

令和元年6月20日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00132

研究課題名(和文) 微弱電波を活用した多重周波数によるセンサネットワークの構築

研究課題名(英文) Construction of a multi-frequency sensor network using Extremely Low Power Radio Station

研究代表者

瀬川 典久 (SEGAWA, Norihisa)

京都産業大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：20305311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：微弱無線のルールを最大限活用して、さまざまな周波数で100m程度届くセンサネットワークを構築することが可能になる。その時に、市販されているソフトウェア無線機で700ch程度確保することが可能になる。1世帯で電波の衝突を全く考えず、700台のセンサを動作させることが可能になる道筋ができた。

狭帯域スペクトル拡散通信の問題点は、送信機と受信機の周波数のずれをどのように対処するかである。今までには、送信機、受信機とも、かなり高価な水晶発振器を用いて対処していたが、ソフトウェア無線を用いることで、受信側で周波数のズレを追跡可能になる。これは、狭帯域通信を安価で実現することが可能になる可能性ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、IoTの発達によって、さまざまな装置が電波を発信し、情報交換がされている。一般家庭でも、無線LAN、BLEを活用し、スマート家電が使われている。ここ数年、無線LANなどのSSID選択画面を見ると、近所の無線がかなり見える状態で、無線の利用がかなり進んでいる事が伺われる。IoT機器の普及が進むと、確実に無線の衝突が起こるようになることが予想される。本研究の成果は、今後、無線の衝突が起きたときの、問題の回避策の一部になると考えている。微弱無線は、従来数m程度しか伝送しないために、家庭内でも使えるとは考えられなかったが、本研究の仕組みを活用し、衝突を回避しながら、通信が可能になる。

研究成果の概要(英文)：It becomes possible to construct a sensor network reaching about 100 m at various frequencies using Extremely Low Power Radio Station. It is possible to secure about 700 channels with commercially available software radios. The system will enable 1 household to operate 700 sensors without worrying about radio waves colliding. The problem with narrowband spread spectrum communication is how to deal with the frequency shift between the transmitter and receiver. Until now, both the transmitter and the receiver have been dealt with by using an expensive crystal oscillator, but the use of software radio makes it possible for the receiver to track the frequency shift. The results of this research have made it possible to realize narrowband communication at low cost.

研究分野：センサーネットワーク

キーワード：センサネットワーク LPWA ソフトウェア無線

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年 IoT(Internet of Things)製品が普及してきている。電化製品やウェアラブル端末など様々な端末がインターネットに接続されることで遠隔操作やモニタリングが可能になっている。IoT に欠かせない技術の一つが無線通信である。電波法では、通信目的、周波数、電波出力が定められており、それらのルールに従い、電波を出力している。

従来の無線通信、例えば、Wifi, Bluetooth, Zigbee で IoT を実現する場合、利用するノードが数百程度であれば、問題なく動作する。しかし、IoT が発達し、数千の物が一齐に電波を出力した場合、従来の規格では混信が発生し、すべてのノードがつながらなくなる恐れがある。これは、現在のセンサネットワークで用いられる無線方式が「搬送波感知多重アクセス/衝突検出方式」になっているからであり、電波をだす個体が増えるに従い、衝突が発生し、それぞれの個体が電波を出すタイミングを決めるのが難しくなるからである。

IoT の更なる普及を目指したとき、既存の無線インフラなどに影響がなく、通信ノード同士で混信が少なくなるような無線通信技術の選択が求められる。

センサとしてモジュールを組み込む最適条件(たとえば低消費電力など)を持った無線通信技術を利用する事で、最善 IoT の実現を行いたいと考える。しかし、周波数資源は有限であり、IoT だけに周波数資源を割り当てることは現実的ではない。そこで、通信距離が狭いエリアを前提にしている微弱電波を活用する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、微弱電波を活用し、電波法の縛りに影響されることなく、複数の周波数を同時に使う仕組みを活用し、数千のセンサノードが一齐電波を出力しても動作する、多重周波数によるセンサネットワークの構築環境を実現することである。

そこで、微弱電波を活用し、電波法の縛りに影響されることなく、複数の周波数を同時に使う仕組みを活用し、数千のセンサノードが一齐電波を出力しても動作する、多重周波数によるセンサネットワークの構築環境を実現することを考えた。微弱電波とは、送信機から3メートルの距離で電界強度が、図1に示されたレベルより低ければ、無線局の免許が必要ない電波形式である。

