

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420339

研究課題名(和文) ユビキタス情報技術における新しいエネルギー源の開発とその応用

研究課題名(英文) Novel energy development for Ubiquitous technology and its applications

研究代表者

安 昌俊 (AHN, CHANGJUN)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90453208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ユビキタス情報機器の新しいエネルギー源として実現させる事を目的とし、無線電力伝送技術の高効率・高性能化と成層圏気球インターネットサービス計画(Project Loon)等のエネルギー充電技術への応用を目指した研究開発である。無線電力伝送システムでは、エネルギーをマイクロ波に乗せて送りだすと距離に比例してマイクロ波が広範囲に広がるため、大電力を受信することは困難となる。そこで、送信マイクロ波に指向性をもたせるビームフォーミング技術による大電力化送信を行い、ビームフォーミング技術を用いてない物と比べ1000mmの伝達距離において、約1.46倍の電力を効率的に送ることができた。

研究成果の概要(英文)：In recent, Google proposed the Project Loon being developed with the mission of providing internet access to rural and remote areas using high-altitude balloons. In this research, we have developed an applicable prototype of 5.8 GHz wireless power transmission system with rough beamforming method to Project Loon. From the measurement results, transmit beamforming phased array antenna can transmit power more efficiently compared to a horn antenna and array antenna without beamforming with increasing the transmission distance. For the transmission distance of 1000 mm, transmit beamforming phased array antenna can obtain higher received power about 1.46 times compared to array antenna without transmit beamforming.

研究分野：無線通信

キーワード：無線電力伝送 ビームフォーミング レクテナ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、太陽光、風力、振動等による発電、蓄電を行う再生可能エネルギー技術に注目が集まっている。再生可能エネルギー技術とは、地球温暖化ガスを発生させず、周辺のエネルギー源から能動的に発電を行う環境発電を意味する。具体的には、圧電素子等を利用したエネルギー発電があげられる。このような環境発電技術は、ユビキタス情報技術を支える新しいエネルギー源としても注目を浴びている。現在、Google は飛行機が飛ぶ2倍の高さの成層圏まで気球を飛ばし、そこにインターネットの基地局を浮かべることで、空中でインターネット回線を作るといった新しいインターネットサービス計画(Project Loon)の研究開発を行っている。この計画でも、太陽光発電が重要なエネルギー源として利用されている。しかし、環境発電は、自然現象からエネルギーを取り出すため、場所や時間などの影響を受けやすく、いつでも発電が可能ではない。

一方、無線による電力伝送技術については、エネルギー問題を解決する一つの方法として様々な検討が行われている。当技術は、米国の NASA を中心に宇宙から発電した電力を地球に送り出す技術として広く研究されている。日本においても、宇宙航空研究開発機構(JAXA)などで高エネルギーを中心とした研究が行われている。無線電力伝送技術は、宇宙から発電した高エネルギーをマイクロ波に乗せて地球に送り出すため、距離に比例してマイクロ波が広範囲に広がる。そのために起こりうる人体や環境への影響を十分考慮する必要がある。仮に、エネルギーを地球から成層圏などの空中に送り出すと人体や環境への影響も少なく、比較的安定した環境である成層圏での新しいユビキタス情報機器のエネルギー源としても利用でき、環境発電の様に場所や時間などの影響も受け難い利点も考えられる。

これまで、研究代表者は携帯電話等の無線信号から効率よく発電し、微弱な無線機器の電源として活用する研究を行った。ZigBee等の無線機器の送信デューティーサイクルが6.7%際に必要な駆動電力3.4V(40mA)を発電し、電力変換効率80%を達成している。しかし、携帯電話等の無線信号は発電を前提として企画されていないため、その発電量は少なく受信場所に強く依存するため、広範囲通信への応用には適していない。研究代表者は広範囲通信への応用を目指し、無人飛行機(UAV)等にマイクロ波無線電力伝送を組み込む予備実装実験を行った。予備実験では、安全のため、送信電力を1Wに設定し、実験を行った。この電力変換技術と高効率無線電力伝送の技術を成層圏気球インターネット計画等に応用できれば、夜間の太陽光を取り入れることのできない時間帯においても自由にエネルギーを得ることが可能となり、ユビキタ

