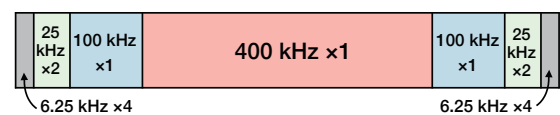


図 6: 本シミュレーションにおけるチャンネルセット

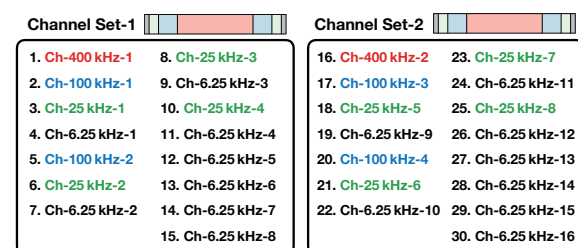
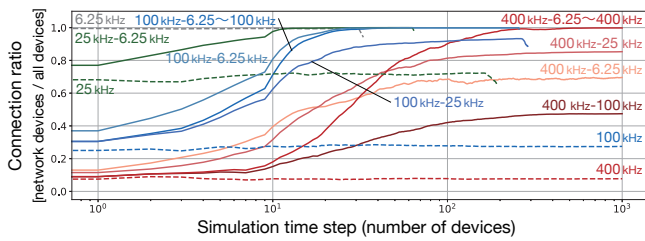
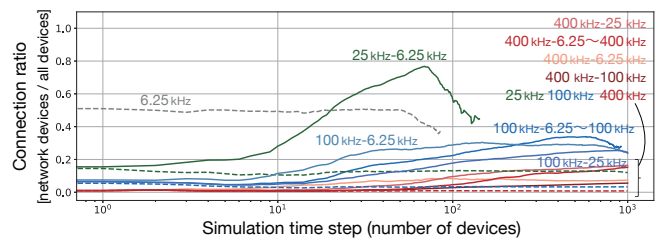


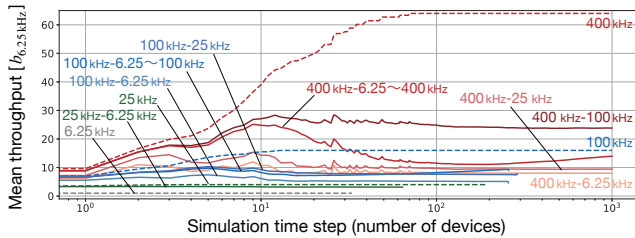
図 7: 本シミュレーションにおけるチャンネル割り当ての優先順位



(a-1) ネットワークに接続している無線機数が全体に占める割合

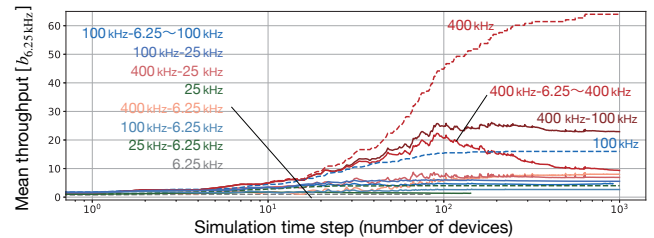


(b-1) ネットワークに接続している無線機数が全体に占める割合



(a-2) ネットワークに接続している無線機の伝送速度の平均値

(a) フィールドの中心を平均とした  
 正規分布に従って無線機を配置した場合



(b-2) ネットワークに接続している無線機の伝送速度の平均値

(b) 一様分布に従って無線機を配置した場合

図 8: 各タイムステップにおけるネットワーク接続率と伝送速度の平均値

ら優先してスキャンする。同じ帯域幅のチャンネルが複数ある場合は階層が上位の PAN を優先し、それでも同じ場合は PC-自身間の距離が近い PAN を優先する。無線機が基本チャンネルに接続できなかった場合、予め設定されているチャンネルリストを参照し、広帯域幅のチャンネルから順に BI の間スキャンする。チャンネルリストは全無線機が共通して所持しており、同じ帯域幅のチャンネルの中でも利用されるチャンネルが予め優先順位づけされているものとする（例えば、予め設定されているチャンネル番号が小さい方が利用される優先度が高い）。スキャンしたチャンネルの PC のカバレッジ内に自身が位置し、かつ PAN の収容無線機数が上限に達していなければその PAN に参加できる。基本チャンネルを除くいずれの PAN にも参加できなかった無線機は次のタイムステップで再度上記の操作を行う。

