

# ニホンアマガエルのサテライト行動に着想を得た LPWA ネットワークのカバレッジ設計手法

細川 侑嗣<sup>†</sup> 小南 大智<sup>††</sup> 合原 一究<sup>†††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>††</sup> 大阪大学 大学院経済学研究科 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-7

<sup>†††</sup> 筑波大学システム情報工学研究科 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{y-hosokawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,  
†††aihara@cs.tsukuba.ac.jp

あらまし 近年、バイオミメティクスに関する研究が多くなされており、情報通信分野においても、群知能と呼ばれる、個体の自律的動作から生じる協調的な社会的行動をネットワーク制御に応用した研究が数多くみられる。我々は、ニホンアマガエルにみられる音声を用いたコミュニケーションに着目している。ニホンアマガエルは広告音を長い時間スケールで同相同期的に、短い時間スケールで逆相同期的に発することが知られている。さらに、発声する個体の近隣で休むサテライト行動をとる個体が存在することも知られている。サテライト行動を再現できる数理モデルを構築し、無線端末に応用することで、一定のネットワーク性能を保ちつつ、長期的なサービスを提供可能な LPWAN の設計手法を提案しシミュレーションによる評価結果を示す。

キーワード サテライト行動、数理モデル、LPWAN、カバレッジ

## Efficient LPWA network coverage method inspired from satellite behavior of Japanese tree frogs

Yushi HOSOKAWA<sup>†</sup>, Daichi KOMINAMI<sup>††</sup>, Ikkyu AIHARA<sup>†††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>††</sup> Graduate School of Economics, Osaka University

<sup>†††</sup> Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

E-mail: †{y-hosokawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††d-kominami@econ.osaka-u.ac.jp,  
†††aihara@cs.tsukuba.ac.jp

**Abstract** There have been many studies on biomimetics have applied swarm intelligence to network control. For that purpose, we are now focusing on the sound communication of Japanese tree frogs. It is known that Japanese tree frogs make a chorus synchronize, and avoid call overlap, which is called anti-phase synchronization. Moreover, in order to save energy, a male frog sometimes rests without calling near another calling male frog, which is called a satellite behavior. By applying a mathematical model that can reproduce the satellite behavior to wireless sensor nodes, we propose a design method for the coverage in a low power wide area network (LPWAN) that can provide a long-term service while maintaining constant network performance. Simulation results show that the proposed method can extend the time by 20.9% that at least one device can sense 60% of the observed field

**Key words** satellite behavior, mathematical model, lower power wide area network (LPWAN), coverage

### 1. はじめに

生物の振る舞いに着想を得ることで新たな技術を創り出す、バイオミメティクスに注目が集まっている。我々は情報通信技

術の分野において、生物の自律分散的な振る舞いに着目し、ロバストで適応性のある制御技術へと応用してきた [1]。個体の自律的動作から生じる協調的な社会的行動は群知能と呼ばれ、ネットワーク制御に群知能の知見を応用した研究も多くなされ



図1 ニホンアマガエル

ている [2].