ス情報機器の新しいエネルギー源としての応用が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究は、マイクロ波無線電力伝送技術に注目し、ユビキタス情報機器の新しいエネルギー源として実現させる事を目的とし、無線電力伝送技術の高効率・高性能化とその応用を目指した研究開発である。無線電力伝送システムでは、エネルギーをマイクロ波に乗せて送り出すと距離に比例してマイクロ波が広範囲に広がるため、受信側では大電力を受信することは困難となる。そこで、送信マイクロ波に指向性をもたせるビームフォーミング技術による大電力化送信を行い、その発電効率を明確にする必要がある。また、成層圏の気球から地上への情報伝送は無指向性アンテナを用いて送信を行う。一方、無線電力伝送は地上から指向性アンテナで気球にエネルギーを送り出すため、強力な干渉波による通信品質の劣化という問題も考えられる。強力な干渉下での通信品質の劣化を防ぐ最適な信号生成法と干渉波による回り込み波の低減法を検討し、その有効性を明確にすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

無線電力伝送システムの最大の課題は、受信マイクロ波から直流電力を取り出す16分配型レクテナの設計と計算機シミュレーションによる性能評価を行うことである。大電力を伝送するためには周波数免許が必要なため、まずはISMバンド(5.8GHz:免許不要周波数)で実現を目指す。ワイヤレスアドホックネットワーク等の情報機器はそれ程大電力を必要としないため、最初は送信電力1Wで試作したシステムの性能を評価する。続いて、送信距離2m以内の近い距離における大電力(5W以上)の電力伝送実験を行い、設計したレクテナで大電力の供給が出来るかを測定し、評価を行う。また、本研究ではエネルギー伝送のみならず、将来、役に立つ成層圏気球インターネットサービス計画の実現に応用させるため、複数の気球に適用可能な干渉波による回り込み波の低減法を検討し、その最適化の検討を行う。

## 4. 研究成果

### (1) レクテナの高性能化

レクテナ(Rectenna: Rectifying Antenna)と呼ばれる電磁波を受信し、整流して電気として取り出す装置は無線電力伝送システムの主要な構成要素の一つである。図1は本研究で用いられた試作したレクテナを示す。本研究では電力伝送された無線信号から電力を取り出す装置として、ISMバンド5.8GHzで最大電力を取り出すように設計された。ISMバンドは周波数免許が不要であ

り、簡単に実装実験に利用することができるため、幅広く利用されている。一般的にレクテナ設計はマイクロストリップダイポールやパッチアンテナが広く使われる。

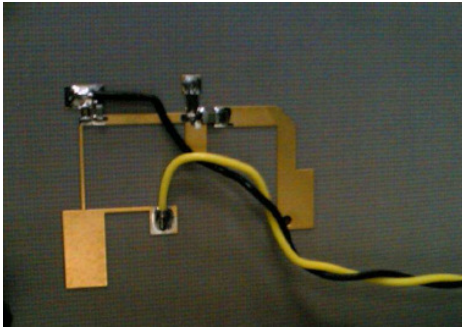


図1 試作のレクテナ

マイクロストリップアンテナは軽量化と小型化が可能である。しかし、狭帯域、制限された入射電力、低利得などのデメリットもある。本研究では、小型化と偏波特性がないマイクロストリップパッチアンテナを採用し、レクテナ設計を行った。レクテナの整流回路はRF-DC変換効率を決めるキーエレメントであり、HSMS-8202ショットキーダイオードを用いた。試作したレクテナはISMバンドである5.8 GHzで最大利得を得るように誘電率10、膜厚1.6 mmのPTFT (Teflon) ボードを用いて試作を行い6.2 dBiの利得を得ることが出来た。