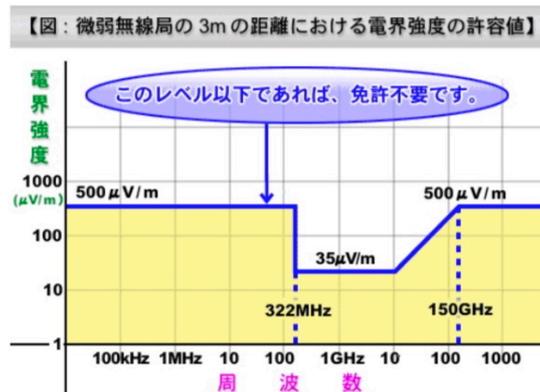


図1 微弱電波の電界強度（総務省電波利用ホームページ「微弱無線局の規定」

(<https://www.tele.soumu.go.jp/j/ref/material/rule/>)より引用)

ここで着目するのは、322MHz 以下の周波数である。322MHz 以下では、電界強度は  $500 \mu\text{V/m}$  の強さがある。これは、ダイポールアンテナを利用した場合、50nW の送信電力とほぼ等価である。現在市販されている微弱電波の通信モジュールで、この周波数を扱うと通信距離は数 m 程度である。よって、現在センサネットワークのモジュールとしては、微弱電波はあまり活用されず、特定小電力の Bluetooth, Zigbee が活用されている。この周波数を有効活用できれば、狭い環境において、かなりの数のセンサノードを扱う仕組みが構築できる。

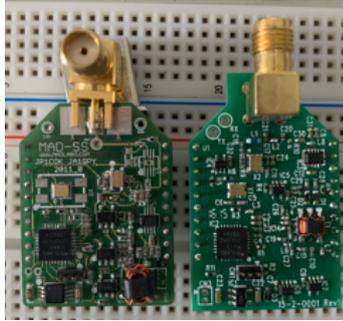
### 3. 研究の方法

まず本アイデアの実証をソフトウェア無線機の一つである USRP で行う。その後、微弱電波で動作するセンサノードの開発、複数の周波数を同時に受信する狭帯域スペクトラム拡散通信センサノードの開発を行う。微弱電波で動作するセンサノードは、周波数の異なる TCXO を複数用意し、なおかつその周波数で動作するアンテナとアンテナ給電点の出力を設計し、微弱電波で出力するセンサノードの開発を行う。複数の周波数を同時に受信する狭帯域スペクトラム拡散通信は、複数の周波数からなる送信波を広帯域のソフトウェア無線で同時に受信し、プログラムによって帯域分割を行い、それぞれの周波数成分に関して、スペクトラム拡散通信の復号化処理を行うことで実現する。

#### 4. 研究成果

##### (1)複数周波数を同時に受信するソフトウェア無線による MAD-SS 通信

微弱無線送信機として、過去に無線局免許を取得している MAD-SS 送信機(144.445MHz および 144.447MHz(G1D))を活用する (図2)。この MAD-SS 送信機は、電波出力 1mW で、シリアル通信で送られてきたデータを、MAD-SS 変調 (DS-SS 変調) を行い、それを規定周波数で2次変調(DSB 変調)し送信している。この無線機のアンテナを取り外し、出力を微弱無線とほぼ等価になるように、調整し実験を行う (図3)。



(左) 図2 MAD-SS 送信機(144.445 および 144.447MHz)

(右) 図3 上:通常 1mW 出力 下:微弱電波にするために電波出力を低減 (約-43dB)

##### (2)ソフトウェア無線機 USRP N210 と GNU RADIO を利用した MAD-SS 復調

ソフトウェア無線機 USRP N210 および GNU RADIO で MAD-SS の復調を行った。図4が、本処理のワークフローである。

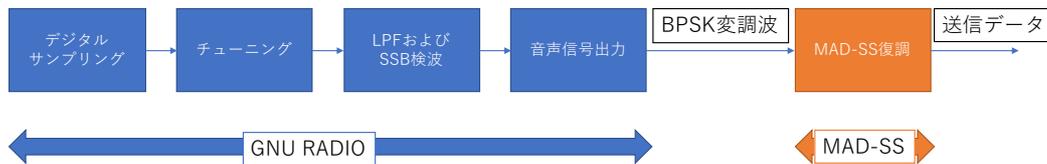


図4 GNU RADIO による MAD-SS 復調ワークフロー

GNU RADIO 側では、送信機から送られてくる DSB 変調した波に対して SSB 復調を行う。GNU RADIO のサンプルなどで SSB 復調の仕組みが紹介されているが、本研究では Weaver 方式で実装を行う。

