

無線ネットワークにおいて盗聴を困難とするための 自己組織型ノイズ無線信号送信手法の検討

A study on self-organizing noise radio signal transmission method to make eavesdropping difficult in single-hop wireless networks

大山 拓海[†] 大和 聖[†] 谷口 義明^{†,‡}

Takumi Oyama Satoru Yamato Yoshiaki Taniguchi

1. はじめに

無線通信においては、送信ノードから送信された無線フレームは一定範囲で受信可能である。そのため、もしその範囲内に第三者のノードがいて、通信内容を盗聴される恐れがある。盗聴を防ぐために一般的に暗号化が利用されるが、暗号化方式に脆弱性がある場合には意味をなさない。また、指向性アンテナを用いることにより盗聴可能な領域を削減することも有効であるが、指向性アンテナを導入する必要がある。

盗聴への対策として、図1のように、周囲の近隣ノードが協調して妨害電波を送信することにより、盗聴可能領域を削減する検討が行われている[1-7]。例えば、文献[6]では、盗聴を困難とするために、周囲のノードが送信端末と同じタイミングでノイズフレームを送信することにより意図的に干渉を発生させ、盗聴可能領域を削減する手法を検討している。しかし、この手法は集中型での動作を想定しており、一般的な無線ネットワーク制御にそのまま用いることはできない。一方、文献[7]では、ノード間の分散的な動作によりノイズフレームを送信することにより、盗聴可能領域を削減する手法を検討している。しかしながら、この手法では、ノードは移動、追加、削除されることなく一様に分布している、ノードの送信電力は均一であり、電波伝搬環境は理想的である、各端末は送受信ノード間距離や通信距離を事前に知っているなどの仮定が置かれている。

一方、蛍の発光同期などの自然界の同期のメカニズムをモデル化したパルス結合振動子モデルをデータフレームの送信タイミング制御に用いる研究[8-14]が多数行われている。これらの手法を用いるとセンサ端末間の自己組織的な動作に基づいたセンサデータの収集が可能であり、端末の追加、削除や移動な

どの環境変動に適応的に追従する制御が実現できる。例えば、文献[13]ではパルス結合振動子モデルにおける進行波状態を利用したデータ収集手法を提案している。文献[9]では逆同期を利用した DESYNC と呼ばれる手法を提案しており、その応用のひとつとして DESYNC-TDMA と呼ばれる TDMA 手法を提案している。このように、データフレームの送信タイミング制御のためにパルス結合振動子モデルを利用する例は多数ある。同様にノイズ無線信号送信タイミング制御にパルス結合振動子モデルを用いることにより、端末の追加、削除や移動などの環境変動に適応的に追従する自己組織型ノイズ無線信号送信制御が実現できれば有用であると考えられる。

本研究では、パルス結合振動子モデルを利用した手法である DESYNC [9] を応用したノイズ無線信号送信手法を提案する。DESYNC は互いに電波の届くシングルホップネットワークにおいて各ノードのばらばらなタイミングでのフレーム送信を実現するアルゴリズムであるが、マルチホップネットワーク環境においては2ホップ以上離れた端末同士が同じタイミングでフレームを送信する場合があるという問題点がある。一方で、盗聴領域を削減するという観点の場合、近隣ノードが送信ノードと同じタイミングでフレームを送信することが望ましいため、DESYNC を用いることにより盗聴領域を削減できる可能性がある。本研究では、自己組織型ノイズ無線信号送信手法実現のための初期検討として、単純に DESYNC を用いて近隣ノードがノイズ無線信号を送信した場合の盗聴可能領域削減効果を評価する。

本報告の以降の構成は以下のとおりである。まず、2. 章で関連研究について述べる。3. 章で本報告で前提とするモデルについて述べる。4. 章で DESYNC を用いた自己組織型ノイズ無線信号送信手法の説明を行い、5. 章でその評価結果を述べる。最後に、6. 章で本報告のまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