我々は生物の中でも、ニホンアマガエル（以降カエルとも表記；図1）の持つ興味深い生態に着目している。カエルの種の中で、オスがメスを引き寄せるために広告音と呼ばれる求愛のための鳴き声を発する。一般的に体長が大きい個体をメスが選ぶ傾向があり、鳴き声が低く、合唱における発声頻度が高い傾向が広告音には見られる。広告音の役割は、求愛の他にオス同士の縄張りの主張であるとも考えられている [3]。ある種のカエルでは、広告音を同相同期的に発する、あるいは逆相同期的に発することが知られている。自身が発声していない際に、他の個体が鳴き始めると、他の個体にメスを獲得されないように発声し始め、合唱が終われば、外敵に自身を発見されるリスクを下げるために自身の発声もやめる。これにより、同相同期的な合唱が見られる。また、合唱の中で自身の存在をメスにアピールするために、逆相同期的に発声タイミングをずらすといった行動も見られている。また、発声している個体の近隣で休む個体も確認されており、この行動はサテライト行動と言われている。体長や声の質、発声回数など、メスにとっての魅力度に差がある個体が近くに存在する場合には、サテライト行動が見られる [4]。魅力度が低い個体が、魅力度の高い個体の近くで発声せずに待機し、魅力度の高い個体に惹きつけられたメスが近づいてくるとそれを奪うといった行動である。発声には多くの体力が使用されるため、サテライト行動である個体が入り替わる現象もみられている。これらの行動は、各個体の繁殖ための利己的な行動であるといえるが、群れ全体でみると、省エネルギーで効率的な行動であるともいえる。群れ全体で見た場合には、同相同期的に合唱を行うことで、合唱が大きく、繁殖地としての質が高いというアピールをメスに行うことが出来る。また、合唱を繰り返す中で、サテライト行動によって一定の割合が休み、休む個体が入り替わっていくことで、群れ全体が合唱を続けられる時間を延ばすことが出来ている。

同相同期と逆相同期の違いのように、カエルの種類が異なると、合唱の短期的時間スケール、長期的時間スケールで見られる同期状態に差異が現れることが知られている。この違いは、彼らの存在する外部環境の差異が原因であるという仮説があり、群れの生存率を高めるための重要な戦略がその中に潜んでいる可能性がある。ニホンアマガエルは短い時間スケールでは逆相同期的に広告音を発し、長い時間スケールでは同相同期的に合唱を行うカエルの一種であり、このような特徴を情報ネットワークへ応用した取り組みについては、いくつかの研究結果が得られている [1], [5].

我々は現在ニホンアマガエルの音声コミュニケーション特性のうち、サテライト行動とくに注目しており、サテライト行動に着想を得た無線端末の制御を行うことで、無線ネットワーク全体の長寿命化が可能であると考えている。特に本稿では、一定のネットワークの頑健性を保ちつつ、持続的なサービスを提供可能な LPWAN の設計に、ニホンアマガエルのサテライト行動に着想を得た無線端末の制御を行う。

無線端末の位置と相関が強いセンシングデータ（気温、湿度など）を収集する LPWAN を想定している。この想定の下では、近隣の無線端末の内、一定割合の端末がセンシングデータを基地局に送信し、残りの端末がスリープすることで、より持続的なサービスを提供することが出来ると考えられる。センシングの頑健性や精度が求められる場合には、一定のセンシングカバレッジを保つ必要がある [6]。サテライト行動に着想を得た端末の制御を行うことで、一定のカバレッジを保つことが可能な時間を伸ばすことができることを示す。

本稿の構成は以下のとおりである。2. 章には、ニホンアマガエルの合唱とサテライト行動に着想をえた LoRaWAN エンドデバイスへのスリープ制御について述べ、3. 章にシミュレーションによる評価結果を述べ、4. 章で結論を述べる。

## 2. スリープ制御モデル

以下ではニホンアマガエルの合唱とサテライト行動に着想を得た、LoRaWAN エンドデバイスのスリープ制御手法について述べる。ニホンアマガエルの合唱における数理モデルが文献 [5] で提案されており、本稿では、サテライト行動に着目し、LoRaWAN の Class を確率的に切り替えるモデルの提案を行う。LoRaWAN エンドデバイスは  $s_n$ ,  $\theta_n$ ,  $T_n$ ,  $E_n$  の4つの変数に基に制御を行うとし、以下で説明を述べる。

