

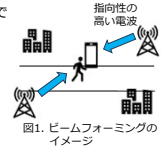
## 位置情報を利用した能動推論による 基地局間連携ビームフォーミング手法 の提案と評価

大阪大学 基礎工学部  
情報科学科 計算機科学コース  
村田研究室  
山田 翔太

0

## 研究背景

- 無線通信における高周波数帯の電波の利用
  - 高周波数の電波を用いることで無線通信の高速化
  - 日本では 5G において 28GHz 帯のミリ波を使用
  - 伝播経路上の障害物によって大きく減衰する課題
- ビームフォーミング
  - 多数のアンテナをもつ基地局 Massive MIMO にて実行する信号処理
  - 通信を行う端末に向かってビーム状に電波を送信することで電波の指向性を高め減衰の影響を抑制
  - チャネル行列の情報をもとに信号処理を実行
    - ・ チャネル行列：伝播経路上で電波が受ける影響
- ビームフォーミングの課題
  - チャネル行列を正確に把握することは困難
  - 端末が動くとき伝播経路も変わるためチャネル行列も変化
    - ・ リアルタイムかつ正確なチャネル行列の把握が必要



1

## ビームフォーミングにおける位置情報の利用

- 位置情報を利用したビームフォーミング
  - チャネル行列は基地局と端末の位置関係に大きく依存
  - より正確なチャネル行列の推測が期待
- PRS (Position Reference Signal) による位置情報取得
  - 基地局と端末間で PRS を送受信し、位置情報を測定
    - ・ 基地局と端末間で完結するため、屋内含め場所を問わずに利用可能
  - PRS の送受信に通信リソースを使用
    - ・ 位置情報の取得時にスループットが低下する課題

2

2

## 研究目的・アプローチ

- 本研究の目的
  - 次のような状況下で、ビームフォーミングと位置情報の取得の統合的な制御の実現
    - ・ 端末の移動により環境は常に変動
    - ・ 位置情報の取得によってビームフォーミングの性能向上が期待
    - ・ 一方、位置情報の取得にオーバーヘッドが存在
- 本研究のアプローチ
  - 位置情報を利用した能動推論によるビームフォーミング手法の提案
  - 位置情報の取得の有無も能動推論によって決定

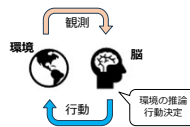
3

3

## 能動推論

- 能動推論
  - 自由エネルギー原理で説明される脳の推論方法
  - 推論と行動を通して環境を知り、目的を達成
    - ・ 環境から受け取る観測値をもとに環境を推論する
    - ・ 行動によって環境に影響を及ぼし、観測値に変化を与える
- 行動の決定方法
  - 次のように定義される期待自由エネルギー  $G_{\pi}$  を最小化する行動を選択
    - 図2. 能動推論のイメージ
  - $$G_{\pi} = -E_{Q(s|\pi)}[\ln P(s|o, \pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(o|\pi)}[\ln P(o|\pi)]$$

$$\approx -E_{Q(s|\pi)}[\ln Q(s|o, \pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(o|\pi)}[\ln P(o|C)]$$
    - ・ 第1項は観測値によって多くの情報を得ることに関連する情報利得
    - ・ 第2項は目的を直接達成することに関連する実利的価値
  - 目的に達するために必要な情報が得られる行動と直接的に目的を達成するための行動をバランス良く選択



4

4

## 基地局における能動推論の概要

- 能動推論の流れ
  1. モバイル端末から信号強度と（取得決定時に限り）位置情報を観測
  2. 能動推論によりその時点の端末の位置におけるチャネル行列の推論
  3. 能動推論によりビームの形状と位置情報の取得の有無を決定
  4. 決定した形状のビームでモバイル端末と通信

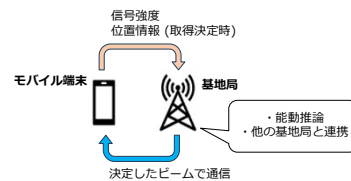


図3. 提案手法のイメージ

5

5

### 能動推論における観測

- 基地局が観測する情報
  - SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)
    - ・ 受信信号における干渉電波とノイズに対する信号強度の比
    - ・ 伝送レート  $C$  は
 
$$C = B \log_2(1 + \text{SINR})$$
 ( $B$ : 帯域幅)
   