文献[7]では無線ネットワークにおいて送信端末と受信端末の周囲のノードがノイズ無線信号を送信することにより、送信ノードが送信した信号の受信可能領域を削減し、盗聴を困難とする手法を検討している。この手法では送受信間距離や対応する通信可能領域から理想的なノイズ無線信号送信ノード数を推定し、推定結果に応じた確率で近隣ノードがノイズ無線信号送信ノードとなる。これによってノイズ無線信号送信ノード数が増えた場合でも適切な数のノイズ無線信号送信ノードを選択することが可能である。一方で、この手法ではノードが一様に分布していることを仮定しており、また、送受信ノード間の距離や面積などあらかじめ既知でなければならない情報が多くあ

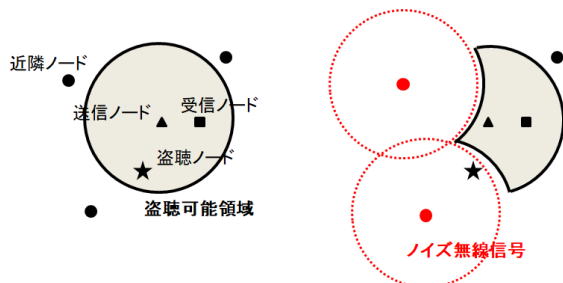


図1 意図的なノイズ無線信号送信による盗聴領域の削減

[†] 近畿大学理工学部情報学科, Faculty of Science and Engineering, Kindai University

[‡] 近畿大学情報学研究所, Cyber Informatics Research Institute, Kindai University

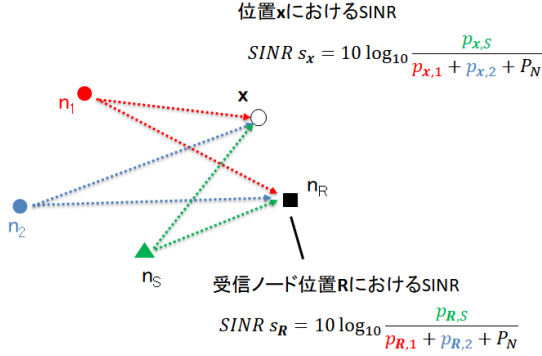


図2 SINR の計算例

る。面積やノード数の推定誤差が大きい場合、適切な数のノードがノイズ無線信号送信ノードにならない可能性がある。一方、本研究では送受信ノード間距離などの事前の情報がない場合でも動作するような手法を検討する。

文献 [9] ではパルス結合振動子モデルを利用した DESYNC と呼ばれる手法を提案しており、その応用のひとつとして DESYNC-TDMA と呼ばれる TDMA 手法を提案している。しかしながら、DESYNC は互いに電波の届くシングルホップネットワークでのみ動作する。マルチホップネットワーク環境においては複数の端末が同じタイミングでフレームを送信するようになるため、TDMA にそのまま応用できないという問題点がある。本研究では、その問題点を積極的に利用し、同タイミングでフレームを送信するノードを盗聴困難化のための妨害ノードとして活用する。

3. モデル

本報告では、文献 [6, 7] と同様の環境を想定する。

3.1 ネットワークモデル

1 台の送信ノード n_S と 1 台の受信ノード n_R と N 台の近隣ノード $n_i \in \mathcal{N}$ ($1 \leq i \leq N$) が設置された環境を想定する。送信ノード n_S は一定間隔 T でデータパケットを送信し、受信ノード n_R はデータパケットに対して ACK パケットを送信するものと仮定する。なお、送信ノードと同時にノイズ無線信号を送信するノイズ無線信号送信ノードとして選ばれた近隣ノードの集合を $\mathcal{N}_{jm} \subseteq \mathcal{N}$ と表記する。

3.2 電波伝搬モデル

本報告の電波モデルとしては SINR モデル [15] を用いる。本モデルにおいては、位置 $\mathbf{x}$ における SINR $s_{\mathbf{x}}$ が $s_{\mathbf{x}} > \beta$ であれば、その位置 $\mathbf{x}$ における送信ノードからのデータの受信に成功する。閾値 β は使用される無線機器や環境に依存する値である。SINR $s_{\mathbf{x}}$ [dB] は下記で計算される。

$$s_{\mathbf{x}} = 10 \log_{10} \frac{p_{\mathbf{x},S}}{\sum_{n_i \in \mathcal{N}_{jm}} p_{\mathbf{x},i} + P_N} \quad (1)$$

