

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24240007

研究課題名(和文)最適電力制御型コグニティブMIMO-OFDMシステムの設計・実現に関する研究

研究課題名(英文)A Study on the Design of the Optimum Power Controlled Cognitive MIMO-OFDM System

研究代表者

宮永 喜一 (Miyanaga, Yoshikazu)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20166185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多様な通信環境において極低消費電力で高速な無線通信を最適に実現する方式の確立とそのハードウェア化を行った。高速な無線通信は現在1Gbpsを超える速度が実現されているが、実際に通信できる環境は限定的であり、様々な環境下における高速無線通信を実現するのは難しい。本研究では、いろいろな環境において、最高のスループットを満足するシステム構成を見つけ、システムを変更する新技術を開発し、同時に消費電力が最小になるように動作するアーキテクチャ(コグニティブ低消費電力システム)を新たに提案・実現した。また提案システムを用いた高品位映像無線通信の応用システムも開発・実現した。

研究成果の概要(英文)：In this project, a new technology on a high speed wireless communication with low power consumption has been developed. In addition, its hardware system has been also designed and developed. In recent, a "OVER 1 Gbps" wireless system was announced and embedded into some systems and however it is also difficult to realize the highest throughput under any communication circumstances. In our project, a new cognitive system has been proposed. By using the cognitive system, the system can find out the most suitable structure which can send data with the highest throughput and can execute with the lowest power consumption. By using this new system, a high quality video wireless communication system has been developed as one of suitable demonstrations.

研究分野：情報通信工学

キーワード：情報通信工学 無線通信システム 低消費電力型LSI 信号処理 映像無線通信 コグニティブ無線 MIMO-OFDM 高品位映像ストリーミング

1. 研究開始当初の背景

最近の無線 LAN などに利用されている高速無線通信システムは、MIMO-OFDM 方式 (Multi-Input/Multi-Output, Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略) に基づくものであり、次世代の無線 LAN 規格として考えられている IEEE802.11ac の高速無線通信も MIMO-OFDM に基づくシステムが想定されている。次世代規格の特徴は、1Gbps を超える超高速無線であり。申請者グループは、実時間で 2.6Gbps(160MHz 帯域)のスループットを達成した世界初の無線通信 LSI を設計実現し、2009 年 1 月の IEEE802.11ac 委員会において発表し、参考資料となった。これらのシステムは、室内環境等、利用する通信環境が限定的であり、現在では、様々な環境でも高速通信を可能とする新方式が望まれている。本研究は、1Gbps を超える速度で、さらに環境に合わせてより速い最高のスループットが得られるよう自律的にシステムを変更する新技術 (多様な通信環境下での高速通信) を開発目的としており、世界的に見ても類似の研究は少ない。また申請者グループは、システムの低消費電力化のため、最適語長制御、通信環境適用型低消費電力方式、サブスレッシュホールド回路設計などの技術を用いて、従来の通信チップに比べて 1/20 以上も消費電力の少ない無線通信 LSI (デジタル部において 300nJ/Mb) を実現した、この LSI システムは世界初であり、著名なジャーナル・国際会議等で発表している (研究業績(12)-(16))。本研究で目指すコグニティブ低消費電力アーキテクチャは、これらの成果をさらに発展させたものであり、多様な通信環境下での高速無線通信 LSI は、世界的に見ても類似例がない。

さらに、本研究では、高速無線チップの応用例として、高品位動画像通信のデモシステム構築も目指している。具体的な応用も含めた高速無線通信システムの LSI 化は、世界最高の性能を示すだけでなく、高い有効性・広い応用範囲を具体的に示すことができるため、優れた研究成果が得られると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、多様な通信環境において極低消費電力で高速な無線通信を最適に実現する方式の確立と LSI の実現、その応用システムの開発を目的とする。現在、高速な無線通信は MIMO-OFDM により 1Gbps を超える速度が実現されている。しかし、実際に通信できる環境は限定的であり、様々な環境下における最適通信を実現するのは非常に難しい。本研究では、利用環境において、必要なスループットを満足するシステム構成を最適に自動判定し、自律的にシステムを変更する新技術 (多様な通信環境下での高速通信) を開発し、同時にシステムの消費電力が最小になるシステム構成を見出し、自律的にシステムを変更するアーキテクチャ (コグニティブ低消

