

氏名	三上 真司
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第863号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	近距離無線通信システムにおける低消費電力化技術に関する研究
論文審査委員(主査)	松田 吉雄(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副主査)	北川 章夫(自然科学研究科・助教授), 八木谷 聡(自然科学研究科・助教授), 笠原 禎也(総合メディア基盤センター・助教授), 吉本 雅彦(神戸大学・教授)

Abstract- In this dissertation, I focus on short-range wireless communication where data rate is low. The first work is set to an energy-harvesting SoC (system-on-a-chip), which is dedicated to a wireless mouse. It can make data communication within a 1-m range and its total power consumption is 2.2 mW. This is sufficiently low to operate with energy harvesting. Next, I propose an aggregation efficiency-aware GIT (Greedy Incremental Tree) routing for wireless sensor network whose aggregation point changes according to aggregation efficiency and energy consumption can decrease compared to the conventional GIT routing and opportunistic routing. Then, I describe a model for transmission power control. So far, it has been assumed that a transmitter has a power consumption of $O(d^n)$, where d and n denote a transmission distance and a pass loss factor. However, I verify that an actual power amplifier has a power consumption of $O(d^r)$, where $n/2.8 \leq r \leq n/2$ (this is called efficiency-degradation model). The efficiency-degradation model gives impacts against the transmission power control. Lastly, I propose a voltage amplifier with low-standby-power and low-active-power capabilities. A sensor node often enters itself into a standby mode when no communication is required, and hence a standby power has to be suppressed as well as an active power. The BSAMP draws less short currents since its bias points are slightly shifted from the middle of a supply voltage where a maximum current flows. The zigzag-style cut-off transistors are applied to minimize the standby current. The standby and active powers of the BSAMP are lower than the conventional inverter-type voltage amplifier by 86% and 46%, respectively.

1. 序論

IT (information technology)の普及によりコンピュータによる情報処理やインターネットなどの通信に関する技術が急速に発展している。特に携帯電話や無線LANなどの無線通信を利用したシステムの発展は目覚ましく、広く普及し利用されている。近年ではその次世代技術としてユビキタスという言葉がキーワードとしてあげられている。ユビキタスとは「いたるところに存在する」という意味であり、情報通信の対象をすべてのモノに拡張することを意味している。この構想を実現するユビキタスネットワークを用いた応用分野は医療、農業、商用、流通など非常に広範囲に渡っているが、その実現のために最も重要な技術が近距離無線通信に関するものである。一般的なRF (radio frequency) を利用する無線通信では媒体に電力を使用するため、システムの低消費電力化が最重要課題となっている。また、その応用によっては大規模なシステムとなるためにシミュレーションによる事前評価が重要である。そのためにより現実に

近い評価技術を構築する必要がある。本研究では特にデータ通信距離が数mと短く、データレートも低い、低消費電力化が最重要課題となる応用分野に着目し、自立電源動作型小型近距離無線通信機器とWSN(wireless sensor network)システムを研究対象と設定した。

2. 自立電源動作型小型近距離無線通信機器応用RFインターフェース内蔵SoCの設計

自立電源動作型小型近距離無線通信として、本論文ではワイヤレスバッテリーレスマウスに着目した。提案する回転運動を利用した発電機構は3mW以上の電力を発生可能であり、この電力で動作するワイヤレスインターフェース内蔵SoC (system-on-a-chip)の設計と試作を行った。本SoCはRF transmitterとmicrocontrollerで構成されている。SoCのブロック図をFig. 1に示す。本SoCの特徴は、RF transmitter部に単純な変調方式であるFSKを採用し、単相構成としたこととmicrocontroller部をマウス動作に特化させたことである。RF transmitterとmicrocontrollerを内蔵したテストチップをTSMC 0.18- μm CMOS mixed-signalプロセスで試作した。Figure 2に試作したSoCのチップ写真を示す。Microcontrollerのゲート数は6000個であり、サイズは $0.45 \times 0.6 \text{ mm}^2$ である。RF transmitterのサイズは $45 \times 45 \mu\text{m}^2$ である。本SoCは電源電圧1V、伝送距離約1m時にRF部で約2.17mW、microcontroller部で消費電力0.03mWという結果が得られ、システム全体で消費電力約2.2mWを達成し、自立電源動作に十分な低消費電力特性が得られた。