ここで、 P_N はノイズ強度、 $p_{\mathbf{x},S}$ は位置 $\mathbf{x}$ における送信ノード n_S からの無線信号の受信電波強度、 $p_{\mathbf{x},i}$ は位置 $\mathbf{x}$ における近隣ノード n_i からのノイズ信号の受信電波強度である。なお、本報告では受信ノードの位置を $\mathbf{R}$ とし、受信ノードの位置における SINR を $s_{\mathbf{R}}$ と表記する。

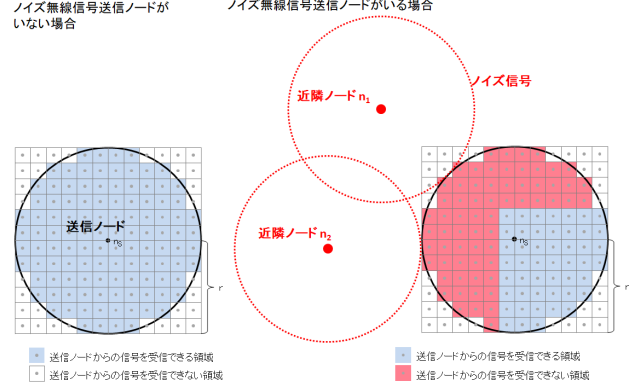


図3 カバレッジの計算方法

SINR の計算例を図 2 に示す。この図では、1 台の送信ノード n_S 、1 台の受信ノード n_R 、2 台のノイズ無線信号送信ノード n_1, n_2 がある。受信ノード位置 $\mathbf{R}$ における SINR $s_{\mathbf{R}}$ と、位置 $\mathbf{x}$ における SINR $s_{\mathbf{x}}$ はそれぞれ図で示されるような式で計算できる。

受信電波強度 $p_{\mathbf{x},i}$ は以下の式で計算される。

$$p_{\mathbf{x},i} = K d_i^{-\eta} q_i \quad (2)$$

q_i はノード n_i における送信電力であり、 d_i は位置 $\mathbf{x}$ とノード n_i の間の距離である。 K と η は無線通信環境に依存するパラメータである。本報告では簡単のため、電波の反射や乱れ、ノイズなどは無視するものとする。また、すべてのノードの送信電力は同じものとし、 $q_i = Q$ とする。ノードごとに送信電力が異なる場合の検討は今後の課題とする。

なお、以上の関係より、周囲にノイズ無線信号を送信するノードがない場合の送信ノードの最大通信距離を r とすると

$$r = \left(\frac{KQ}{10^{\frac{\beta}{10}} P_N} \right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (3)$$

で表される。

3.3 盗聴領域削減効果の指標

本報告では、文献 [1, 2, 6, 7] と同様に、カバレッジを用いて盗聴領域削減効果の評価を行う。カバレッジは、ノイズ送信により送信ノードからの信号を受信出来なくなった領域とノイズ送信がない場合に送信ノードから送信される信号を受信可能な領域の比である。

図 3 に本稿におけるカバレッジの具体的な計算方法を示す。図 3 中、半径 r の円は、ノイズ無線信号送信ノードがない場合に送信ノード n_S の送信データを正常に受信できる範囲を表している。本稿におけるカバレッジの計算においては、この円の中心と中心を同じくする一辺 $2r$ の正方形を $m \times m$ のグリッド状の小領域に分割する。なお、本稿の評価では $m = 20$ を用いている。また、各小領域において、小領域の中心座標の SINR が閾値 β を上回っていれば、その小領域で送信ノードから送信される信号を受信可能であるとみなす。ノイズ無線信号送信ノードがない場合の、送信ノードから送信される信号を受信可能な領域 (図左側において、青色で示されている小領域の数) と、ノイズ無線信号送信ノードがある場合に、送信ノード

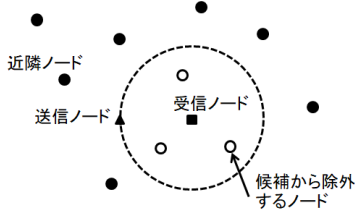


図4 ノイズ無線信号送信候補から除外するノード

ドから送信される信号を受信できなくなる領域（図右側において、赤色で示されている小領域の数）を求めて、その比をカバレッジとする。

カバレッジが高いほど近隣ノードのノイズ信号送信による衝突で盗聴可能領域を削減出来ていることを示す。ここで、過度なノイズ送信により受信ノード位置 R における SINR s_R が β を下回り、目的の信号を受信出来なくなった場合はカバレッジを0とする。

