

脳の認知モデルを用いた LPWAネットワークにおける無線チャンネル割当手法

小南大智 (大阪大学)
鈴木一哉 (NEC)
長谷川洋平 (NEC)
下西英之 (NEC)
村田正幸 (大阪大学)

発表の概要

課題

- LPWA (LoRa) ネットワークにおける自営網の混在が無線干渉を起こし、通信品質が悪化する
- 管理者が不在の場合には最適化が困難

提案

- 通信品質の悪化した無線チャンネルが n 個存在する、ということを用いたベイズ推定のフレームワークでモデル化した、脳の認知モデルによって認知し、通信品質の良い無線チャンネルを機器に割り当てる手法を提案

要素技術

- LPWA
- ベイジアンアトラクターモデル^[4]
 - アトラクターを持つ非線形ダイナミクス
 - ベイズフィルタ (Unscented Kalman Filter)

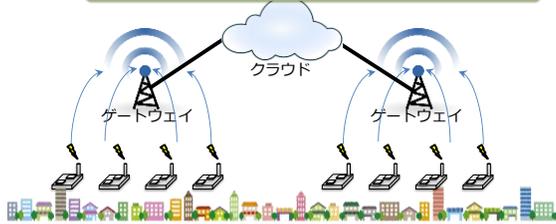
[4] S. Bizer, J. et al, "A bayesian attractor model for perceptual decision making," PLoS Computational Biology, Aug. 2015.

研究背景

Low Power Wide Area (LPWA)

- 少ない送信電力で (送信電力 20 mW)
- 広い範囲に (1 km~100 km) データを送る技術
 - 多端末→基地局のスター型であり、**上り方向通信**が中心

IoT サービス普及に向けて重要な技術として着目されている



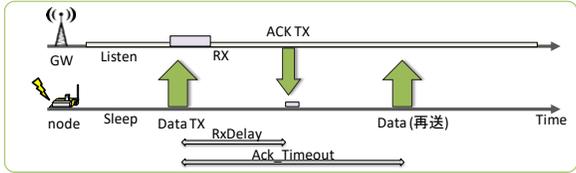
LoRa (Long Range) WAN

LoRa アライアンスの公開する技術仕様

- 免許不要の周波数帯を利用しており、GW および子機を準備することで自営網を容易に構築可能
- 端末は、物理層に LoRa 変調、MAC 層に ALOHA を採用
 - 物理層で使用可能な無線チャンネル数は 8 つ

同一周波数帯を用いる他のシステムが空間的に近い場所に存在すると、通信の干渉・衝突の増加が問題となる

LoRa による通信の一例



研究の目標・アプローチ

本発表での目標

- ゲートウェイにおけるデータ受信成功率の向上
- 無線チャンネルの通信品質の変化 (悪化) を認知する

提案手法

- 課題における前提
 - 無線チャンネルの通信品質はデータの受信成功率で表される
 - 無線チャンネルごとにパケットエラー率 (PER) は異なる
 - 端末のデータ生成頻度は低く、端末は疎らに配置されるため、通信品質について時空間的に十分な情報を得ることが困難
- アイデア
 - 時空間的に不十分な情報が利用できない際にも適切な推論を実施する人間の脳の情報認知機構を応用する
 - 脳の情報認知をモデル化したベイジアンアトラクターモデル^[4]を用いて、無線チャンネルの通信品質を認知する

ベイジアンアトラクターモデル (BaM)

脳の情報認知機構をモデル化

- 情報知覚モデル**
 - 観測対象の情報をベクトル形式で記述し、一定周期で情報の観測を行い、情報弁別モデルの入力とする
- 情報弁別モデル**
 - 知覚した情報を過去の記憶と照らし合わせ弁別を行う
 - 知覚情報が無いときの脳の認知過程を、認知状態が K 個のアトラクターを持つダイナミクスで更新されるモデルとして表現 (過去の記憶が各アトラクターに対応)
 - 知覚情報が入力された際の内部状態を推定する
- 意思決定モデル**
 - 情報弁別の推定結果が尤もらしい際に意思決定を行う
 - 情報弁別の尤度を計算するためにベイズ推定を用いる
 - 尤度が閾値を超えた場合に現在の弁別結果を採用する

脳の認知過程における内部状態の更新

- 内部状態 ($z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_K]^T$) を以下のダイナミクスで更新

$$z_t = z_{t-\Delta t} + \Delta t f(z_{t-\Delta t}) + \sqrt{\Delta t} w_t$$

- f は winner-take-all network (一人勝ち) ダイナミクス
 - z_n のみが最大値、 z_n 以外は最小値に収束する ($n=1 \dots K$)
 - w_t は正規分布に従う乱数 (認知過程のノイズ)