費電力アーキテクチャ) を新たに提案し、その無線通信 LSI を実現する。また提案システムを用いた高品位映像データストリーミング等の応用システムも開発する。

3. 研究の方法

3 年間の研究期間内で、次の (1)~(5) のシステムを開発している。本研究の特徴の 1 つとして、単に高速で低消費電力の LSI を設計・実現するだけではなく、その LSI を活用した、映像伝送システムも設計・開発することが挙げられる。これにより、従来からオープンな課題となっていた高速無線チップの活用例もデモシステムとして実現した。

- (1) より実環境に近いといわれている Winner II 無線チャンネルモデルを導入し、マルチチャンネルの無線通信環境を同定する。モデルのパラメータは、アジマススプレッド、K ファクタ、ドップラー周波数、CNR 及び占有帯域である。それらを高精度にセンシングする方式とその LSI モジュールを開発する ; **コグニティブ方式向け環境センサ**
- (2) 与えられた通信環境において、要求されているスループットをできるだけ満足するようなシステム構成を自動的に判定・設計し、自律的にシステムを変更するコグニティブシステムを提案・設計・開発・実現・評価する ; **多様な通信環境下での高速通信**
- (3) システムの消費電力が最小になるようにシステム構成を自動的に判定し、(2) の条件下において、自律的にシステムを変更する新アーキテクチャを提案する ; **最適低消費電力通信**
- (4) ギガビット通信 (1Gbps 以上のスループット)、ミリワットシステム (1W 以下の消費電力) を達成する $4 \times 4 \sim 16 \times 16$ MIMO-OFDM システムを設計・開発・実現する。通信帯域幅は 40MHz - 80MHz での可変帯域を想定し、(2)、(3) の状況に合わせてスループットやビットエラーレート、パケットエラーレートを最適制御する ; **コグニティブ MIMO-OFDM システム LSI**
- (5) 高品位映像データストリーミング、大容量データ通信等を実現する MAC/LLC を設計し、(4) に対応できるインターフェイス (IF) を設計・開発する。これにより、動画像を実際に送受信できるトータルシステムを実現する ; **低消費電力型高速 MAC-IF**

4. 研究成果

- 4.1 コグニティブ無線システム (鳥取大学)
 - ここでは、「3. 研究の方法」に関する (1)、(2) についての研究を行った。
 - コグニティブ無線方式として、空き周波数帯域の有効活用に関する研究が盛んにされているが、周波数帯域に限らず伝搬環境に応

じて通信方式を最適化し、スループット特性やチャンネル容量を改善する手法が期待されている。そこで本研究では、MIMO-OFDMシステムへの環境適応型コグニティブの導入について検討を行った。下記に研究内容及び成果を述べる。

(a)チャンネルシナリオ識別手法

コグニティブシステムの実現には、伝搬環境の様々なパラメータを推定する必要があるが、すべてのパラメータを推定することは困難である。そこで、様々なパラメータにより構成される伝搬シナリオを識別し、それに応じてMIMO-OFDMシステムの最適化を図る。そのため、伝搬シナリオの識別が必要となる。屋内から屋外まで幅広い伝搬環境に対応したチャンネルモデルとして、WINNER IIチャンネルモデルが知られており、アジマススプレッド、 K ファクタ、遅延スプレッド、NLOS/LOS環境、ドップラー周波数などが各シナリオにより異なる。本提案法はアジマススプレッド及び K ファクタの推定値の平均がガウス分布となることを利用してシナリオ識別を行う。図4.1.1にシナリオ識別結果を示す。従来法と比較して識別精度が改善していることが確認され、本手法の有効性が確認された。これによりコグニティブシステムに必要なチャンネルシナリオ識別手法が実現された。