## (2) ビームフォーミング技術による送信

無線電力伝送システムでは、エネルギーをマイクロ波に乗せて送り出すと距離に比例してマイクロ波が広範囲に広がるため、受信側では大電力を受信することが困難となる。そこで、送信マイクロ波に指向性をもたせるビームフォーミング技術による大電力化送信を行った。ビームフォーミングを形成するためには、送信マイクロ波の位相を変え、移相器の出力が急激に劣化する。そのため、出力の劣化を最小限にしながら指向性を増大できるアルゴリズムの提案とその効果を実装実験で明確にする必要がある。図2には中心周波数 $f_0$ の半波長間隔 $\lambda/2$ で各アンテナ素子が配置された位相配列アンテナを示す。位相配列アンテナの指向性パターンは角度 $\Theta$ により決定される。例えば $\Theta=0$ の場合、送信信号のメインローブは角度 $\Theta=0$ を中心とする指向性パターンを示す。一方、 $\Theta \neq 0$ の場合、送信信号のメインローブは角度 $\Theta$ が中心となるため、各アンテナ素子の出力信号は規則的な遅延時間を持つ。各アンテナ素子間の遅延距離は以下の様に計算できる。

$$x = d \cdot \sin \Theta, \quad (1)$$

ただし、 $d$ は各アンテナ素子の間隔である。

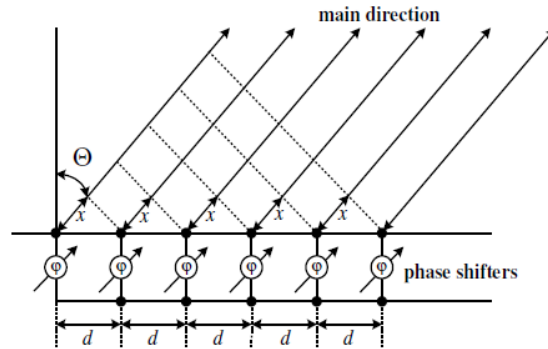


図2 位相配列アンテナ

ビーム指向角度 $\Theta$ と位相差 $\varphi$ の関係は以下の式で計算できる。

$$\frac{2\pi}{\varphi} = \frac{\lambda}{x} = \frac{\lambda}{d \cdot \sin \Theta} \quad (2)$$

式(2)により、最大ビーム指向角度は $\varphi = \pi$ 時に、以下の式で計算できる。

$$\Theta_m = \sin^{-1}(\lambda/2d). \quad (3)$$

式(3)により、最大ビーム指向角度は各アンテナ素子の間隔の逆数に比例する関係であり、各アンテナ素子の間隔を大きくするとビーム指向角度を調整することで無線電力伝送のエネルギー効率を向上することができる。

## (3) 発電量の時間変動

無線通信システムにおいて、情報を伝送するためには、送信信号の振幅や位相を変化させて送信を行う。そのため、変調信号の振幅や位相が時間変動するとその信号の包絡線も変動する。従って、エネルギーを乗せたマイクロ波の振幅の変動により発電量も時間変動するため、安定的な発電とその利用にも制限が生じる。この問題を改善するため、増幅器の非線形問題でも応用される振幅の変動が少ないオフセットQPSKと $\pi/4$  QPSK等の変調方式を検討し、最適な変調方式とその発電量を明らかにするため、まず、平滑回路あり、なしの場合に分けて検討を行った。平滑回路がない場合は、オフセットQPSKと $\pi/4$  QPSKを用いると従来QPSKと比べ、約3%の発電量が大きくなった。しかし、平滑回路を用いた場合は、変調方式にさほど依存しないことがわかった。そのため、大電力化伝送の検討に変調方式を考慮せず、平滑回路を用いたレクテナでの検討を行った。

## (4) 実験結果

無線電力伝送実験装置は電界効果トランジスタ(Field effect transistor, FET)発信器により、5.8 GHzの信号が生成される。

生成された信号は分配機に入力され、4つの出力信号として分配される。4つの出力信号はそれぞれ4つの移相機に入力され、位相制御パソコンにより入力された信号を5.625度の分解度で位相を変更する。位相変更された信号を1ワットアンプに入力するにはその電力が低いため、中間アンプを経由し、1ワットアンプに入力される。総送信電力は4つのアンプから出力されるため4ワットとなる。送信アンテナとして利用されるホーンアンテナは図3に示すように横縦112mm×85mmでアンテナ利得は16dBiである。

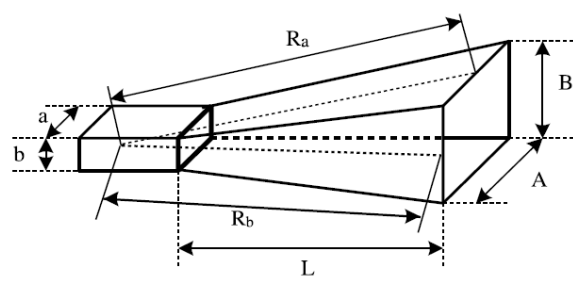


図3 ホーンアンテナの立体

受信レクテナは4×4のパッチアンテナで構成される。各パッチアンテナ設計は誘電率10、膜厚1.6mmのPTFT (Teflon)ボードを用いて行い6.2dBiの利得を得る。各パッチアンテナは横縦19mm×15mmで設計された。試作装置による無線伝送実験は、伝送距離を200mm, 400mm, 600mm, 800mm, 1000mmでそれぞれ行った。表1には無線電力伝送実験装置の諸元を示す。

表1 無線電力伝送実験装置の諸元

Device	Specification
Signal generator	5.8GHz, 10dBm
Power divider	-6.4dB
Phase shifter	6 bits shifter
Sub amplifier	30dB
Power amplification	30dB±2dB
Horn antenna	15dBi
Patch antenna	6dBi
Rectenna	16 patch antennas

図4にはホーンアンテナ単体とビームフォーミングを行った位相配列アンテナのビーム特性を示す。ビームフォーミングを行っていないホーンアンテナ単体はビーム広がりが38度と広いビーム特性を示す。一方、ビームフォーミングを行った位相配列アンテナはビーム広がりが22度とビームフォーミングを行っていないホーンアンテナ単体と比べ、狭いビーム特性を示す。

一般的にビーム特性 ( $M^2$ ) は以下の式で評価される。

$$M^2 = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\tan \theta_{div}}{\tan \theta_{div,0}} \quad (4)$$

ただし、 $\theta_{div}$  は測定したビーム広がり、 $\theta_{div,0} = \lambda / \pi \cdot d$  で定義される回折限界ガウスビームのビーム広がりである。

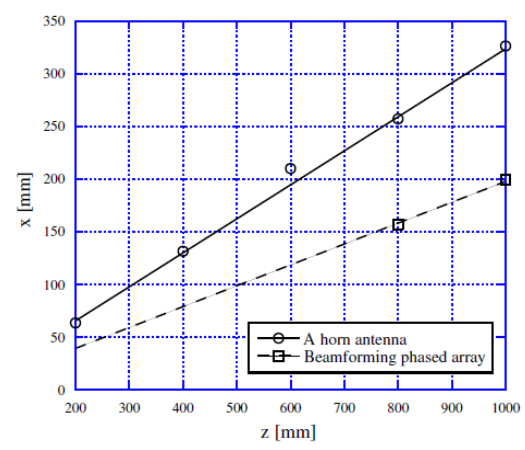


図4 測定したビーム特性

図4の結果から $\theta_{div}$ は10.87度、 $\theta_{div,0}$ は8.6度であり、ビーム特性 ( $M^2$ ) は1.26となる。一般的に位相配列アンテナの各素子数を増やし、全体的な面積を広げるとより優れたビーム特性を実現できる。今回の実験では、4つのホーンアンテナを用いて実験を行った。