内部状態と記憶の対応

$$x_t = M\sigma(z_t)$$

- M は特徴量行列 (観測ベクトルの次元 $\times N$)
- σ はシングモイド関数 (z_n を 1 に、 z_n 以外を 0 に変換)
 - n 番目のアトラクターに対応した記憶が x として出力

情報知覚後の内部状態

- 記憶と観測の誤差が最小となるように更新されると仮定
- この仮定のもと内部状態 z を推定する

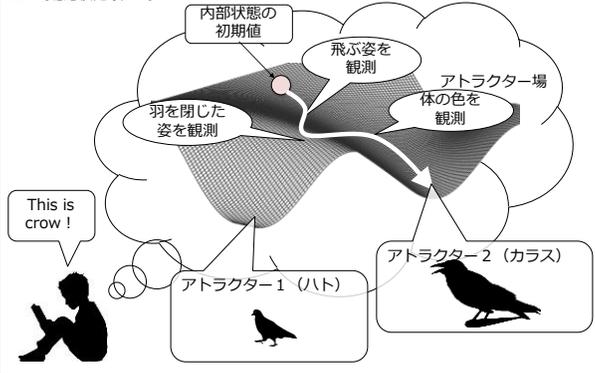
Unscented Kalman Filter (UKF) を利用

確信度を利用した意思決定

- UKF では事前分布として正規分布を仮定するため、確率密度 $P(z_t = \varphi_n | x_t)$ が定義できる
- P を尤度関数として利用し、確信度と呼ぶ
 - 確信度は各 n ($n = 1 \dots K$) に関して計算され、確信度が一定のしきい値を超えた記憶内容に対応する意思決定を行う

確信度の増加と意思決定

BaM の意思決定イメージ



BaM による通信品質の認知手法

BaM を利用する際の既知の問題点

- 観測情報の種類が一定である場合、アトラクター数が多いほど推定精度が悪化する (観測情報数 \geq アトラクター数が望ましい)

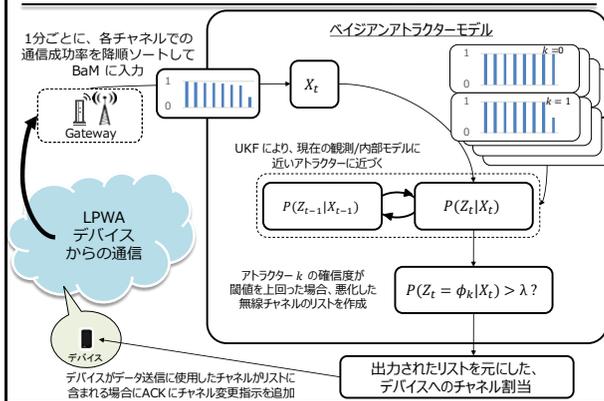
通信品質が悪い無線チャネルの数を認知

- どの無線チャネルの通信品質が悪いのかを区別せずに、通信品質が相対的に悪い無線チャネルの数を BaM で認知する



- アトラクターに記憶させる情報
 - 8 個のアトラクターを用意し、 k 番目のアトラクターには通信品質の悪い無線チャネルが k 個、良い無線チャネルが $8 - k$ 個ある ($k = 0 \dots 7$) ことを表す特徴量ベクトル
 - 通信品質が良い (悪い) = データ受信成功率 1.0 (0.5)