#### 4.5 複数帯域幅・多数チャンネルのネットワーク構成の効果

各チャンネル構成に対してシード値を変えて 100 回のシミュレーションを実施し、その平均を基にシミュレーション評価を行った。図 8 に正規分布/一様分布に従って無線機を配置した場合の各タイムステップにおけるネットワーク接続率と伝送速度の平均値の結果を示す。ネットワーク接続率とは全無線機数に対して SPC 配下の全てのネットワークのどれかに接続している無線機の数に占める割合である。また、伝送速度の平均値とは SPC 配下の全てのネットワークのどれかに接続している全ての無線機が、その PAN のコーディネータ (PC) と通信するためのチャンネル (基本チャンネル以外) の伝送速度を平均した値である。

図 8(a) より、無線機の配置が正規分布に従う場合、チャンネル構成が 6.25 kHz のみ、25 kHz-6.25 kHz、100 kHz-

6.25 kHz、100 kHz-6.25~100 kHz の場合だとネットワーク接続率が 100 % に達しているが、いずれにおいても伝送速度の平均が  $10 b_{6.25\text{kHz}}$  程度より低い結果となっている。また、チャンネル構成が 100 kHz のみ、あるいは SPC のメインチャンネルが 400 kHz (400 kHz-6.25~400 kHz 以外) の場合だとネットワーク接続率が 100 % に達しておらず、孤立無線機が多いことがわかる。特に、チャンネル構成が 400 kHz のみの場合、伝送速度が全体の中で最も高いが、ネットワーク接続率が全体の中で最も低い結果となっている。

一方で、チャンネル構成が 400 kHz-6.25~400 kHz の場合では  $10 b_{6.25\text{kHz}}$  より高い伝送速度を維持しながら、ネットワーク接続率 100 % を達成している。ただし、ネットワークに参加する無線機数が 60 台以上でないと 80 % 以上の高いネットワーク接続率は達成できていない。これは、SPC のメインチャンネルのカバレッジ内に多く無線機が配置されないと、各帯域幅のチャンネルの PAN を十分な数用意することができないためである。無線機の配置が一様分布に従う場合 (図 8(b))、無線機の配置が正規分布に従う場合よりも SPC 中心に配置される無線機数が少なくなるため、チャンネル構成が 400 kHz-6.25~400 kHz の場合だとネットワーク接続率が 20 % より低い結果となっている。

表 3 にシミュレーション終了時、すなわちタイムステップが 1,000 になった時あるいは SPC 配下のネットワークの総無線機数が SPC のメインチャンネルの収容無線機数の上限に達した時におけるネットワーク接続率、伝送速度の平均値、SPC-ED 間距離の最大値、各帯域幅のチャンネルの PAN の数、SPC 直下の無線機数の結果を示す。表 3(a) に示されるとおり、無線機の配置が正規分布に従う場合、単一チャンネルを利用したネットワーク構成ではカバレッジと伝



表 3: シミュレーション終了時におけるネットワーク接続率, 伝送速度の平均値, SPC-ED 間距離の最大値, 各帯域幅のチャンネルの PAN の数, SPC 直下の無線機数, BCCA を用いる/用いない場合のチャンネル探索に要する時間

