

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11764

研究課題名（和文）Radio Resource Management in 5G and Beyond Networks: A Layered In-network Learning Approach

研究課題名（英文）Radio Resource Management in 5G and Beyond Networks: A Layered In-network Learning Approach

研究代表者

王 瀟岩 (Wang, Xiaoyan)

茨城大学・理工学研究科（工学野）・准教授

研究者番号：10725667

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：5Gシステムはスモールセル構成が採用されており、周波数利用効率が大幅に向上できるが、セル間干渉問題が発生してしまう。この問題を解消するため、電波を特定の方向に絞り込む技術であるビームフォーミングが広く検討されている。マルチセルシステムには、グローバル最適なビームフォーミング制御は非常に困難になる。本研究では、静的および動的な下りリンクシナリオにおいて、ネットワーク全体のエネルギー効率の最大化を目標にし、深層強化学習を用いた低分解能アナログビームフォーマと送信電力制御手法を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、無線リソースの最適化の実現に向け、深層強化学習を用いたアナログビームフォーマと送信電力制御について検討する。提案手法は従来手法と比べ、静的および動的なシナリオにおける、大幅なエネルギー効率改善が期待でき、周波数資源の有効利用に向けて重要な役割を持っていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The 5G system adopts a small cell configuration, which significantly improves frequency efficiency but also leads to inter-cell interference issues. To address this problem, beamforming, a technique that focuses radio waves in specific directions, is widely considered. Achieving globally optimal beamforming control in multi-cell systems is highly challenging. This study aims to maximize the energy efficiency of the entire network in both static and dynamic downlink scenarios, proposing a low-resolution analog beamforming and transmission power control method using deep reinforcement learning.

研究分野：無線通信システム

キーワード：周波数活用

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

5Gには「高速・大容量」、「低遅延」、「多数同時接続」が求められており、将来のB5Gにおいては、これらを更に高度化することに加え、新たに「超低消費電力」、「通信カバレッジの拡張性」、「自立性」、「超安全・信頼性」などの機能が期待されている。5Gに用いられる電波には大きく分けて、Sub-6Gとミリ波の二種類がある。ミリ波とは30GHz帯から300GHz帯の電波を指し、帯域を広く取れるが、伝搬損失が大きく遮蔽物に弱いなどの短所がある。そのため、従来の4Gが採用されているマクロセル構成ではなく、5GやB5Gの無線通信システムでは、スモールセル構成が検討されている。スモールセル構成はマクロセル構成よりも通信エリアが狭くなっており、空間周波数利用効率を大幅に向上することができる。しかし、スモールセル構成では隣接するセルとの距離が近いいため、セル間の電波干渉が発生してしまい、無線リソースの最適化が困難になる。

セル間干渉問題を解消するため、ビームフォーミング技術が広く検討されている。ビームフォーミングとは、電波を特定の方向に向けて送受信する技術であり、これを用いることで下りリンク通信の場合には、基地局(BS: Base Station)から目標のユーザー機器(UE: User Equipment)に向けた集中的なビーム状の電波の送信を行い、他のUEとの電波干渉を抑えることが可能となる。ビームフォーミングには、アナログビームフォーミングとデジタルビームフォーミング、アナログとデジタルを混合したハイブリッドビームフォーミングの3種類に大きく分かれる。その中、アナログビームフォーマは、ハードウェアの複雑さが小さく低消費電力であるため、安価な小セルBSに容易に実装できる。シングルセルに対して、送信信号の位相と振幅を制御することにより、通信容量やエネルギー効率の最大化が容易に実現できる。ただし、マルチセルシステムでは、協調ビームフォーミングの最適化は非決定性多項式時間(NP)困難な問題であり、特にモバイルUEが存在するシナリオにはさらに困難になる。分数計画法(FP)や加重MMSEアルゴリズムは、部分的な最適解を導き出すことができるが、グローバルチャネル情報を収集するために集中型の計算ユニットが必要であり、これにより無視できない通信遅延が発生してしまう。近年、人工知能(AI)の発展により、インテリジェントなBSが機械学習アルゴリズムを実装することで、無線リソースを最適化する手法が提案された。ただし、こちらの既存手法では、教師あり学習手法となり、静的なシナリオにおけるビームフォーミング制御を想定していた。

### 2. 研究の目的

本研究では、下りMISO(Multi-Input Single-Output)リンクを想定した静的および動的なシナリオにおいて、ネットワーク全体のエネルギー効率(EE)の向上を目的とした深層強化学習を用いた低分解能アナログビームフォーミング制御手法を提案する。グローバル的な最適化を実現するため、BS同士はローカル観測情報を交換し、各BSに提案された深層強化学習(DRL)アルゴリズムを分散的に実装することにより、各自のEEと他のセルのEEへの負の影響の間のトレードオフを考慮しつつ、最適なビームフォーマと送信電力を学習する。

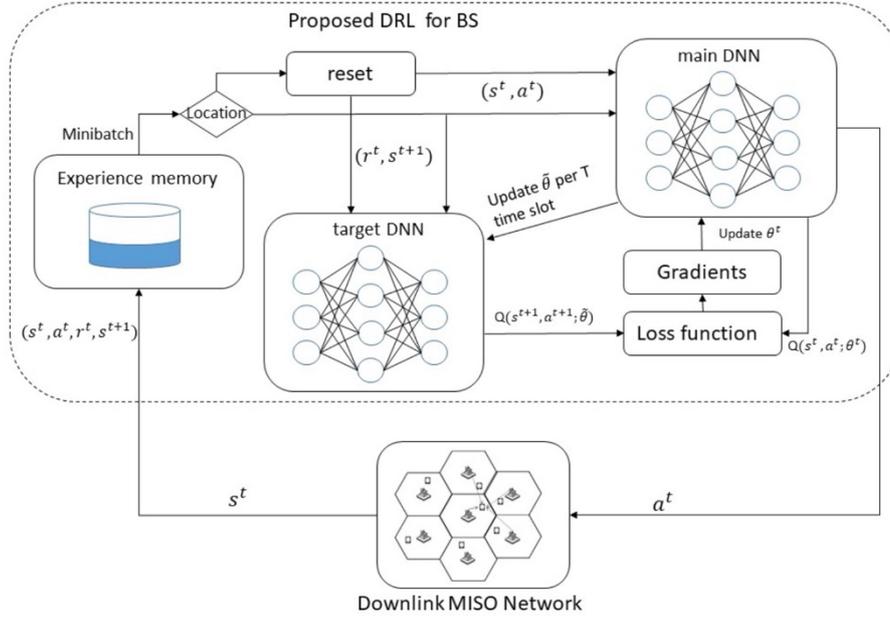
### 3. 研究の方法

以下の図に示すように、学習の安定性を保証するために、経験再生アプローチとダブルQネットワークアーキテクチャを採用している。すなわち、アクション選択のためのメインDNNとアクション評価のためのターゲットDNNが分けられている。経験メモリは、最新のM個の時間スロットの経験を保存し、先入先出のルールに従いメモリを更新する。さらに、UEの位置が急激に変化する場合、BSはそれを検出し、学習率 $\alpha$ と探索確率 $\epsilon$ をリセットする。BS $n$ に対して、深層強化学習における重要な要素である「行動」、「状態」、「報酬」について以下のように定義する。

- 状態

- (a)ローカル情報

- ・ビームフォーマ $w_n^{t-1}$



- 送信電力  $p_n^{t-1}$
- 信号ゲイン  $h_{n,n}^t w_n^{t-1}$
- 信号ゲイン  $h_{n,n}^{t-1} w_n^{t-2}$
- 通信路容量  $C(w_n^{t-1}, p_n^{t-1})$
- 干渉電力  $|\sum_{m \neq n} h_{m,n}^{t-1} w_m^{t-1} p_m^{t-1}|^2 + \sigma^2$
- 干渉電力  $|\sum_{m \neq n} h_{m,n}^{t-2} w_m^{t-2} p_m^{t-2}|^2 + \sigma^2$
- UE の座標  $(x, y)$

(b) 他 BS  $m$  から受けた干渉情報

- 干渉信号ゲイン  $h_{n,m}^{t-1} w_n^{t-1}$
- 被干渉 UE  $m$  の通信路容量  $C(w_m^{t-1}, p_m^{t-1})$
- 受信電力  $h_{m,m}^{t-1} w_m^{t-1} p_m^{t-1}$
- 干渉電力  $|\sum_{j \neq m} h_{j,m}^{t-1} w_j^{t-1} p_j^{t-1}|^2 + \sigma^2$

