様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 6 月 14 日現在

機関番号：１４６０３
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ１８１０５

研究課題名（和文）IoTセンサ向け802.11ahのPHY層の低コスト超低消費電力回路の開発

研究課題名（英文）Develop a low-cost low-power 802.11ah PHY Circuit for IoT sensors

研究代表者
Ｔｒａｎ　Ｔｈｉ・Ｈｏｎｇ（Tran, Thi Hong）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：９０７６０８３５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は802.11ah規格に基づくIoTセンサー向けPHYトランシーバのシミュレータとハードウェア回路を開発した。シミュレータをMatlabで実行してPHYトランシーバの誤り率BERおよびPERを評価した。ハードウェア回路を実際のFPGAボードでの検証した。新たなアイデアについては、低コストK-bestビタビ復号器、およびMUL-RED Radix-2 FFT回路が提案された。さらに、研究予算の一部は、可視光通信（VLC）およびブロックチェーン技術に関する研究に使用されていた。
結果としては、本研究予算で、論文誌3本、国際会議論文14本が公開された。招待講演2回、国内会議発表を9回行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究はIoTセンサー向け無線通信機の物理層の低コスト超低消費電力ハードウェア回路を開発する上で、IoTスマートシステム（スマートヘルスケア・スマートファームなど）の開発のコストの削減に貢献する。また、ブロックチェーンシステムの開発の上で、それらのシステムのセキュリティ問題を解決し、システムの柔軟性を高めにする。詳しくは、ブロックチェーン（BC）技術を応用するので、スマートコントラクトでIoTシステムを自動的に制御できる。さらに、IoTシステムのデータが安全な分散型台帳に確保される。
本研究の結果を受け継いで、これから高セキュリティ低コストIoT+AI+BCプラットホームの開発に進んでいる。

研究成果の概要（英文）：This project has developed simulator and hardware circuit of PHY transceiver based on 802.11ah standard. The simulator is written in Matlab to check BER and PER performance of PHY transceiver. Hardware circuit includes basic blocks of PHY transceiver, such as: Scrambler/Descrambler, FEC encoder, Viterbi Decoder, Mapper/Demapper, PHY Controller, etc. The verification on real hardware platform (FPGA board) shows that transceiver operates correctly. In terms of new idea, low complexity K-best Viterbi decoder, and MUL-RED Radix-2 pipeline FFT circuit have been proposed. Furthermore, part of research budget has been used to research about visible light communication (VLC), and blockchain technology.
In terms of result, thanks to 16K18105 research budget there are 3 journal/letter papers, 14 international conference papers have been published. There are 2 invited talks and 9 domestic conference presentations have been provided.

研究分野：無線通信の回路・セキュリティ

キーワード：802.11ah　PHY transceiver　Viterbi Decoder　VLC　Blockchain　IoT system　PHY encryption　IoT sensor

１．研究開始当初の背景

近年 IoT に関する研究が注目されている。スマートハウス、スマートシティ、スマート農場、スマートヘルスケアシステムなどの実現には IoT 技術が必須である。例えばスマート農場の場合、2050 年に世界の人口は 96 億人になり、全てを養うには食料生産量の 70％増加が必要と言われている。農業生産の量と質を改善する一つの方法として、IoT センシング技術を使用したスマート農場がある。スマート農場では、まず、植物・動物にセンサを取り付け、気象データ、土壌マッピング、施肥量などの環境状態や植物の病状、収穫量、動物の体温、活動状態、健康障害などのさまざまな情報を取得し監視する（図 1）。次に、これらの情報を解析し、最適な調節を行う。スマート農場には多数のセンサが必要と予想され、スマート農場の建設・維持コストは非常に大きい。さらに、膨大な量のセンサを毎日運用するには、電力コストの問題も解決しなければならない。同様に、スマートハウス、スマートシティ、スマートヘルスケアシステムを実現するためにも、膨大な量のセンサが必要となり、経済的コストと電力コストが課題となる。以上の背景より、低コスト低消費電力 IoT センサの開発が重要であると言える。また、どんな機能を持っているセンサもサーバーコンピュータとのデータ交換が必要であるため、無線通信機が必要となる。ゆえに、低コスト超低消費電力 IoT センサの無線通信機の開発は必須の研究課題であると考えられる。IoT 無線通信機に関しては、IEEE 802.11 委員会は、WiFi 802.11a や 11n や 11ac など国際規格の提供に成功した後で、現在 IoT 向け 802.11ah 規格を作成中である。そのため数年後に 802.11ah 規格が策定されると予想される。802.11ah 規格はデータリンク層のメディアアクセス制御副層（MAC）と物理層（PHY）について検討されており（図２）、本研究は、PHY 層に注目する。PHY 層は、OSI 参照モデルにおける第１層で、ノイズと干渉が存在する無線環境の上でデータを正確に伝送できる処理方法に注目したものである。802.11ah 規格が作成中であるため、Qualcomm や Motorola や NEC などの世界的な大きい会社の研究所以外には研究者からまだ注目して研究を行われていない。それらの研究所は、ビジネス的な研究所であるため、技術的な研究結果を公開しないと考えている。そのため、本研究では、802.11ah 規格について以下の二つ課題を研究する。１つ目は、802.11ah 規格の最終バージョンを作成するために、従来のドラフトバージョンのパフォーマンスを検証する必要がある。２つ目は、802.11ah 規格に基づく低コスト超低消費電力 PHY 層の回路を開発する。

