

令和元年6月19日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14265

研究課題名（和文）電波漏洩対策に有効なマッシブ電波センサアレイ

研究課題名（英文）Massive Array-Structure Radio Sensors for Countermeasure to Radio Signal Leak

研究代表者

田久 修（Takyu, Osamu）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：40453815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：屋内などの室内を囲む壁に、電波の検出、中継、人工雑音の放射の機能を有する電波センサをアレイ状に多数配置した、マッシブ電波センサアレイを利用した電波漏洩対策の検討を進めた。電波センサを多数用いることで、単一センサ当たりの電力を抑えたとしても、環境モニタリング、人工雑音及び中継伝送により室内の電波漏洩に対する情報漏洩抑制を実現する。解析検討、シミュレーション評価を進め、マッシブ電波センサアレイの基盤となる技術及び原理を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で得られた研究成果とその意義は次のとおりである。所望とする通信エリアの情報漏洩を抑制するため、人工雑音を利用できることを明らかにした。特に、センサを多数配置することで、不要な人工雑音による干渉を抑制するため、他の無線システムとの共存が可能になる。次に、多数センサの協調送信により、より多くの無線端末の同時送信を可能にした。これは、無線通信で問題となる周波数資源の枯渇問題への対策としても有効である。多数の電波センサによる人やモノの位置推定法は、電波を利用した人やモノの見守りシステムに応用でき、より安全な生活を実現できる無線システムとして期待される。

研究成果の概要（英文）：We study massive array-structure radio sensors with the detection and the relay of radio wave and the emission of artificial interference, where the position structure of them are regular. The functions of radio sensors can suppress the information leak caused by radio emission from the target area to others. Owing to a lot of radio sensors, although the signal power emitted by a radio sensor is reduced, the required suppression of information leak is achieved. From the computer simulation and the analyses, the fundamental principles of massive radio sensor are constructed.

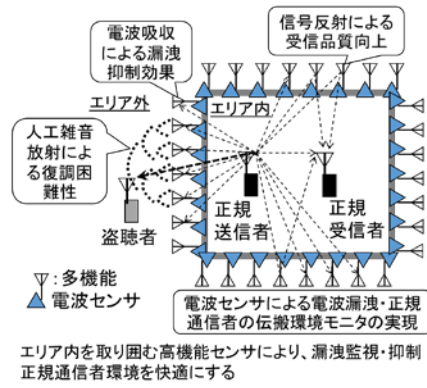
研究分野：無線通信システム

キーワード：物理層セキュリティ 無線センサネットワーク コグニティブ無線

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

無線ローカルエリアネットワーク（WLAN）の普及に伴い、電波漏洩による情報漏洩対策として物理層セキュリティに注目が集まっている。物理層セキュリティは、正規通信者以外の受信点で信号電力対干渉雑音電力比（SINR）が復調に必要な所要値を下回るように制御する無線技術である。海外では米国のジョージア工科大学、国内では慶應義塾大学で研究が盛んである。しかし、受信状態が不確定で漏洩抑制効果に確証がなく、安全性が低い欠点がある。そこで、人工雑音法に基づき、正規通信者のエリアをすべて取り囲むように多機能電波センサを配置するマッシュ電波センサアレイの構想を確立した（図1参照）。センサはモニタ用電波センサ、電波吸収、人工雑音、信号反射を正規通信者の信号電力で機能させ、エリア内の品質向上とエリア外の復調困難性を両立する。大規模センサのスケールメリットと正規通信者への包囲網で、高い確証と究極的な情報漏洩抑制を実現する世界初の物理層セキュリティが確立される。



2. 研究の目的

マッシュ電波センサアレイによる情報漏洩対策に必要な基盤技術を確認する。電波センサをアレイ状に多数配置した面的展開により、電波センサの電波漏洩監視や人工雑音等による漏洩抑制効果を高度化し、情報漏洩対策の観点でその効果を明らかにする。また、電波センサの中継機能を利用した無線端末の同時アクセス数の拡大を進め、安全性の確保と通信の大容量化を実現する。具体的には次の研究目的を設定した。