BaM による制御ループ



性能評価

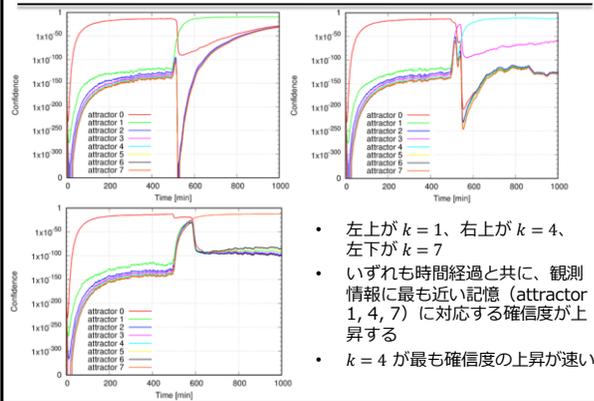
LPWA の通信モデル

- ネットワークモデル
 - 5x5 km² のエリアに LPWA 端末 3,000 台と基地局 1 台を設置
 - 端末は一様乱数に従い設置、基地局は (0, 0) に設置
- 無線通信モデル
 - 端末は 8 個の無線チャネルから一様乱数に従い一つを選択して指示があるまで使用
 - データ・ACK のサイズは 50 byte・10 byte、通信速度は 1.5 kbps
 - 通信はユニットディスクモデルを利用
 - 自身を中心とする半径 10 km の円内の端末と通信可能
 - 同時に複数の端末からの信号が届くと、衝突により信号の復号は必ず失敗する
 - 確率的なバケットエラー
 - 各チャネルに PER ($q = 0$ or 0.5) を設定し、確率 q でバケット損失が生じる
- MAC 層モデル
 - データ・ACK 送信前に 10 ms のキャリアセンス
 - 同一チャネルを利用している信号を検出したときは送信を中止する。データの場合は一度だけ、2 分後に再送を試みる (現状は再送時右同一チャネルを利用)
 - データ受信から一定時間 (RxDelay) 後に ACK を送信 (10 ms に設定)
- データ発生モデル
 - 30 分に 1 個の周期的発生 (連続衝突する状況を回避するため、-5 ~ 5 秒の乱数を追加)

BaM に関するシミュレーションシナリオ

- アトラクターに記憶させた通信品質情報のいずれかに近い入力値が観測されるように以下の設定を用いる
 - はじめに 8 個の無線チャンネルの中から k 個ランダムに選択し、その無線チャンネルを利用した通信では、PER を 0.5 とする
 - のごりの $8 - k$ 個の無線チャンネルでは、PER を 0 とする
 - データ受信成功率を、ゲートウェイが受信したデータの内、復号に成功した割合とする
 - BaM における観測周期は1分とし、1分ごとのデータ受信成功率を入力に用いる（各チャンネルで毎分平均 12.5 個）
- 観測値に近い記憶に対する確信度の増加する速さを評価
 - 初期値として $k = 0$ とし（すべての無線チャンネルで PER 0）、シミュレーション開始から 500 分経過後に、 k を 1~7 に変化させる

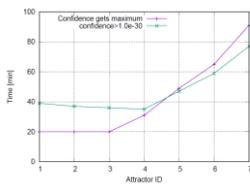
シミュレーション結果（認知精度）



- 左上が $k = 1$ 、右上が $k = 4$ 、左下が $k = 7$
- いずれも時間経過と共に、観測情報に最も近い記憶（attractor 1, 4, 7）に対応する確信度が上昇する
- $k = 4$ が最も確信度の上昇が速い

シミュレーション結果（認知速度）

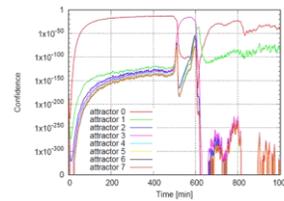
確信度の上昇の速さを評価



- 時刻 500 分以降：
 - 入力と一致するアトラクターの確信度が最大となるまでの時間
 - 他のアトラクターの確信度が落ちない場合に増加
 - 入力と一致するアトラクターの確信度が一定値を超えるまでの時間
 - $k = 1 \sim 4$ では直前までの観測情報からの変化が小さい場合に増加
 - $k = 5 \sim 7$ では $k = 0$ との違いを認識するまでに時間がかかる

シミュレーション設定（無線チャンネル割当）

通信品質の悪化したチャンネルの回避



時刻 500 分で $k = 0$ から $k = 3$ に変化

- 確信度が 10^{-30} を超えた際にチャンネル割当を開始
 - 相対的に通信品質が悪い無線チャンネルを使用している端末に、良品の無線チャンネルから一つをランダムに割り当てる
 - 割り当てるためには ACK を送信する必要があり、そのため、端末からデータが届くまでは割り当てが行われない

まとめと現状の取り組み

まとめ

- LPWA (LoRa) ネットワークにおける自営網の混在が無線干渉を起し、通信品質が悪化する可能性が考えられる
- 通信品質の悪化した無線チャンネルが存在することを、脳の認知モデルによって認知し、通信品質の良い無線チャンネルを機器に割り当てる手法を提案し、基本的な性能を評価した

現状の取り組み

- 現実的な設定におけるシミュレーション評価
 - 通信モデル、データ発生モデル、干渉モデル、端末追加・削除
- 情報の記憶数（アトラクター数）の削減
 - 悪化チャンネルの個数すら気にせず、悪化したチャンネルが存在するかもしれないだけを認知するのであれば高速かつ正確に行える
- 確信度を用いた意思決定の仕組みの変更
- 通信性能に着目した性能評価
 - データ損失率、転送容量などを他手法と比較評価する