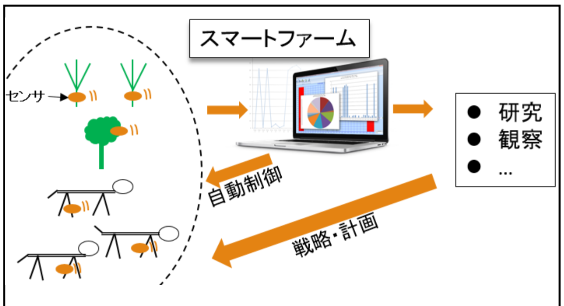


図１:スマートファームの例

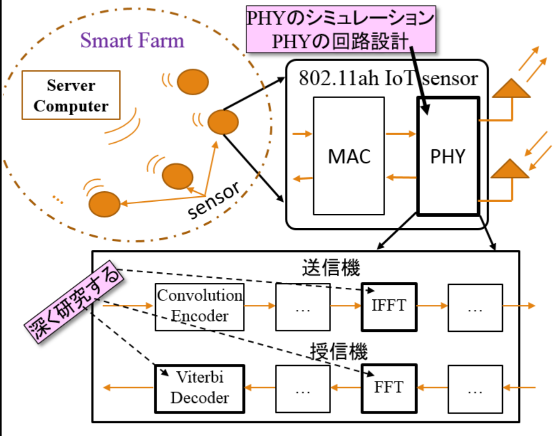


図２:本研究の研究課題

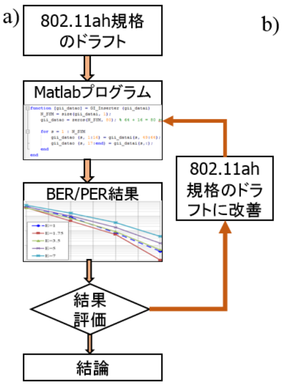
２．研究の目的

本研究では以下の２つの目的を設定する。【1】802.11ah 規格のドラフトバージョンを評価し、PHY 層の改善できるポイントを提案して、規格の最終バージョンの作成に貢献する。【2】IoT 向け 802.11ah 規格に基づく PHY 層の低コスト超低消費電力回路を開発する。さらに、PHY 層には低演算ビタビデコーダのアルゴリズムを提案して、アルゴリズムの効果を確認するためにシステムシミュレーションを行い、そのアルゴリズムに基づくハードウェア回路を設計する。

３．研究の方法

28 年度は、802.11ah 規格のドラフトバージョンに基づいて PHY 層のシミュレータを Matlab 言語で開発した（図 3）。このシミュレータはシステムのシミュレーションによって PHY 層のビタビデコーダと FFT/IFFT の最適なパラメーターを選択する。また、PHY 層の回路規模と消費電力を削減するために、最も複雑なブロック（ビタビデコーダ、FFT、IFFT）に注目して研究し、低演算処理アルゴリズムと低コスト回路アーキテクチャーを開発した。29 年度以降は、802.11ah の PHY 層の送受信機の残りブロックの回路を別々に開発した。そして、送信機･受信機･全体システムのコントローラを開発し、各ブロックを接続

a)



b)

パラメタ	シミュレーション値
シミュレータ	IEEE 802.11ah draft
ツール･言語	Matlab R2015b
通信路	AWGN, Rayleigh fading
変調･復調	BPSK, QPSK, 16-256QAM
符号レート	1/2, 2/3, 3/4, 5/6
帯域幅	1, 2, 4, 8 MHz
イテレーション数	10 000 回

図３：シミュレーションの手順とパラメーター

し、PHY 層の送受信機の回路を作成した。ハードウェア回路の面積と消費電力を ASIC の合成ツールと FPGA ボードの上で評価した。詳しい研究方法・計画は以下通りである。

(1) 802.11ah 規格のドラフトバージョンの PHY 層のパフォーマンスの評価
PHY 層のシミュレータは送信機と受信機と雑音のある通信路（noisy channel）を含む。送受信機は、様々な IoT アプリケーション・通信路環境状態に対応するために、帯域幅の 1MHz，2MHz，4MHz，8MHz や変調・復調方式の BPSK，QPSK，16QAM，64QAM，256QAM や符号レートの 1/2，2/3，3/4，5/6 などの組み合わせ操作オプションを提供する。シミュレータは Matlab 言語で作成する。加法性白色ガウス雑音(AWGN)とレイリーフェージングチャンネルの通信路を使用してシステムのシミュレーションを行い、BER/PER の結果を明らかにする。

(2) 受信機にあるビタビデコーダと送受信機にある IFFT/FFT のブロックの最適なパラメーター、低演算処理アルゴリズム、回路アーキテクチャーの提案
受信機にあるビタビデコーダと送受信機にある IFFT/FFT に注目して研究する。ビタビデコーダの研究は 3 つの主な内容を含む。一つ目は、ビタビデコーダの最適なパラメーター・処理方法について研究する。二つ目は、シミュレーションによって K-best ビタビデコーダの低演算量誤り訂正アルゴリズムの BER/PER を評価する。三つ目は、 低コスト超低消費電力ビタビデコーダの回路アーキテクチャーを提案する。
IFFT/FFT の研究は２つの主な内容を行う。一つ目は、送信機の高速フーリエ逆変換（IFFT）と受信機の FFT の入力信号のビット幅（*FFT_BW*）の最適な値を BER/PER のシミュレーション結果に基づいて選択する。二つ目は、低コスト超低消費電力 IFFT/FFT の回路を開発する。

(3) PHY 層の送受信機の低コスト超低消費電力回路の設計・評価
ここでは、PHY 層の送受信機の各ブロックのインターフェースをドキュメントとして作成して、各ブロックのハードウェア回路を開発する。回路設計には Verilog というハードウェア記述言語を活用する。回路検証には機能検証とタイミング検証があり、機能検証では Modelsim ツールを活用し、タイミング検証では FPGA の Xilinx VC707 のボードで実施する。また、回路の面積と消費電力については、FPGA と ASIC の両方で計測する。FPGA では Xilinx VC707 ボードを活用し、ASIC では Design Vision ツールの上で VDEC ランセンスを活用する予定である。

４．研究成果

本研究成果は以下通りである。

(1) Matlab ツールで 802.11ah 標準に基づいて PHY 送受信機のシミュレータを開発して、シミュレーションを実行する上でシステムの誤り率 BER と PER のパフォーマンスを明確にした。

(2) K-best ビタビデコーダのアルゴリズムと低コストハードウェアアーキテクチャを提案した。

(3) PHY の送受信機のハードウェア回路を開発した。送受信機は Scrambler/Descrambler, FEC Encoder, Viterbi Decoder, Mapper, Demapper　などブロックを含む。

(4) さらに、本研究は可視光通信(VLC)システムの誤り率のパフォーマンスを向上に関する研究や通信機のセキュリティの向上するため物理層の暗号化に関する研究や通信システムのセキュリティのためブロックチェーンに関する研究などを行った。

詳しくは、年度ごとの成果が以下通りである。
平成 28 年度の研究では、802.11ah の PHY 層のシミュレータを開発した。シミュレータは PHY 層の送信機と受信機と通信路を含み，送受信機は 802.11ah に定義された様々なブロックを含む。例えば、Scrambler/Descrambler, Interleaver/De-Interleaver, Mapper/Demapper, IFFT/FFT, GI-Inserter/GI-Remover, Channel-Estimation などである。また、通信路は加法性白色ガウス雑音(AWGN)とレイリーフェージングチャンネルの二つのものを設計した。このシミュレータを使用して、PHY 層の送受信機にある IFFT/FFT と受信機にあるビタビデコーダのパフォーマンスを評価した。評価した結果に基づいて IFFT/FFT とビタビデコーダの最適なパラメーターを明確にした。また、IFFT/FFT とビタビデコーダの回路ハードウェアを開発した。IFFT/FFT の研究結果についての論文を１本、ビタビデコーダの研究結果についての論文を 3 本国際会議にて発表した。さらに、PHY 層のシステムの誤り率のパフォーマンスを改善するために、ビタビデコーダ以外の前方誤り訂正コードに関する課題も研究を行った。結果として、国際会議で 2 本の論文を公開した。加えて、平成 29 年度の研究を進めるために、PHY 層のプロトタイプハードウェア回路システムを開発し、このシステムを CPSY 国内研究会で発表した。
平成 29 年以降は、無線通信機のセキュリティを向上するために、物理層に暗号化アルゴリズムと回路設計を行った。MATLAB ツールで暗号化を追加した送受信機の BER/PER パフォーマンスを評価した。結果として、提案した暗号化はシステムの BER/PER パフォーマンスを劣化させない事を明確にした。本研究結果を国際会議論文 2 本にて公開した。
さらに、本研究課題では、以下の二つの研究内容を行った。可視光通信システムの開発とブロックチェーン技術を応用するスマートヘルスケアシステムの開発である。 可視光通信システムの開発については、スマートフォンにあるローリングシャッタスマートフォンカメラを用いた可視光受信機のプロト

タイプシステムの開発、システムの誤り率を削減するため可視光受信機の誤り訂正技術を提案し回路の開発を行った。結果として、論文誌 3 本と国際会議論文 4 本を公開した。ブロックチェーン技術の研究については、遠隔医療システムなどを制御する Euthereum ブロックチェーンプラットフォーム上でスマートコントラクトを開発し、その研究結果を国際会議論文 2 本公開した。

本研究を通して行った、IoT 向け無線通信システムについての研究結果を、合計で論文誌 3 本と国際学会論文 14 本公開した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　17　件）

[1] V. C. Nguyen, H. L. Pham, **<u>Thi Hong Tran</u>**, H. T. Huynh, Y. Nakashima, **"**Digitizing Invoice and Managing VAT Payment Using Blockchain Smart Contract," Int. Conference on Blockchain and Cryptography (ICBC 2019), Korea, May 2019. (Not yet published) (Peer-reviewed)

[2] Dai Long Hoang, **<u>Thi Hong Tran</u>** and Yasuhiko Nakashima, "Hardware Implementation of CORDIC Based Physical Layer Phase Decryption for IEEE 802.11ah," The 7th Inter. Conf. on Communications and Broadband Networking (ICCBN), Japan, Apr. 2019. (Not yet published) (Peer-reviewed)

[3] H. L. Pham, **<u>Thi Hong Tran</u>**, Y. Nakashima, "A Secure Remote Healthcare System for Hospital Using Blockchain Smart Contract," **DOI:** 10.1109/GLOCOMW.2018.8644164, IEEE Globecom 2018 Workshop on Blockchain and IoT, Dec. 2018, UAE. (Link: https://ieeexplore.ieee.org/document/8644164) (Peer-reviewed)

[4] D.D. Le, D.P., Nguyen, **<u>Thi Hong Tran</u>**, Y. Nakashima **, "**Log-Likelihood Ratio Calculation using 3-bit Soft-Decision for Error Correction in Visible Light Communication Systems,**"** Special section on Information Theory and Its Applications, IEICE trans. Fundamentals, Vol.E101-A, No.12, pp.2210-2212, Dec. (2018) (Peer-reviewed)

[5] Dai Long Hoang, **<u>Thi Hong Tran</u>** and Yasuhiko Nakashima, "Performance Evaluation of 802.11ah Physical Layer Phase Encryption for IoT Applications", IEEE International conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Vietnam, pp.84-88, Oct. 2018. (Peer-reviewed)