- (1) （マッシュ電波センサへの電力供給技術と情報漏洩対策効果）電力源をもたない電波センサに対して、無線で電力を供給する無線電力伝送技術と無線機アーキテクチャを明らかにする。多数の電波センサの利用によるスケールメリットを生かし、通信の安全性を確保した条件で単独の電波センサに求められる電力量が削減できることを明らかにする。
- (2) （人工雑音放射による通信の安全性を確保するエリア展開）多数の電波センサによる人工雑音の放射を利用した通信の安全性を確保するエリア展開において、情報漏洩抑制効果を明らかにする。電波センサを多数配置することで、低い電力の人工雑音においても、エリア外に漏れこむ電波信号の盗聴困難性が確保できることを明らかにする。
- (3) （多数の無線中継を利用したアクセス数拡大効果）通信エリア内において同時アクセス可能な無線端末数を拡大するため、無線中継を利用した通信方式を確立する。多数のセンサが連携することで複数の情報入出力を可能にする分散 MIMO（Multi-Input Multi-Output）環境を確立する。これにより、センサの連携数の拡大に対する同時アクセス可能な無線端末数の拡大効果を明らかにする。
- (4) （情報漏洩と人とモノのモニタリング）多数の電波センサを利用した、屋外への情報漏洩をモニタリングするシステムを構築し、情報漏洩の危険度をしめすシステムを構築する。そして、電波漏洩に影響を与える人やモノの位置を推定する測位システムを構築し、測位精度を明らかにする。センサ数の拡大による、情報漏洩の危険度判断および人やモノの位置推定精度の改善効果を明らかにする。

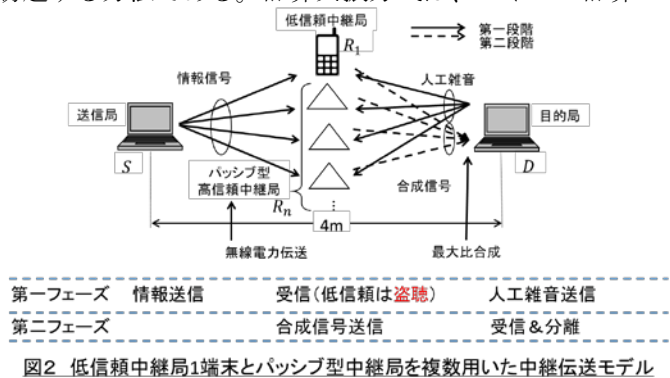
3. 研究の方法

研究の目的で示した、4つの目的を達成するため、次のように研究を進めた。

(1) マッシュ電波センサへの電力供給技術と情報漏洩対策効果

電波センサに電力を供給する無線電力伝送技術について調査を実施した。無線電力伝送技術には様々な方式が提案されているが、電波センサに装備可能な形状や変換効率などの観点で、電磁誘導方式、磁界共鳴方式、そして電波受信方式に絞られた。電磁誘導方式では、電磁界の時間的な変化によってコイルに電圧を誘起する方法である。磁界共鳴方式は、コイルの磁界の調相現象を利用した方法である。そして、電波受信方式は、受信した電波を整流し、コンデンサで電荷を蓄積することで必要電力を確保する方法である。本研究では、無線通信と電力伝送の統合を想定しているため、電波受信方式を用いた。

電波受信方式を想定したマッシュ電波センサへの電力供給では、電波発信源（送信局）が放出した電波が空間的に広がる。そのため、電力を受給するセンサが面的に展開し



たととしても、電波発信源は変更することなく、各センサに電力を伝送できる。しかし、電波源と受給する端末との距離に応じて電力が低下するため、各センサが受給できる電力に制限が生じる。一方、電波センサは、通信を確立するための中継機能を備えるため、情報を受信する目的局に対して電波を受信できる距離関係にある。そこで、本研究課題では、送信局と目的局が同時に電力伝送をする、複数電波発信による電力伝送法を提案する。図2に示すように、送信局と目的局が同時に電力供給をすることで、電波センサへの電力供給を拡大することができる。しかし、通信を確立する観点で、目的局から放射した電力は人工的な雑音（人工雑音）と捉えられるため、中継局地点で受信品質が劣化する。そこで、非再生中継と干渉キャンセル技術を併用した、物理層ネットワークコーディング技術を確立した。送信局が伝送する情報信号（電力伝送も含む高い送信電力）と目的局が送信する人工雑音が混信した状態で電波センサ（中継局）が受信する。中継局は、受信信号から電力を受給し、受給した電力で受信信号を増幅して、再度信号を発する。目的局は、情報信号と人工雑音が混信した信号を中継局より受信する。ここで、人工雑音は、目的局が通知しているため、人工雑音の再生が可能である。そこで、受信信号から人工雑音を干渉キャンセルにより除去することで、情報信号のみが復調可能になる。ここで、空間上で任意に受信した端末は、人工雑音と情報信号の二つを同時に受信するため情報信号の復調性能は低い。そのため、安全性が確保できない他端末が中継したとしても、中継中に信号を復調することは困難になる。そこで、バッテリー付きの無線端末を信頼性が低い端末として低信頼中継局と定義し、中継局に参加した場合を想定した。このようにすることで、バッテリー付きの無線局により高い電力で中継できるとともに、電波センサによる中継と並列利用することで、複数のネットワークパスを形成し、通信品質を安定にするダイバーシチ効果を引き出せる。その結果、通信の品質安定性を確保することができる。本提案法の有効性を検証するため、計算機シミュレーションを実施した。