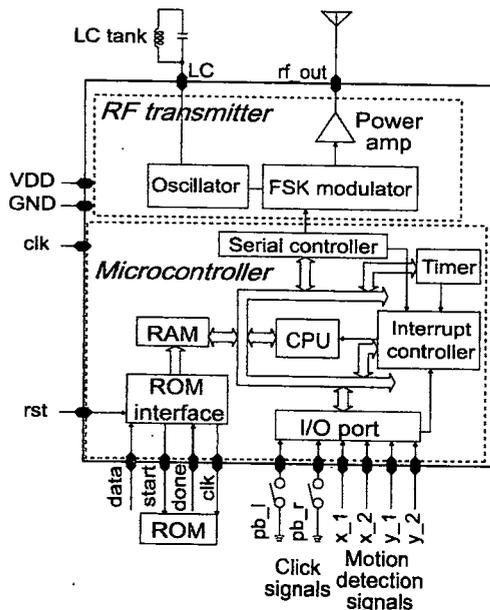


Figure 1. Block diagram of SoC.

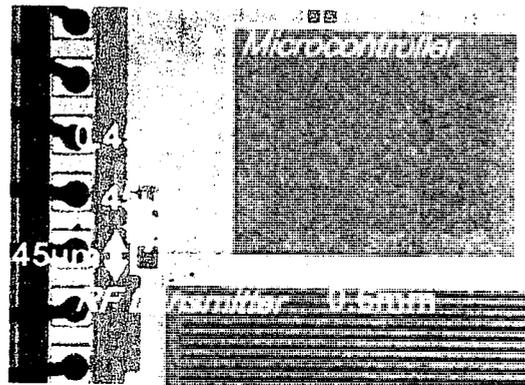


Figure 2. Chip photograph.

3. Wireless sensor network の概要

近年多くの応用分野での使用を期待されているWSNは膨大な数のセンサノードから構成され、センシングした情報をsink(データステーション)に収集する(Fig. 3)。このWSNは人の立ち入ることのできない場所や広大な土地での使用を想定されているためにメンテナンスフリーであることが望まれる。そのためにシステムの可用時間の向上が最重要課題となっている。本研究ではこのWSNシステムに対し、低消費エネルギーな経路制御プロトコル、現実に近い消費電力モデル及び電圧増幅器の低消費電力化技術の3件の提案を行った。

4. Wireless sensor network における集約率を考慮した GIT 経路制御の評価

WSNのための経路制御の研究では、データ集約に完全集約を用いることを仮定されている場合が多い。集約とは受信した複数パケットを結合し、新しいパケットとして生成し送信することであり、衝突の面や送信回数削減の面から非常に有効である。完全集約は lossy な集約方式

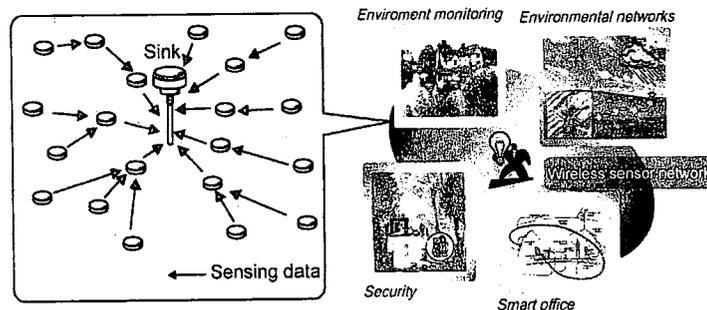


Figure 3. Wireless sensor network.