- 行動

行動にはビームフォーマ  $w_n^t$  と送信電力  $p_n^t$  で構成される。また、 $w_n^t = [e^{j\varphi_1}, \dots, e^{j\varphi_K}]$ 、 $\varphi_k \in \{\frac{2\pi b}{2^B} | b = 0, 1, \dots, 2^B - 1\}$  は  $k$  番目のアンテナ素子の位相、 $B$  は位相器の分解能となる。そのため、ビームフォーマでは各アンテナ素子で位相が選択される。

- 報酬

報酬は次式で定義する。

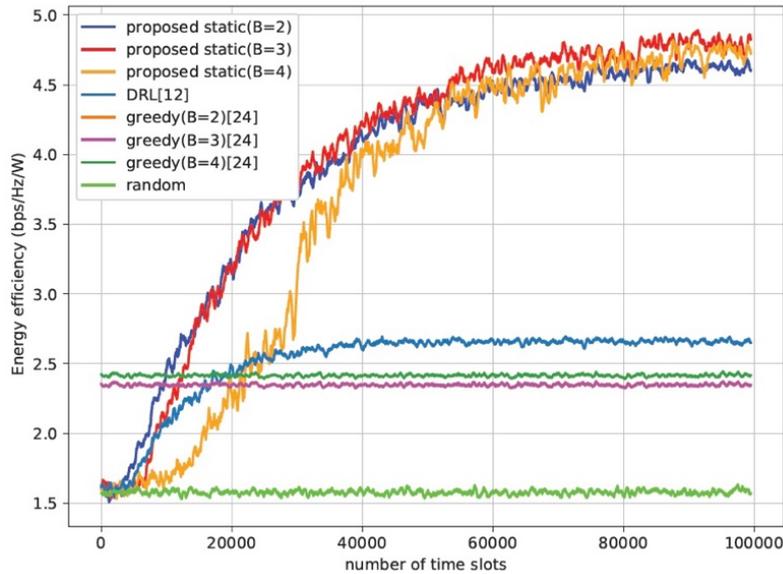
$$r_m^t = C(w_n^t, p_n^t) - I_n \quad (1)$$

ここで、 $I_n$  は他のセルに  $BS_n$  からの干渉がある場合とない場合との EE の差をとったものである。つまり、この学習においてビームを学習することで自分のセルへの EE を最大化しつつ、他のセルの EE への干渉を最小化していくことが報酬につながるということの意味する。

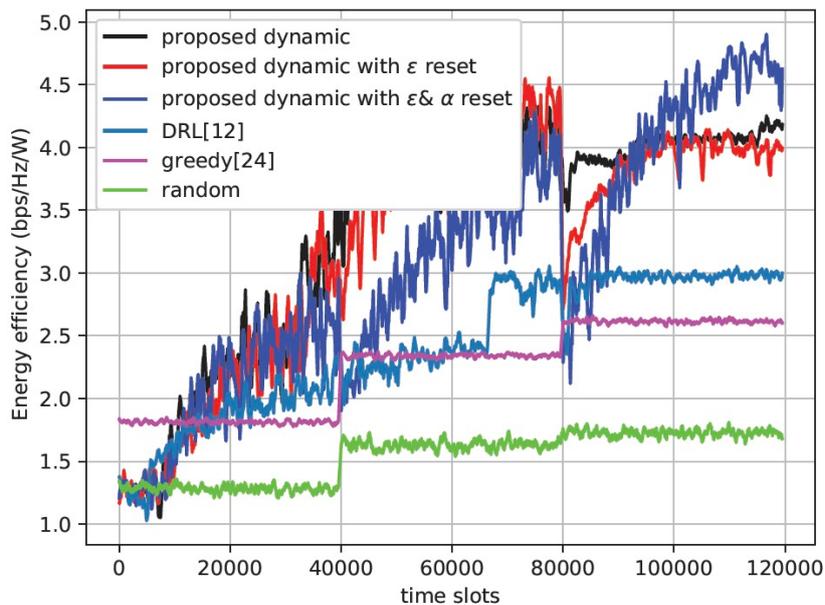
#### 4. 研究成果

本研究では、移動 UE のない静的なシナリオと移動 UE のある動的なシナリオの両方を想定し、提案手法を用いたアナログビームフォーミング制御のシミュレーションを行い、既存手法と比べ性能評価を行った。