4. 自己組織型ノイズ無線信号送信手法

本章では、DESYNC を用いたノイズ無線信号送信手法について述べる。本手法では、送信ノードと受信ノードを除く近隣ノードはノイズ無線信号送信候補ノードとなる。ただし、図4のように受信ノードからみて送信ノードよりも近い位置にある近隣ノードはノイズ無線信号送信候補から除外する。これらの近隣ノードがノイズ無線信号を送信すると受信ノード位置において送信ノードからの信号の受信に失敗するためである。この除外処理は、例えば、受信ノードが受信電波強度等から送信ノードよりも近い位置にあるノードを推定し、その結果を周囲に広告することにより行う。

3.1 節で述べたように、送信ノード n_S は間隔 T 毎にデータパケットを送信する。受信ノード n_R は、データパケットを受信した場合、ACK パケットを送信するものとする。近隣ノードは DESYNC [9] に従い動作する。近隣ノードは、送信ノードから送信されるデータパケットあるいは近隣ノードからのノイズ無線信号を受信すると自身のノイズ無線信号送信タイミングを調整する。一方、本稿では、ACK パケットは盗聴難化の対象外とし、ACK パケットを受信した場合は調整を行わない。以降で、DESYNC に基づく動作の詳細について説明する。手法の疑似コードを図5に示す。

近隣ノード n_i はタイマ t_i と送信予定時刻 T_{next} を管理する。ノード起動時に、送信予定時刻 T_{next} は起動時刻の T 秒後に初期化されているものとする。ノードは n_i は自身のタイマ t_i が送信予定時刻 T_{next} となると、ノイズ無線信号をブロードキャスト送信し、その時刻を T_{fire} として記録する。ノードはノイズ無線信号を送信した後、初めて他のノードからの無線信号を受信すると、その受信時刻を時刻 $T_{nowfire}$ として記録し、自身の送信予定時刻 T_{next} を以下の式で求められる値に調節する。

$$T_{next} = T + (1 - \alpha)T_{fire} + \alpha \frac{T_{prefire} + T_{nowfire}}{2} \quad (4)$$

ここで、 α はタイミング調整を行うためのパラメータである。本研究では 0.95 を設定している [9]。 $T_{prefire}$ は自ノードのノイズ無線信号送信の直前に観測した近隣ノードの無線信号送信

```
// 初期化処理
init() {
    alpha = 0.95
    justBroadcasted = False
    t_next = getCurrentTime() + T
    setNoiseBroadcastTimer(t_next)
}

// 時刻 t_next でノイズ信号をブロードキャストする処理
onNoiseBroadcastTimerExpire(){
    broadcastNoise()
    justBroadcasted = True
    t_fire = getCurrentTime()
    t_prefire = t_lastFire
    t_next = getCurrentTime() + T
    setNoiseBroadcastTimer(t_next)
}

// ノイズ信号もしくはデータパケットを受信した場合の処理
onReceivingNoise(){
    t_lastFire = getCurrentTime()
    if (justBroadcasted) {
        justBroadcasted = False
        t_nowfire = t_lastFire
        t_next = T + (1 - alpha) * t_fire +
            alpha * (t_prefire + t_nowfire) / 2
        setNoiseBroadcastTimer(t_next)
    }
}
```

図5 近隣ノードの動作の疑似コード [9]

時刻である。以上の動作を繰り返す事で2ホップ以上離れているノードの一部が送信ノードと同じタイミングでノイズ無線信号を送信するようになる。本研究では、送信ノード n_S と同じタイミングでノイズ無線信号を送信するノードを盗聴領域削減に利用する。