動作環境は以下の通りである。

- ソフトウェア無線機  
Ettus Research USRP N210 (GPS を利用した周波数安定化機能付き)  
受信ボード Basic RX  
対応周波数: 1-250MHz  
バンド幅: 100MHz
- ホスト PC  
CPU: Intel Corei7-4770S (3.1GHz)  
Memory:32GB  
OS: Windows 10  
利用ソフト: GNU RADIO, MAD-SS 受信(ss-rx.exe)

これらを利用し、実行結果は、図5に示す。GNU RADIO と N210 で MAD-SS の受信が可能になった。複数チャンネルは、デジタルサンプリング以降を平行にすれば、可能になる。

しかし、本手法は、シングルチャンネルでも途中受信できなくなるときが発生する。受信できるときの周波数偏差が 100 Hz 程度なので、周波数がずれて受信ができないわけではない。GNU RADIO のフローが間違っていれば、復調がまったくできない。途中流れるデータを調べてみると、処理落ちしていることがわかる。

まず、理由としては、帯域が広すぎるために処理が間に合わないことが、考えられたため、サンプリングレートを下げて対処したが、問題は修正されなかった。MAD-SS の GNU RADIO での受信は、安定して動作しないと考えている。今後も受信フローの見直しを行う予定である。

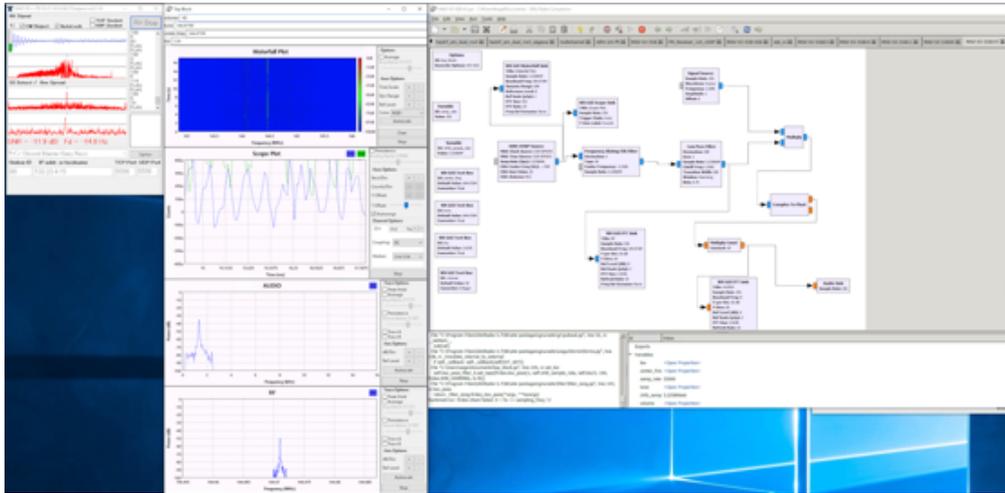


図 5 GNU RADIO による MAD-SS 復調

(3)別のソフトウェア無線を用いた MAD-SS の復調

GNU RADIO での複数チャンネルの復調にめどが立たないために、別の手法も検討し、実験を行った。

ソフトウェア無線を実現するためのソフトウェアの一つに SDR#(SDR Sharp)が存在する。SDR#には、受信したスペクトルをそのままネットワークに流す機能(spyserver)が搭載されている。また、SSB の受信機能も実装されており、高速に復調する。

そこで、まず無線機により広帯域で受信したスペクトルデータを spyserver で送信し、それぞれの周波数に応じた、SDR Sharp 受信クライアントを起動し、SSB 復調、MAD-SS 復調を行う(図6)。外部ネットワークに流すとネットワークトラフィックによってパフォーマンスに影響するが、1台のマシン上で実行するので、そこは無視できる。