### a) 状態 ( $s_n$ )

LoRaWAN の端末には ClassA, ClassB, ClassC の3種類の通信モードがある。ClassA は基地局から ACK を受け取るタイミングでしか受信せず、ClassB は一定の間隔で基地局がビーコンを送信し、ビーコンを受け取るタイミングで受信が可能、ClassC は常に受信可能でスリープを行わない。受信する必要の有無に応じて、この3種類のモードを適切に切り替えることで、消費電力を削減することが可能である。定期的にセンサーデータを送信する状態、スタンバイモードとし一定間隔でセンシングを行う状態、スリープを行いデータの送受信やセンシングを行わない状態、それぞれをアクティブ状態、スタンバイ状態、スリープ状態と定義する。 $n$  番目の無線センサーノードの状態を  $s_n$  として表すと、 $s_n = 0$  はアクティブ状態、 $s_n = 1$  をスタンバイ状態、 $s_n = 2$  をスリープ状態と対応させる。 $s_n = 0$  の場合は Class C に対応させる。 $s_n = 1, 2$  の場合には、初めは ClassA で受信を行わず、一定期間後に ClassC に切り替えることで受信を行う。 $s_n = 0, 1, 2$  の間の状態遷移は式 (10)~13 に基づき行う。Class A から C へは  $\lambda \times \Delta T_{inter}$  時間経過すると状態遷移を起こす。ここで  $\Delta T_{inter}$  はデューティーサイクルの平均値とする。Class C の時に、 $\mu \times \frac{2\pi}{\omega}$  の間、他のエンドデバイスの電力情報を知るために、受信スロットを開放し、

その間に状態遷移が発生しない場合は Class A への切り替えを行う。

b) データ送信タイミング ( $\theta_n$ )

$s_n = 0$  の際に、エンドデバイスが基地局へセンシングデータを送信する。データを送信するタイミングは位相である  $\theta_n$  に基づいて決定する。 $\theta_n = 0$  のタイミングでデータを送信し、他の端末がセンシングデータを送信していることを受信すると、自身との位相差に基づいて位相の更新を行う。角速度は  $\omega$  とする。センシングデータの送信時には、ヘッダにバッテリー残量を付与し、サテライトへの遷移はヘッダのバッテリー残量情報に基づき決定するとする。

c) デューティサイクル ( $T_n$ )

必要な値に応じて  $T_n$  を調整することで、センシングデータを収集する間隔を決定するデューティサイクルを決定できます。

d) バッテリー ( $E_n$ )

エンドデバイスのバッテリー容量 (mAh) を  $E_n$  として表す。ここではセンシングにおけるバッテリー消費は無視することし、表 1 のスタンバイモード、レシーブモード、トランスミットモードのみの電力消費を考える。表 1 は Semtech 社の LoRa 通信モジュール SX1276 [7] のデータシートから抜粋している。

$\theta_n$ 、 $T_n$ 、 $E_n$  は状態に以下のように状態によって変化する。

- アクティブ状態

$$\frac{d\theta_n}{dt} = \omega + \sum_{m \text{ for } r_{nm} < r_0}^N \delta(\theta_m) \Gamma_{nm} (\theta_n - \theta_m) \quad (1)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = \begin{cases} -\iota & \text{if } \delta(\theta_n) = 1, \\ -\kappa & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = \delta(\theta_n) \quad (3)$$

- スタンバイ状態

$$\frac{d\theta_n}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = \begin{cases} -\eta & \text{if ClassC,} \\ -\kappa & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = -\alpha \quad (6)$$

- スリープ状態

$$\frac{d\theta_n}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dE_n}{dt} = \begin{cases} -\kappa & \text{if ClassC,} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{dT_n}{dt} = -\alpha \quad (9)$$

$r_{nm}$  は  $n$  番目と  $m$  番目の端末の距離であり、 $r_0$  は他端末のデータ送信による影響を受ける最大距離を決定するパラメータである。 $\Gamma_{nm}(\theta_n - \theta_m)$  は周期  $2\pi$  の相互作用関数であり、 $\delta(\theta_n)$  はディラックのデルタ関数である。これを用いることで、距離が  $r_0$  以下の端末のデータ送信によって位相が更新され、自身がデータを送信するごとにバッテリー  $E_n$  は  $\iota$  ずつ減少し  $T_n$  は 1