(a) フィールドの中心を平均とした正規分布に従って無線機を配置した場合

Channel configuration	Capacity [devices]	All devices [devices]	Network devices [devices]	Connection ratio [network devices / all devices]	Mean throughput [ $b_{6.25\text{kHz}}$ ]	Max SPC-device distance [ $r_{400\text{kHz}}$ ]	Number of Ch-400kHz PANs	Number of Ch-100kHz PANs	Number of Ch-25kHz PANs	Number of Ch-6.25kHz PANs (including Ch-Basic)	SPC children [devices]	Scanning time (no Ch-Basic) [BI]	Scanning time (with Ch-Basic) [BI]
6.25kHz	32	32.15	32.00	99.52%	1.00	6.65	0.00	0.00	0.00	2.00	32.00	1.00	2.00
25kHz	128	176.94	128.00	72.34%	4.00	3.97	0.00	0.00	1.00	1.00	128.00	1.00	2.00
100kHz	512	1000.00	274.80	27.48%	16.00	2.00	0.00	0.00	1.00	274.80	1.00	1.00	2.00
400kHz	2048	1000.00	77.31	7.73%	64.00	0.99	1.00	0.00	0.00	1.00	77.31	1.00	2.00
25kHz-6.25kHz	64	64.01	64.00	99.98%	3.13	7.56	0.00	0.00	1.00	46.50	45.50	4.30	2.34
100kHz-6.25kHz	256	256.19	256.00	99.93%	5.09	8.47	0.00	1.00	0.00	70.88	69.88	18.36	3.26
100kHz-25kHz	256	274.26	256.00	93.34%	7.51	5.80	0.00	1.00	74.89	1.00	74.89	15.23	2.71
400kHz-6.25kHz	1024	1000.00	695.23	69.52%	8.01	8.37	1.00	0.00	0.00	78.31	77.31	35.77	9.65
400kHz-25kHz	1024	1000.00	853.12	85.31%	9.44	4.95	1.00	0.00	77.31	1.00	77.31	25.36	3.40
400kHz-100kHz	1024	1000.00	474.30	47.43%	23.83	2.94	1.00	26.00	0.00	1.00	77.31	11.00	2.84
100kHz-6.25-100kHz	256	256.18	256.00	99.93%	9.35	8.49	0.00	10.81	20.64	40.41	69.86	16.81	6.37
400kHz-6.25-400kHz	1024	1000.00	997.99	99.80%	13.96	8.57	4.00	8.00	16.00	33.00	77.31	18.73	10.52

(b) 一様分布に従って無線機を配置した場合

6.25kHz	32	63.58	32.00	50.33%	1.00	7.88	0.00	0.00	0.00	2.00	32.00	1.00	2.00
25kHz	128	969.87	123.67	12.75%	4.00	3.99	0.00	0.00	1.00	1.00	23.67	1.00	2.00
100kHz	512	1000.00	32.79	3.28%	16.00	1.97	0.00	1.00	0.00	1.00	32.79	1.00	2.00
400kHz	2048	1000.00	8.17	0.82%	64.00	0.93	1.00	0.00	0.00	1.00	8.17	1.00	2.00
25kHz-6.25kHz	64	82.62	64.00	77.46%	1.49	10.94	0.00	0.00	1.00	11.53	10.53	4.76	4.54
100kHz-6.25kHz	256	867.75	252.85	29.14%	2.69	9.68	0.00	1.00	0.00	29.55	28.55	13.88	9.55
100kHz-25kHz	256	973.06	250.03	25.70%	5.53	5.87	0.00	1.00	31.85	1.00	31.85	9.82	2.91
400kHz-6.25kHz	1024	1000.00	72.99	7.30%	8.00	8.47	1.00	0.00	0.00	9.11	8.11	5.05	4.49
400kHz-25kHz	1024	1000.00	164.57	16.46%	6.90	4.81	1.00	0.00	8.11	1.00	8.11	4.34	3.24
400kHz-100kHz	1024	1000.00	55.73	5.57%	22.91	2.81	1.00	8.11	0.00	1.00	8.11	3.68	2.86
100kHz-6.25-100kHz	256	729.21	256.00	35.11%	4.56	9.57	0.00	4.03	7.92	14.09	24.04	30.92	11.12
400kHz-6.25-400kHz	1024	1000.00	152.20	15.22%	9.34	8.19	1.04	1.99	3.04	4.04	8.11	13.81	4.94

送速度がトレードオフの関係にあることによって高いネットワーク接続率と伝送速度を両立することはできないが、複数帯域幅・多数チャンネルを利用した構成では高いネットワーク接続率を維持しながら伝送速度の平均値を向上させている。また、Ch-6.25 kHzを含むチャンネル構成のSPC-無線機間距離の最大値の結果が6.25 kHzのみのチャンネル構成の結果  $6.65 r_{400\text{kHz}}$  より大きくなっている。表 3(b) より、無線機の配置が一様分布に従う場合では正規分布に従う場合と比べて全体的に SPC 直下の無線機数が少なくなっており、その結果十分な数の PAN を用意することができず、ネットワーク接続率が大幅に低下している。これにより、ネットワークの中心となる SPC を無線機の密度が高い地点に設置することの重要性がわかる。

#### 4.6 第2階層のチャンネルを複数の帯域幅で構成する効果

チャンネル構成を SPC-PC と PC-ED 間の2階層に限定してカバレッジの最大値を計算した場合、今回実施したチャンネル構成の中では 25 kHz-6.25 kHz が最もカバレッジが広がるはずである。しかしながら、表 3(a) においては、チャンネル構成が 100 kHz-6.25 kHz, 400 kHz-6.25 kHz, 100 kHz-6.25~100 kHz, 400 kHz-6.25~400 kHz の場合の方が SPC-無線機間距離の最大値が大きくなっている。これは、チャンネル構成が 25 kHz-6.25 kHz の場合ではネットワークの収容能力が低いためにすぐに SPC のメインチャ

ネルの収容無線機数の上限に達してしまうことでシミュレーションが早期に終了し、SPC からより遠くにある無線機のネットワーク参加機会が失われたためである。

特に、チャンネル構成が 400 kHz-6.25~400 kHz の場合で SPC-無線機間距離の最大値が  $8.57 r_{400\text{kHz}}$  と全体の中で最も大きくなっている。これは次のように説明できる。第2階層で利用できるチャンネルが Ch-6.25 kHz しかない場合だと、SPC のメインチャンネルのカバレッジ外の範囲において SPC に比較的近い無線機も Ch-6.25 kHz に接続するしかなくなり、その結果すぐに Ch-6.25 kHz の収容無線機数の上限に達してしまうことで、Ch-6.25 kHz でしか接続できないような離れた地点にいる無線機分の収容容量が不足してしまう。一方で、チャンネル構成が 400 kHz-6.25~400 kHz の場合だと、SPC のメインチャンネルのカバレッジ外の範囲において SPC に比較的近い無線機はその次に広い帯域幅のチャンネルに収容されるため、Ch-6.25 kHz の収容容量が SPC に近い無線機によって消費されることが少なくなる。そのため、Ch-6.25 kHz の PAN の数が比較的少なくても、Ch-6.25 kHz の収容容量は Ch-6.25 kHz でしか接続できないような離れた地点にいる無線機用に残されているため、SPC-無線機間距離の最大値が最も大きくなっている。

チャンネル構成が 400 kHz-6.25 kHz の場合と 400 kHz-6.25~400 kHz の場合を比較すると、いずれの無線機の配置においても後者の方が高いネットワーク接続率と伝送速度を



達成している。特に、無線機の配置が正規分布に従う場合では、ネットワークの接続率が最大 30.3% 向上し、伝送速度の平均が最大 74.3% 向上している。これは、第 2 階層のチャンネルを複数の帯域幅のチャンネルで構成することによって、SPC から離れた無線機を収容するための狭帯域幅のチャンネルの収容容量が SPC に近い無線機によって消費されることが少なくなったためネットワークの接続率が向上し、各無線機は SPC との距離に適した帯域幅のチャンネルで接続できるようになったため伝送速度の平均が向上したものと考えられる。

#### 4.7 BCCA の効果

表 3 に BCCA (3.2 節参照) を用いたネットワーク参加管理を行う/行わない場合の各無線機がネットワークに参加する際にチャンネル探索に要する時間の結果を示す。BCCA を用いない場合、新規参加無線機は予め設定されているチャンネルリストを参照し、広帯域幅のチャンネルから順に BI の間スキャンする。BCCA を用いる場合は 4.4 節の操作を行う。ただし、孤立無線機はシミュレーション終了までチャンネル探索を続けるが、その無線機のチャンネル探索時間は計測していない。また、新しい PAN ができたことで孤立無線機がネットワークに接続できた場合、その PAN ができてから無線機がチャンネル探索に要した時間を計測した。