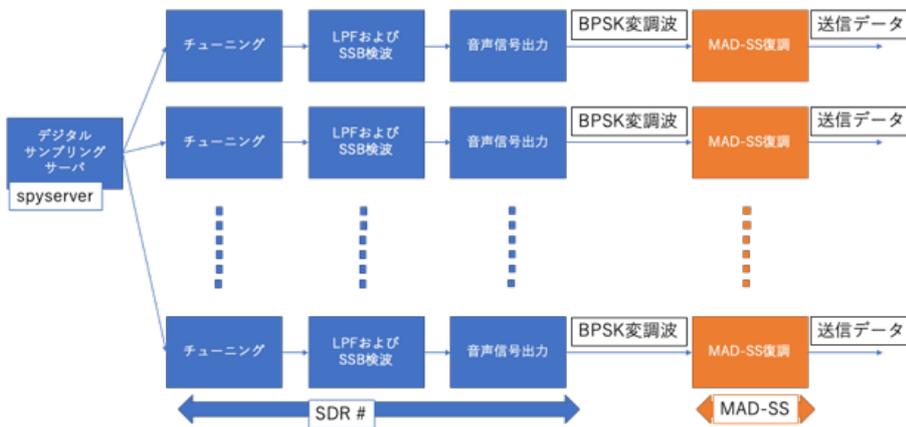


図 6 spy server と SDR#による MAD-SS 復調ワークフロー

図 7 が、SDR Sharp と MAD-SS 復調による、複数周波数のリアルタイム受信である。spyserver で、対応している無線機(RTL-SDR)を利用している。spyserver で流しているスペクトルを2つの受信フロー(上が 144.451731MHz, 下が 144.471580MHz)で MAD-SS 復調に成功している。

この仕組みを使えば、ソフトウェア無線機の帯域およびソフトウェア無線機の性能で、チャンネルを増やすことが可能である。

MAD-SS 送信機の無線帯域が、99%専有帯域幅で 2 KHz であり、受信側では周波数偏差を考慮し、受信帯域幅を 2.6KHz に設定している。

よって、ソフトウェア無線機の受信帯域幅を 2 MHz とした場合、約 760ch 設定することが可能になる。

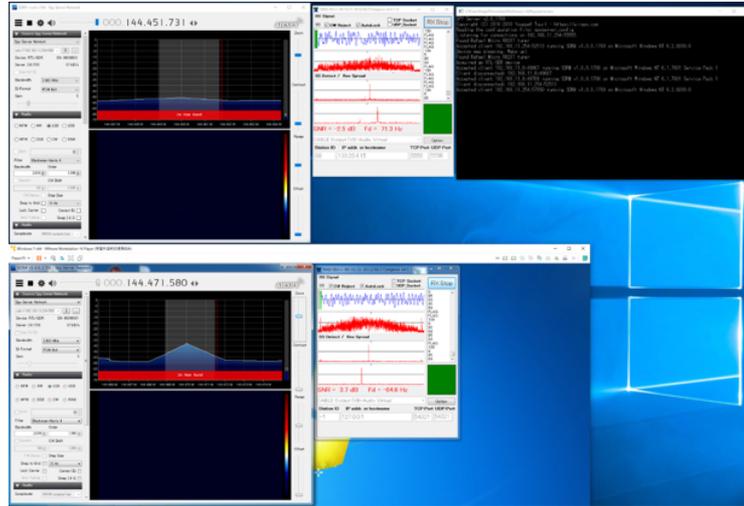


図7 spy server と SDR#による MAD-SS 復調

(4)新しい受信機を活用した、MAD-SS の利用

チャンネル数が増えることを前提に、あたらしい MAD-SS の利用方法の提案および実装を行った。

主に行ったプロジェクトは次のとおりである。

① 生体情報を活用するシステム

人間の体に脈拍センサをつけ、その情報を伝送し、処理することで、さまざまな便利な IoT アプリケーションを構築することを目指す。具体的には、Arduino に脈拍センサを取り付け、その情報をスマートフォンに送信し、その脈拍情報を写真撮影時に活用するシステムである。

また、脈拍情報を利用し、その情報で部屋に利用者の好む癒やしの声が出るシステムを構築した。

微弱電波での、脈拍情報の伝送は可能であったが、BLE 無線機の急激な小型化、スマートウォッチの高機能化などによって、この方向性での開発は今後進めないほうが良いことを確認した。