ずつ増加する。これはカエルが逆相同期的な発声を行うことを表現しており、LoRaWAN エンドデバイスではデータ送信タイミングをずらし衝突回避を行うことが可能である。バッテリー  $E_n$  と  $T_n$  にはそれぞれ上限と下限が存在し ( $0 \leq E_n \leq E_{max}$  および  $0 \leq T_n \leq T_{max}$ )、上限もしくは下限を超えることはないこととする。

スタンバイ・スリープ状態では発声は行われなため、位相の更新は行われな。バッテリーはスタンバイモード時と Class C の際に消費する。疲労度は一定の割合  $\alpha$  で回復する。

次に 3 状態の遷移確率について記載する。ここで、スリープ状態とアクティブ状態間には直接の遷移は無いこととし、スタンバイ状態を介して 3 つの状態が切り替わることとする。

$$P_n^{active \rightarrow standby} = F_1(E_n)G_1(T_n) \quad (10)$$

$$P_n^{standby \rightarrow active} = F_2(E_n)G_2(T_n)H(\vec{s}) \quad (11)$$

$$P_n^{standby \rightarrow sleep} = I_1(E_n) \quad (12)$$

$$P_n^{sleep \rightarrow standby} = I_2(E_n) \quad (13)$$

アクティブ状態からスタンバイ状態への遷移は、体力のあるカエルが鳴き続け、体力がなくなってくると休むといった行動に着想を得て遷移確率を式 (14)、(15) のように決定した。またデューティサイクルをある一定の値に保つため、式 (15) のようにロジスティック関数を使用して、 $T_n$  の値によって遷移確率が大きく影響されるようにした。

$$F_1(E_n) = -\frac{0.5}{E_{max}} E_n + 1 \quad (14)$$

$$G_1(T_n) = \frac{1}{\exp(-\gamma(T_n - \Delta T)) + 1} \quad (15)$$

スタンバイ状態からアクティブ状態への遷移は、体力のあるカエルが鳴き始めやすいといった行動に着想を得て、遷移確率を式 (16) の  $F_2$ 、 $G_2$  を定義した。アクティブ状態からスタンバイ状態への遷移と同様にデューティサイクルをある一定の範囲内に保つため、式 (17) のように決定した。また、ニホンアマガエルをはじめとする多くの種で、ある個体が鳴き始めるとそれに追従して周辺の個体が鳴き始める特徴が見られる。この特徴に着想を得て式 (16) の  $H$  のようにモデル化した。他端末の状態の把握に関しては、各端末は自身から一定距離 ( $r_0$ ) 内に存在する各端末が、自身が Class C で観測できている最後のデータ送信時刻を覚えており、各端末について次のデータ送信時に観測できた場合には、送信間隔  $f$  を把握できるとした。以上から、式 (11) の  $F_2(E_n)$ 、 $G_2(T_n)$ 、および  $H(\vec{f})$  を次式のように定義する。ただし、 $H(\vec{f})$  は、近くにデータ送信する端末がいる場合といない場合で、異なる 2 値をとる。

$$F_2(E_n) = \frac{0.5}{E_{max}} E_n + 0.5 \quad (16)$$

$$G_2(T_n) = \frac{1}{\exp(\gamma(T_n - (T_{max} - \Delta T))) + 1} \quad (17)$$

表 1 LoRa 無線モジュールの SX1276 における消費電流 (DC=3.3V)

モード	設定	値
sleep		0.2(uA)
standby		1.6(mA)
receive mode	bands 2&3	12.0(mA)
	band 1, LNA boost ON	11.5(mA)
transmit mode	TX power=13dBm	29(mA)
	TX power=7dBm	20(mA)

$$H(\vec{f}) = \begin{cases} p_{high} & \text{if } f < \Delta T_{call} \exists f \in \vec{f}, \\ p_{low} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

