

Spreading Factor Allocation Method Adaptive to Changing Environments for LoRaWAN Based on Thermodynamical Genetic Algorithm

大阪大学 大学院情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻 村田研究室
藤田 勇樹

2022/2/10

LoRaWAN

- 低消費電力/長距離通信可能な IoT 向け広域ネットワーク規格
- 端末数が増加すると通信の衝突が頻発
 - MAC プロトコルに ALOHA を使用することに起因
 - 端末ごとに拡散率というパラメータを動的に制御し衝突の緩和が可能
- 拡散率設定には下表のようなトレードオフ
 - アプリケーションや状況に応じた適切な割り当て方法が必要

拡散率設定のトレードオフ

拡散率	通信速度	衝突率	通信可能距離	ノイズ耐性	消費電力
小	高	低	短	低	小
大	低	高	長	高	大

2

研究目的とアプローチ

- LoRaWAN 制御における課題
 - 適切な拡散率割り当ての決定は組み合わせ最適化問題
 - 端末数の増加とともに現実的な時間での導出が困難
 - 端末の移動等の環境変動に対する動的な制御の遂行が困難
- 研究目的
 - 環境変動に対応する LoRaWAN への拡散率割当制御の実施
- アプローチ
 - 熱力学的遺伝アルゴリズム^[1]を利用
 - 解の適合度と多様性のバランスを調整可能
 - 多様性を維持し環境変動に適応可能なフィードバック関数を使用

[1] N. Mori, J. Yoshida, H. Kita, and Y. Nishikawa, "A thermodynamical selection rule in the genetic algorithm," Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, vol. 5, no. 2, pp. 82–90, Feb. 1996.

3

熱力学的遺伝アルゴリズム (TDGA)

- 個体群の多様性を考慮する遺伝的アルゴリズム (GA)
 - 通常の GA にみられる初期収束の問題を回避
- Gibbs の自由エネルギー最小化原理に基づく選択操作
 - 温度 T で熱平衡状態のシステムでは、状態の定常分布は自由エネルギー $F = E - HT$ を最小化
 - F を最小化する個体を選択し、適合度だけでなく多様性を考慮

変数	意味	TDGA での解釈
E	システムの平均エネルギー	個体群の適合度の平均を負にした値
H	エントロピー	個体群の多様性
T	温度	低温では適合度重視 高温では多様性重視

4

フィードバック TDGA (FTDGA)^[2]

- TDGA では、探索が進み適合度の負数 E が減少すると $F = E - HT$ よりエントロピー (多様性) H が減少
- TDGA の温度 T をフィードバック関数 $J(t)$ で置き換え

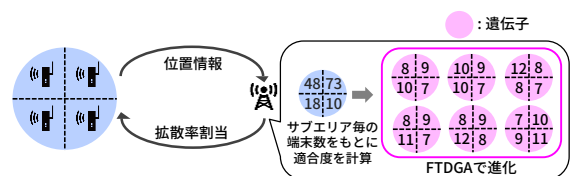
$$J(t) = \exp(\tau(H^* - H)) J(t-1)$$
- H^* : 目標エントロピー
 - 個体群の多様性がこの値になるように次の温度を決定
- τ : フィードバックゲイン
 - 目標エントロピーに近づく力の度合い
- 個体群の多様性を維持し、環境の変動に対応可能

[2] N. Mori, H. Kita, and Y. Nishikawa, "Adaptation to a changing environment by means of the thermodynamical genetic algorithm," Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, vol. 12, no. 4, pp. 240–249, Apr. 1999.

5

FTDGAを用いた拡散率割当手法

- FTDGA の設計
 - 遺伝子: 制御対象エリアをサブエリアに区切り、各サブエリアの拡散率を並べる
 - 評価関数 (適合度): パケット到達率と端末の消費電力量に基づき定義 (後述)
- 拡散率割当方法
 - 基地局は端末からのデータに含まれる位置情報を収集、各サブエリアの端末数を計算
 - 一定周期で位置分布情報をもとに FTDGA を実行し、遺伝子を進化 (拡散率割当の更新) させ、評価値が最良のものを出力
 - 拡散率割当をサブエリアごとにブロードキャストし、各端末は以降その拡散率で通信