であり、各ノードが受信した複数データを1つのデータとして次のホップに送信する。よって総データ数を大きく削減できるが、利用可能な応用分野が限定される。より一般的に用いることのできる集約手法として、データを集約する毎に線形にデータが増加する線形集約がある。完全集約を用いた場合に、スタイナ木を構築する近似アルゴリズムでは、GIT (greedy incremental tree) routing が最も効率的であるとされている。GIT では1つ目のデータ供給ノード(source) と sink は最短パスを形成し、他の source はそのパスに最短パスで接続する (Fig. 4 (a)). しかし、線形集約によりデータが増加する場合は消費エネルギーがデータ量に比例するために、より sink に近い点でデータ集約を行うことで消費エネルギーが削減可能となる。よって本研究では、線形集約を行う場合に集約効率に応じて最適な集約点を選択する AGIT (Aggregation efficiency-aware GIT) routing を提案した (Fig. 4 (b)). AGIT routing における集約点は sink に近づくため、形成されるパスは最短パスを形成する opportunistic routing に近いものとなる。シミュレーションにより、AGIT routing を従来の GIT 及び opportunistic routing と比較した結果を Fig. 5 に示す。ここで、AGIT routing の消費エネルギー削減効果を gain と定義する。本シミュレーションでは線形集約として header elimination を仮定している。そのため、payload サイズが小さい場合にはほぼ完全集約とみなすことができ、AGIT と GIT routing で形成されるパスはほぼ同じものとなる。また、payload サイズが大きくなりすぎると、AGIT routing で形成されるパスは opportunistic routing で形成されるパスとほぼ同じとなる。このため、gain は payload サイズが 4, 36, 108Byte と増加するにつれ増加し、216Byte の場合には減少している。また、source の数が増加するにつれ gain も増加し、最大 8% を達成した。

また、経路探索のための exploratory message がネットワーク全体に広がるのを抑制するために、hop exploratory scheme を提案した。本方式では sink と source 間の hop 数以下の hop 数を持つノードにのみ exploratory message を送信する。Hop exploratory scheme を用いることでパスの形成時の消費エネルギーを最大 40% 削減可能である (Fig. 6)。しかし、パスの選択肢が減少するために gain が 6.7% まで減少する。よって、AGIT routing と Hop exploratory scheme の間にトレードオフが存在する。これはデータをどれほど長く送信するか依存し、運用法に依存すると考えられる。

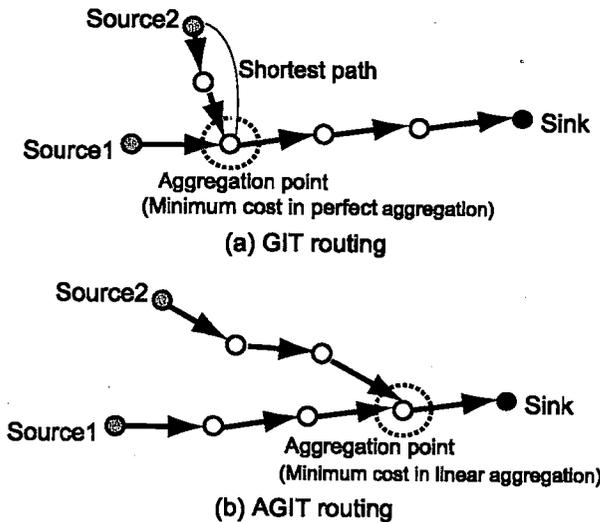


Figure 4. GIT and AGIT routing.

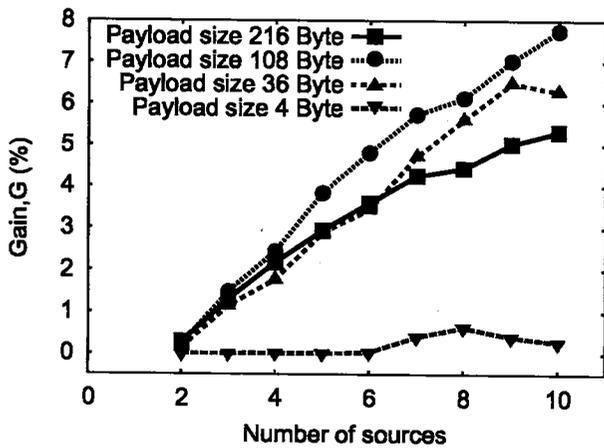


Figure 5. Gains by nodes on the path tree (header size = 36 Byte).

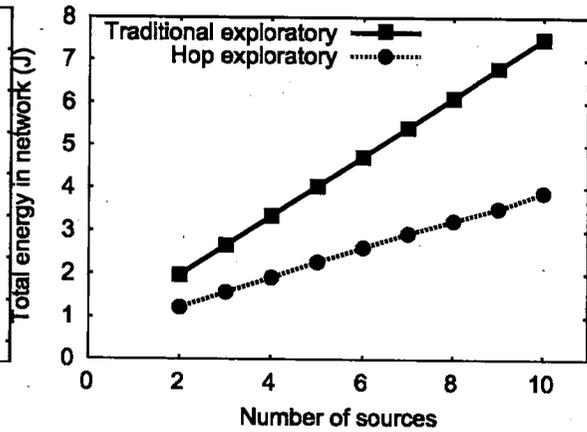


Figure 6. Total energy consumption in whole network until the path tree is constructed.

