

「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」
平成 17 年度採択研究代表者

黒田 忠広

慶應義塾大学理工学部・教授

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

1. 研究実施の概要

磁気結合チャネルを用いたチップ間通信の研究においては、磁気結合を用いて 10Tbps/100mW のチップ間通信を可能にする技術を創出する。これまでに、1Tbps/100mW の世界最高速度チップ間通信を達成した。また、送信電力の削減を図る技術としてナノダイジー・チェーン技術、パルス波形最適化技術を研究し、0.14pJ/bit と 1/20 の電力削減に成功した。さらに、面積ペナルティを低減する技術としてバースト転送技術を研究し、11Gbps/ch のチップ間通信を実現した。今後は低電力化のための磁性材料の導入による 30fJ/bit のチップ間通信の実現や、磁気結合を利用した新たなアプリケーションの創出を目指す。

60GHz 帯を用いた偏波変調パルス通信方式を提案し、10Gbps/10mW のワイヤレス通信用 CMOS 回路の試作・実証を目指している。1Gbps を超える高速無線通信では変調および復調における超高速 DA 変換回路および AD 変換回路の消費電力が問題となるが、本研究では無線パルス信号をデジタル符号から直接生成する送信回路と無線パルス信号からデジタル信号を直接生成する受信回路を組み合わせることにより AD/DA 変換回路を省略し、低電力化を図っている。今年度、本研究ではミリ波パルス信号をデジタル符号化するための受信回路と無線システム的设计に取り組んだ。

本研究では、大面積かつフレキシブルな有機ワイヤレス給電シートを試作し、空間を動き回る情報システムに高効率かつ利便性高く電力伝送する手法を供することを目的としている。本年度は、ワイヤレス電力伝送システムの超低消費電力化をねらいとして、待機時の消費電力を下げるため、有機トランジスタの微細化を進めた。まず、有機トランジスタのチャンネル長である 90 ミクロンを既存の装置で 20 ミクロンにまで微細化した。また、プ

ラスティック MEMS スイッチの駆動電圧を昨年の 70V から 10V 以下にまで低減し、周波数応答も昨年の 1Hz 程度から 1kHz まで向上できた。さらに、ワイヤレス電力伝送シートと整合するシートを介した新しい通信方式を提案し、原理実験に成功した。

CMOS デジタル回路でアナログ回路を積極的に置き換えた、電力効率に優れた新しいワイヤレス通信方式を提案し、100Mbps/1mW のワイヤレス通信用 CMOS LSI の試作・実証を行う。従来の無線アーキテクチャでは、大部分を占めるアナログ回路による消費電力が問題となっている。今年度、本研究では「オールモスト・デジタル無線」と「通信シート」の 2 つのアプローチで端末間短距離無線通信の低電力化に取り組んだ。

2. 研究実施内容

2.1 ナノコイル配列を用いたチップ間通信

本研究においては、最終的な成果として 1/1000 の低電力化を達成すると共に、ワット級の電力で毎秒ペタビットのチップ間通信を可能にすることを目標としている。そのためには速度と電力のトレードオフを改善する新回路技術の創出と、トレードオフを最適化するための設計理論の確立が重要な鍵となる。

これまでの研究において、磁気結合チャネルを用いたチップ間通信技術は、デジジー・チェーン技術とパルス整形技術を利用することで、従来の 1/20 に相当する 0.14pJ/b のエネルギー効率を実現し、1Tbps/150mW のチップ間通信を達成可能にした。本年度は、面積ペナルティを低減するための高速送受信回路技術について研究し、1 チャンネルあたりのデータ伝送速度を 11Gbps/ch まで高めることに成功した。

高速送受信回路技術は、クロック信号を用いない非同期チャネルを用いたものである。非同期チャネル用の受信器回路は高速に動作することが可能であるため、11Gbps のデータ伝送速度が可能となった。この技術により、面積ペナルティを従来の 1/3 に低減することが可能となった。

2.2 偏波変調通信による端末間至近距離通信

60GHz 帯を用いた偏波変調パルス通信方式を提案し、10Gbps/10mW のワイヤレス通信用 CMOS 回路の試作・実証を目指している。1Gbps を超える高速無線通信では変調および復調における超高速 DA 変換回路および AD 変換回路の消費電力が問題となるが、本研究では無線パルス信号をデジタル符号から直接生成する送信回路と無線パルス信号からデジタル信号を直接生成する受信回路を組み合わせることにより AD/DA 変換回路を省略し、低電力化を図っている。

