

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24500086

研究課題名(和文) スペクトラム拡散通信を活用した長距離送受信センサノードの開発

研究課題名(英文) Development of the long-distance sensor node that utilized spread spectrum communication

研究代表者

瀬川 典久 (SEGAWA, Norihisa)

京都産業大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号：20305311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：低電力での運用を可能にする低消費電力型のDSP(Digital Signal Processor)内蔵のマイコンを利用し、スペクトラム拡散通信を行う。センサノードを構築し、ノード間距離約10kmのセンサノードを構築する。このことによって、従来設置が難しかった山間地でのセンサネットワークの構築が、非常に少量のセンサノードの設置で可能になり、幅広い応用が考えられる。
また、本システムを活用し、以下の応用を考えている従来のzigbee等のセンサでは、動きを捉えることが難しかった熊などの生態情報受信し、伝送するセンサノードを構築することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：Using a microcomputer of the DSP(Digital Signal Processor) incorporation of the low consumption electricity type, I build a sensor node to perform spread spectrum communication. I realize distance approximately 10km between nodes by using this sensor node. The construction of the sensor network in the mountains that setting had difficult conventionally is enabled by the setting of very a little sensor node, and wide application is thought about by this.
In addition, I utilize this system and receive the habits information such as the bears that it was difficult to arrest movement with the sensors such as conventional zigbee thinking about the following application and can build a sensor node to transmit.

研究分野：センサネットワーク

キーワード：センサネットワーク 狭帯域スペクトラム拡散通信

1. 研究開始当初の背景

本研究の背景は、以下の通りである。センサネットワークの基本技術が開発され約10年が経過し、現在その技術を用いたさまざまな応用システムの開発が行われている。その中で、近年屋外、野外でのセンサネットワークの利用に注目が集まっている(図1)。

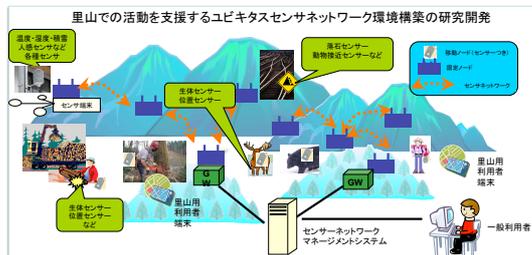


図1 野外におけるセンサネットワークの利用

しかし、これらの手法はセンサノード間の伝達距離が元々短距離であり(山中では2.4GHzで平均100m程度、950MHzでは平均400m程度)、屋外で広範囲で運用するためには、大量のセンサを設置する必要がある。また、野外に設置する場合には、その土地の所有者に設置の許可を得る必要がある。よって、多数のセンサを郊外に設置を行う際、さまざまな土地の権利者と交渉し設置を行う必要がある。

また、センサノードを設置するための人的コストの問題である。従来のセンサを、広域で動作させるためには、最低でも20個以上の設置が必要になる。それだけの数を、野外に設置するには、かなりの人的資源が必要になる。また、都市ではなく里山、高山などの自然環境が厳しい場所への設置は、設置そのものが生命の危険をかける必要がある、慎重を要する。

野外でセンサノードを大量に導入する場合、

センサノードのそのものコスト<センサノードの設置コスト

になり、広域での実験が難しくなる。

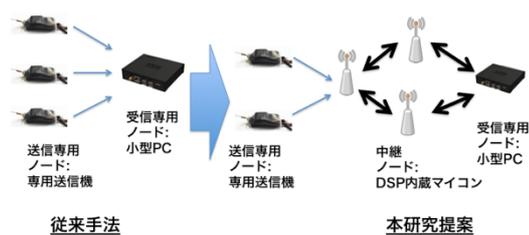
そこで本研究では電波の雑音からの耐性が強くフェージングの影響を回避しやすい、スペクトラム拡散通信をセンサノードに活用する方法を提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来のセンサネットワークが主に利用する通信方式とは異なり、高速同期法を用いたスペクトラム拡散通信を利用し、低電力で長距離通信を行うセンサネットワークを構築する。本方式が実用化されると、野外においてセンサノードの設置個数が大幅に減り(伝送距離の二乗の効果が期待)、実際に野外での活動をとらえるのにセンサ

ネットワークが活用される事が期待される。スペクトラム拡散通信をセンサノードに実装するためには、ノード間の同期、周波数調整、拡散コードを利用した復調、復号のための高速計算が必要であるが、従来のマイコン(PIC, ATmega)では、スペクトラムの解析が出来ないために、従来のセンサネットワークシステムでは活用されてこなかった。