5. Wireless sensor network における送信電力制御による送信効率劣化が消費電力モデルに与える影響

WSN の省電力化の一つの方法である送信電力制御を考慮する場合、従来研究では送信器の消費電力は d の n 乗 (d は通信距離, n はパス損失係数) に比例して変化すると仮定されてきた。しかし、この仮定は送信効率が常に一定の場合において成り立つものであり、実際には送信効率は変動すると考えられる。そこで本研究では送信器の最終段である power amplifier に着目し、インピーダンス整合理論を用いた基礎解析を実施すると共に、cascode power amplifier (Fig. 7) に対して実回路解析とシミュレーションを行い、送信効率の劣化が及ぼす影響を調査した。これらの解析とシミュレーションにより、送信効率が劣化する場合、送信器の消費電力は d の n/m 乗 ($2 \leq m \leq 2.8$) に比例して変化するという結果が得られた。よって、

m を degradation factor とする ED (efficiency degradation) model を提案した。ここで、 $n/m=r$ とすると送信電力制御が有効となる条件式を以下に示す。

$$(N_{\text{over}}-1)A_{\text{RX}} < rA_{\text{TX}} - r + 1.$$

N_{over} は送信器が最大伝送距離で通信したときに通信対象としたノード以外でデータを受信(オーバーヒアリング)したノードの個数であり、 A_{TX} は送信器において送信電力の変化に関係ない一定の電力と送信器の最大消費電力の比を表し、 A_{RX} は受信器の電力と送信器の最大消費電力の比を表している。この式からED modelにおける r は常に従来のモデルにおける r より小さいために、送信電力制御による消費電力の削減効果を得られにくいことがわかる。よって、送信電力制御を考慮する場合により正確な結果を得るためには、従来モデルよりもED modelの方が適している。特にノード密度が低くオーバーヒアリングするノードが少ない(N_{over} が非常に小さい)場合に従来のモデルは非常に楽観的な結果を得る傾向が顕著であるため注意する必要がある。

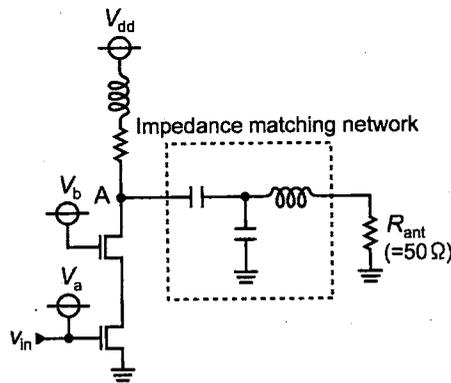


Figure 7. Cascode power amplifier.

6. Wireless sensor network 応用 carrier sense 機能を持つ 433MHz 帯, 356- μ W 電圧増幅器
 WSN応用 433MHz帯非コヒーレント型on-off keyingレシーバの消費電力の 94%を占めるインバータ型電圧増幅器の低消費電力化を行った。WSNではアクティブ比が非常に低く 99. 9%の時間がスタンバイ状態である。よって、アクティブ時の消費電力と同様にスタンバイ時の消費電力の削減も重要である。従来の回路はインバータの入出力を抵抗で接続する構成であったために高い電圧ゲインを持つが、常に最大の貫通電流が流れ消費電力が大きいという問題があった。提案するBSAMP (bistability amplifier) はsub amplifierによるフィードバック構成となっており(Fig. 8), 入力信号を増幅するmain amplifierのバイアス点を V とすることでアクティブ時の貫通電流を削減している。またジグザグ型カットオフ方式を採用することでスタンバイ時の消費電力を最小化することに成功した。シミュレーションの結果、BSAMPはフィードバック動作により従来と同等の電圧ゲインを実現しつつ、スタンバイ時に 86%, アクティブ時に 46%の消費電力削減効果が得られ、99.9%の時間がスタンバイの時には 54%の消費電力削減効果が得られた(Tab. 1)。またBSAMPは増幅動作に対して最小入力信号振幅を持ち、さらにその最小入力信号振幅が V_b , V_a によって制御可能である。この特性を利用することで、チャネル状況確認のためのcarrier sense機能を実現可能である。この機能によってMACにおいて無駄な再送の原