(b)環境センサ

コグニティブ無線には正確な環境パラメータの推定が必要であるが、これまでコグニティブ無線用環境センサについて検討がされていなかった。そこで本研究ではアジマススプレッド、 K ファクタ、ドップラー周波数、マルチパス伝搬路の遅延時間等の推定手法について検討を行った。特に本稿では K ファクタ推定手法について報告する。従来の K ファクタ推定手法では、マルチパス遅延を考慮しておらず、また加法性白色ガウス雑音により推定精度が著しく劣化した。そこで本研究ではマルチパス遅延の存在するMIMOチャンネルに対応したチャンネルモデルから K ファクタ推定を行うとともに、マルチパスMIMOチャンネルのスパース性を利用する手法について提案、検討した。図4.1.2に K ファクタ推定精度を示す。シミュレーション結果より提案法により推定精度が大幅に改善していることが確認され、精度のよいコグニティブ無線用環境センサが実現した。

(c)MIMO ストリーム数制御手法

本研究では、MIMO-OFDMシステムのコグニティブ化として伝搬路の統計データ、アンテナレイアウト情報を基にするストリーム数選択手法について提案した。MIMOチャンネルの統計的性質は、移動局、基地局の位置が大きく変わらない限り変動しないため、チャ

ネルのアジマススプレッド、放射角並びに到来角に応じて、ストリーム数、つまり、アンテナ間隔を制御する手法である。図4.1.3に本提案手法によるチャンネル容量を示す。到来角、放射角に対して安定的に通信が可能となることが確認された。これにより環境適応型コグニティブMIMO-OFDMシステムが実現された。

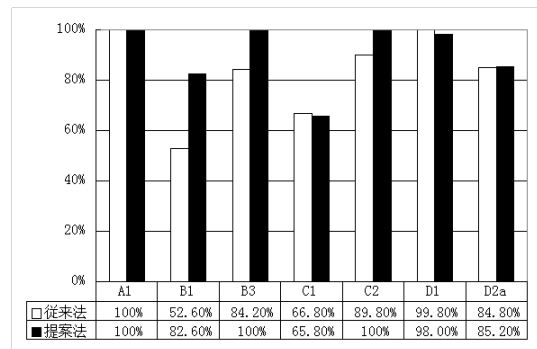


図 4.1.1 シナリオ識別精度

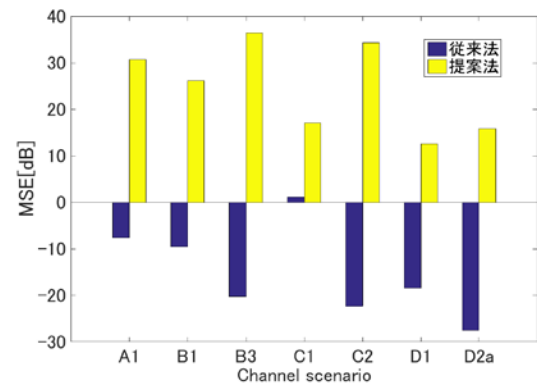


図 4.1.2 K ファクタ推定精度

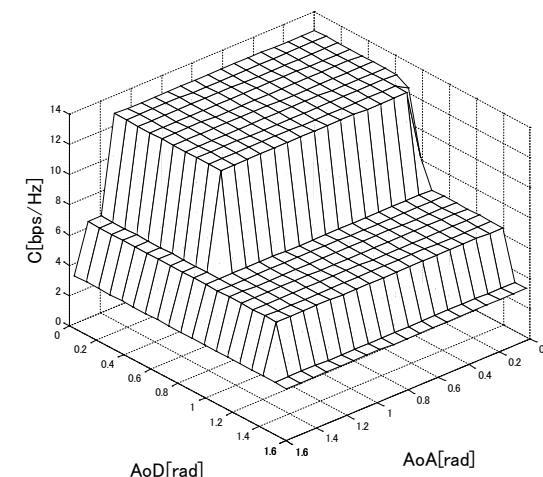


図 4.1.3 提案法によるチャンネル容量

4.2 極低消費電力型高速無線MIMO-OFDMシステム (北海道大学)