そのため、現状では、電池で動作する小型の送信機と電源が供給されているPCを利用したセンサネットワークが提供されている。そこで本研究では、これらの問題点を解決するための低電力での運用を可能にする低消費電力型のDSP(Digital Signal Processor)内蔵のマイコン(ARM Cortex-M4F)を利用し、スペクトラム拡散通信を行う、センサノードを構築し、ノード間距離約10kmのセンサノードを構築する(図2)。このことによって、従来設置が難しかった山間地でのセンサネットワークの構築が、非常に少量のセンサノードの設置で可能になり、幅広い応用が考えられる。



ノード間距離は、共に10km以上

図2 提案システム

また、本システムを活用し、以下の応用を考えている従来のzigbee等のセンサでは、動きを捉えることが難しかった熊などの生態情報受信し、伝送するセンサノードを構築することが可能になる。そのため、従来衛星通信を使った手法にくらべて、非常に安価で研究者が利用することが可能になる。

本手法を利用することによって、災害が起こりやすいエリアに少数のセンサノードを設置し、災害情報をとらえることが可能になる。また、センサネットワークの仕組みを利用することで、小電力で動作させることが可能になるために、容易に設置が行える。

これらのことから、本研究が進むにつれて、動物行動学、地質学などの研究者に、本研究のアウトプットを提供することで、さまざまな応用が生まれ、野生の研究に対して幅広い貢献が期待される。

3. 研究の方法

スペクトラム拡散通信の一つの実装である(株)数理設計研究所が開発した、高速同期法を用いたスペクトラム拡散通信を利用する。本手法は、従来のスペクトラム拡散通信より、

(1) ノード間の同期 (2) 周波数変化に対する耐性 (3) 拡散コード当たりのデータ転送速度に対して従来手法より高速にデータが転送できる。数理設計研究所から、岩手県立大学に対してソースコードライセンスを供給されているために、本ソースコードを活用し、センサネットワークを構築する。本手法は、単純伝送および MAC レイヤのみの供給のため、本研究では、①ノードの管理機能②ノード間の通信管理機能③ノード間ルーティング機能実装する。

まず、最初に数理設計研究所から購入するサンプルキットを利用し、サンプルキット上に実装する。その後、汎用 DSP と通信チップを利用し小型ノードでの実装を実現する。本年度は、手法の確認だけを行うために、微弱電波を用い実験を行う。

その後、実装したセンサノードを、長期間設置し伝送実験を行う。特に、今後の応用を見据えて、作成したノードの技術適合試験を取得し、特定小電力での通信を実現する。周波数帯は、1 4 4 M h z 帯のアマチュア無線バンドを利用する。また、作成したセンサノードを、高清水牧場、NHK 遠野送信局に設置し、長期間動作させ、性能の確認を行う。

構築した長距離センサノードに対し、従来から作成している、動物に装着するセンサ、自然環境を計測するセンサを装着し、実際の野生動物、自然環境の観察を行う。特に、実際の活用は、将来の具体的な実用例になるので、地方自治体(遠野市、滝沢村)、他分野での活用(岩手大学農学部)の関係者と議論を重ねながら実用システムを構築し、第三者の評価も受けながら、本手法の評価を行う。

4. 研究成果

- (1) ノード間の管理を容易にする MAD-SS センサネットワークの構築

MAD-SS を容易に使うために、MAD-SS シールド送信器および、MAD-SS 受信システムを開発した。

Arduino でプログラミング可能な MAD-SS 送信機

MAD-SS シールド(図3)は、数理設計研究所が開発したスペクトラム拡散通信の位置一手法 MAD-SS を実装した物である。MAD-SS シールドは、アマチュア無線での利用を前提として設計されており、実効出力 1mW で約 10 k m の伝送を目指している。また、シリアル通信ポートを持っており、1 パケット 31byte で設計されている。

また、MAD-SS シールドは、Xbee と外形形状

が同一になっており、またシリアル通信を行うためのピン (Vin, GND, TX, RX) が同一になっている。よって、Arduino Fio 等の Xbee のシリアルモードで通信するシステムでハードウェアを変更なしに利用することが可能である。