今年度は高速無線通信でかぎとなる低消費電力受信回路の設計に主に取り組んだ。本受信回路では、通常の CMOS 回路をミリ波パルス信号からベースバンドのデジタル信号を直

接生成するために、非線形増幅回路(Nonlinear Amplifier: NLA)を用いた。これにより、周波数を低周波に変換するためのミキサ、ミキサに基準周波数を供給する局部発振回路、AD変換回路、および復号回路を省略することができ、大幅な低消費電力化を図ることができた。90nm CMOS プロセスを用いて 60GHz 帯パルス信号用の受信回路を試作した結果、19.2mW の消費電力でパルスレシーバを構成可能であることを実証した。本研究成果は 2008 Symposium on VLSI Circuits にて発表予定である。また、通信距離によらず安定して受信可能なように可変増幅回路を導入した受信回路について設計を行い、現在試作中である。

2.3 有機トランジスタを用いた大面積無線給電シート

本研究では、大面積かつフレキシブルな有機ワイヤレス給電シートを試作し、空間を動き回る情報システムに高効率かつ利便性高く電力伝送する手法を供する。具体的には、アンテナ・コイルとスイッチング用の有機トランジスタを集積化して 1 つの給電セルを構成し、格子状に並べて大面積のシート全面を覆ったワイヤレス電力伝送シートを試作する。昨年度は、有機トランジスタによる電子的スイッチとプラスチックによる機械的スイッチを組み合わせ、シート型のワイヤレス電力伝送システムの実現に成功した。特に、本プロジェクトにおいては、大面積シート上で細かく分割された領域ごとに独立して電力が伝送できるシートを実現することによって、広い領域の任意の場所で 30 ワットクラスの大電力を高効率に伝送した。

本年度は、これらの研究成果をさらに発展させ、いよいよワイヤレス電力伝送システムの超低消費電力化を進める計画に取り組んだ。特に、システム全体の消費電力を大幅に低減するためには、待機時の消費電力を大幅に下げる必要があるが、これには有機トランジスタの微細化が極めて有効である。そこで、有機トランジスタのチャンネル長である 90 ミクロンを既存の装置で 20 ミクロンにまで微細化した。また、プラスチック MEMS スイッチも微細化することによって、昨年度は駆動電圧が 70V であったのが 10V 以下にまで低減できた。さらに、周波数応答も昨年の 1Hz 程度から 1kHz まで向上できた。さらに、黒田チームと高宮チームとの連携をより深め、有機トランジスタとシリコンの集積化を進めることによって、ワイヤレス電力伝送シートと整合するシートを介した新しい通信方式を提案し、原理実験に成功した。

2.4 オールモスト・デジタル無線と通信シートによる端末間短距離通信

従来の無線アーキテクチャでは、大部分が DC 的に電力を消費するアナログ回路により構成されているため、消費電力の低減が困難であった。本研究では、DC 電力を消費しない CMOS デジタル回路で、アナログ回路を積極的に置き換えたオールモスト・デジタル無線という、電力効率に優れた新しいワイヤレス通信方式の提案と実証を目指す。

今年度は「オールモスト・デジタル無線」と「通信シート」の 2 つのアプローチで端末間短距離無

線通信の低電力化に取り組んだ。

まず、「オールモスト・デジタル無線」に関して、DC-960MHz 帯向けのインパルス UWB トランシーバ LSI の設計・実測を 90nm CMOS で行った。100Mbps の通信時に、送信回路で 220 μ W、受信回路で 190 μ W の低消費電力を実証した。1 ビット当たりのエネルギーで比較すると、これは UWB トランシーバとしては世界最低記録を達成した。この低電力動作を実現する上でキーとなる新規技術が、送信回路のデジタル波形整形回路と、受信回路の DC 電力を消費しないパルス検出回路である。この成果は、VLSI 回路シンポジウム 2008 において 6 月に発表予定である。