ここでは、「3. 研究の方法」に関する(3)、(4)についての研究を行った。

MIMO のストリーム数は、4 から 16 とし、MATLAB シミュレーションモデルにより、4×4MIMO-OFDM、8×8MIMO-OFDM、16×16MIMO-OFDM システムの設計とその性能評価を行った。但し、本研究グループが所有する FPGA ハードウェア実現システムの制限から、実装した MIMO-OFDM は、4×4MIMO-OFDM、8×8MIMO-OFDM である。本報告は、8×8MIMO-OFDM に関するフィールド実験について述べる。

無線伝送性能は予定の性能が実現でき、2x2、4x4、さらには 8x8 の MIMO-OFDM ハードウェアシステム構成において、実機を使用した MIMO 無線伝送を成功させた。無線伝送スループットは最終的に 1.2Gbps に達した。伝送品質は 1.08Gbps で 1.78×10^{-3} 、1.2Gbps で $BER=2.70 \times 10^{-2}$ となった。図 4.2.1 には、8×8MIMO-OFDM の実験システムを示す。



図 4.2.1 8×8MIMO-OFDM システム

本システムの FPGA 合成結果は、図 4.2.2 に示す通り。

Resource	Utilization	Available	Utilization(%)
FF	10686	2443200	1
LUT	28113	1221600	2
Memory LUT	1504	344800	1
I/O	247	1200	21
BRAM	28	1292	2
DSP48	241	2160	11
BUFG	1	128	1

(a) 8x8 MIMO-OFDM Rx 実装結果(合成例)

Resource	Utilization	Available	Utilization(%)
FF	62970	2443200	3
LUT	207586	1221600	17
Memory LUT	1120	344800	1
I/O	245	1200	20
BRAM	176	1292	14
DSP48	320	2160	15
BUFG	1	128	1

(b) 8x8 MIMO-OFDM Tx 実装結果(合成例)

図 4.2.2 FPGA 合成結果

さらに、LSI 設計時のゲート総数と予想消費電力は、図 4.2.3 に示す。

Transmitter	Gate Count	Power (mW)
Scramble	4,830	0.57
Encoding	5,390	0.60
Interleave*	104,020	14.2
Mapping	5,480	0.52
Pilot Insertion*	218,970	29.9
IFFT*	573,680	57.9
GI & Preamble*	330,720	44.5
Total	1,243,090	148.2

(a) 8x8MIMO-OFDM 送信機の構成例

Receiver	Gate Count	Power (mW)
Synchronization	21,410	2.5
FFT*	573,920	81.0
Re-order & Pilot	235,370	33.4
MIMO Detection*	7,800,630	956.6
De-mapping	14,580	1.1
De-interleave*	676,930	73.4
Viterbi Decoding*	2,711,330	257.6
De-Scramble	4,830	0.30
Total	12,039,000	1,405.9

(b) 8x8MIMO-OFDM 送信機の構成例

Receiver	Power (mW)
Synchronization	2.5
FFT	81.0
Re-order & Pilot	33.4
MIMO Detection + 動的MIMO	110.2
De-mapping	1.1
De-interleave	73.4
Viterbi Decoding	257.6
De-Scramble	0.30
Total	559.5

(c) 動的 MIMO デコーダ+8x8MIMO-OFDM 送信機

図 4.2.3 消費電力評価

各評価結果より、当初の予定より優れた結果が得られていることがわかる。

4.3 映像と無線システムのクロスレイヤ設計・開発 (九州工業大学)

ここでは、「3. 研究の方法」に関する(5)についての研究を行った。

「多様な通信環境下での高速通信」及び「最適低消費電力通信」を同時に実現する通信システムを達成するために、以下の2つについて提案・開発を行った。本提案のアクセスポイントの構成は、図 4.3.1 とする。