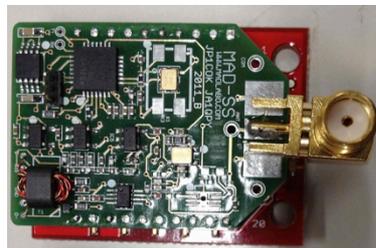


図3 MAD-SS シールド

Arduino とは、単純な入出力を備えたマイコン基板(主に CPU として、ATMega1281 を利用)と Processing/Wiring 言語からなる開発システムである。コードの記述が容易に行え、なおかつ用途に応じてさまざまな基板が提供されているため、世界中で幅広く利用されている。

Arduino Fio は、大きさ縦約 3cm 横約 7cm の大きさに CPU (ATMega328P) および I/O とリチウムポリマー充電回路を搭載した、Arduino 基板の一種である。

Arduino で MAD-SS シールドを用いセンサネットワークプログラミングを行う際、以下の仕組みをライブラリとして用意する。

①コールサイン送信機能

MAD-SS シールドをアマチュア無線帯で利用するためにコールサインを定期的を送る必要がある。

②位置情報送信機能

GPS の情報は、通常 GPS モジュールからシリアルで送られてくる。これらをシリアルとして受信を行い、緯度、経度情報などを取得する必要がある

③センサ情報サンプリング

温度センサ、加速度センサなど任意のセンサを接続し、データを取得する仕組みが必要である。

④複数のシリアルポートのハンドリング機能

MAD-SS シールドは、一つのシリアルポートを利用する。よって、シリアルポートを一つしか持たない Arduino の場合、シリアルポートを拡張する必要がある。

小型マイコンによる MAD-SS 受信機

MAD-SS 送信機は、オーディオ帯域でスペクトラム拡散の変調(1次変調)を行い、その後、BPSK 搬送波を用い2次変調を行い伝送している。

よって、受信機では、まず BPSK 搬送波から復調しオーディオ帯域のスペクトラム拡散信号を取り出し、その信号を MAD-SS 受信アルゴリズムに通すことで、送信データを復調する。

屋外で安定して長期間動作するセンサノードを構築するには、以下の事が要求される。

① 非常に小型・軽量かつ低電力で動作

② 気温変化に影響しない周波数安定度

既存で販売されている受信機は、上記の条件を満たさないために、新たに受信機の開発を行った。

図4は、BPSK 搬送波からオーディオ帯域のスペクトラム拡散信号をとり出す受信機である。重量は、55g であり、消費電力は、平均 0.2W である。周波数安定度は、0.5ppm である。

図5は、オーディオ信号から送信データを取得するためのマイコンである Raspberry Pi Model A+ と Cirrus Logic Audio Board(Wolfson 社製 Smart Codec with Voice Processor DSP WM5102)である。Cortex-M3 では、メモリ不足で開発ができず、また、組込マイコンの進歩により、他のマイコンでも十分低電力で動作するようになったために、ターゲットマイコンを切り替えた。ソフトウェアは、MAD-SS 受信プログラムおよび pulse audio システムを利用している。重量は、48g であり、消費電力は、平均 0.67W (最大 1.1W) である。



図4 MAD-SS 専用受信器

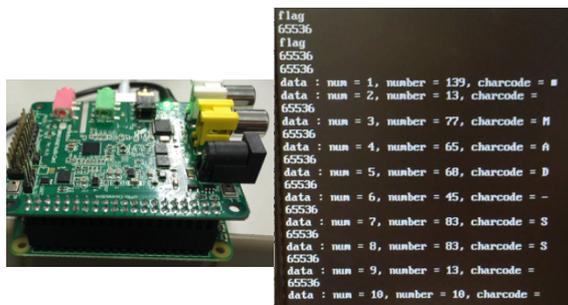


図5 MAD-SS decode using Raspberry Pi A+

受信ソフトと外部プログラム接続

MAD-SS シールドから送られた信号は、専用受信機で受信され、受信ソフトでデコードされる。デコードされた情報は、1 パケット毎に処理される。パケットのデータは、次のようにデコードされる(表1)。

表1 MAD-SS data and data format

ver3. 1, 86, 2013-03-10, 08:59:52, 5, 139, 9, 49, 52, 51, -5. 71, -5. 40, -4. 10, -4. 26, -3. 98, -111. 70, -110. 36, -110. 36, -109. 01, -110. 36	
MAD-SS data	Data format
Ver3. 1	Software version
86	Receiver node ID
2013-03-10	DATE at data receive
08:59:52	TIME at data receive
5	Counts of data receive
139	Transmitter Type ID
9	Transmitter ID
49, 52, 51	Payload
-5. 71, -5. 40, -4. 10, -4. 26, -3. 98	SNR (db)
-111. 70, -110. 36, -110. 36, -109. 01, -110. 36	Frequency variation (Hz)

