

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540033

研究課題名(和文) アナログCDMA通信方式を用いた構造モニタリングに関する研究

研究課題名(英文) A study on Structure Health Monitoring using Analog CDMA

## 研究代表者

鈴木 誠 (Suzuki, Makoto)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：20615257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：無線センサネットワークにおいて1つの重要な問題である時刻同期について、アナログCDMAという、新たな観点からの検討を行った。アナログ信号をCDMAで符号化をかけることによって、複数端末から連続波を送信可能とする新しいアーキテクチャを開発した。性能評価によれば、20dB程度のSN比を実現可能であり、スマートフォンで利用されているような数100ug/Hz程度の加速度センサを利用するには十分な性能を実現でき、斜張橋のケーブルなどの測定には十分な精度を実現できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We studied on time synchronization, an important issue in wireless sensor networks, using a novel communication architecture called analog CDMA. By modulating analog waves using CDMA, a sink node can collect continuous analog sensor data from multiple points. According to our evaluation, the analog CDMA communication can achieve SNR of 20dB, which means the communication architecture can be applied to acceleration sensors whose noise level is several 100 ug/sqrt(Hz).

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 時刻同期 アナログCDMA

## 1. 研究開始当初の背景

社会資本ストックの老朽化に伴い、構造モニタリングの重要性が高まっている。橋梁などの大型建造物を対象とした際には、長距離通信、および多数のノードを収容するためのネットワーク構築、多点との相関を取得するための高精度時刻同期について考慮しなくてはならない。これに向けて、無線センサネットワークを利用した構造モニタリング手法が実現されつつある。しかしながら、マルチホップルーティングや時刻同期機構の複雑性が普及を阻害する一因となっている。

大型建造物を対象とした構造モニタリングの要求条件は、(1)高精度同期サンプリング、(2)複数センサノードの多元接続の2点である。これらの要求を満たす既存技術としては、(1)FDMAによるアナログ伝送、(2)IEEE802.15.4がある。しかしながら、加速度センサのような狭帯域信号の多重化をFDMAで行う場合には、温度変化等により発振周波数変動が生じ、ガードバンドを設ける必要があるため、多数ノードの収容が困難となる。また、高精度同期サンプリングをZigbee等で実現する場合、各センサノードにおいてサンプリングを行うために、サンプリングタイミングに相違が生じるという本質的な困難性を孕んでおり、複雑な時刻同期機構を適用せざるを得ない。

巨大な建造物から、加速度や歪などのセンサ値を時刻同期やルーティングなしに、大量に集めることが可能となれば、構造モニタリングというアプリケーションをより低コストで実現可能となり、インフラ監視技術の飛躍的な向上も見込まれる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、無線センサネットワークの構築を抜本的に簡略化する無線通信方式の開発にある。具体的には、マルチホップルーティングおよび時刻同期機構の複雑性が無線センサネットワークの社会進展を阻んでいる最大の原因であるとの観点から、ベースバンド狭帯域化によるシングルホップでの通信可能距離の延長、および多数センサノードからのセンサ出力信号の多重化を可能とする「アナログCDMA通信方式」の開発を目的とする。また、フィールド検証を通して実環境での有効性を明確にし、これらの利用技術を発見・示唆することを目的とする。

アナログCDMA通信方式によれば、センサノードのソフトウェア開発を必要とせず、多様なセンサを容易に無線で収容可能となり、無線センサネットワークの社会展開にも資すると考えられる。アナログCDMA通信方式によって、無線センサネットワークの抜本的な簡

易化が可能となれば、構造モニタリングなど、無線センサネットワークの実社会展開が急速に進むと考えられる。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまでの無線センサノードとは全く異なる、アナログCDMA通信方式によって多数の無線ノードを収容するという課題に取り組む。現在の無線センサネットワーク研究が暗黙的に前提としているCSMAの通信方式を根本から再考することによる、新たなネットワーク方式を創出する。

これまでのIEEE802.15.4といった汎用的な通信方式では、2MHzといった広い帯域幅を利用しているのに対して、加速度センサの帯域は高々数100Hz程度であり、アナログ信号のまま転送することで、大幅な帯域利用効率の向上が見込まれる。

アナログCDMA通信方式では、多数ノードのセンサ値がリアルタイムに伝送され、AD変換を1台の受信機で行う。これによって、多点でのセンサ値の相関を取得するための複雑な時刻同期方式が不要となる。さらに、衝突回避が不要なことから、RF受信器やCPUさえも具備しない、簡易なセンサノードの利用が可能となる。また、スペクトラム拡散により、ベースバンド帯域が発振器のゆらぎ以下である通信が可能となるため、熱雑音や妨害波によるノイズが低減され、FDMA方式と比較した場合、シングルホップの通信範囲も拡大される。

