

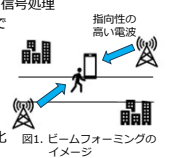
## 位置情報を利用した能動推論による 基地局間連携ビームフォーミング手法

大阪大学 情報科学研究科  
情報ネットワーク工学専攻 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
  - チャネル状態情報をもとに信号処理を実行
    - ・ チャネル状態情報：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
  - チャネル状態情報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状態情報も変化
  - リアルタイムかつ正確なチャネル状態情報の把握が必要



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
  - チャネル状態情報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状態情報の推測が期待
- 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

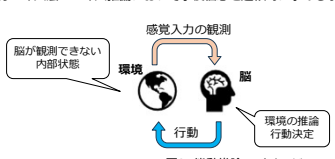
### 研究目的・アプローチ

- 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、位置情報の取得によるオーバーヘッドが存在
- 本研究のアプローチ
  - PRS による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
  - ビームの形状と位置情報の取得を能動推論によって制御

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、脳が観測できない環境の内部状態を推論
    - ・ 行動によって環境に影響を及ぼし、次に得る観測値を制御
  - 環境の状態の推論には変分ベイズ法を使用
    - ・ 変分ベイズ法：ベイズ推論において事後信念を近似的に求める手法



4

### 能動推論による行動の決定方法

- 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
 
$$G_\pi = -E_{Q(o|\pi)}[\ln P(s|o, \pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(o|\pi)}[\ln P(o|\pi)]$$

$$\approx -E_{Q(o|\pi)}[\ln Q(s|o, \pi) - \ln Q(s|\pi)] - E_{Q(o|\pi)}[\ln P(o|C)]$$
    - ・ 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

5

### 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状態情報の推論
  3. 推論結果から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

6

### 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)
   
 によって計算
      - ・ 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

7

### 能動推論で推論する環境の状態・基地局の行動

- 基地局が能動推論により推論する環境の状態
  - チャネル状態情報を推論
    - ・ チャネル状態情報は離散的であると仮定
- 基地局が能動推論により決定する行動
  - ビームの形状を電力と位相の組で指定
    - ・ 電力5段階, 位相4段階の計20種類のビームから選択
  - 位置情報の取得の有無を決定
  - 期待自由エネルギー  $G_n$  を最小にするよう行動系列  $\pi$  を決定
 
$$G_n = -E_{Q(\theta|\pi)}[\ln P(s|o, \pi)] - \ln Q(s|\pi) - E_{Q(\theta|\pi)}[\ln P(o|\pi)]$$

8

### 能動推論における選好と基地局間連携

- 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 の最大化を目標とし, 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
  - 観測値からチャネル状態情報を推論し, 基地局に提供
    - ・ 各基地局は提供されたチャネル状態情報を推論の際の事前信念として利用

9

### 評価環境

- チャネル行列のデータセットに DeepMIMO\* を使用
  - 仮想的な屋外・屋内環境でレイトラッキングを実行するツール
  - 各地点ごとのチャネル行列のデータセットを取得可能
    - ・ チャネル行列: チャネル状態情報を行列で表したもの
- 端末1台に対しビームフォーミングを実行
  - 歩行者, 車の速度で移動する端末を想定してそれぞれ評価
    - ・ 速度や移動経路, 推論頻度を想定に合わせて設定 (表2)

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

	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

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

10

### 評価シナリオ

- DeepMIMO が提供する O1 Scenario を使用
- 図4の環境でシミュレーションを実行
  - 基地局は黄色の円に位置
  - 歩行者は青色部分を移動
  - 車は緑色部分を移動

図4. シナリオ模式図

11

## 評価方法

- 20000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

$$\text{スループット/帯域幅} = \begin{cases} \log_2(1 + \text{SINR}) & \text{when (A)} \\ \frac{13}{14} \log_2(1 + \text{SINR}) & \text{when (B)} \end{cases}$$

### ● 位置情報の利用方法について集計結果を比較

- 位置情報の取得を能動推論で制御する場合
- 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

12

12

## 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

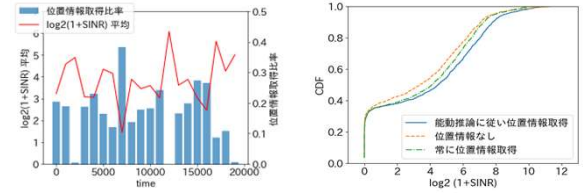


図5. 位置情報の取得を能動推論で制御する場合の推論1000回毎のスループットと位置情報取得回数

図6. 位置情報の利用方法による比較

13

13

## 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

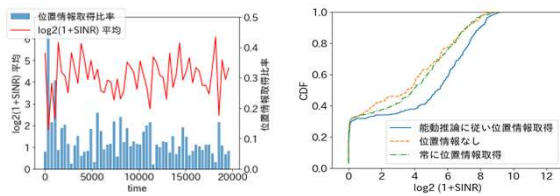


図7. 位置情報の取得を能動推論で制御する場合の推論350回毎のスループットと位置情報取得回数

図8. 位置情報の利用方法による比較

14

14

## まとめと今後の課題

### ● まとめ

- 能動推論の観測値に位置情報を追加することでビームフォーミングの性能向上を確認
- 位置情報の取得を能動推論で制御することで位置情報取得のコストを抑制
- 位置情報についての行動決定によって計算量が増加する欠点
  - ・ より高速な端末に対して計算が追いつかなくなる可能性

### ● 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
  - ・ 基地局のアンテナ数の増加
  - ・ 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

15

15