5. シミュレーション評価

本報告ではシミュレーションにより DESYNC を用いたノイズ無線信号送信手法の評価を行う。

5.1 評価条件

評価条件は文献 [6, 7] と同じ設定を用いた。4000×4000 の領域の中央に送信ノード n_S を、座標 (400, 0) に受信ノード n_R を設置し、 N 台の近隣ノード n_i を領域中にランダムに配置した。また、通信環境のパラメータとしては $K = 1$ 、 $\eta = 2$ 、 $P_N = 10^{-6}$ 、 $Q = 1$ 、 $\beta = 0$ を用いた。この設定の場合、各ノードの通信距離は $r = 1000$ となる。シミュレーションは各条件ごとに500回ずつ行い、その平均値を結果として用いる。

本研究では、提案手法の特性を評価するため、ランダム手法、既存手法 [7] との比較評価を行う。ランダム手法では、受信ノードの1ホップ内にいるノードを除くすべてのノードが一定の確率 P でノイズ無線信号送信ノードとなる。もっとも単純と考えられる手法であり、比較として用いる。

既存手法 [7] では、ノードは、もし自身が送信端末の通信可能領域に含まれ受信端末の通信可能領域に含まれない領域（以

下、候補領域)にいる場合、下記式で計算される確率 p でノイズ無線信号送信ノードとなる。

$$p = \min\left(1, \frac{M}{N_m}\right) \quad (5)$$

ここで、 M は何台のノードがノイズ無線信号送信ノードになるかどうかを表すパラメータである。 N_m は候補領域中にあるノード数の推定値であり、下記式で計算する。

$$N_m = \left(\pi r^2 - 2r^2 \arccos \frac{\ell}{2r} + \ell \sqrt{r^2 - \frac{\ell^2}{4}} \right) \rho \quad (6)$$

ρ はノード密度であり、近隣ノードから制御パケットを受信することにより近隣ノード数を推定し、推定結果を通信可能領域で割ることにより計算する。送受信ノード間距離 ℓ とノードの通信半径 r は既知であるとする。

既存手法では ℓ や r といった事前に既知でなければならない情報があり、状況によってはその数値に誤差が含まれる場合があると考えられる。またノードの移動や故障などにより観測したノード密度に誤りが発生する場合がある。本研究では、このような誤差を考慮するため、式 (5) を拡張し、下記の確率 p_ϵ によりノードがノイズ無線信号送信ノードとなる場合を考える。

$$p_\epsilon = p(1 - \epsilon) \quad (7)$$

本報告では ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$) を誤差比率と呼ぶ。誤差比率 ϵ が大きくなるほど誤差が大きくなる。

5.2 ランダム手法との比較評価結果

まず、単純なランダム手法と DESYNC を用いた手法の比較結果を図 6、図 7 に示す。図 6 はランダム手法の確率 P を変えた場合のカバレッジを、図 7 はノイズ無線信号送信ノード数を示す。なお、どちらの手法もノード数 N は 1000 としている。ランダム手法では、確率が低いときは DESYNC を用いた手法と比較して高いカバレッジを実現できているが、確率がある一定値以上になった段階で急激にカバレッジが 0 となっている。これは、図 7 に示されるように、確率の増大によりノイズ無線信号送信ノード数が多くなりすぎ、受信ノードが送信ノードからのデータを受信できなくなるためである。したがって、ランダム手法では確率を適切に設定する必要があること、少しでも不適切な確率を設定すると受信ノードが送信ノードからのデータを受信できなくなることがわかる。一方、DESYNC による手法ではパラメータの設定は不要であり、ランダム手法と比較すると実用性が高いと考えられる。

5.3 既存手法との比較評価結果

ノード数 N を 0 から 1000 まで 10 刻みで増やし、既存手法と DESYNC を用いた手法それぞれを用いた場合のカバレッジの変化を図 8 に、ノイズ無線信号送信ノード数を図 9 に示す。既存手法ではパラメータ M として 5 を設定している。図 8 に示されるように、既存手法ではカバレッジが約 0.58、DESYNC を用いた手法ではカバレッジが約 0.26 となっている。どちらの手法でもノード数に関わらず一定のカバレッジを維持しているが既存手法の方がより高いカバレッジを得ている事がわかる。これは図 9 に示されるようにノイズ無線信号送信ノード数に差があるためであると考えられる。既存手法においてノイズ無線