(A) 様々な環境下での最適画像伝送システム

本研究では、通信路環境にあわせたスケラブルな画像伝送手法を提案した。提案手法では、MIMO (Multi-input multi output) 通信システムを用いて通信路にあわせてデータ伝送を制御することで、データの優先度に応じた通信品質を確保することが可能となる。加えて、JSCC (Joint source channel coding) の技術を用いて、スケラブル画像符号化と MIMO 通信システムとを組み合わせることで、通信路環境がおよぼす画質への影響を低減させることができ、高画質な画像を得ることが可能となる。

図 4.3.2 に示すように、無線 LAN の環境において提案手法は、従来手法に比べ高画質であることが確認された。また、本提案手法を検証するプラットフォームを作成し、画像伝送システムについての検討を行った (図 4.3.3 参照)。

(B) 最適低消費電力通信システム

本システムでは、OSI モデルの MAC 層と LLC 層以上の層とのクロスレイヤ制御を行った。本研究では LLC 層以上の層として、トランスポート層を使用した。

クロスレイヤ制御部では、入力された通信データの情報をトランスポート層から得ることで、通信データのリアルタイム性等が決定される。通信データの性質にあわせてアクセスポイントをスリープ状態にしておくための時間を制御することで、消費電力を削減することが可能である。併せて、通信データの到着時間から、次の通信データの到着までアクセスポイントをスリープ状態に遷移させることができ、省電力化が可能である。

実際の動画伝送やデータ伝送の packets 到着間隔を計測し、その計測データを用いて検証を行った結果、通信データの伝送量が少ない場合、90%以上の省電力化が可能であることが確認された。また、データ伝送量が多い場合でも、スリープ状態に移行するため、消費電力を削減することが可能である。

以上の2つの映像と無線システムのクロスレイヤ設計・開発により、高画質・低消費電力が達成できるシステムを提案できた。

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 20 件)

- ① Constantin Siriteanu, Yoshikazu Miyanaga, Steven D. Blostein, Satoshi Kuriki and Xiaonan Shi, MIMO Zero-Forcing Detection Analysis for

