

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21510173

研究課題名（和文） インフラ安全監視を行う無電源作動ワイヤレスセンサー

研究課題名（英文） Study on Passive Wireless Sensors for Safety Monitoring of Infrastructures

研究代表者

五十嵐 一 (IGARASHI HAJIME)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90212737

研究成果の概要（和文）：

本研究では、橋梁やトンネル、電力設備などのインフラストラクチャの温度や応力など、システムの安全を特徴づける物理・化学量を遠隔計測するための無電源ワイヤレスセンサーを開発した。本センサーは UHF 帯域の電磁波を受け、10 マイクロワット程度の極低電力で動作する。試作したセンサーは、4W EIRP の高出力の電磁波を用いる場合、10m 程度の通信可能距離を持ち、温度データを精度よく送信できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

In this work, we have developed a wireless passive smart sensor which monitors safety conditions of infrastructures such as bridges, tunnels and electrical power apparatuses. This sensor measures physical and chemical data such as temperature and strain and sends them to readers by electromagnetic waves. This sensor can work with about ten micro watts receiving electromagnetic energies. It is shown that the prototype has about ten meters communication distance and can send the measured temperature with good accuracy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム，安全システム

キーワード：パッシブ IC タグ，RFID，センサーネットワーク，スマートセンサー，モニタリングシステム，極低消費電力回路

1. 研究開始当初の背景

社会の安全性を脅かす構造物の崩落や土砂崩れ、火災、有毒ガス発生などの予知、防止が長年の課題である。近年では特にコンクリート構造物の塩害や凍害による崩落、架橋の老朽化による崩落、集中豪雨による土砂崩れ、地震による建築物の倒壊、過熱による発電設備や電気電子機器の発火などが大きな問題となっている。このような災害を防ぐ

ためには温度やひずみ、応力などを頻繁かつ広範囲にきめ細かく計測監視することが有効である。このような安全監視のためには、無線センサーネットワークが有効である。しかし、従来のセンサーネットワークで使用される無線センサーはバッテリーで動作するため、バッテリーの交換が必要である。このため危険箇所への配置や広域へ多数配置することは難しかった。一方、商品認識用の電

波型 IC タグを開発が開発されつつあった。この電波型 IC タグはバッテリーを有さず、リーダからのエネルギーを受けて動作する。通信距離は 5m~20m である。この動向に応じて UHF 帯域の無線式タグが使用できるように 2006 年に法令が改正された。

2. 研究の目的

本研究では、電波型 IC タグの技術をベースとし、無電源の無線センサーを開発する。開発する無線センサーは、リーダから放射された電磁波(UHF 帯域)のエネルギーにより電子回路が起動し、受信した電磁波に含まれた ID 番号が PW センサーの ID 番号と一致すれば、応答を反射波(後方散乱波)によりリーダに返信する。さらに、ひずみや温度により整合回路のインピーダンスを変化させ、整合状態を崩すことにより反射波の振幅を変化させる。ここでインピーダンス変化部と整合回路の接続部を ON/OFF スwitchングすれば、通常の反射波と非整合状態の反射波が交互にリーダに到達する。これらの振幅の比を算定することで、測定データを読み取ることができる。このような新しいセンサーの構造は単純であるため、故障率が少なく安定した計測が期待でき、また安価に作成可能である。さらにセンサーからデジタル情報を読み取るためのアナログデジタル変換器が不要であるため消費電力が小さく、通信距離が伸びることが期待できる。本研究では、本無線センサーによる温度・ひずみ計測に焦点を当て、その基本性能を検証する。具体的には以下の研究を実施する。

- (1) 無線センサーとリーダの通信距離を長くするために、無線センサーのアンテナを設計・最適化し、さらにアンテナを試作して実測による評価を行う。
- (2) 温度、ひずみを計測するためのセンサー(可変インピーダンス)について複数の機構を候補として、シミュレーションおよび実験によりそれらを比較検討する。
- (3) 無線センサーを試作して通信実験を行い、本センサーが実現可能であることを示し、また通信可能距離、測定精度など基本性能を評価する。
- (4) 電磁界シミュレーションにより、コンクリートや土壌中などにセンサーを設置して情報を読み取る際、どの程度の深度まで読み取ることができるか、また鋼材や水分などの導体による散乱吸収によるエネルギー散逸はどれくらいあるのかを明らかにする。

