

# 実時間ビームフォーミング実現のための 能動推論を用いたネットワークデジタルツインの 動的更新手法の検討

大阪大学 基礎工学部  
情報科学科ソフトウェア科学コース  
村田研究室  
橋本悠平

特別研究報告会 2025/2/13

- **Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)**
  - 6G通信を代表とする次世代ネットワーク技術を支える技術
  - 基地局に複数のアンテナを配置し、それらのアンテナを用いて通信を行う技術
  - 各アンテナの電波を制御することでビームフォーミングを可能にする技術
- **ビームフォーミング**
  - 特定の通信相手に向けて電波の指向性を操作する
  - 基地局と端末間の位置関係が反映されるCSI (Channel State Information) の高精度な推定が必要
  - 端末の位置とその位置におけるCSIを結びつけたCSIマップなどのマップ情報が有効
- **マップ情報を用いたビームフォーミングの研究<sup>[1][2]</sup>**
  - 端末の位置とそれに対応したマップ情報を用いることでビームフォーミングの性能を向上させる
  - リアルタイムなフィードバックが得られず、マップは事前に構築されている前提
  - リアルタイム性が考慮されておらず、環境変化への対応が難しいという課題

[1] D. Ding, D. Wu, Y. Zeng, S. Jin, and R. Zhang, "Environment-aware beam selection for an aerial communication with channel knowledge maps," in 2021 IEEE Globecom Workshops (GC Workshops), pp. 1-6, 2021.  
[2] Z. Jiang, C. Jiang, S. Zou, S. Wang, Z. Han, and S. Sun, "Channel-aware beam selection for aerial communication in dynamic environment: A real-time beamforming-based network approach," China Communications, vol. 21, no. 4, pp. 10-22, 2024.

## NDT (Network Digital Twin) とその活用

- **NDT (Network Digital Twin)**
  - ネットワークのリアルタイムな状態を仮想空間に再現する技術
  - リアルタイムな状態を再現するため環境変化に対して適応性がある
- **ビームフォーミングとNDT**
  - CSIは環境の変化による電波伝播環境の変化の影響を受ける
    - 環境変化：建物の移動や天候の変化など
  - CSIマップを動的に更新することでリアルタイムなCSIマップを再現可能
  - 動的に更新するCSIマップはNDTとしてリアルタイムなビームフォーミングに有効

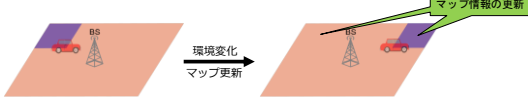


図1: 環境変化に対するCSIマップの動的更新のイメージ

## 研究目的・アプローチ

- **本研究の目的**
  - CSIマップを動的に更新することによるNDTの実現方法の検討
  - NDTを用いたビームフォーミングの実現
- **本研究のアプローチ**
  - ドローンを導入しCSIマップを動的に更新する手法を検討
  - ドローンの制御に能動推論を活用
  - CSIマップのCSI情報をもとにビームフォーミングを実行

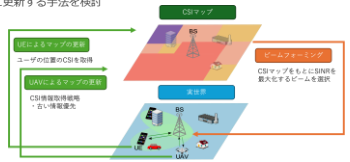


図2: 本研究の全体像

## 能動推論

- **能動推論**
    - 自由エネルギー原理に基づき行動決定を行う理論
      - 観測データから環境の状態を推測
      - 推測結果に基づき行動を決定
    - 未知な情報を減らす行動と、得られた知識を活用した望ましい行動とのバランスをとることが可能
  - **行動決定の方法**
    - 以下の期待自由エネルギー  $G_n$  を最小化する行動  $\pi$  を選択
      - $\theta$ : 観測値,  $s$ : 状態,  $C$ : 脳が好ましいと考える選択
- $$G_n = -E_{Q(\theta, s|\pi)}[\ln P(s|\theta, \pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(\theta|\pi)}[\ln P(\theta|\pi)] \quad (1)$$
- $$\approx -E_{Q(\theta, s|\pi)}[\ln Q(s|\theta, \pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(\theta|\pi)}[\ln P(\theta|C)] \quad (2)$$
- 第1項は観測値を得ることによる状態の信念の不確実性を減らすという情報利用
  - 第2項は観測値の分布が選択に近づくという実利的な価値