スタンバイ状態からスリープ状態、スリープ状態からスタンバイ状態への遷移はサテライト行動に着想を得て遷移確率を決定した。サテライト行動はメスを奪うことが可能な距離に自身より魅力的なオスが存在する場合に見られている。カエルの魅力度は体長や合唱における発声頻度だと考えられており、発声頻度は体力に依存して変化すると考えることができる。そこで自身の近くにバッテリーに余裕がある端末が存在する場合にスリープを行うことでカバレッジの低下を防ぎスリープが可能である。

$$E_n^{sleep2} = \max(\vec{E}) \quad (19)$$

$$E_n^{sleep1} = \vec{E} \quad (20)$$

$$I_1(E_n) = \frac{1}{\exp(-\epsilon(E_n^{sleep} - E_n - \delta)) + 1} \quad (21)$$

$$I_2(E_n) = \frac{1}{\exp(\epsilon(E_n^{sleep} - E_n + \delta)) + 1} \quad (22)$$

ここで、 $E_n^{sleep}$  はスリープ状態に遷移するかどうかの基準となるバッテリー残量を表しており、 $\vec{E}$  は自身から  $r_0$  以内で観測できたエンドデバイスのバッテリー残量である。式 (19)、(20) のように近隣の端末のバッテリーの内どの端末を基準としてスリープを行うかを選択することにより、スリープする端末の割合を決定することが可能である。

### 3. シミュレーション評価

シミュレーションによる LPWA ネットワークのカバレッジ設計の結果を述べる。この章ではサテライト行動を LoRaWAN エンドデバイスに適用することによって、一定のカバレッジを保ちつつ、スリープを行うことで長寿命化が図れることをシミュレーションによって示す。サテライト行動の有効性を示すため、2. 章に示したスリープ制御手法と、スリープ状態に遷移しない手法との比較を行った。LoRaWAN は LPWA 規格の一つであり、従来の無線通信と同程度の送信出力で長距離の通信が可能である。LoRaWAN の通信可能距離に合わせて、1 km×1 km の観測領域に 100 台のエンドデバイスをランダムに設置した。観測領域を 20 m×20 m の正方形で分割した際の格子の交点上に対しカバレッジを計算する。本論文では、1 つ以上のセンサによってセンシングされている交点の全交点の数に対する割合としてカバレッジを定義する。表 2 にパラメータ

表 2 パラメータ設定

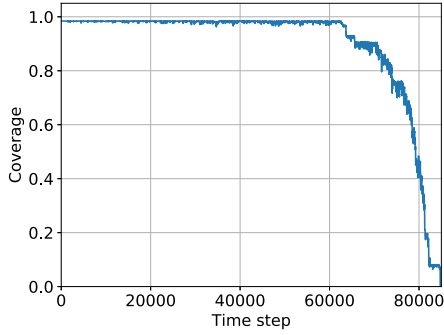
パラメータ	値	説明
$r_0$	200	他端末のデータ送信による影響を受ける最大距離
$r_1$	100	バッテリー残量を比較する端末間の最大距離
$r_2$	150	センシング可能な最大距離
$\alpha$	0.39	疲労度の回復割合
$T_{max}$	100.12	疲労度の最大値
$\Delta T$	$T_{max}/1.2$	式 (15)、(17) における変曲点を決定するパラメータ
$\gamma$	0.5	式 (15)、(17) におけるロジステック関数のパラメータ
$E_{max}$	500	バッテリー容量 (mAh)
$p_{high}$	0.8	式 (18) におけるパラメータ
$p_{low}$	0.01	式 (18) におけるパラメータ
$\epsilon$	0.5	式 (21)、(22) におけるロジステック関数のパラメータ
$\lambda$	0.7	Class A から C への切り替え時間を決定するパラメータ
$\mu$	20	Class C に留まる最大時間を決定するパラメータ
$\eta$	1.6	スタンバイモードにおけるバッテリー消費量
$\iota$	29.0	送信時のバッテリー消費量
$\kappa$	12.0	受信時のバッテリー消費量