[6] **【Best Paper Award】** Tuan Kiet Tran, Duc Phuc Nguyen, Dinh Dung Le, **<u>Thi Hong Tran</u>**, Huu Thuan Huynh and Yasuhiko Nakashima: "Demonstration of A Visible Light Receiver Using Rolling-Shutter Smartphone Camera", ATC'18, pp.214-219, Oct. 2018. (Peer-reviewed)

[7] Duc Phuc Nguyen, Dinh Dung Le, **<u>Thi Hong Tran</u>**, Huu-Thuan Huynh, and Yasuhiko Nakashima: "Hardware Implementation of A Non-RLL Soft-decoding Beacon-based Visible Light Communication Receiver", ATC'18, pp.208-213, Oct. (2018) (Peer-reviewed)

[8] Duc-Phuc NGUYEN, **<u>Thi Hong Tran</u>**, Dinh-Dung LE, Yasuhiko NAKASHIMA: "Non-RLL DC-Balance based on a Pre-scrambled Polar Encoder for Beacon-based Visible Light Communication Systems", International Conference and Exhibition on Visible Light Communications 2018 (ICEVLC2018), Mar. 2018. (Link: https://arxiv.org/abs/1904.00832) (Peer-reviewed)

[9] D.D. Le, D.P., Nguyen, **<u>Thi Hong Tran</u>**, Y. Nakashima: "Joint Polar and Run-length Limited Decoding Scheme for Visible Light Communication Systems", IEICE Communications Express Letter, Vol.7, Issue 1, pp.19-24, Jan. 2018. (Peer-reviewed)

[10] Duc Phuc Nguyen, **<u>Thi Hong Tran</u>,** Yasuhiko Nakashima: "A Multi-mode Error-Correction Solution based on Split-Concatenation for Wireless Sensor Nodes", Journal of Communication, ISSN 1796-2021, vol. 12, no. 2, pp. 130-136, DOI: 10.10720/jcm.12.2.130-136, Feb. 2017. (Peer-reviewed)

[11] **<u>Thi Hong Tran</u>,** Duc Phuc Nguyen, and Yasuhiko Nakashima: "PER Evaluation of K-min Viterbi Decoder for Wireless Sensors", 10th international conference on Sensing Technology (ICST-2016), DOI: 10.1109/ICSensT.2016.7796225, Nov. 2016. (Peer-reviewed)

[12] Hiromasa Kato, **Thi Hong Tran**, Yasuhiko Nakashima: "ASIC Design of A Low-Complexity K-best Viterbi Decoder for IoT Applications", The IEEE APCCAS 2016, the 13th of the biennial Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, DOI: 10.1109/APCCAS.2016.7803985, Oct. 2016. (Link: https://ieeexplore.ieee.org/document/7803985) (Peer-reviewed)

[13] Duc Phuc NGUYEN, **Thi Hong TRAN**, Yasuhiko NAKASHIMA: "A High Coding-Gain Reduced-Complexity Serial Concatenated Error-Control Coding Solution for Wireless Sensor Network", IEEE International Conference on Signal and Image Processing, **DOI:** 10.1109/SIPROCESS.2016.7888352, Aug. 2016. (Peer-reviewed)

[14] **Thi Hong Tran**, Soichiro Kanagawa, Duc Phuc Nguyen and Yasuhiko Nakashima: "ASIC Design of MUL-RED Radix-2 Pipeline FFT Circuit for 802.11ah System" IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips 2016, **DOI:** 10.1109/CoolChips.2016.7503678, Apr. 2016. (Link: https://ieeexplore.ieee.org/document/7503678) (Peer-reviewed)

[15] **Thi Hong Tran**, Hiromasa Kato, Shinya Takamaeda-Yamazaki, Yasuhiko Nakashima: "Performance Evaluation of 802.11a Viterbi Decoder for IoT Applications", International Conference on Advanced Technologies for Communications 2015 (ATC'15), Ho Chi Minh city, **DOI:** 10.1109/ATC.2015.7388343, Oct. 2015. (Link: https://ieeexplore.ieee.org/document/7388343?denied=) (Peer-reviewed)

〔学会発表〕（計　14　件）

1. V. C. Nguyen, H. L. Pham, **Thi Hong Tran**, H. T. Huynh, Y. Nakashima, **"**Digitizing Invoice and Managing VAT Payment Using Blockchain Smart Contract," Int. Conference on Blockchain and Cryptography (ICBC 2019), Korea, May 2019.