SNR (signal-noise ratio:信号雑音比) は、スペクトラム通信が行われてセンサデータを受信したとき、雑音に対して信号がどの程度強かったのかを表す値である。MAD-SS では、同期確立手続きとして、トグル点検出とシフト量検出に続き、推定したシフト量から拡散コードの開始位置を再設定して逆拡散し、最終的には搬送波シフト量の確認までを一気に演算している。逆拡散したスペクトル上にある目的信号とそれ以外の雑音との比を MAD-SS の SNR として定義している。

また、これらのデータは、TCP ソケットを利用し、ユーザプログラムに渡される。受信ソフトは、クライアントとして動作しており、各自のユーザプログラムにソケットを利用したサーバを組み込むことで、受信ソフトから受信データを受け取ることが可能である(図6)。その際に、送信ノード ID、受信データ個数から、データが欠けていたかどうかの確認が可能である。SNR、周波数偏差から電波の状況を調べることが可能である(MAD-SS 層でも、データの検証は行われている)。送信機、受信器を組み合わせることで、受信したデータを受信ノードで解釈を行い、転送することが可能になった。



図6 MAD-SS 受信の仕組み

(2) 本システムを利用による野生動物の追跡実験

GPS を利用した従来のテレメトリシステムには、発信機回収の労力、及び位置情報取得から現地踏査までのタイムラグなどの課題がある。これらの課題を解消するため、長距離無線通信技術 MAD-SS を応用した新たなテレメトリシステム「GPS-TX」が開発された。本システムは、野生動物の現在位置をリアルタイムで把握することで、野生動物の行動をより詳しく明らかにすることが期待できる。著者らは、岩手県遠野市において GPS-TX をニホンツキノワグマ (*Ursus thibetanus japonicus*) の追跡に適用し、3 頭の追跡個体の行動把握に努めた。追跡個体の位置情報からコアエリアを抽出し、現地踏査を行った結果、森林下層部の状況やニホンツキノワグマの痕跡を基に、コアエリアにおける追跡個体の行動を推測することが可能になった。

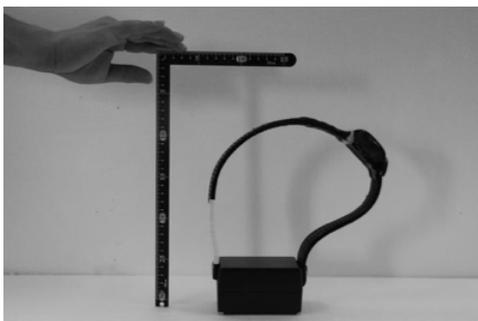


図 7 クマの追跡に利用した GPS-TX

(3) MAD-SS を用いた成層圏-地上通信の実現

2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、遠野エリアにおいても大規模な停電が発生し、携帯電話網の利用が不可能になった。受信局も、3G ネットワークが遮断され、停電が発生し停止した。また、現地の国道などが通行止めになり、受信局の復旧にかなりの時間を要した。

災害などによって受信局が一時的に使えない状況において、地上に設置された 1mW から 10mW 程度の低電力で送信するセンサネットワークの情報を収集する手段を提供する必要がある。そこで、成層圏気球を中継局として通信することを提案し、実験を行った。

従来の地上に設置したセンサネットワークとは異なり、成層圏に到達する気球を利用した長距離の MAD-SS センサネットワークの活用を提案する。図 8 は、気球を利用したセンサネットワークの仕組みである。この気球は、ラジオゾンデと呼ばれる、気象観測に用いる気球である。気球の重さは、約 300 g でこの気球にヘリウムガスを注入し、高度約

30km まで上昇させる。この気球の値段は、約 3 万円である。

高度 20km まで上昇した気球は、地上と MAD-SS で通信を行う。例えば、MAD-SS の電波の出力を 10mW にした場合、半径 100km 以上の通信が可能になると考えられる。