の設定を示す。エンドデバイスを中心とした半径  $r_2$  の円内をセンシング可能とする。本稿では  $\theta$  によるセンシングデータ送信タイミングのシミュレーションは行っておらず、4.4 sec を 1 タイムステップとしたシミュレーションを行った。アクティブ状態の際には、1 タイムステップで 1 回データ送信を行うこととし、センシングデータ送信時には 400 msec 送信モードであるとし、バッテリー消費を計算した。

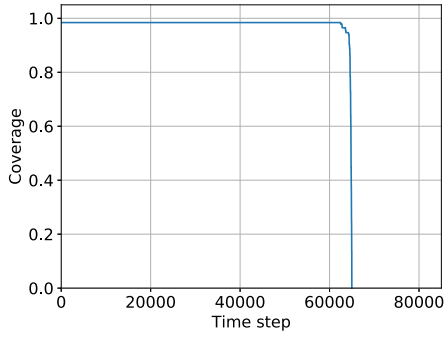
カバレッジ、バッテリーの変化を図 2、3 に示す。サテライトに着想を得たスリープ制御を行うことによって、カバレッジを落とさずにスリープを行い、センシング可能な時間をのばせることが出来ていることが示された。図 2 では、60%の領域をセンシング可能な時間が 20.9%伸ばすことが可能であることを示している。また、式 (21)、(22) におけるスリープを行う基準である  $E_n^{sleep}$  を  $E_n^{sleep1}$ 、 $E_n^{sleep2}$  に設定した場合の全端末数に対する各状態の端末数の割合を図 4、5 に示す。スリープ状態に入る基準を変化させることで、求められる寿命やカバレッジに応じた調整が可能であることも示された。

### 4. まとめ

本稿ではニホンアマガエルのサテライト行動に着想を得た LoRaWAN エンドデバイスのスリープ制御の提案とシミュレーションによる評価を行った。1 km×1 km の領域に 100 台のエンドデバイスをランダムに配置したシミュレーション結果より、60%の領域をセンシング可能な時間が 20.9%伸ばすことが可能であることを示せた。今後は、カエルの短時間スケールの逆相

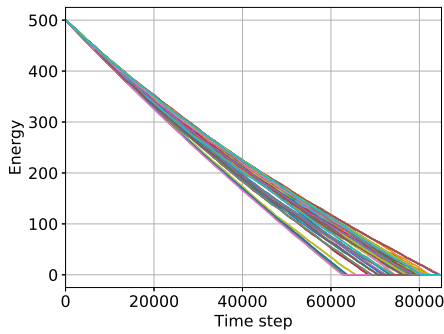


(a) 提案手法

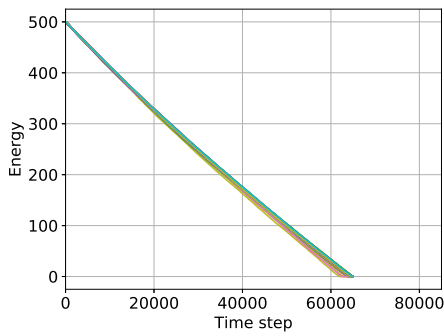


(b) スリープを行わない手法

図 2 カバレッジの変化 ( $E_n^{sleep} = E_n^{sleep1}$ )

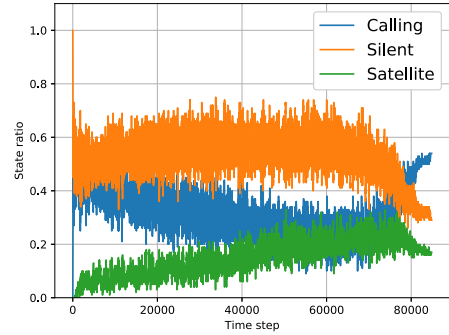


(a) 提案手法

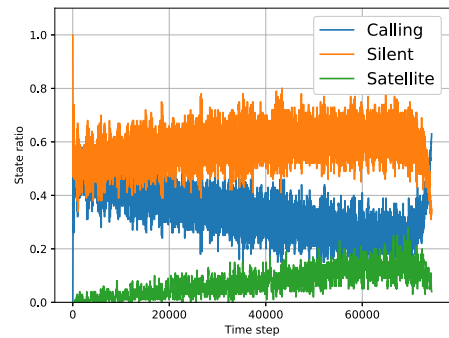


(b) スリープを行わない手法

図 3 バッテリーの変化 ( $E_n^{sleep} = E_n^{sleep1}$ )

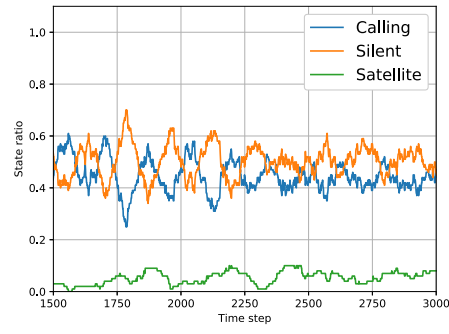


(a)  $E_n^{sleep} = E_n^{sleep1}$

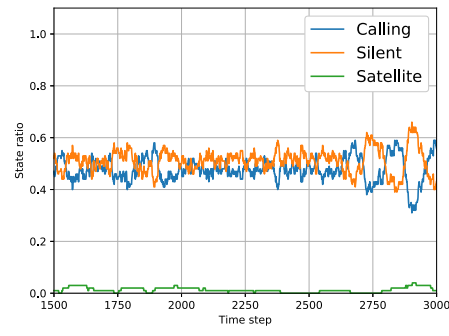


(b)  $E_n^{sleep} = E_n^{sleep2}$

図 4 各状態の端末数の割合



(a)  $E_n^{sleep} = E_n^{sleep1}$



(b)  $E_n^{sleep} = E_n^{sleep2}$

図 5 各状態の端末数の割合 (1,500~3,000 タイムステップ)

同期を再現した数理モデルを LPWAN に適用した際の、衝突回避の評価や、既存方法との比較に取り組んでいく。

### 文 献

- [1] A. Mutazono, M. Sugano, and M. Murata, “Energy efficient self-organizing control for wireless sensor networks inspired

by calling behavior of frogs,” *Computer Communications*, vol. 35, pp. 661–669, Mar. 2012.

- [2] Z. Zhang, K. Long, J. Wang, and F. Dressler, “On swarm intelligence inspired self-organized networking: Its bionic mechanisms, designing principles and optimization approaches,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*,

vol. 16, pp. 513–537, 1st Quarter 2014.

- [3] K. Wells, *The Ecology and Behavior of Amphibians*. University of Chicago Press, Feb. 2010.
- [4] J. R. Lucas, R. D. Howard, and J. G. Palmer, “Callers and satellites: Chorus behaviour in anurans as a stochastic dynamic game,” *Animal Behaviour*, vol. 51, pp. 501–518, Mar. 1996.
- [5] I. Aihara, D. Kominami, Y. Hirano, and M. Murata, “Mathematical modelling and application of frog choruses as an autonomous distributed communication system,” *Royal Society Open Science*, vol. 6, pp. 1–16, Jan. 2019.
- [6] I. Khoufi, P. Minet, A. Laouiti, and S. Mahfoudh, “Survey of deployment algorithms in wireless sensor networks: coverage and connectivity issues and challenges,” 2017.
- [7] “SX1276-7-8-9 Datasheet.” <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>. available at Jan. 2020.