(2) 人工雑音放射による通信の安全性を確保するエリア展開

室内などにおける壁等で物理的に区切られたエリアに対して、エリア外へ電波が漏洩することによる情報漏洩の対策として、マッシュ電波センサによる人工雑音放射による安全性を確保する方法を検討した。エリア境界上に電波センサを配置し、電波センサのアンテナ指向性にパッチアンテナのような指向性のあるアンテナをエリア外に高い指向性利得が得られるように配置した。これにより、エリア外の不特定端末に対して、高い電力の人工雑音を放射することができ、エリア内の正規の通信者に対しては人工雑音の干渉を抑制できる。電波センサを4面の壁面で囲われたエリア内の各壁面に複数配置した。これにより、一定数の電波センサの数で高効率にエリアを囲む人工雑音の発射が可能になる。人工雑音の放射は、電波伝搬の影響を強く受けるため、電波伝搬環境を模擬するレイトレーシングシミュレーションで評価検証を進めた。

(3) 多数の無線中継を利用したアクセス数拡大効果

多数の電波センサが連携する協力無線中継において、多数の無線端末が多元接続を確立する方法を検討した。これまでに、複数の端末が中継局を経由して、各端末が保有する情報を目的局に伝送する、無線MIMOスイッチ法が確立されている。この方法では、再送信する中継処理中に事前フィルタリングを適用することで、宛先端末に情報を転送するとともに、他端末への情報通知を停止できる。しかし、この方法では、中継局による情報復調が可能となる情報漏洩の危険性がある。

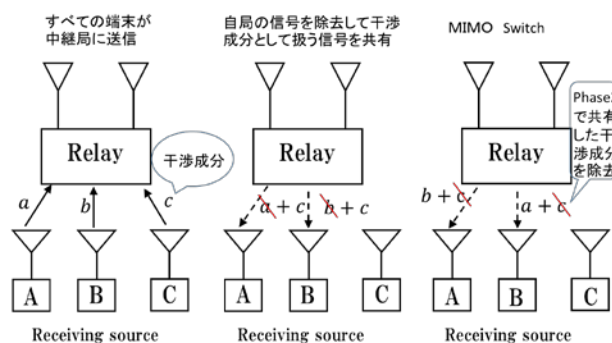


図3 提案過負荷MIMO Switching法

そこで、図3に示すように、本検討では、情報交換可能なアクセス数一つ上回る無線アクセスをする過負荷環境を構築した。そして、事前フィルタリングを修正し、一つ上回るアクセスの情報を全端末に報知するブロードキャストを確立する。ブロードキャスト終了後に従来の無線MIMOスイッチで情報交換をする。その結果、ブロードキャストした信号が全端末に事前通知されるため、干渉キャンセルを利用することで過負荷状態が緩和され、情報復調が可能になる。一方、中継局や第三の端末が情報を受信した場合においても、過負荷状態となるため、復調困難性が保持され、安全性を維持できる。本提案法の有効性を計算機シミュレーションで検証した。

(4) 情報漏洩と人とモノのモニタリング

室内の一区画である部屋からの電波漏洩監視法として、電波センサのスペクトラムセンシングによる電波漏洩モニタ法を確立した。図4に示すように、対象とする部屋に対して、部屋を構成する壁面上に加え、隣接する部屋の壁面に電波センサを配置する。これにより、対象とする部屋からの漏洩量に加え、隣接する部屋までの漏洩状況を観測することができ、共用部分である廊下における電波の通過特性を推定することができる。その結果、共用部分における電波