3. 研究の方法

開発する無線センサーを図 1 に示す。通常の無線 IC タグとは異なり、本装置にはセン

シングのための可変インピーダンス部が付いている点が新しい。まず図 1 の左にあるリーダから UHF 帯域の変調された電磁波を放射する。この電磁波には、通信したい無線センサーの ID 番号の情報を含める。無線センサーはこの電磁波を受信し、ID 番号が一致すれば応答のために無線センサーの整合回路スイッチを ON/OFF する。スイッチが ON のときには、誘導電流がアンテナに流れ、リーダに向かう反射波(逆散乱波)が放射される。一方、スイッチが OFF のときには反射波が放射されない。リーダはこのような反射波の ON/OFF の時系列応答を受け取る。このように無線センサーには固有の ID 番号があるため、多数設置してもデータが混ざることがない。さらに、温度やひずみなどにより可変インピーダンス値が変化するので、インピーダンス整合(電磁波を効率よく受信できる状態)が崩れ、反射波の振幅が変化する。ここで論理回路により可変インピーダンス部の接続部を ON/OFF することにより、整合状態と非整合状態を繰り返す。これらの反射波の振幅比より計測値を読み取ることができる。

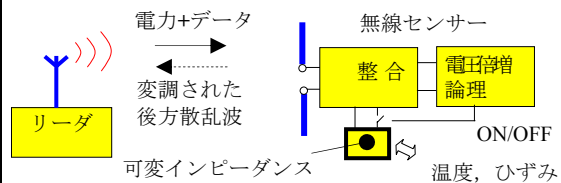


図 1 無線センサーの概要

無線センサーは 1cm 画程度の回路部と 10cm ~2.5cm 程度のアンテナから成る。温度計測として、サーミスタを用いる。

(1)アンテナの設計、試作、評価

無線センサーのアンテナを設計するときに考慮すべき点は、①受信エネルギーが最大となるのはアンテナと電子回路のインピーダンスが複素共役になるときである。②アンテナが受信できる電力を増加させるには、アンテナゲインを大きくすればよい。③受信電力が最大となる周波数が UHF 帯域の約 1GHz になるようにしなければならない。④使い勝手を考えると、アンテナは小型の方がよい。アンテナの形状設計ではこれらの要求を満足しなければ成らないが、形状パラメータを調整しつつ要求を試行錯誤的に満足させるのは困難である。

そこで、申請者が研究してきた電磁界解析と免疫型アルゴリズムに基づく最適化法を用いる。本法では電磁界解析(モーメント法)により求めたアンテナゲイン等を最適化の目的関数とする。最適化では、多数の異なるアンテナ形状をランダムに生成し、それらを

擬似的な抗体群とみなし、目的関数を増加(または減少)させるように抗体を進化させることで大域的な最適解を見出す。また、最適解の信頼性を上げるために、免疫型アルゴリズムの他、遺伝的アルゴリズムも用いる。得られた最適形状を基にアンテナを現有のエッチングキットにて実際に作成する。作成したアンテナのインピーダンスは現有のネットワークアナライザによりゲイン(放射特性)およびインピーダンスを測定し、数値解析により求めた値と比較検討し、所望のアンテナが作成できたかをチェックする。

(2) センサー部の設計、試作、評価

サーミスタによる温度計測を行うため、まずサーミスタの温度-抵抗特性を計測する。つぎにサーミスタの抵抗変化による整合回路全体のインピーダンス変化を自作の回路シミュレータにより求め、このときの反射波の振幅変化を自作の電磁界解析ソフトウェア(FDTD 法およびモーメント法)により求める。また整合回路を試作して、そのインピーダンス変化をネットワークアナライザにより計測して、解析値と比較検討する。

(3) 電磁波シミュレーションによる性能予測

無線センサーを用いる環境と通信可能距離などの基本性能の関係を明らかにするために、電磁波シミュレーションを行うための解析コードを開発する。本無線センサーの回路には、電圧増倍回路などの非線形回路があるため、テブナンの等価回路を用いた解析では、得られる結果の精度は高くないと考えられる。そこで、マクスウェル方程式と回路方程式を連成した電磁界解析コードの開発が必要である。このため、FDTD 法と修正節点法をベースとして、解析コードの開発を行う。さらに開発した解析コードを用いて、無線センサーの動作解析を行い、電圧増倍回路で得られる電圧等を評価する。