まず、静的なシナリオにおけるシミュレーション結果を以下の図に示す。提案手法は、約 80000 タイムスロット後に既存手法を上回り、最終的に EE は約 4.7bps/Hz/W に収束された。ランダム手法と Greedy アプローチに比べて、それぞれ 3 倍と 2 倍の改善がある。位相器分解能が 2 から 4 に増加すると、EE が向上できるが、収束速度が遅くなる。



次に、UE が移動する動的なシナリオにおけるシミュレーションを行い、すべての UE は、時刻  $t=40000$  と  $t=80000$  における、セル内でランダムに移動した。EE の結果を以下の図に示す。1 回目の位置変動後、提案された動的アプローチは高い EE を維持できる。しかし、UE が 2 回目の位置変更を行った後、提案された動的アプローチは新しい環境を探索することが難しい。それに対して、 $\epsilon$  &  $\alpha$  をリセットした提案された動的アプローチの EE は、2 回移動後とも、それぞれ 2.2 と 2.5bps/Hz/W に急激に低下する。しかし、新しい環境での学習を素早く開始し、最終的には最も高い EE を達成することができた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Xiaoyan Wang, Masahiro Umehira, Mina Akimoto, Biao Han and Hao Zhou	4. 巻 22(18)
2. 論文標題 Green Spectrum Sharing Framework in B5G Era by Exploiting Crowdsensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Green Communications and Networking	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGCN.2022.3186282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Xiaoyan Wang, Yuto Teraki, Masahiro Umehira, Hao Zhou and Yusheng Ji	4. 巻 1
2. 論文標題 A Usage Aware Dynamic Spectrum Access Scheme by Exploiting Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22186949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Chao Pan, Zhao Wang, Haijun Liao, Zhenyu Zhou, Xiaoyan Wang, Muhammad Tariq, and Sattam Al-Otaibi	4. 巻 early access
2. 論文標題 Asynchronous Federated Deep Reinforcement Learning-Based URLLC-Aware Computation Offloading in Space-Assisted Vehicular Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TITS.2022.3150756	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yuki Kishimoto, Xiaoyan Wang, and Masahiro Umehira	4. 巻 2021
2. 論文標題 Reinforcement Learning for Joint Channel/Subframe Selection of LTE in the Unlicensed Spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Wireless Communications and Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2021/9985972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Zhenyu Zhou, Haijun Liao, Xiaoyan Wang*, Shahid Mumtaz, Jonathan Rodriguez	4. 巻 34
2. 論文標題 When Vehicular Fog Computing Meets Autonomous Driving: Computational Resource Management and Task Offloading	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Network	6. 最初と最後の頁 70-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MNET.001.1900527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hang Zhou, Xiaoyan Wang*, Masahiro Umehira, Xianfu Chen, Celimuge Wu, and Yusheng Ji	4. 巻 9
2. 論文標題 Wireless Access Control in Edge-Aided Disaster Response: A Deep Reinforcement Learning-based Approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 46600 - 46611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3067662	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Kouhei Kato, Xiaoyan Wang, Masahiro Umehira and Yusheng Ji
2. 発表標題 Deep Reinforcement Learning based Secondary User Transmit Power Control for Underlay Cognitive Radio Networks
3. 学会等名 ACM Research in Adaptive and Convergent Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hang Zhou, Xiaoyan Wang, Masahiro Umehira, and Yusheng Ji
2. 発表標題 A Deep Reinforcement Learning based Analog Beamforming Approach in Downlink MISO Systems
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hang Zhou, Xiaoyan Wang, Masahiro Umehira, and Yusheng Ji
2. 発表標題 A Deep Reinforcement Learning based Analog Beamforming Approach in Downlink MISO Systems
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Teraki, Xiaoyan Wang, Masahiro Umehira and Yusheng Ji
2. 発表標題 Deep Reinforcement Learning based Usage Aware Spectrum Access Scheme
3. 学会等名 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Kishimoto, Xiaoyan Wang and Masahiro Umehira
2. 発表標題 Reinforcement Learning based Joint Channel/Subframe Selection Scheme for Fair LTE-WiFi Coexistence
3. 学会等名 IEEE MSN ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hang Zhou, Xiaoyan Wang, Masahiro Umehira, Xianfu Chen, Celimuge Wu, Yusheng Ji
2. 発表標題 Deep Reinforcement Learning based Access Control for Disaster Response Networks
3. 学会等名 IEEE Globecom ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	梅比良 正弘  (Umehira Masahiro)  (00436239)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・特命研究員    (12101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------