2. Dai Long Hoang, **Thi Hong Tran** and Yasuhiko Nakashima, "Hardware Implementation of CORDIC Based Physical Layer Phase Decryption for IEEE 802.11ah," The 7th Inter. Conf. on Communications and Broadband Networking (ICCBN), Japan, Apr. 2019.

3. H. L. Pham, **Thi Hong Tran**, Y. Nakashima, "A Secure Remote Healthcare System for Hospital Using Blockchain Smart Contract," IEEE Globecom 2018 Workshop on Blockchain and IoT, Dec. 2018, UAE.

4. Dai Long Hoang, **Thi Hong Tran** and Yasuhiko Nakashima, "Performance Evaluation of 802.11ah Physical Layer Phase Encryption for IoT Applications", IEEE International conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Vietnam, Oct. 2018.

5. **【Best Paper Award】**Tuan Kiet Tran, Duc Phuc Nguyen, Dinh Dung Le, **Thi Hong Tran**, Huu Thuan Huynh and Yasuhiko Nakashima: "Demonstration of A Visible Light Receiver Using Rolling-Shutter Smartphone Camera", ATC'18, Oct. 2018.

6. Duc Phuc Nguyen, Dinh Dung Le, **Thi Hong Tran**, Huu-Thuan Huynh, and Yasuhiko Nakashima: "Hardware Implementation of A Non-RLL Soft-decoding Beacon-based Visible Light Communication Receiver", ATC'18, Oct. 2018.

7. Duc-Phuc NGUYEN, **Thi-Hong TRAN,** Dinh-Dung LE, Yasuhiko NAKASHIMA: "Non-RLL DC-Balance based on a Pre-scrambled Polar Encoder for Beacon-based Visible Light Communication Systems", International Conference and Exhibition on Visible Light Communications 2018 (ICEVLC2018), Mar. 2018.

8. **[1'st Prize in Poster Presentation】**Duc-Phuc Nguyen, Dinh-Dung Le, Dai-Long Hoang, Satoya Yoshida, **Thi-Hong Tran**, and Yasuhiko Nakashima: "A Precise Indoor Localization System with Fixed Visible Light Communication LEDs for Smart Shopping", IC-TECS2017 (poster), Dec. 2017.

9. **Thi Hong Tran,** Duc Phuc Nguyen, and Yasuhiko Nakashima: "PER Evaluation of K-min Viterbi Decoder for Wireless Sensors", 10th international conference on Sensing Technology (ICST-2016), China, Nov. 2016.

10. Hiromasa Kato, **Thi Hong Tran**, Yasuhiko Nakashima: "ASIC Design of A Low-Complexity K-best Viterbi Decoder for IoT Applications", The IEEE APCCAS 2016, the 13th of the biennial Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Korea, Oct. 2016.

11. Duc Phuc NGUYEN, **Thi Hong TRAN**, Yasuhiko NAKASHIMA: "A High Coding-Gain Reduced-Complexity Serial Concatenated Error-Control Coding Solution for Wireless Sensor Network", IEEE International Conference on Signal and Image Processing, China, Aug. 2016.

12. Hiromasa Kato, **Thi Hong Tran**, Yasuhiko Nakashima: "Ultra low-complex IEEE 802.11ah Viterbi Decoder for IoT Applications", IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips 2016 (poster), Japan, Apr. 2016.

13. **Thi Hong Tran**, Soichiro Kanagawa, Duc Phuc Nguyen and Yasuhiko Nakashima: "ASIC Design of MUL-RED Radix-2 Pipeline FFT Circuit for 802.11ah System" IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips 2016, Japan, Apr. 2016.

14. **Thi Hong Tran**, Hiromasa Kato, Shinya Takamaeda-Yamazaki, Yasuhiko Nakashima: "Performance Evaluation of 802.11a Viterbi Decoder for IoT Applications", International Conference on Advanced Technologies for Communications 2015 (ATC'15), Vietnam, Oct. 2015

〔図書〕（計　0　件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　0　件）

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。