(4) 無線センサー回路部の設計、試作

検討した無線センサーを試作して、その性能を評価する。無線センサー回路のアナログ部には、受信した微小電圧を増加させる電圧増倍回路(コッククロフト・ウォルトン回路)、変調された電磁波から信号成分を取り出す復調回路、後方散乱波に信号を乗せるためにスイッチングを行う変調回路、電圧レギュレータなどを搭載する。これらを回路シミュレータにより設計し、プリント基板上に作成する。プリント基板は現有のキットにより作成する。作成した回路の高周波特性(UHF 帯域)を高周波オシロスコープにて測定する。一方、デジタル部で行う ID 番号の認識、全体の動作制御、情報のエンコードなどのために十分な能力を有する PIC マイコンを用いる。

(5) 温度の遠隔測定実験

作成した無線センサーのアンテナ取り付け部に電源を接続し、回路が動作する最低の

電力を計測する。この電力から通信可能距離を推定する。さらに ID 番号を表す変調信号をアンテナ端子から入力し、回路が応答することを確認する。同様に計測指令を入力し、無線センサーが読み取り値に応じてインピーダンスを変化させることを確認する。つぎに無線センサー回路部のインピーダンスを現有のネットワークアナライザで測定し、これと整合するように無線センサーのアンテナを作成する。つぎに無線センサーとリーダアンテナ(ホーンアンテナ)を電波暗箱に入れ、リーダアンテナから変調した電磁波を放射し、無線センサーで信号を受信しているかを確認する。ここで電波暗箱は不要な電磁波が外部に漏れないためのものである。さらに無線センサーから測定データが放射されているかを確認する。最後に、リーダアンテナから放射する電力を減少させていき、無線センサーが応答する最小の電力を測定し、その値から通信可能距離を評価する。最後に温度測定のために、ビーカーに温度の異なる水を入れ、サーミスタをビーカー表面に貼って測定する。図2に作成した無線センサー、図3に電波暗箱に設置した無線センサーとホーンアンテナを示す。

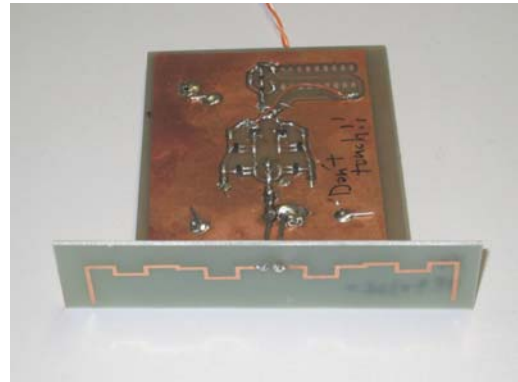


図2 作成した無線センサー

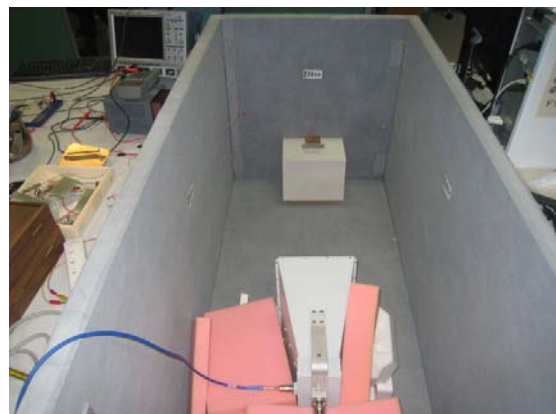


図3 通信実験系

4. 研究成果

以下に本研究で得られた研究成果をまとめる。

(1) 無線センサー用アンテナ最適化法の開発

研究の方法(1)で記したように、無線センサー用の小型アンテナには、回路とのインピーダンス整合、小型化、高ゲインなどが求められる。このような要求を満足するために、遺伝的アルゴリズムなどの進化論的最適化手法と、モーメント法を用いたアンテナ最適化法を開発した。アンテナとしては、ミアンダラインアンテナ、格子アンテナ、スパイラルミアンダラインアンテナを選んだ。最適設計された例を図4に示す。図4(d)は、電磁的特性はやや(c)に劣るものの、サイズが極めて小さなスパイラルアンテナを示している。

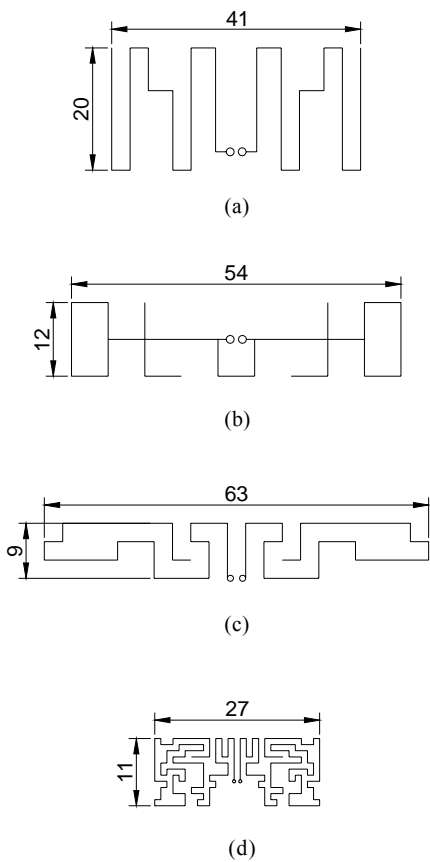


図4 最適設計されたアンテナ

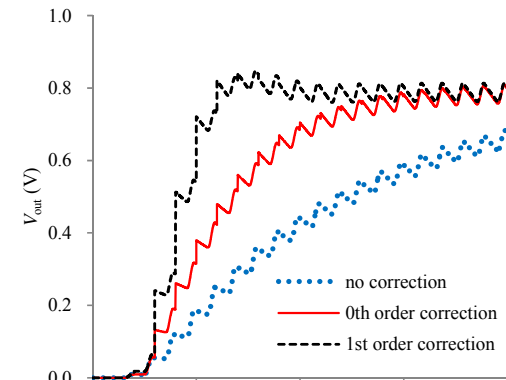
(a), (b), (c)はそれぞれ、ミアンダラインアンテナ、格子アンテナ、スパイラルアンテナである。(d)は超小型のスパイラルアンテナの設計例を示す。

(2) 電磁波と回路の高速連成解析法の開発

研究の方法(3)で記したように、無線センサー回路は非線形回路であるため、テブナンの定理を適用した解析は精度が保障できない。そこで、非線形回路と電磁波の相互作用を考慮した結合解析法を開発した。電磁波の解析にはFDTD法、回路の解析には修正節点法を

用いた。

解析の結果、本解析法により精度の高い結果が得られるものの、電磁波の周期(約1ナノ秒)に比べて、回路の時定数が非常に大きいため、定常に至るまでの解析時間が膨大であることが判明した。そこで、回路の時定数を実効的に短くして、定常界を得る方法を新たに開発した。その結果、従来よりも数十分の1程度で定常界がえら得ることが分かった。なお、得られた定常界は、通常の方法の方法により得られたものと同じである。図5に本高



速化法の効果を示す。

図5 高速化の効果

縦軸は電圧増回路の出力電圧、横軸は時間を示す。no correction, 0th, 1st order correctionは、それぞれ従来法、0次、1次の高速化結果を示す。

(3) 極低消費電力ADコンバータの開発

図6に示す温度計測用の極低消費電力ADコンバータを開発した。図6において、 R_{th} がサーミスタを表している。この回路にはコンパレータが用いられており、コンパレータが基準電位とコンデンサの電位を比較してその結果を出力する。コンデンサはマイクロコントローラからのパルス信号によって充電される。試作ではコンパレータとしてNational Semiconductor社製LPV7215を用いた。このコンパレータは2Vでの動作時の消費電力が1.2 μ Wと極めて小さく、センサ回路の低消費電力化を実現した。

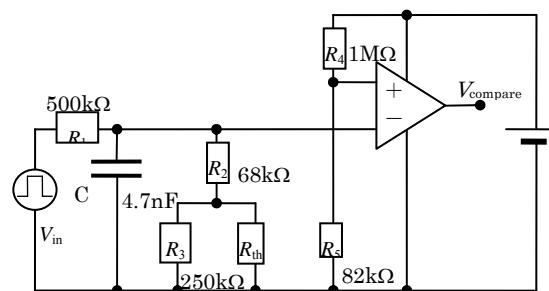


図6 極低消費電力ADコンバータ

(4) 無線センサーの試作と測定実験

図2に示す無線センサーを試作して、図3の測定環境にて、通信実験を行った。まずリーダー(ホーンアンテナ)から、4W EIRP(高出力)の電磁波を無線センサーに照射すると回路が動作し、測定した温度データが計測できていることがわかった。測定値は予測値とほぼ一致した(図7)。つぎに逆散乱波によりこの測定値がリーダー(ホーンアンテナ)に送信されていることが確認された。通信距離を正確に測定することは出来なかったが、10m程度あるものと推定された。

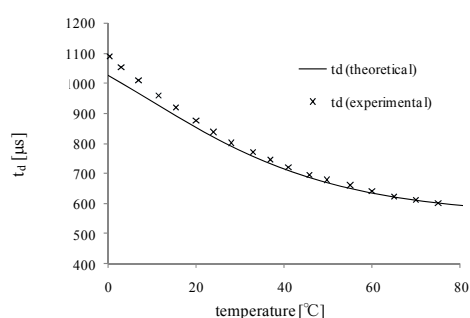


図7 図6の回路による温度測定結果

以上のように高出力(4W EIRP)では10m程度の通信可能距離が得られたが、環境で使用できる低出力(1W EIRP)では、通信距離は約2m程度となってしまふ。このため通信距離を伸ばすための更なる研究が必要である。

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)

[雑誌論文] (計11件)

① H. Igarashi, Y. Watanabe, Y. Ito, Why error correction methods realize fast computations, IEEE Transactions on Magnetics, vol.48, no.2, 415-418, 2012

http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/48389/1/ToM48-2_415-418.pdf

② 牧村, 渡邊, 五十嵐, 和木, 電波型パッシブRFIDによる電車線路設備のモニタリングシステム, 電気学会論文誌(C), vol.132, 691-696, 2012

③ Y. Watanabe, H. Igarashi, Accelerated FDTD Analysis of Antennas Loaded by Electric Circuits, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.60, no.2, 958-963, 2012

④ Y. Watanabe, K. Watanabe, H. Igarashi, Optimization of Meander Line Antenna Considering Coupling Between Nonlinear Circuit and Electromagnetic Waves for UHF-Band RFID, IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, no.5, 1506-1509, 2011

http://eprints2008.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/46103/1/IEEE_TM47_1506-1509.pdf

⑤ H. Makimura, Y. Watanabe, K. Watanabe, H. Igarashi, Evolutional Design of Small Antennas for Passive UHF-Band RFID, IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, no.5, 1510-1513, 2011

http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/46101/1/IEEE_TM47_1510-1513.pdf

⑥ H. Igarashi, K. Watanabe, Deflation Techniques for Computational Electromagnetism: Theoretical Considerations, IEEE Transactions on Magnetics, vol.47, no.5, 1438-1441, 2011

http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/46102/1/IEEE_TM47_1438-1441.pdf

⑦ 渡部, 牧村, 渡邊, 五十嵐, 電波型パッシブRFIDのための媒質効果の低減, 日本 AEM 学会誌, vol.19, no.2, 286-291, 2011

[学会発表] (計40件)

① K. Watanabe, H. Igarashi, Double Antennas for Passive Long Range UHF-Band RFID, 15th international symposium on applied electromagnetics and mechanics, 2011年9月9日, Royal Continental Hotel(ナポリ, イタリア)

② Y. Watanabe, K. Watanabe, H. Igarashi, Pareto optimization of antenna for passive UHF-band RFID, 15th international symposium on applied electromagnetics and mechanics, 2011年9月7日, Royal Continental Hotel(ナポリ, イタリア)

③ Y. Watanabe, K. Watanabe, H. Igarashi, Accelerated FDTD computation applied to antenna shape, COMPUMAG2011, 2011年7月13日, シドニー会議場(オーストラリア)

[図書] (計1件)

五十嵐(分担執筆), シミュレーション辞典, コロナ社, 2012, 15および220

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 環境情報計測装置, 環境情報計測システム, 及び環境情報計測方法

発明者: 和木浩, 五十嵐二, 渡辺浩太, 牧村英俊
権利者: 北海道大学, 東日本旅客鉄道株式会社
種類: 特許

番号: 特願2010-208452

出願年月日: 2010年9月16日

国内外の別:

国内 (国際特許も申請中)

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://hbd.ist.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

五十嵐 一 (IGARASHI HAJIME)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：90212737

(2)研究分担者

渡辺 浩太 (WATANABE KOTA)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：20456789

(3)連携研究者

()

研究者番号：