次に、無線よりも低電力な有線通信と、無線通信の可動性を両立させるために、有線通信と無線通信の中間領域として、「通信シート」を新たに提案・実証した。染谷グループにより開発された大面積のプラスチック・シート上に容量結合通信用パッドとプラスチック MEMS スイッチと不揮発有機トランジスタメモリを集積した通信シート向けに、容量結合通信用トランシーバ LSI の設計・実測を 180nm CMOS で行った。60cm の距離を 100kbps の通信時に、10.7 μ W の低消費電力を実証した。この低電力動作を実現する上でキーとなる新規技術が、クロックなしのデータ伝送方式と、DC 電力を消費しない信号検出回路である。この成果は、ISSCC2008 において発表した。

3. 研究実施体制

(1)「慶應」グループ

- ①研究分担グループ長:黒田 忠広 (慶應義塾大学、教授)
- ②研究項目
 - ・磁気結合チャネルを用いたチップ間通信の研究

(2)「柏」グループ

- ①研究分担グループ長:藤島 実(東京大学、准教授)
- ②研究項目
 - ・偏波変調通信を用いた超高速無線通信の研究

(3)「本郷」グループ

- ①研究分担グループ長:染谷 隆夫 (東京大学大学院、准教授)
- ②研究項目
 - ・ワイヤレス給電シートの超低消費電力化に関する研究

(4)「駒場」グループ

- ①研究分担グループ長:高宮 真 (東京大学、准教授)
- ②研究項目

- ・超低消費電力の無線通信を実現するオールモスト・デジタル無線に関する研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. K. Niitsu, N. Miura, M. Inoue, Y. Nakagawa, M. Tago, M. Mizuno T. Sakurai, and T. Kuroda, "Daisy Chain Transmitter for Power Reduction in Inductive-Coupling CMOS Link," IEICE Transactions on Electronics, Vol.E90-C, No.4, pp. 829-835, Apr., 2007.
2. K. Niitsu, N. Miura, M. Inoue, Y. Nakagawa, M. Tago, M. Mizuno H. Ishikuro, and T. Kuroda, "60% Power Reduction in Inductive-Coupling Inter-Chip Link by Current-Sensing Technique," JSAP Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 4B, pp. 2215-2219, Apr., 2007.
3. N. Miura, H. Ishikuro, K. Niitsu, T. Sakurai, and T. Kuroda, "A 0.14pJ/b Inductive-Coupling Transceiver With Digitally-Controlled Precise Pulse Shaping," IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Vol.43, No.1, pp. 285-291, Jan., 2008.
4. A. Oncu, B.B.M.W. Badalawa, and M. Fujishima, "22-29 GHz ultra-wideband CMOS pulse generator for short-range radar applications," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 42, NO. 7, pp. 1464-1471 July 2007.
5. Shintaro Nakano, Tsuyoshi Sekitani, Tomoyuki Yokota, and Takao Someya, "Low operation voltage of inkjet-printed plastic sheet-type micromechanical switches", Appl. Phys. Lett. 92, 053302 (2008).
6. Tsuyoshi Sekitani, Yoshiaki Noguchi, Ute Zschieschang, Hagen Klauk, and Takao Someya, "Organic transistors manufactured using inkjet technology with subfemtoliter accuracy", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 105, Issue 13, pp. 4976-4980 (Online March 24, 2008; April 1, 2008).
7. T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, T. Sakurai, T. Someya, "A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS switches", Nature Materials, 6, 413 - 417 (01 Jun 2007).
8. Y. Noguchi, T. Sekitani, and T. Someya, "Printed shadow masks for organic transistors", Applied Physics Letters 91, 133502 (2007).
9. Tsuyoshi Sekitani, Kazuki Hizu, and Takao Someya, "Air-stable operation of organic field-effect transistors on plastic films using organic/metal hybrid passivation layers", Japanese Journal of Applied Physics, Volume 46, Issue 7A, pp. 4300-4306 (JUL 2007).
10. Yasushi Takamatsu, Tsuyoshi Sekitani, and Takao Someya, "Temperature dependence of Hall effects in organic thin-film transistors on plastic films", Appl. Phys. Lett. 90, 133516 (2007).
11. Kazuki Hizu, Tsuyoshi Sekitani, Joe Otsuki, and Takao Someya, "Reduction of operation

voltage in complementary organic thin-film transistor inverter circuits using double gate structures", *Appl. Phys. Lett.* 90, 093504 (2007).