よって計算
      - ・ 位置情報を取得する際はスループットが伝送レートの最悪 13/14 に低下
        - ・ PRS の送受信に OFDM サブキャリアの14個のシンボルのうち1つを使用
        - ・ シミュレーションでは SINR を補正
  - 位置情報
    - ・ 基地局が位置情報の取得を決定した際に基地局から見たモバイル端末の距離・角度を観測
    - ・ 位置情報を取得しない際は最後に観測した位置情報を観測
  - いずれの観測値も離散化した上で観測

6

### 能動推論における行動・選好と基地局間連携

- 基地局が能動推論により決定する行動
  - 期待自由エネルギー  $G_\pi$  を最小にするよう行動系列  $\pi$  を決定
 
$$G_\pi = -E_{Q(o|\pi)}[\ln P(s|o, \pi)] - \ln Q(s|\pi) - E_{Q(o|\pi)}[\ln P(o|\pi)]$$
  - ビームの形状を電力と位相の組で指定
  - 位置情報の取得の有無を決定
- 基地局の選好
  - 選好は基地局が目標とする観測値の分布
  - SINR の最大化が目標とし、高い SINR ほど高い選好を設定
  - 端末の位置情報に優劣はないので位置情報に選好の差は設けない
- 基地局間連携
  - 連携用のエージェントをおき、一定期間毎に各基地局の推論結果を観測
  - 各基地局の推論結果をもとにその時点でのチャネル行列を推論し、基地局に提供
    - ・ 各基地局は提供されたチャネル行列を推論の際の事前信念として利用

7

### 評価環境

- チャネル行列のデータセットに DeepMIMO\* を使用
  - 各地点ごとのチャネル行列のデータセット
  - 図4の環境で表1の端末1台に対しビームフォーミングを実行
    - 端末の速さに応じて推論の頻度を設定

	歩行者想定	車想定
端末の速さ	1.4 m/s	16 m/s
推論の頻度	1 回 / 秒	4 回 / 秒

パラメータ	値
周波数	28GHz
帯域幅	0.4GHz
基地局アンテナ数	4
端末アンテナ数	1

図4. シナリオ模式図

\* DeepMIMO, the Wireless Intelligence Lab, <https://www.deepmimo.net/>

8

### 評価方法

- 2000回推論を行う中で、基地局の観測した SINR を集計
- 各 SINR から スループット/帯域幅 を計算
  - スループット/帯域幅 は以下の式にて計算される値
    - ・ (A) : どの基地局も位置情報を取得しない
    - ・ (B) : 少なくとも1つの基地局が位置情報を取得する
$$\text{スループット/帯域幅} = \begin{cases} \log_2(1 + \text{SINR}) & \text{when (A)} \\ 13 & \text{when (B)} \\ 14 & \log_2(1 + \text{SINR}) & \text{when (B)} \end{cases}$$
- 位置情報の利用方法について集計結果を比較
  - 能動推論によって位置情報を取得する場合
  - 位置情報を利用しない場合
  - 常に位置情報を取得する場合

9

### 実行結果 (歩行者想定)

- SINR の低下に応じて位置情報を取得することで、ビームフォーミングの性能を上げながらも位置情報取得コストを抑制

図5. 能動推論に従い位置情報取得した際の推論1000回毎のスループットと位置情報取得回数 (破線は位置情報を利用しない場合)

図6. 位置情報の利用方法による比較

10

### 実行結果 (車想定)

- 歩行者想定より激しい環境の変動中でも位置情報を用いることで高いスループットを頻繁に達成

図7. 能動推論に従い位置情報取得した際の推論350回毎のスループットと位置情報取得回数 (破線は位置情報を利用しない場合)

図8. 位置情報の利用方法による比較

11

## まとめと今後の課題

- **まとめ**
  - 位置情報を観測しながらビームフォーミングを行うことで性能の向上を確認
  - 位置情報の取得を能動推論で決定することで、性能を保ちつつ位置情報取得のコストを抑制
- **今後の課題**
  - 複数のモバイル端末に対するビームフォーミング
    - ・周波数帯あるいは時間で分割して処理
  - 位置情報に誤差を含む場合の評価
  - 能動推論を用いない他の手法との比較

12