表 3 より、全ての第 2 階層のチャンネル構成において、BCCA を用いる場合の方が用いない場合よりもチャンネル探索に要する時間が短くなっており、最大で 400 kHz-25 kHz の場合に 86.6% 短縮されている。これは、次のように説明できる。BCCA を用いない場合は、狭帯域幅のチャンネルでしかネットワークに接続できない位置に無線機が配置されたときに、そのチャンネルより優先度の高い広帯域幅のチャンネルを全て順にスキャンするため、広帯域幅のチャンネル数に比例してチャンネル探索に要する時間も長くなる。加えて、無線機は稼働中の PAN がわからないため、稼働中の PAN の総数が少ない場合にスキャンが空振りする機会が多くなる。一方で、BCCA を用いる場合は、基本チャンネルのカバレッジ範囲内ならば無線機は SPC から PAN リストを受信することで稼働中の PAN や PC の位置を知ることができ、スキャン対象を稼働中の PAN のみに絞ることができる。加えて、PC-自身間の距離を参考にしてスキャンの順序を決定できるため、絞られたチャンネル候補の中から短い時間で接続可能な PAN を見つけることができる。

本シミュレーションでは広帯域幅のチャンネルで接続できる見込みのないような離れた地点の無線機でも最初に広帯域幅のチャンネルから順にスキャンするように設定しているため、距離的に接続が見込まれないチャンネルはスキャンを省略するようなアルゴリズムを加えれば、チャンネル探索に要する時間はより短くできることが期待される。

## 5. まとめ

本稿では複数帯域幅の準狭帯域チャンネルを多数使用する無線通信システム DR-IoT における効率的な広域データ収集を目的として、DR-IoT のネットワーク形成のシミュレーションに基づいてチャンネル割り当てに関する分析を行った。本システムでは複数帯域幅・多数の準狭帯域チャンネルと、IEEE 802.15.4 TMCTP の枠組みを応用してネットワークを構成する。また、TMCTP におけるネットワーク全体の管理無線機 (SPC) の不活性期間の間に狭帯域幅のチャンネルを使用する BCCA を用いることでチャンネル探索時間の短縮を可能とする。

シミュレーションの結果、単一チャンネルを利用したネットワーク構成では高いネットワーク接続率と伝送速度は両立しない一方で、複数帯域幅・多数チャンネルを利用したネットワーク構成では高いネットワーク接続率を維持しながらネットワークに参加している無線機の伝送速度の平均値が向上することを確認した。SPC のチャンネルの帯域幅を 400 kHz で固定し、第 2 階層を Ch-6.25 kHz に固定したチャンネル構成の場合と複数の帯域幅 (6.25 kHz・25 kHz・100 kHz・400 kHz) のチャンネルで構成した場合を比較すると、後者ではネットワークの接続率が最大 30.3% 向上すること、及び伝送速度の平均が最大 74.3% 向上することを確認した。BCCA を用いる/用いない場合を比較すると、全ての 2 階層のチャンネル構成において後者の方がチャンネル探索に要する時間が短くなっており、最大で 86.6% 短縮されることを確認した。

今後、スロット単位の各無線機の制御や通信部分を考慮した詳細なシミュレーションの実施やチャンネルの使用状況や各地点の通信需要に応じたチャンネル割り当ての具体的なアルゴリズムの設計を行う予定である。

#### 謝辞

本研究開発は総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 SCOPE(受付番号 JP225006003) の委託を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] 大和田泰伯, 高井峰生, 梶田宗吾, 井家上哲史, 石原進, 加藤新良太, 山本寛: 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).
- [2] 加藤新良太, 石原進, 井家上哲史, 山本寛, 梶田宗吾, 高井峰生: 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] IEEE 802.15.4-2020: IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks, pp. 1-800 (2020).
- [4] I. Jang, K. Hwang: Multi-channel cluster PAN for TVWS band, ICNC2014, pp. 1076-1080 (2014).
- [5] 石原進, 浅野心夏, 梅本亮介, 加藤新良太, 梶田宗吾, 山本寛, 井家上哲史, 高井峰生: 準狭帯域無線システム DR-IoT の基本アーキテクチャの設計, 信学技報, Vol. 122, No. 341, SeMI2022-97, pp. 119-124 (2023).