## CSIマップの動的更新方法

- **CSIマップの受動的更新**
  - ユーザのフィードバックを基にCSIを計測
  - 計測できるCSIはユーザの位置のCSIに限定
- **CSIマップの能動的更新**
  - ドローンを用いてCSIを計測
  - ユーザが存在しない位置に対してドローンを派遣することでその位置のCSIを計測可能
  - 場所ごとの優先度を反映して移動先を決定
    - 情報が未知である地点を優先
    - 情報が古い地点の更新を優先
    - 効率の良いルート上の地点の計測を優先
    - 低電力時に充電を優先

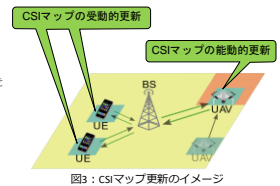


図3: CSIマップ更新のイメージ

7 能動的なCSIマップ更新のためのドローンの移動制御

- ドローンの移動制御における移動位置の選択を能動推論として捉える

$$G_n = -E_{Q(0,s|\pi)}[\ln Q(s|0,\pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(0,\pi)}[\ln P(o|C)] \quad (2)$$

CSIマップ上で  
未知の情報削減
移動優先度の  
高い場所の選択

- 次の移動位置の選択 (π) に対して以下のように設定する

- 観測値 (o) :
    - ・ドローンの位置 o[0]
    - ・その位置におけるSINR o[1]
    - ・行動として選択した位置 o[2]
  - 状態 (s) : CSIマップ
  - 行動 (π) : 次の移動位置
  - 嗜好 (C) : 観測値 o[n] に対して目標とする分布 C[n] (n = 0,1,2)
- } 離散化して設定する

7

8 ドローンの移動制御における嗜好

- それぞれの観測値に対する嗜好

- C[0]、C[1]に関してはそれぞれの観測値に優劣はないため嗜好の差は設けない
- C[2]は充電の必要性、移動ルートの効率性、計測優先度を考慮し、以下の式で定める

$$C[2][i] = \begin{cases} \frac{CH_i}{\text{充電の必要性}} & i = i_c \\ \frac{(ER_i/d_i) + (T - T_{MAP}(t))}{\text{ルートの効率性} \quad \text{計測優先度}} & i \neq i_c \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

$$CH = \begin{cases} 0, & (T - T_{charge}) < \kappa \\ (T - T_{charge}) \times \tau, & (T - T_{charge}) \geq \kappa \end{cases}$$

$$ER_i = \begin{cases} w_1(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \times (\alpha(i) - \alpha_i) > 0 \wedge (\gamma_i - \gamma_{i-1}) \times (\gamma(i) - \gamma_i) > 0 \\ w_2(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \times (\alpha(i) - \alpha_i) > 0 \vee (\gamma_i - \gamma_{i-1}) \times (\gamma(i) - \gamma_i) > 0 \\ w_3(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \times (\alpha(i) - \alpha_i) \leq 0 \wedge (\gamma_i - \gamma_{i-1}) \times (\gamma(i) - \gamma_i) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

表1: 式(3)、式(4)、式(5)の各記号の意味

| 記号             | 意味                       |
|----------------|--------------------------|
| $i$            | 移動位置のindex               |
| $i_c$          | 充電地点のindex               |
| $d_i$          | 現在地から移動位置 <i>i</i> までの距離 |
| $T$            | 現在時刻                     |
| $T_{MAP}(t)$   | 移動位置のCSIマップ更新時間          |
| $T_{charge}$   | 最後に充電した時間                |
| $(x_t, y_t)$   | 時刻 <i>t</i> における位置の座標    |
| $(x(i), y(i))$ | 移動位置 <i>i</i> の座標        |