漏洩検出による情報搾取に対する危険度判断が可能になる。次に電波漏洩量の判断法として教師あり学習によるクラスタリングの手法を確立した。まず、情報漏洩の危険がある、廊下などの共用部分に、一時的に電波センサ（仮電波センサ）を配置する。そして、対象とする部屋内で電波を発したとき、仮電波センサと周辺の壁面に配置した電波センサで同時に電力量を測定する。その結果、廊下における電波漏洩量と壁面周辺の電波センサが検出した電波漏洩量とのデータセットが構成される。同様に対象とする部屋内で、電波発生源が一定距離移動した毎に、データを測定する。その結果、データセットが多数用意される。次に、データセットを分類分けするため、k-means クラスタリングを適用した。これにより、仮電波センサの漏洩電力量の大きさの観点で一定区間に分類分けできる。そして、漏洩電力量の大きさに対応して、漏洩電波による情報漏洩の危険度が設定できる。運用時においては、仮電波センサを外し、部屋内の様々な位置に発信源を配置したとき、壁面に配置された電波センサが電力を検出する。そして、k-means クラスタリングにおける分類分けに対して、最近傍と判断されるクラスタを選択することで、現時点での漏洩の危険度を明らかにする。本手法について、レイトレーシングシミュレーションを用いた精度評価を進めた。

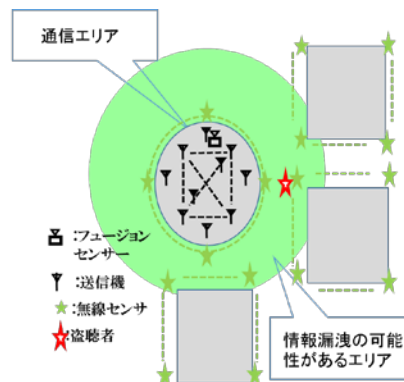


図4 多数センサを用いた電波漏洩モニタリングシステム

安全性を確保するエリア内の無線環境は、人やモノの移動により変化する。無線環境の認識に応用するため、多数の電波センサを利用した人やモノの位置を測定する方法を検討した。位置測定には、GPA などの対象物に測位用の装置を配備する方法があるため、任意の人やモノの測位が難しくなる。また、レーダーなど電波の反射特性を利用した方法があるが、高い周波数帯などの一般に無線通信として普及していない周波数帯が想定されている。そこで、WiFi などで利用されている 2.4GHz 帯の周波数帯において、通信目的に配備されたアクセスポイント (AP) から発せられる電波に対して、壁面に多数の電波センサを設置し、多数の電力量を評価するシステムを構築する。そして、人の動きによる電力量の変化を検出することによって、人の位置を特定する方法を確立した。位置推定法は、電波漏洩量の予測と同様に、教師あり学習により人の位置に対する各センサの電力の分布とのデータセットを生成する。そして、位置が未知の人あるいはモノによる電波センサの電力分布と最近傍にあるデータセットを選択することで、位置を推定する。本手法の有効性について、レイトレーシングシミュレーションによる精度評価を進めた。

4. 研究成果

(1) マッシュ電波センサへの電力供給技術と情報漏洩対策効果

本実験では、送信局と目的局は1局とした。図5は、安全性を考慮した伝送容量であるセキュアキャパシティの累積分布関数 (CDF) 特性を示す。`Untrusted Relay` はバッテリー付きの中継局を1つ、`Passive Relays` は外部より電力伝送を受けるパッシブ型の中継局を3つ配置した場合、`Untrusted Relay & Passive Relays` はバッテリー付き中継局とパッシブ型中継局3局を併用利用した場合である。図より、最も高いセキュアキャパシティを達成した。これは、Passive Relays では、中継電力が不十分であるため、伝送容量が低下した。低信頼中継局においては、提案法により中継局での情報漏洩を回避できるため、安全性を確保できる。そこで、Passive Relays を併用することで、受信電力を拡大するとともに、マルチルートダイバーシチ効果が得られ、高いセキュアキャパシティを達成した。次に図6は、Passive Relays 数に対するCDF=10%のセキュアキャパシティの特性である。`Passive Only` は、パッシブ中継局のみを用いた場合である。図より、パッシブ中継局を15以上に増やした場合には、低信頼中継局を併用しない方が高いセキュアキャパシティを達成した。これは、パッシブ中継局においては情報漏洩の危険がなく、一方で多数の中継局を配備することで、不足していた電力を確保することができ、高いセキュアキ