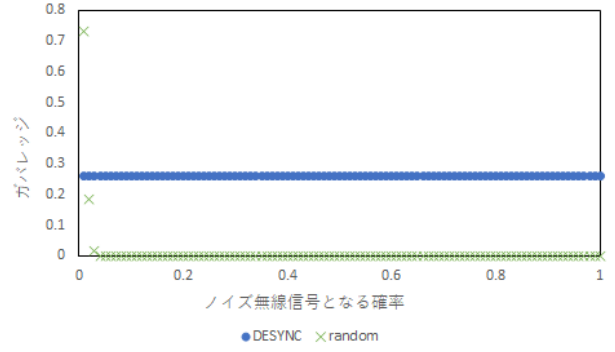


図 6 ランダム手法の確率 P を変えた場合のカバレッジ

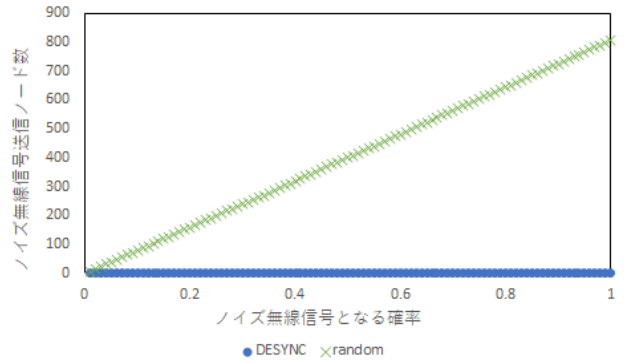


図 7 ランダム手法の確率 P を変えた場合のノイズ無線信号送信ノード数

信号送信ノード数が一定の値になるのは、事前にパラメータを適切に設定しているためである。

図 13 にノード数を変化させた場合の受信不可率を示す。受信不可率とは、過剰な数のノードがノイズ無線信号を送信し、受信ノードにおいて送信ノードからのデータを受信できなくなる割合である。図に示されるように、既存手法では、受信ノードが送信ノードからのデータを受信できない場合があることがわかる。一方、DESYNC を用いた手法では送信ノードからのデータを受信できない場合がなかった。そのため、受信成功率という面では DESYNC を用いた手法の方が既存手法よりも良いという結果となった。

次に、既存手法において誤差比率を考慮した場合の結果との比較を図 11、図 12、図 13 に示す。なお、ノード数 N は 1000 に固定している。図 11 に示されるように、既存手法は誤差比率の上昇とともに少しずつカバレッジが下がっている。また、図 12 に示されるように誤差比率が高くなるにつれノイズ無線信号送信ノードの数は少なくなっている。その結果、誤差比率 0.67 を超えた段階で既存手法のカバレッジが DESYNC を用いた手法を下回り、以降 DESYNC を用いた手法の方がカバレッジが高くなることがわかる。

以上のように、DESYNC を用いた手法が条件によって既存手法を上回るが、誤差の小さな環境においては既存手法のほうが高い性能を示すことがわかった。一方、DESYNC を用いた手法を利用することにより、既存の情報やパラメータを設定する必要がある、ノードの移動やノード数の増減に対して適応的に動作するというメリットがあると考えられる。今後、このような観点での評価を実施する必要がある。

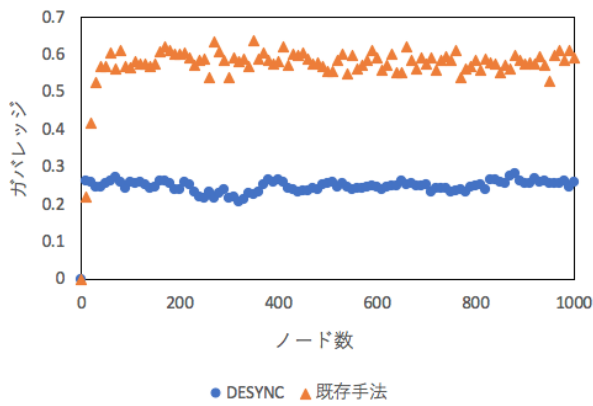


図8 ノード数 N を変えた場合のカパレッジの変化

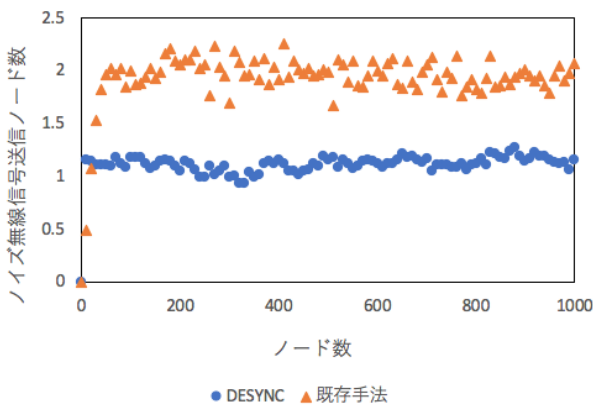


図9 ノード数 N を変えた場合のノイズ無線信号送信ノード数の変化

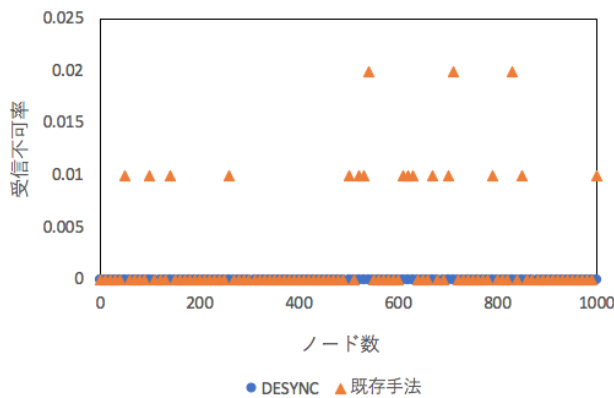


図10 ノード数 N を変えた場合の受信不可率の変化

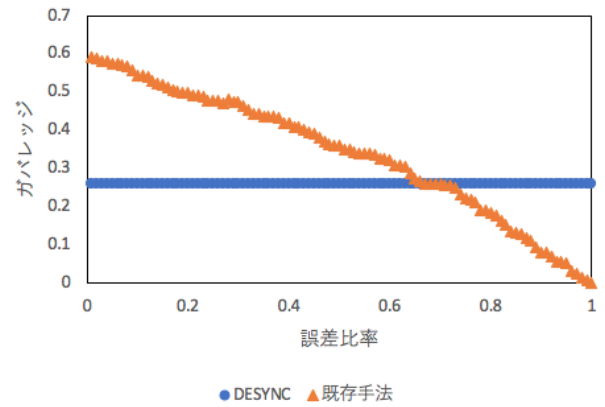


図11 誤差比率を変えた場合のカパレッジの変化

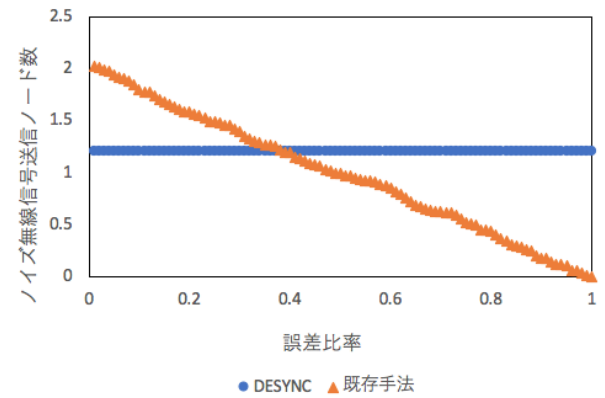


図12 誤差比率を変えた場合のノイズ無線信号送信ノード数の変化

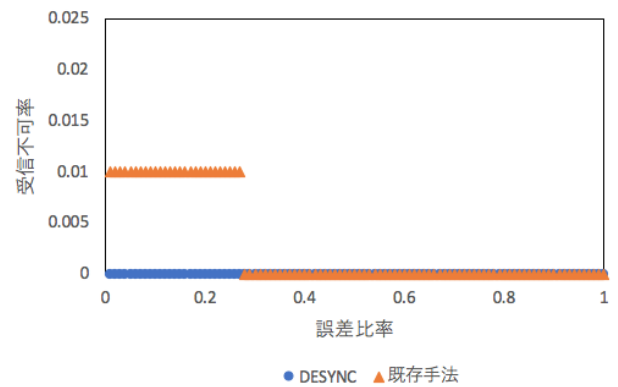


図13 誤差比率を変えた場合の受信不可率の変化

6. まとめと今後の課題

本研究では無線ネットワーク環境において盗聴を困難とするために、パルス結合振動子モデルに基づくアルゴリズムであるDESYNCを用いてノイズ無線信号を送信するノードを選定する手法を検討した。DESYNCを用いた手法では自己組織的にノイズ無線信号送信ノードの選定を行うことが可能である。シミュレーション評価の結果、DESYNCを用いた手法を用いると、ノード数に関わらず一定のカパレッジを維持できることがわかった。全体として既存手法よりカパレッジは低くなったが、大きな誤差がある場合にはDESYNCを用いた手法の方が

より高いカパレッジを得られることがわかった。

本研究では単純にDESYNCアルゴリズムをノイズ無線信号送信ノード選択に利用しただけであるため、今後の課題として、手法を改良することがあげられる。また、ノード数が動的に変化する環境での評価や、消費電力の評価も必要である。

謝辞

本研究の一部は科学研究費（課題番号19K11934）および令和2年度近畿大学学内研究助成金（SR08）の補助を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] I. Shimada and H. Higaki, "Interference with overhearing for secure ad-hoc networks," in *Proceedings of CNSCE 2017*, Mar. 2017, pp. 130–135.
- [2] —, "Interference of overhearing by eavesdropper nodes for secure wireless ad-hoc networks," in *Proceedings of ICOIN 2018*, Jan. 2018, pp. 700–705.
- [3] M. Dehghan, D. L. Goeckel, M. Ghaderi, and Z. Ding, "Energy efficiency of cooperative jamming strategies in secure wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 9, pp. 3025–3029, Sep. 2012.
- [4] W. Liu, X. Zhou, S. Durrani, and P. Popovski, "Secure communication with a wireless-powered friendly jammer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 401–315, Jan. 2016.
- [5] Z. Liu, J. Liu, N. Kato, J. Ma, and Q. Huang, "On cooperative jamming in wireless networks with eavesdroppers at arbitrary locations," in *Proceedings of IEEE ICC 2016*, May 2016, pp. 1–6.
