

「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デジター・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。今年度は、当該技術を NAND フラッシュメモリに適用し、消費電力を 1/2、実装面積を 1/8 にまで低減することに成功した。

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送信回路に用いられる高速スイッチ回路とミリ波パルス受信回路を実現した。

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消費電力を大幅に低減するため、有機トランジスタを微細化をすすめた。その結果、微細化された有機トランジスタで周波数応答を評価する実験を推進したところ、ゲート接地の有機トランジスタで周波数 1MHz においてオンオフ比を 3 桁以上確保できることを確かめることができた。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、機器を包むことによって電磁ノイズがどこで発生するかを検知できるシート型システム (EMI シート) 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 トランシーバ回路の試作・実証を目指している。今年度は、昨年度までに開発したインパルス UWB トランシーバの低電力性を損な

わずに通信品質(ビットエラーレート)を低減する新しい受信回路方式の研究に取り組んだ。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

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、デージー・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⁵⁾。

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。

本年度は磁気結合を利用したあらたなアプリケーションである積層フラッシュメモリ間のリピート伝送方式を研究し、多段積層における 3 チップ以上のチップ間通信が行えることを確認した。

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。

今年度は実用化に向けた低消費電力パルス受信回路の高速化に取り組んだ。本受信回路では、ミリ波パルス受信回路に用いられる、非線形増幅回路(Nonlinear Amplifier: NLA)に差動型を用いた受信感度の向上、出力のロジック判別回路の高速化、電流帰還型を用いたばらつき耐性の向上を行い、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、50mW の消費電力で 5Gbps 動作のパルスレシーバを実証した。一方、送信機の出力電力を増大させるために、60GHz 発振器に接続する高速ミリ波スイッチを試作し、8Gbps 動作を確認した。

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 40 ワットクラスの大電力を高効率に伝送した。さらに、伝送効率も 80%にまで向上することに成功している。

本年度は、これらの研究成果をさらに発展させ、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。そこで、まず有機トランジスタを微細化をすすめた。その結果、微細化された有機トランジスタで周波数応答を評価する実験を推進したところ、ゲート接地の有機トランジスタで周波数1MHz においてオンオフ比を 3 桁以上確保できることを確かめることができた。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、機器を包むことによって電磁ノイズがどこで発生するかを検知できるシート型システム(EMI シート)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

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。昨年度までに、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を提案し、これを適用した DC-960MHz 帯向けのインパルス UWB トランシーバ LSI の設計・試作を行い、100Mbps の通信時に、送信回路で $220 \mu\text{W}$ 、受信回路で $190 \mu\text{W}$ の低消費電力を実証してきた。これは、1 ビット当たりのエネルギーで比較すると、UWB トランシーバとしては世界最低記録を達成した。

本年度は、これらの研究成果をさらに発展させ、ワイヤレス通信の通信品質(ビットエラーレート)を低減する研究に取り組んだ。昨年度のインパルス UWB トランシーバ LSI では、受信したパルス信号の電圧の大小判定を直接行ってデータを判定する受信方式であったので、ビットエラーレートが高い欠点があった。そこで、受信したパルス信号と期待するテンプレート信号の両者を照合することにより受信信号を判定する相関回路を DC 電力の消費なしで実現する新しい受信回路を提案し、90nm CMOS でのチップ試作により動作実証を行った。

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. Y. Yuxiang, Y. Yoshida, N. Yamagishi, and T. Kuroda, "Chip-to-Chip Power Delivery by Inductive Coupling with Ripple Canceling Scheme," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No.4, Apr. 2008.
2. 三浦典之, 黒田忠広, "3次元実装のための低電力・広帯域誘導結合通信," エレクトロニクス実装学会誌, Vol.11, No.3, pp.174-181, May 2008.
3. Y. Yoshida, N. Miura, and T. Kuroda, "A 2 Gb/s Bi-Directional Inter-Chip Data Transceiver With Differential Inductors for High Density Inductive Channel Array," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 43, No.11, pp. 2363-2369, Nov. 2008.
4. V. Kulkarni, M. Muqsith, K. Niitsu, H. Ishikuro and T. Kuroda, "A 750 Mb/s, 12 pJ/b, 6-to-10 GHz CMOS IR-UWB Transmitter With Embedded On-Chip Antenna," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 44, No. 2, pp. 394-403, Feb. 2009.
5. N. Miura, Y. Kohama, Y. Sugimori, H. Ishikuro, T. Sakurai, and T. Kuroda "A High-Speed Inductive-Coupling Link with Burst Transmission," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.44, No.3, pp.947-955, Mar. 2009.
6. K. Niitsu, Y. Yuxiang, H. Ishikuro, and T. Kuroda, "An Improvement in Efficiency of Wireless Inter-Chip Power Delivery Using Thin Film Magnetic Material for 3D System Integration," accepted to Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 49, No. 4B, Apr. 2009.
7. K. Takano, M. Motoyoshi and M. Fujishima, "4.8GHz CMOS frequency multiplier using subharmonic pulse-injection locking for spurious suppression," IEICE Transactions on Electronics, vol. E91-C, No. 11, pp. 1738-1743, Nov. 2008.
8. M. Takamiya and T. Sakurai, "Low Power VLSI Circuit Design with Fine-Grain Voltage Engineering," IPSJ Transactions on System LSI Design Methodology, Vol. 2, pp. 18 - 29, Feb. 2009. (Invited)

9. Takao Someya, “Electronic eyeballs”, News and Views, Nature 454, 703-704, 7 August 2008.
10. Tsuyoshi Sekitani, Yoshiaki Noguchi, Kenji Hata, Takanori Fukushima, Takuzo Aida, Takao Someya, “A Rubberlike Stretchable Active Matrix Using Elastic Conductors”, Science, Vol. 321, No. 5895, 1468-1472, 12 September 2008.
11. Tomoyuki Yokota, Shintaro Nakano, Tsuyoshi Sekitani, and Takao Someya, “Plastic complementary microelectromechanical switches”, Applied Physics Letters 93, 023305, July 2008.
12. 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, July 2008.
13. 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, Apr. 2008.

(2)特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 1 件)