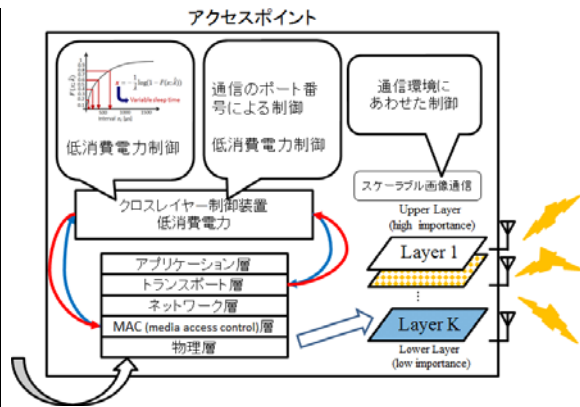


図 4.3.1 アクセスポイントの構成



図 4.3.2 最適画像伝送の効果



図 4.3.3 画像伝送システムのプラットフォーム

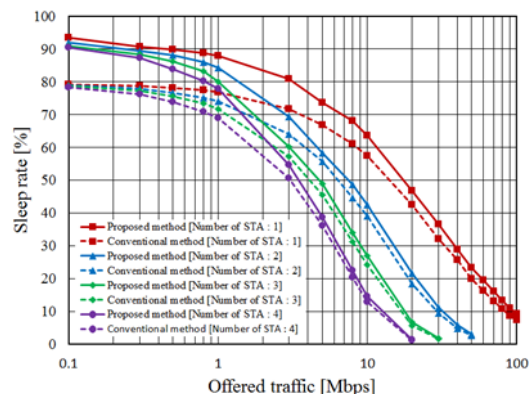


図 4.4.4 消費電力の低減効果

- Correlated and Estimated Rician Fading, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 査読有, Vol. 61, No. 7, pp. 3087-3099, 2012.
- ② Yuya Miyaoka, Yuhei Nagao, Masayuki Kurotaki and Hiroshi Ochi, RTL Design of High-Speed QR Decomposition, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, vol. E95-A, no. 11, pp. 1991-1997, 2012.
- ③ Shogo FUJITA, Leonardo LANANTE Jr., Yuhei NAGAO, Masayuki KUROSAKI, and Hiroshi OCHI, Novel THP Scheme with Minimum Noise Enhancement for Multi-User MIMO Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E96-A, pp. 1340-1347, 2013.
- ④ Kazi Obaidullah, Constantin Siriteanu, Shingo Yoshizawa, Yoshikazu Miyanaga, Effects of Channel Features on Parameters of Genetic Algorithm for MIMO Detection, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E96-A, pp. 1984-1992, 2013.
- ⑤ Kosuke Shimazaki, Shingo Yoshizawa, Yasuyuki Hatakawa, Tomoko Matsomoto, Satoshi Konishi, Yoshikazu Miyanaga, A VLSI Design of a Tomlinson-Harashima Precoder for MU-MIMO Systems Using Arrayed Pipelined Processing, 査読有, Vol. E96-A, pp. 2114-2119, 2013.
- ⑥ Shingo Yoshizawa, Yoshikazu Miyanaga, Evaluation of Cover and Reflector in Receiver Antennas for SM-MIMO Wireless Communications, Journal of Electrical and Computer Engineering, 査読有, Vol. 123827, pp. 1-8, 2013.
- ⑦ Nozomi Miyazaki, Shingo Yoshizawa, Yoshikazu Miyanaga, Low-Power Dynamic MIMO Detection for a 4x4 MIMO-OFDM Receiver, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E97-A, pp. 306-312, 2014.
- ⑧ Kazuki SHIOGAI, Naoto SASAOKA, Masaki KOBAYASHI, Isao NAKANISHI, James OKELLO, Yoshio ITOH, Bias Free Adaptive Notch Filter Based on Fourier Sine Series, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E97-A, pp. 557-564, 2014.
- ⑨ Xiaonan Nicole Shi, Yoshikazu Miyanaga, Performance optimization of iterative receiver for wireless

communications based on realistic channel conditions, Computers & Electrical Engineering, 査読有, Vol. 40, pp. 1498-1507, 2014.

- ⑩ Shingo Yoshizawa, Mai Nozaki, Hiroshi Tanimoto, VLSI Implementation of an Interference Canceller Using Dual-Frame Processing for OFDM-IDMA Systems, 査読有, Vol. E98-A, pp. 811-819, 2015.

[学会発表] (計 46 件)

- ① Jaeseong Kim, Shingo Yoshizawa and Yoshikazu Miyanaga, A Low-Power MMSE Detector Using Dynamic Voltage Wordlength Scaling for 4x4 MIMO-OFDM Systems, IEEE ISCAS2012, 査読有, COEX (韓国), 2012.
- ② Hiroki Iwaizumi, Masahiro Sugitani, Baiko Sai, Hiroshi Tsutsui, Yoshikazu Miyanaga, Video Wireless Communication Based on High Speed 8×8 MIMO-OFDM System, International Symposium on Communications, Control, and Signal Processing, 査読有, May 21-24, 2014, Athens, Greece.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等(高速・低消費電力の無線通信)

http://csw.ist.hokudai.ac.jp/?page_id=220

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮永 喜一 (MIYANAGA, Yoshikazu)
北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 20166185

(2) 研究分担者

吉澤 真吾 (YOSHIZAWA, Shingo)
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20447080

(3) 研究分担者

伊藤 良生 (ITO, Yoshio)
鳥取大学・工学部・教授
研究者番号: 70263481

(4) 研究分担者

笹岡 直人 (SASAOKA, Naoto)
鳥取大学・工学部・准教授
研究者番号: 80432607

(3) 研究分担者

黒崎 正行 (KUROSAKI, Masayuki)
鳥取大学・工学部・教授
研究者番号: 80404094