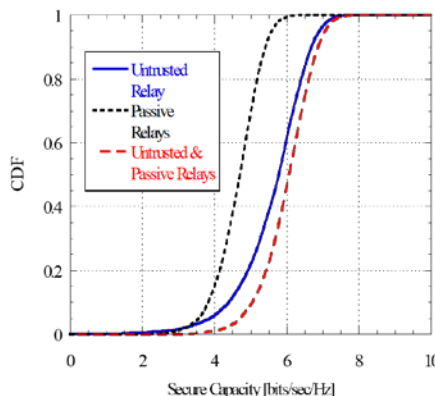


図5 セキュアキャパシティの累積分布関数 (CDF)

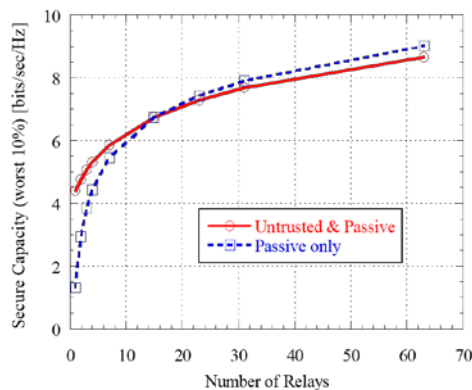


図6 Passive 中継局数に対するCDF=10%のセキュアキャパシティ

ャパシティを達成している。以上より、多数の中継局を配備することで、高い安全性を確保した大容量通信が実現できることを示した。

(2) 人工雑音放射による通信の安全性を確保するエリア展開

レイトレーシングシミュレーションの実験結果を示す。図7にセンサ等の位置関係を示す。1は電波発信源を配置し、灰色で示したエリア内の6～13までの受信点を正規受信者としてモデル化する。そして、灰色のエリアの外における14～53までの受信点(22～29を除く)は不特定の受信者を想定し、電波漏洩の強度を評価する。最後に22～29は人工雑音発信源を示しており、今回の例で

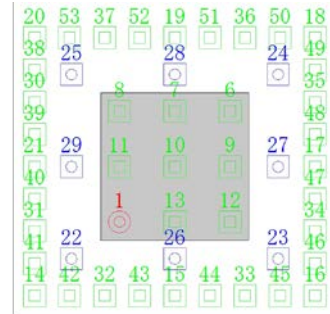
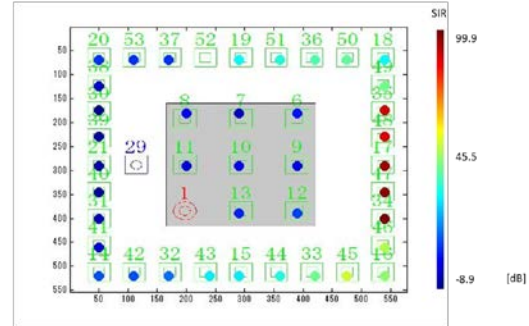


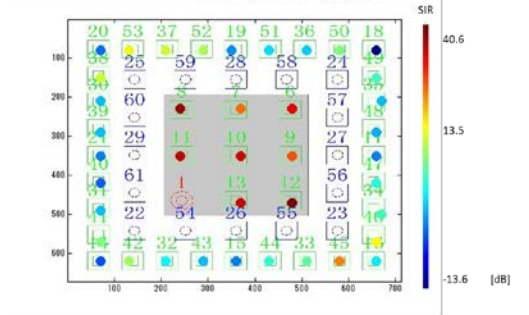
図7 端末の位置関係(レイトレーシングシミュレーション、人工雑音センサ8個)

は8局配備した例となっている。人工雑音源は1、16局の場合を想定した。人工雑音源の指向性は1局の場合は、無指向性アンテナとし、16局は、エリアの外向きに対して、30°の指向性アンテナを想定した。

図8に各受信点の信号電力対干渉雑音比の大きさを示している。人工雑音源が一つの場合、正規のエリア内のSIR(信号電力対干渉電力比)が低下し、正規エリア内の通信品質が大きく劣化している。また、人工雑音源の無い側面では、高いSIRが達成され、外部への情報漏洩の危険性が高いことがわかる。次に人工雑音源を16局とした場合は、エリア外の受信点のSIRを効果的に抑制することができ、電波漏洩を抑制することができる。これは、指向性アンテナを配備することで、正規のエリアへの干渉漏洩を抑制する一方で、人工雑音を放射できる範囲は正規のエリア外に限定される。そして中継局数を拡大することで、人工雑音が届かない範囲を抑制した。これより、人工雑音源の数の増加と指向性アンテナの配備により、安全性を確保するエリア展開が可能になることを明らかにした。



(A) 単独の人工雑音源



(B) 人工雑音源 16

図8 人工雑音発生による情報漏洩抑制効果

(3) 多数の無線中継を利用したアクセス数拡大効果

MIMO Switchingを発展させた、並列アクセス数の拡大効果を確認した。図9に、セキュアキャパシティに対する累積分布関数(CDF)特性を示す。ここで、平均SNR=40dB、レイリーフェージング通信路を想定した。また、端末数を3, 4, 5としたとき、連携する中継局数を2, 3, 4とした。また、中継局が結託して復調を試みる場合を想定した、通信の安全性を想定した。端末間の周波数・時間同期は理想的であるとした。Proposalが本研究の提案する過負荷状態を利用した場合、ConventionalがMIMO Switchingによる従来法である。図より、従来法は、信号分離可能な状態であるため、復調困難性がなく、中継局の連携により、情報漏洩が生じるためセキュアキャパシティが低下する。一方、提案法では、過負荷状態を確立するため、中継局の連携においても復調困難性を維持できる。その結果、高いセキュアキャパシティを達成した。また、中継局数を増加した場合(端末数を3から5に増加)、セキュアキャパシティの拡大を確認した。ただし、CDF特性の傾きに変化がなく、ダイバーシチ効果は認められなかった。これは、中継局数の拡大による多様性が多重数の増加に必要な直交チャネルの確立に利用され、選択制が拡大せずダイバーシチ効果が得られなかったと想定される。以上より、提案法により、中継端末数の増加によって、並列伝送数の拡大と安全性の確保を両立できることを示した。

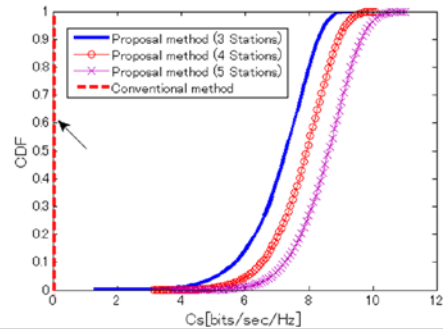


図9 セキュアキャパシティに対するCDF特性(過負荷MIMO Switchingによる方法)

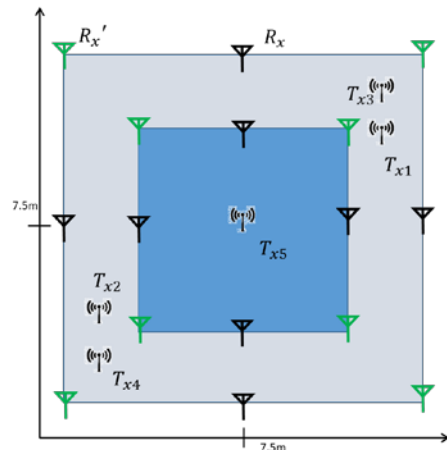


図10 電波センサと電波源の配置図

(4) 情報漏洩と人とモノのモニタリング

レイトレーシングシミュレーションにより、電波漏洩に対する周辺電波センサによるモニタリング評価を実施した。無線通信環境のモデルは図4に示している。電波漏洩の観測地点を10か所の代表点で評価し、最悪値 (worst match), 中央値 (middle match), 最良値 (best match) の三段階で評価した。表1に、実際の電力漏洩量と推定量との間の差は3dB程度に抑えられ、高い推定精度を達成した。このように、周辺環境の電波センサの配置によって、高い電波漏洩モニタリングの精度を達成することを確認した。次に多数センサによる、人の位置推定精度について評価した。電波センサ及び電波源の位置は図10とする。図11に、電波発信源の数に対する、位置推定の正解率 (Match Rate) の特性を示す。ここで、Match Rateとは、図11で示した、学習パターンに対して、位置情報未知の人あるいはモノが学習パターンの中で最近傍の位置に正確に選択できる確率を示している。図より、電波源を1から2へ拡大することで、Match Rateの改善を確認した。