② 自然環境をセンシングするシステム

構築した受信機を活用し、京都市内に設置した空気センサ（一酸化窒素など）の情報を Arduino と MAD-SS を用いて伝送する仕組みを構築した（図8,9）。送信機は、特定小電力版 MAD-SS を活用した。受信側に、本研究の成果を活かした。

設置場所が、京都市内のマンションのベランダである。特定小電力(426MHz)帯は、不特定多数の利用者が電波を出していることがわかり、他の周波数をうまく使うことで、微弱電波の特徴と狭帯域スペクトル拡散通信の特徴により、100m程度の伝送で周波数を幅広く利用できる可能性を示した。

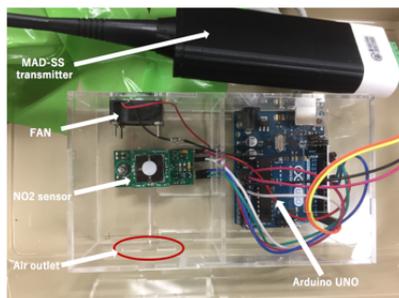


図8 NO2 センサーと MAD-SS 送信機による  
環境情報を送信するセンサー

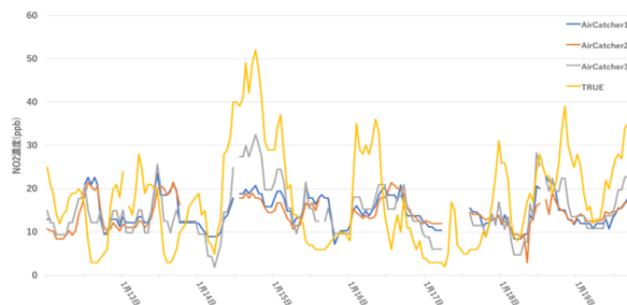


図9 センサの稼働状況

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

(1)安江 悠真, 青井 俊樹, 玉置 晴朗, 矢澤 正人, 高橋 広和, 瀬川 典久, 時田 賢一, 長距離通信技術を応用した新しいテレメトリシステム“GPS-TX”によるツキノワグマ (*Ursus thibetanus japonicus*) の行動追跡事例, 哺乳類科学, 2016, 56 巻, 1 号, p. 27-36, 公開日 2016/07/01, <https://doi.org/10.11238/mammaliancience.56.27>, (査読あり)

〔学会発表〕 (計 8 件)

- (1) Yuta Miyagawa, Norihisa Segawa, Masato Yazawa, Masa-yuki Yamamoto: Development of a Low-cost Gas Sensor Unit for Wide Area Air Pollution Monitoring System, ACM MobiSys '19, 574-575 (2019).
- (2) 木嶋百音, 瀬川典久: 女性のための声を用いた癒しシステム, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, pp 444 - 445(2017)
- (3) 瀬川典久, 矢澤正人: SDR を利用した MAD-SS 受信器の試作, 信学技報, vol. 117, no. 134, ASN2017-43, pp. 151-152, 2017 年 7 月.(2017)
- (4) 瀬川典久, 矢澤正人: 成層圏気球中継通信を実現するための狭帯域スペクトラム拡散通信 MAD-SS 受信機の制作 (続報), 電気学会関西支部(2016)
- (5) 大下隼人, 瀬川典久: 生体情報とスマートフォンを連携した画像撮影システムの開発, WISS 2016, 3A-06(2016)
- (6) Norihisa Segawa, Masato Yazawa, Hidetoshi Mino, and Takaki Hanada. 2016. Prototype system for a ultra long distance via sensor network MAD-SS balloon transmitter: Poster Abstract. In Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments (BuildSys '16). ACM, New York, NY, USA, 253-254(2016).
- (7) 瀬川典久:微弱電波を活用した多重周波数によるセンサネットワークの構築, 京都産学公連携フォーラム(2016)
- (8) 瀬川典久:成層圏気球中継通信を実現するための狭帯域スペクトラム拡散通信 MAD-SS 受信機の制作, UBIQUITOUS WEARABLE WORKSHOP 2015 (UWW2015), (2015)

## 6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 矢澤 正人

ローマ字氏名: YAZAWA, Masato

※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。