本研究では、下記の2つの課題に取り組む。

- (1) **アナログCDMA通信方式の開発と性能解析** センサ出力をアナログ信号のままCDMA変調することで、複雑な時刻同期機構を利用することなく、高精度に同期計測を可能とするアナログCDMA通信システムを開発する(図1)。また、既存のアナログ出力センサにCDMAの送信部を追加するだけで無線センサネットワークを構築可能であり、ソフトウェア開発工程の大幅な短縮が可能とする。さらに、アナログ伝送により懸念される信号品質の劣化という問題に対して、必要とするSN比と、収容するノード数や他システムからの干渉強度などの関係を明らかにする。
- (2) **アナログCDMAセンサノードの開発** アナログ信号のCDMA変調では、PN周期の間に拡散変調器入力電圧が変化するため、単純なDLLによる相関ピーク検出による同期検出は困難である。センサ出力の1次変調にFM方式を用い、FM復調器の同期判定を、受信機PN発生器に

フィードバックを行うチップ同期方式を開発する。

また、アナログ CDMA 通信方式のハードウェア実装を行うとともに、実証実験を通して、実環境における有効性を示す。

#### 4. 研究成果

無線センサネットワークにおいて1つの重要な問題である時刻同期について、アナログ CDMA という、新たな観点からの検討を行った。

アナログ信号を CDMA で符号化をかけることによって、複数端末から連続波を送信可能とする新しいアーキテクチャを開発した。図2～図5に示すようにアナログ CDMA 通信システムの実装を行った。性能評価によれば、20dB程度のSN比を実現可能であり、スマートフォンで利用されているような数  $100\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度の加速度センサを利用するには十分な性能を実現でき、斜張橋のケーブルなどの測定には十分な精度を実現できることを確認できた。

今回の試作による実測では、SN比が20dB程度に限られるため、アプリケーション範囲は多少限られたものとなる。しかしながら、特に、斜張橋ケーブルの張力推定など、振動周波数を取得するものに関しては、フェージングによるノイズの影響が小さくなることから、有用なアプリケーションとなる可能性がある。

また、現状の無線センサネットワークを利用した構造モニタリングシステムでは、1台のセンサノードからのデータ収集に、計測時間と同程度の時間を必要としているのに対して、本通信システムではリアルタイムに全てのノードからデータを収集可能となるといったことから、交通可否診断などの新しい応用も開ける可能性を示唆することができた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

1. M. Suzuki, et al., 'Development and Field Experiment of Routing-Free Multi-Hop Wireless Sensor Network for Structural Monitoring,' Proceedings of International Conference on Smart Infrastructure and Construction, June, 2016.
2. 鈴木誠, 都市高速道路の「中」で見た無線センサネットワーク, 電子情報通信学会総合大会, BP-5-1, March, 2016

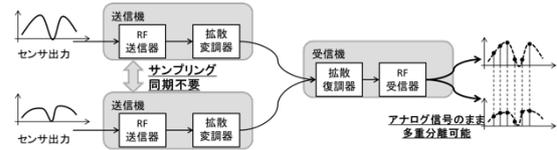


図1 アナログ CDMA の概要

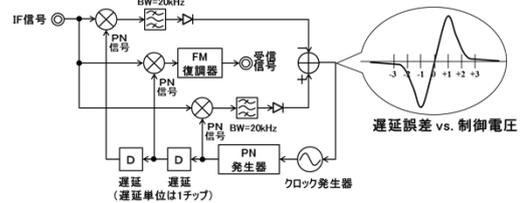


図2. アナログ CDMA 受信部の構成

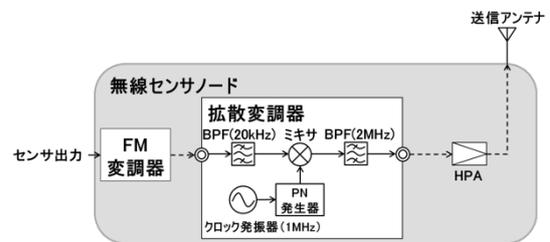


図3. アナログ CDMA 送信部の構成

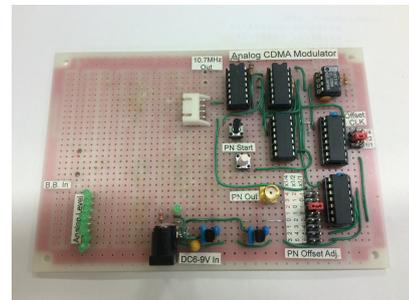


図4. 実装したアナログ CDMA 変調器

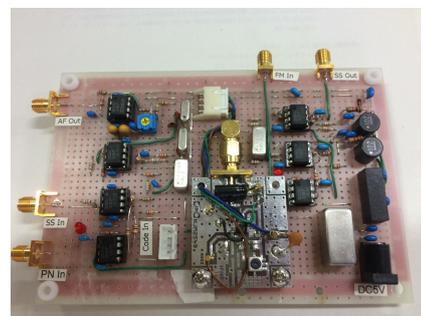


図5. 実装したアナログ CDMA 復調器

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 誠 (SUZUKI, makoto)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：20615257

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし