

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00234

研究課題名（和文）Internet of Everythingのための極小無線システム

研究課題名（英文）Ultra Small Wireless Systems for Internet for Everything

研究代表者

黒田 忠広（Kuroda, Tadahiro）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：50327681

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,100,000円

研究成果の概要（和文）：無線タグ用半導体集積回路の小型化高効率化を追究するとともに、無線タグと通信を行うリーダの高性能化を追究した。本研究チームが従来提案した回路形式に比べて、消費電力を大きく削減可能な回路形式を考案するとともに、タグの読み取り性能を上げるための構成を検討し、それらを実装した無線タグのテストチップを試作し、実証した。また、自家中毒を低減する機能を搭載したリーダの試作による実証を行った。送信波形の位相および振幅を制御して受信系にループバックし、タグ以外の物体からの不要反射波をキャンセルすることで受信系の利得飽和を回避するシステムを考案し、動作を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより実現されるSociety 5.0では、全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出すことが期待されている。一方で、小さくまた電源をとることが難しい“モノ”が門在する。すべての“モノ”をつなぐことができる小型で低電力な通信システムの実現が望まれるが、本研究成果は、無線通信システムの寸法を極小にして、IoE(Internet of Everything)を実現するための手段として大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：We pursued miniaturization and high efficiency of semiconductor integrated circuits for wireless tags, and also pursued high performance of readers that communicate with wireless tags. The research team has devised a circuit that can greatly reduce power consumption compared to the circuit proposed in the past, studied a configuration for improving tag reading performance, and implemented a wireless tag test chip. The idea was prototyped and proven. In addition, a prototype of a reader equipped with a function to reduce self-poisoning was carried out. We devised a system that avoids gain saturation in the receiver by controlling the phase and amplitude of the transmitted waveform, looping it back to the receiver, and canceling unwanted reflected waves from objects other than tags, and demonstrated its operation.

研究分野：半導体集積回路

キーワード：RFID 無線タグ オンチップアンテナ IoT Society 5.0 リーダ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

背景 1: 極小無線システムの研究の必要性

全ての人とモノをつなぐ IoT におけるボトルネックの一つは、アンテナやバッテリーを搭載することが困難な小型のモノをいかにネットワークに接続するかということである。また大きさと同様にコストも課題である。多数の小型のモノに無線システムを装着しようとするれば自ずと手間とコストがかかる。いくらチップが小さくなくても外付けのアンテナやバッテリーが大きくてはコストが高くなる。したがって、真の IoT、すなわち IoE(Internet of Everything)を実現するためには、アンテナを含めた極小無線システムの研究が必要になる。

背景 2: 低電力無線技術の進展

アンテナを含めた極小無線システムの実現のためには、低電力無線技術が必要である。研究代表者は、近接場無線接続技術の分野で世界を牽引する研究開発を行ってきた。2004年に世界で初めて誘導結合通信技術を発表して以来、半導体のオリンピックと称される国際会議 ISSCC で 38 件の論文を発表し、VLSI 回路シンポジウムで 28 件の論文を発表している。また、JST の CREST 研究「高性能・超低電力短距離ワイヤレス可動情報システムの創出」の研究代表や、JST の ACCEL 研究「近接場結合集積技術による革新的情報処理システムの実現と応用展開」の研究代表を務め、主に低電力無線技術の分野で、原著論文や国際学会などを合わせて 457 件の発表を行い、近接場無線接続技術においては電力を 1/1000 に低減することに成功している。

近年においては、RFID に用いるタグの小型化に関する研究にも着手し、2018年には 2.1 mm × 1.2 mm のチップ上に集積したアンテナを用いて、10cm の距離での通信に成功したことを VLSI 回路シンポジウムにおいて発表している。図 1 にそのチップ写真を示すとともに、小型集積型アンテナの放射パターンの実測値とシミュレーション値を示す。これらの成果は、研究代表者のグループに小型チップ集積型アンテナの設計技術と、極小無線システムの設計技術に関して世界トップレベルにあることを明確に示している。

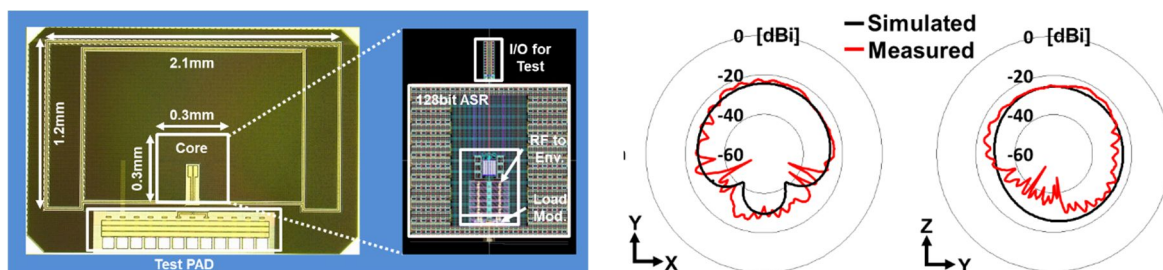


図 1 (a)ベースとなる研究で試作したチップの写真と小型集積型アンテナの放射パターン

2. 研究の目的

本研究は、Society 5.0 の実現の要である IoT 技術において、ボトルネックとなる小型のモノのネットワーク接続を目指し、極小無線システム技術を創出することを目的とする。より具体的には、1mm 角以下の極小チップにアンテナと無線回路を集積した無線タグを実現し、インテリジェントなリーダと組み合わせることで通信距離を確保し、極めて安価な IoE(Internet of Everything)システムを追究する

3. 研究の方法

(1) タグ用チップの小型化と高性能化

図 2(a)に、従来型の無線タグの構成図を示す。従来の無線タグは、アンテナ、整流器、定電圧電源回路、クロック生成回路、CMOS 論理回路からなる。アンテナが受けた電波は、整流器によりリップル電圧を含む直流電圧に変換され、それを定電圧電源回路に入力することで、一定の電圧を発生する。その電圧によりクロック生成回路と論理回路を動作させている。

図 2(b)に、本研究で取り組む極小無線タグの構成図を示す。アンテナ、整流器、論理回路のみからなり、定電圧電源回路やクロック生成回路が不要である点が大きくことなる。またその論理回路は、従来型の CMOS 論理回路ではなく、整流器の出力であるリップル電圧を含む直流電圧で駆動可能な断熱論理回路を採用する。

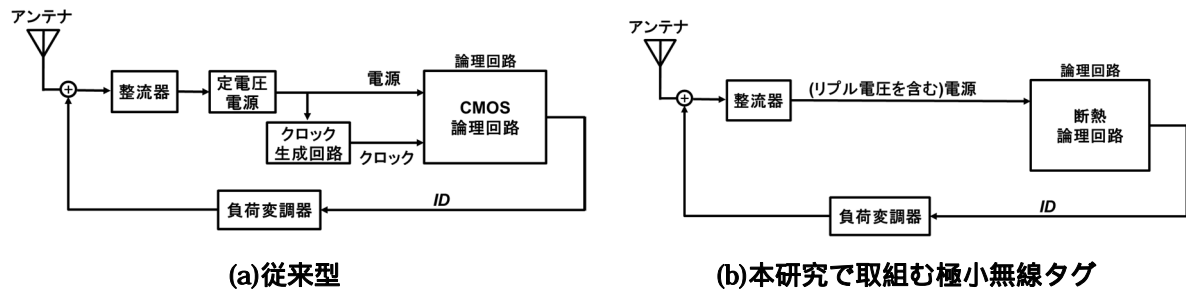


図2 無線タグの構成の比較

このような構成をとることで、低電力化と小型化を追究することが可能になる。低電力化という観点では、構成要素の数が少ないことが挙げられる。定電圧回路は電圧変換を行うためその部分の損失が避けられない。またクロック生成にも電力が必要になる。またもう1つのポイントとして断熱論理回路の採用がある。断熱論理回路は、1990年代に考案され、低電力回路方式の1つとして脚光を浴びたものである。ただし、クロック電源を生成する必要があることが欠点として顕在化し、広く用いられることはなかった。しかしながら無線タグにおいては、電力源が電波であり、整流器の出力の時点では、リップル電圧を含む直流電圧となっている。本研究では、この変動する電源電圧を断熱論理回路の電源として採用し、電源発生効率化と論理回路の低電力化という、まさに一石二鳥の効果を得る狙いである。

小型化という観点でも、従来の無線タグに比べて、構成要素の数が少ないことが利点となる。加えてリップル電圧を除去する定電圧電源回路には、比較的大きな容量素子を用いることが一般的であるが、この部分を不要とすることで更なる小型化が可能となる。また上述のように無線タグを低電力化することで、動作に必要な電力が小さくなる。これはすなわちアンテナサイズを小さくできることを意味しており、通信距離を確保しつつ、小型化の追求が可能となる。

(2) 信号衝突回避メカニズムの導入とリーダでの自家中毒の削減

通信距離を拡大した際に課題となるのが、複数の無線タグを同時に読み出す際の信号の衝突の問題である。全ての無線タグは同じ周波数を用いて通信を行うため、通信を行うタイミングが一致すると、リーダは正しい信号を受信できなくなる。従来型の無線タグは、クロック生成回路をそれぞれの有するが、本研究で用いる無線タグは前述のようにクロック電源を用いるためリーダのクロックに同期して動作させることができることが独自の強みである。したがって、衝突回避機構を無線タグに内蔵することにより、確率論ではなく決定論的に衝突を回避することを目指す。

またリーダ側の自家中毒を避けるシステムを追究する。自家中毒とは、リーダ自身が送信した信号が、リーダの受信系に回り込むことで、信号が埋もれる現象である。RFIDシステムではリーダの送信周波数と受信周波数がほぼ同じであるため、この現象が起きやすい。試作したRFIDシステムを活用し、自家中毒の解析を行う。解析結果をもとに自家中毒のモデルを構築し、対策を施す。

4. 研究成果

(1) タグ用チップの小型化と高性能化

タグ用チップの小型化のため、小型オンチップアンテナを開発した。本研究チームが従来提案したアンテナサイズよりも小さなアンテナを考案し設計および実装を行った。本アンテナは $1050\ \mu\text{m} \times 825\ \mu\text{m}$ であり、その面積は 0.87 平方ミリメートルであり、本研究の目標の1つである 1 平方ミリメートルを下回るサイズとなっている。図3に開発したアンテナを示す。アンテナの利得は、従来の本研究グループ提案のアンテナが 2.5 平方ミリメートルであるのに対して、アンテナ面積が約 $1/3$ になっているにもかかわらず、アンテナの利得は $1.5\ \text{dB}$ 程度低いのみである。同アンテナに関しては、IEICE 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) という国際会議に採択され、"An on-chip antenna with an area of 0.9 square millimeters for RFID applications in the $5.8\ \text{GHz} - 24\ \text{GHz}$ range" と題して発表を行った。

タグ用チップの高性能化のため、タグを断熱的に動作させるためのパワークロックの新たな波形成型回路を考案し、従来に比べて 10 倍の動作周波数で動作可能となることを示した。提案した波形成型回路を図4に示す。この波形成型回路は、従来のパワークロック生成回路が、高速動作時の立下りが遅いことに起因して理想的なクロック波形から離れ、無線タグ回路が動作しなくなることを防ぐものである。本回路を用いることで、無線タグ回路は従来よりも高速動作が可能となり、衝突回避のため時分割多重化したとしても、 5 秒程度で動作を完了することが可能となった。同成果は、29th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS 2022) に採択された。

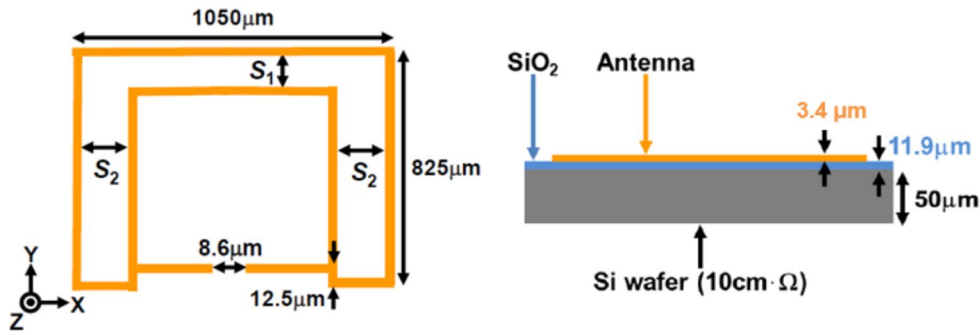


図 3 本研究で開発した小型アンテナ

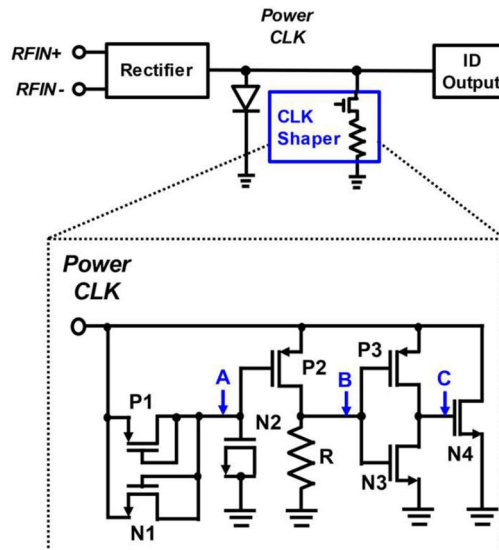


図 4 本研究で提案するパワークロック成型回路

(2) 信号衝突回避メカニズムの導入とリーダでの自家中毒の削減

通信距離の拡大により、通信可能な範囲内にある無線タグの数が増えると、複数の無線タグが同時にリーダに反応することになり、リーダはその情報を正しく受け取ることができない。つまり通信の多重化が必要となる。多重化の方法には、周波数分割、時分割、コード分割の3通りが考えられるが、複雑な多重化方式の採用が可能な携帯電話やスマートフォンとは異なり、無線タグに搭載する機能を可能な限り絞り込むことで小型化低コスト化を実現するため、我々は最も実装が簡素になる、時分割方式を用いることとした。時分割方式では、通信する時間帯を端末毎に割り当てることで、同時帯の通信を避けて信号の衝突を防止する。本研究では、無線タグがそれぞれに有する ID をベースにスロットを割り当てることとした。無線タグが有する ID に同じものは2つとない。よって必ず異なるタイムスロットに割り当てるのが原理的に可能であるのだが、それでは必要なインターバルが長くなりすぎるため、非常に低い確率での衝突を許容しつつ、インターバルを2秒程度と短くする方式を考案した。タグ自らがユニークな ID をベースに計算したタイムスロットで通信を行うことで、信号の衝突を避けることが可能となる。信号衝突回避機能を搭載した無線タグのテストチップを試作し、衝突回避が可能であることを実験的に示した。その成果は、半導体集積回路のトップ国際会議の1つである。Asian Solid-State Circuits Conference 2021 に採択された。図5に提案した衝突回避回路の動作の実測結果を示す。

また極小無線タグとスマート化したリーダを組合せたシステムの構築と実証を行い、リーダにおける自家中毒を回避するシステムを実装し検証した。リーダシステムに関しては、送信波形の位相および振幅を制御して受信系にループバックし、タグ以外の物体からの不要反射波をキャンセルすることで受信系の利得飽和を回避するシステムを考案した。不要反射波をキャンセルするために開発した位相、振幅制御モジュールとソフトウェア無線機と組み合わせることで、不要反射波を別途検出する回路を搭載することなく、自家中毒を抑制するリーダシステムを開発した。また、受信フレームの複数回平均化により S/N 比の改善を図った。これらの技術を組み

合わせることで、極小無線タグの ID 情報を 8cm の距離で読み取ることが可能となった。同成果を 53rd European Microwave Conference (EuMC2023) に投稿した。

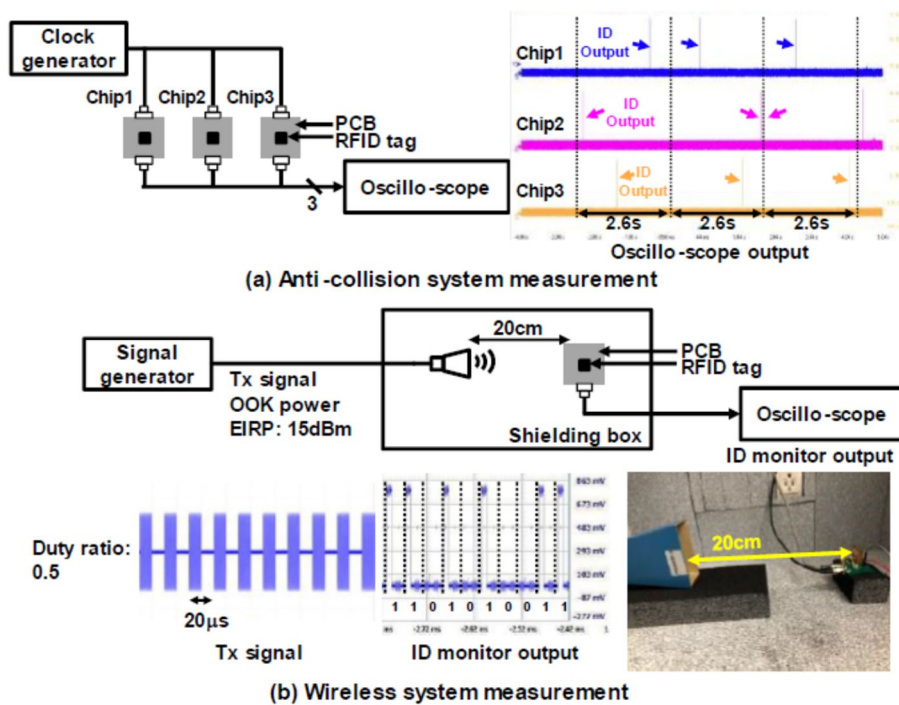


図 5 本研究で提案した衝突回避回路の動作の実測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miura Reiji, Shibata Saito, Usui Masahiro, Shiba Kota, Kosuge Atsutake, Hamada Mototsugu, Kuroda Tadahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 A bonding-less 5-GHz RFID module using inductive coupling between IC and antenna	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1058-1 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac4ce2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shibata Saito, Miura Reiji, Sawabe Yoshiki, Shiba Kota, Kosuge Atsutake, Hamada Mototsugu, Kuroda Tadahiro	4. 巻 5
2. 論文標題 A 5-GHz 0.15-mm ² Collision-Avoiding RFID Employing Complementary Pass-Transistor Adiabatic Logic With an Inductively Connected External Antenna in 0.18- μ m CMOS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Solid-State Circuits Letters	6. 最初と最後の頁 268 ~ 271
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LSSC.2022.3223079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 R. Miura, S. Shibata, M. Usui, K. Shiba, A. Kosuge, M. Hamada, and T. Kuroda
2. 発表標題 A Bonding-less 5-GHz RFID Module Using a 300um x 500um IC Chip
3. 学会等名 JSAP International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Shibata, R. Miura, Y. Sawabe, K. Shiba, A. Kosuge, M. Hamada, and T. Kuroda
2. 発表標題 A 5-GHz 0.15-mm ² Collision Avoidable RFID Employing Complementary Pass-transistor Adiabatic Logic with an Inductively Connected External Antenna
3. 学会等名 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 R. Miura, S. Shibata, M. Usui, A. Kosuge, M. Hamada, and T. Kuroda
2 . 発表標題 A 5.2GHz RFID Chip Contactlessly Mountable on FPC at Any 90-Degree Rotation and Face Orientation
3 . 学会等名 27th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC'22) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 E. Charlot, M. Hamada, and T. Kuroda
2 . 発表標題 An on-chip antenna with an area of 0.9 square millimeters for RFID applications in the 5.8 GHz - 24 GHz range
3 . 学会等名 IEICE 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Shibata, R. Miura, Y. Sawabe, K. Shiba, A. Kosuge, M. Hamada, and T. Kuroda
2 . 発表標題 A 5-GHz 0.15-mm ² Collision Avoidable RFID Employing Complementary Pass-transistor Adiabatic Logic with an Inductively Connected External Antenna
3 . 学会等名 IEEE 48th European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Shibata, Y. Sawabe, K. Shiba, A. Kosuge, M. Hamada, and T. Kuroda
2 . 発表標題 A Low-power RFID with 100kbps Data Rate Employing High-speed Power Clock Generator for Complementary Pass-transistor Adiabatic Logic
3 . 学会等名 29th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (ICECS 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	石黒 仁揮 (Hiroki Ishikuro) (80433738)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------