- [6] T. Matsushita and Y. Taniguchi, "A method for selecting jamming nodes considering SINR to prevent eavesdropping in wireless networks," in *Proceedings of APWConCSE 2017*, Dec. 2017, pp. 55–58.
- [7] Y. Taniguchi and M. Nakayama, "A distributed jamming signal transmission method considering node density to prevent eavesdropping in wireless networks," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 8, Aug. 2019.
- [8] H. Nakano, A. Utani, A. Miyauchi, and H. Yamamoto, "Data gathering scheme using chaotic pulse-coupled neural networks for wireless sensor networks," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E92-A, no. 2, pp. 459–466, Feb. 2009.
- [9] J. Degesys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: self-organizing desynchronization and TDMA on wireless sensor networks," in *Proceedings of ACM/IEEE ISPN 2007*, Apr. 2007, pp. 11–20.
- [10] A. Patel, J. Degesys, and R. Nagpal, "Desynchronization: the theory of self-organizing algorithms for round-robin scheduling," in *Proceedings IEEE SASO 2007*, Jul. 2007, pp. 87–96.
- [11] J. Degesys, P. Basu, and J. Redi, "Synchronization of strongly pulse-coupled oscillators with refractory periods and random medium access," in *Proceedings of ACM SAC 2008*, Mar. 2008, pp. 1976–1980.
- [12] J. Degesys and R. Nagpal, "Towards desynchronization of multi-hop topologies," in *Proceedings of IEEE SASO 2008*, Oct. 2008, pp. 129–138.
- [13] Y. Taniguchi, N. Wakamiya, and M. Murata, "A traveling wave based communication mechanism for wireless sensor networks," *Journal of Networks*, vol. 2, no. 5, pp. 24–32, Sep. 2007.
- [14] Y. Taniguchi, "A desynchronization-based data gathering mechanism for a fish farm monitoring environment," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E100-A, no. 11, pp. 2547–2550, Nov. 2017.
- [15] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, Mar. 2000.