因となるデータの衝突を回避可能である。

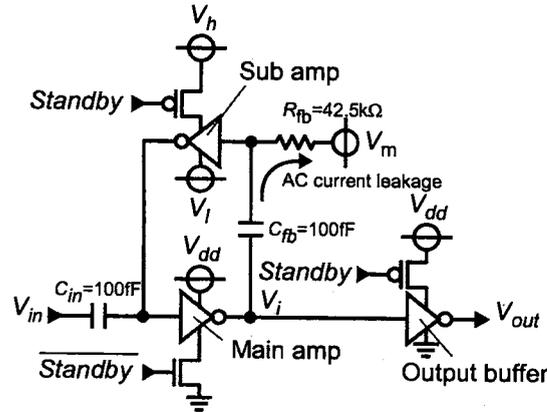


Figure 8. Schematic of BSAMP.

Table 1. Total power consumption of BSAMP

	Standby	Active			Total*
		Sig. "0"	Sig. "1"	Average	
Conv.	167 nW	680 μW	628 μW	654 μW	821 nW
BSAMP	24 nW	278 μW	435 μW	356 μW	380 nW
Saving	86%	59%	31%	46%	54%

Sig. "0"; アクティブ時に信号入力がない場合

Sig. "1"; アクティブ時に信号入力がある場合

*; 99.9%の時間がスタンバイの場合

7. 結論

ユビキタスネットワークの実現のための近距離無線通信システムにおける低消費電力化技術に関する研究を行った。本研究では特に低消費電力化が最重要課題となる応用分野に着目し、自立電源動作型小型近距離無線通信機器と WSN システムを研究対象と設定した。自立電源動作型小型近距離無線通信機器に関してはワイヤレスマウスに着目し、回転運動により発生する電力で動作するワイヤレスインターフェース内蔵 SoC の設計とその試作を行った。実チップによる評価の結果、本 SoC は通信距離 1m 時に消費電力 2.2mW であった。これは自立電源動作に十分な低消費電力特性である。

また WSN に関しては低消費エネルギーな経路制御プロトコルである AGIT routing, より現実的な消費電力モデルである ED model 及び低消費電力回路である BSAMP の3件を提案した。AGIT routing は従来の手法の比最大約 8%の消費エネルギー削減効果が得られた。また、送信電力制御による消費エネルギーを考慮する場合に、従来のモデルは ED model に比べより楽観的な結果を得ることを明らかにした。BSAMP は従来の増幅器に比べ 99.9%時間がスタンバイの場合に 54%の消費電力削減効果を達成した。

学位論文審査結果の要旨

平成19年2月2日に第1回学位論文審査委員会を開催。2月6日に口頭発表、その後第2回審査委員会を開催し、審議の結果、以下の通り判定した。尚、口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

本論文は、近距離無線通信システムにおける低消費電力化技術に関する一連の研究であり2つに大別される。第1は自立電源動作型機器に関する研究で、ワイヤレスバッテリーレスマウス応用のLSIを0.18 μm プロセスで設計試作し、伝送距離約1m時の消費電力22mWを実現し、自立電源動作に十分な低消費電力特性を達成した。第2はWSN (Wireless Sensor Network) に関するもので、低消費エネルギーな経路制御プロトコルの提案、送信効率の劣化を考慮した消費電力のモデル式の提案、及び低消費電力電圧増幅器の開発からなっている。経路制御では、集約率に応じて最適な集約点を選択する方式を提案した。消費電力モデルの研究では、送信器の消費電力は従来 d の n 乗(d は通信距離、 n はパス損失係数)に比例するとされてきたが、送信効率の劣化を考慮すると、 d の n/m 乗($2 \leq m \leq 2.8$)になることを明らかにした。更に、従来と同等の電圧ゲインを実現しつつ、消費電力を54%削減したWSN向け433MHz帯電圧増幅器を実現した。

以上の研究成果は、今後の様々な近距離無線通信システムに展開できる技術であり、実用的価値は広い。従って、博士(工学)に値するものと判定する。