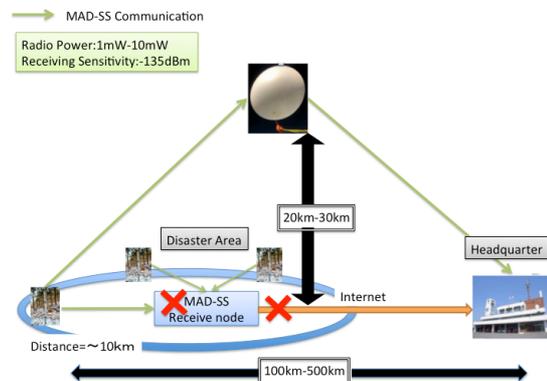


図 8 成層圏気球を利用した長距離センサネットワークの実現

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 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, 日本哺乳類学会「哺乳類科学」56 巻 1 号 (掲載決定) (2016 年 6 月予定) (査読有り)

[2] Ohashi Shingo, Segawa Norihisa, Sawada Naoya, Deguchi Yoshitaka, Kofujita Hisayoshi, Matsubara Kazuei: Construction of an Automatic Method to Monitor Behavior of Captive Deer using RFID, 電気学会論文誌. C 134(11), 1690-1695, 2014
The Institute of Electrical Engineers of Japan,
<http://ci.nii.ac.jp/naid/130004704427/10.1541/ieejjeiss.134.1690>, (査読有り)

[学会発表] (計 7 件)

[1] Norihisa Segawa, Jun Sawamoto, Masaaki Gokan, and Masato Yazawa. 2014. Low power and low cost tide gauge sensor node using a long distance communication technology -MAD-SS-: poster abstract. In Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings (BuildSys '14). ACM, Memphis, USA, 224-225.

DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2674061.2675046>, 2014-11-5, (査読有り)

[2]瀬川 典久, 澤本 潤, 矢澤 正人: 依頼講演 狭帯域スペクトラム通信 MAD-SS を活用する成層圏気球通信の実現, 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報 114(166), 185-188, 2014-07-30, 京都テルサ(京都府京都市)

[3]Norihiisa Segawa, Jun Sawamoto, Masato Yazawa, Haruo Tamaki, Hidetoshi Mino, Takaki Hanada, and Takeshi Yatsuo. 2013. A prototype system of the MAD-SS wide area sensor network using a weather balloon. In Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '13). ACM, Rome, Italy, Article 56, 2 pages.

DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2517351.2517433>, 2013-11-11, (査読有り)

[4]瀬川 典久, 澤本 潤, 矢澤 正人, 玉置 晴朗, 美濃 英俊: 狭帯域スペクトラム拡散通信 mad-ss を容易に利用するための環境の提案, 電子情報通信学会技術研究報告. ASN, 知的環境とセンサネットワーク 113(132), 213-217, 2013-07-10, アクトシティ浜松(静岡県浜松市)

[5]瀬川 典久, 澤本 潤, 東 淳樹, 高橋 広和, 西 千秋, 時田 賢一, 藤永 清和, 矢澤 正人, 玉置 晴朗: MAD-SS センサネットワークを利用した鳥のトラッキングシステムの構築: カラスのライフログ, 電子情報通信学会技術研究報告. CS, 通信方式 112(210), 67-71, 2012-09-13, 東北大学(宮城県仙台市)

[6]Norihiisa Segawa, Jun Sawamoto, Masato Yazawa, and Haruo Tamaki. 2012. A marine experiment of a long distance communication sensor network -MAD-SS-. In Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking (Mobicom '12). ACM, Istanbul, Turkey, 435-438. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2348543.2348603>, 2012-08-23, (査読有り)

[7]Norihiisa Segawa, Tomoaki Yamaguchi, Jun Sawamoto, Masato Yazawa, and Haruo Tamaki. 2012. Poster: a construction of a long distance communication sensor network node using Arduino and Mad-SS shield. In Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '12). ACM, Low Wood Bay, Lake District, United Kingdom, 529-530.

DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2307636.2307666>, 2012-06-26, (査読有り)

[その他]

[1]瀬川典久: 2015 年度電子情報通信学会関西支部 優秀論文発表賞

[2]瀬川典久: 京都三条ラジオ「くらもといたるのいたらナイト」2014年9月11日 研究紹介

[3]矢澤正人・青井俊樹・安江悠真・高橋広和・坂庭浩之・東淳樹・瀬川典久・時田賢一「GPS-TX-国産 GPS 送信機, 構想から実用化までの軌跡-」, 2012 年度日本哺乳類学会大会ポスター賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬川 典久 (SEGAWA, Norihiisa)
京都産業大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号: 20305311

(2) 連携研究者

杉野 英二 (SUGINO, Eiji)
岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・講師

研究者番号: 10293391

矢澤 正人 (YAZAWA, Masato)
数理設計研究所・代表取締役
研究者番号: 60393477