8

9 評価環境

- 図4のシナリオの環境でビームフォーミングを実施

- ビームフォーミング: 電波の振幅と位相を決定することにより実現
  - 各アンテナの送信信号 (y) と受信信号 (x) の関係式:  $y = \sqrt{P_s} H w x + n$  (6)
- チャネル行列として実際の電波伝播環境を再現したデータセットDeep MIMO<sup>3)</sup>のチャネル行列を使用
- ユーザの動作: 大通りを往復し、1000秒毎に裏通りを1往復する

表2: 式(6)の各記号の意味

| 記号           | 意味           |
|--------------|--------------|
| $\sqrt{P_s}$ | 振幅           |
| $H$          | CSIを表すチャネル行列 |
| $w$          | 位相           |
| $n$          | ノイズ          |

表3: 式(4)、式(5)のパラメータ設定

|          |      |       |     |
|----------|------|-------|-----|
| $\tau$   | 0.01 | $w_1$ | 2   |
| $\kappa$ | 1000 | $w_2$ | 1   |
|          |      | $w_3$ | 0.1 |

表4: シミュレーションの主な設定

| 数値   | 数値 | アンテナ数 |
|------|----|-------|
| 基地局  | 3  | 4     |
| ユーザ  | 1  | 1     |
| ドローン | 1  | 1     |



図4: シミュレーション環境

9

10 評価方法

- ユーザとドローンの移動の様子を見ることによりCSIマップの更新の様子を評価

- 表5の各シミュレーションのSINRを比較し、以下の観点から評価

- CSIマップ導入の有効性
- ドローン導入の有効性

- SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio)

- SINRの単位はdBであり、値が大きいほど通信品質が大きいことを示す

表5: シミュレーション名とシミュレーションの内容の対応

| シミュレーション名       | シミュレーションの内容                         |
|-----------------|-------------------------------------|
| without CSI-Map | CSIマップを用いずにビームフォーミングを実施             |
| passive CSI-Map | ドローンを用いずに構築したCSIマップを用いてビームフォーミングを実施 |
| active CSI-Map  | ドローンを用いて構築したCSIマップを用いてビームフォーミングを実施  |

10

11 評価結果 (CSIマップの更新の様子)

- ドローンを導入することによりユーザが存在しない位置のCSIの計測が可能

- ドローンがCSIマップ上の未知の情報削減に貢献



動画1: ユーザとドローンの移動の様子

11

12 評価結果 (SINRの比較)

- CSIマップ導入の有効性に関するSINRの比較 (図5)

- CSIマップを導入することで、過去に計測したCSIを有効に活用できるため、SINRが向上した

- ドローン導入の有効性に関するSINRの比較 (図6)

- ドローンを導入することで、あらかじめCSIマップの情報を補充することができるため、SINRが向上した

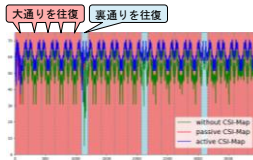


図5: 表2の各シミュレーションにおけるSINRの時間変化

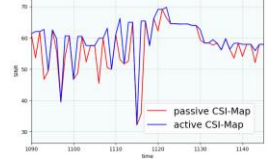


図6: 図5のtime 1090~1145の範囲において、passive CSI-Mapとactive CSI-Mapを取り出し拡大した図

12

## まとめと今後の課題

13

### ● まとめ

- NDTを用いることでチームフォーミングの性能が向上した
- NDTの更新手法としてドローンを用いることでチームフォーミングの性能が向上した

### ● 今後の課題

- コーザ数、ドローン数増加時のスケーラビリティおよび相互連携の検討
- 3次元制約を含めたドローンの移動制御方法の検討
- より現実的な環境を想定した評価の検討
  - CSIマップの不確実性の考慮
  - 環境変化によるCSI変化の考慮

13