これは、設置位置の異なる電波源を配備することで、他方面から電波が到来し、人及びモノの変化に対して、電波環境が敏感に変化するようになったと考えられる。さらに、電波センサの数の拡大により、Match Rateの改善を確認した。これより、電波センサの数の拡大と電波源の数の増加によって、電波センサの空間面の網羅性に加えて、電波の空間展開を広げることによって、位置推定精度が改善することを明らかにした。

以上の個別課題の成果により、無線電力伝送を想定したパッシブな電波センサにより安全性を確保する無線通信が確立できること、多数の電波センサを利用した人工雑音の利用により安全なエリア展開を可能にすること、電波センサの中継機能を利用することにより多数局の同時アクセス数の拡大を実現すること、電波センサのモニタリング利用により電波漏洩監視に加えて、人やモノの位置推定にも応用できることなどを明らかにし、当初目的であるマッシブ電波センサの基本原則について網羅的に検討を進めることができたといえる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計7件)

- ① 池内 剛、田久 修、藤井 威生、大槻 知明、笹森 文仁、半田 志郎、多目的最適化問題における低信頼中継局を用いたPLNCの位置変動による安全性の検討、電子情報通信学会総合大会2019、B-5-16、2019年3月19日
- ② 高橋 新、田久 修、藤井 威生、大槻 知明、笹森 文仁、半田 志郎、低信頼中継局によるWireless MIMO SwitchingとPLNCを用いた物理層セキュリティの検討、電子情報通信学会総合大会2019、B-5-17、2019年3月19日
- ③ Tetsuya Noguchi, Osamu Takyu, Takeo Fujii, Tomoaki Ohtsuki, Performance Evaluation of Information-Sharing Scheme Among Multiple Destinations with Mirroring Null Steering in Single Antenna Networks, 2019 International Conference on Information Networking (ICOIN), Kuala Lumpur, Malaysia, January 2019, pp. 417-420.
- ④ 池内 剛、田久 修、藤井 威生、大槻 知明、笹森 文仁、半田 志郎、二目的最適化問題による低信頼中継局を用いたPLNCの安全性の評価、電子情報通信学会無線通信システム研究会、RCS2018-335, pp. 279-284, 2019年3月8日
- ⑤ Shunsuke Imai, Osamu Takyu, Fumihito Sasamori, Shiro Handa, A study of monitoring system for radio leak with massive radio sensors, 2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), Kuala Lumpur, 2017, pp. 1806-1810.
- ⑥ 今井 俊介、田久 修、複数無線センサを用いた環境モニタリングの検討、電子情報通信学会スマート無線研究会、SR2018-70, pp. 27-28, 2018年10月30日
- ⑦ 今井 俊介、田久 修、マッシブ無線センサを用いた電波漏洩モニタリングの検討、電子情報通信学会スマート無線研究会、SR2017-45, pp. 115-116, 2017年7月20日

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

表1 電波漏洩モニタリングの結果

壁設置3パターン	best match(E_{x5})	middle match(E_{x4})	worst match(E_{x3})
判定率	91.3	56.5	45.7
推定漏洩電力 [dBm]	-44.1	-43.3	-35.8
実際の漏洩電力 [dBm]	-44.4	-42.1	-38.8

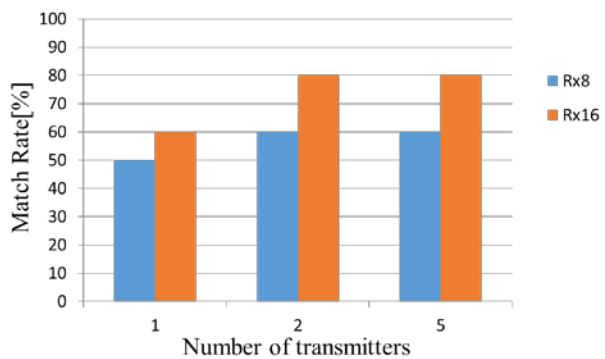


図11 無線センサ増加による位置推定精度