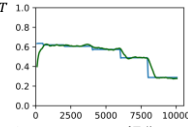
6

評価関数の設計

- **パケット到達率に関する評価関数 F_{arr}**
 - パケット発生率を μ 、送信にかかる時間を T 、送信経路中のパケットエラー率を PER とするとき、

$$F_{arr} = (1 - PER)e^{-2\mu T}$$
 - 拡散率ごとの F_{arr} の平均を評価関数とする
 - シミュレーションでの実測値 (緑線) と F_{arr} (青線) はほぼ一致 (右図)
- **消費電力に関する評価関数 F_{pow}**
 - 全端末の送信にかかる消費電力を P とし、 P を 0 から 1 に正規化

$$F_{pow} = -\frac{P - nPow(12)}{n(Pow(12) - Pow(7))}$$
 - 全端末が消費電力最小の拡散率 7 で $F_{pow} = 1$
 - 全端末が消費電力最大の拡散率 12 で $F_{pow} = 0$



7

提案手法の評価

- **LoRaWAN の通信モデル**
 - 10km 四方のエリアに LoRa 端末 1000 台と基地局 5 台を配置
 - 各端末は 32 Byte の位置情報データを 100 秒に 1 回送信
 - 5 台の基地局のうち 1 台でもデータを受信すれば受信成功
 - 拡散率には 7 から 12 の整数のいずれかが設定可能
- **比較手法**
 - エリート戦略を使用する遺伝的アルゴリズム (SGA)
 - フィードバック関数を使用しない TDGA
- **GA 呼び出し毎の出力した個体の適合度 (fitness) で評価**

8

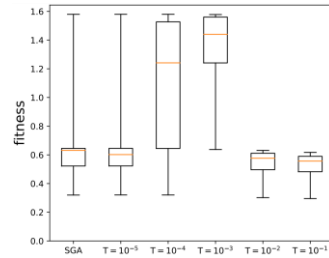
シミュレーション設定

- **GA の設定**
 - シミュレーション時間: 10000 秒
 - サブエリア区切り数: 10 x 10
 - 個体群サイズ: 500
 - 50 秒に一回 GA を呼び出し、その度に 100 世代計算
- **環境変動モデル**
 - 基地局が故障する状況
 - 端末が移動する状況
- **複数のパラメータでシミュレーションを 10 回ずつ実行**
 - TDGA では温度 T を変更
 - FTDGA では H^* と τ を変更

9

評価結果: 基地局が故障する状況 (TDGA)

- 基地局が 2000 秒毎に 1 台故障する設定
- 温度 $T = 10^{-3}$ で、目的関数に適した制御が可能

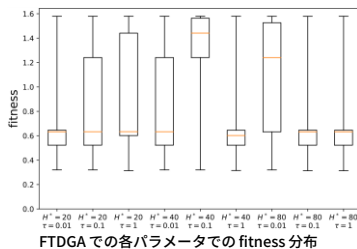


SGA, TDGA での各パラメータでの fitness 分布

10

評価結果: 基地局が故障する状況 (FTDGA)

- $(H^*, \tau) = (40, 0.1)$ が最も優れ、 $T = 10^{-3}$ と同等の性能
- $(H^*, \tau) = (20, 0.01)$ などでは低いエントロピーを維持し、環境変動直後の解探索性能で劣る
- $(H^*, \tau) = (40, 1)$ などではエントロピーが振動し性能が低下

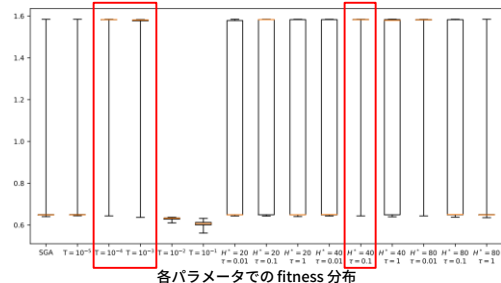


FTDGA での各パラメータでの fitness 分布

11

評価結果: 端末が移動する状況

- 適切な T は前環境と異なる
- (H^*, τ) は前環境で最良の $(40, 0.1)$ で他を上回る性能
 - 適切な H^* は遺伝子表現でおおよそ決定し環境に左右されにくい



各パラメータでの fitness 分布

12

まとめと今後の課題

まとめ

- 変動する環境において LoRaWAN の拡散率割当制御を行う手法を提案
- 適切な H^*, τ での FTDGA で今回設定したどの環境でもパケット到達率の向上と省電力化を行う制御が可能
 - TDGA では温度 T は環境ごとに調整が必要

今後の課題

- 適切な H^*, τ を求める手法の構築
 - 遺伝子表現が決定すれば一意に定まると考えられる