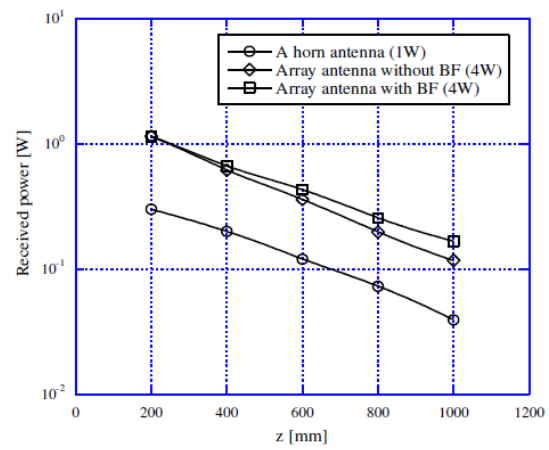


図5 受信電力特性

図5にはホーンアンテナ単体とビームフォーミングを行った位相配列アンテナの受信電力特性を示す。実験結果からビームフォーミングを行った位相配列アンテナの受信電力はビームフォーミングを行っていないホーンアンテナ単体と比べ、約1.46倍の電力を受信できることが示された。この結果から無線電力伝送にはビームフォーミングを行った位相配列アンテナが有効であることを示された。

## 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 8 件)

(1) Shoichi Higuchi, and Chang-Jun Ahn, ``Reduced Complexity and Latency for a Massive MIMO System using a Parallel Detection Algorithm,`` 査読有、Elsevier ICT express, vol.3, pp.1-5, April 2017. (<https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.009>)

(2) Wenjian Wang, Ye Tian, and Chang-Jun Ahn, ``Blind symbol timing synchronization scheme for real-time industrial wireless control network using high-speed preambleless OFDM systems over multipath fading channels,`` 査読有、Elsevier Digital Signal Processing, vol.62, pp.30-37, March 2017.

(<http://doi.org/10.1016/j.dsp.2016.10.015>)

(3) Ye Tian, Wenjian Wang and Chang-Jun Ahn, ``Accuracy Improvement using WLAN for Indoor Positioning Systems,`` 査読有、International Journal of Communications, vol.10, pp.86-90, August 2016. (<http://www.naun.org/cms.action?id=3033>)

(4) Chang-Jun Ahn, ``An Applicable 5.8 GHz Wireless Power Transmission System with Rough Beamforming to Project Loon,`` 査読有、Elsevier ICT express, vol.2, no.2, pp.87-90, July 2016. (<https://doi.org/10.1016/j.ict.2016.02.011>)

(5) Willy Anugrah Cahyadi, Yong-hyeon Kim, Yeon Ho Chung, and Chang-Jun Ahn, ``Mobile Phone Camera based Indoor Visible Light Communications with Rotation Compensation,`` 査読有、IEEE Photonics Journal, vol.8, no.2, pp.1-8, April 2016. (<http://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2545643>)

(6) Wenjian Wang, Chang-Jun Ahn, Tatsuya Omori, and Ken-ya Hashimoto, ``An adaptive coarse time synchronization method for factory automation in wireless control network based on OFDM systems over fading channels,`` 査読有、IEICE Communications Express, vol.4, no.11, pp.333-339, November 2015.

(<http://doi.org/10.1587/comex.4.333>)

(7) Hikaru Oka, Chang-Jun Ahn, Tatsuya Omori, and Ken-ya Hashimoto, ``IQ Imbalance Estimation and Compensation Schemes based on Time Frequency Interferometry for OFDM,`` 査読有、Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, vol.26, no.9, pp.1165-1172, September 2015. (<http://doi.org/10.1002/ett.2852>)

(8) Chang-Jun Ahn, Takeshi Kamio, Hisato Fujisaka, and Kazuhisa Haeiwa, ``RF Energy Harvesting and Charging Circuits for Low Power Mobile Devices,`` 査読有、IEIE Transactions on Smart Processing and Computing, vol.3, no.4, pp.221-225, August 2014.

(<http://doi.org/10.5573/IEIESPC.2014.3.4.221>)

[学会発表] (計 19 件)

(1) 栗原麻人, 安昌俊, ``SIC を用いたアップリンクマルチユーザ可視光 OFDM-IDMA システムの特性評価,`` IEICE Technical Report, IEICE Technical Report, CS2016-76, vol.116, no.468, pp.1-6, February 2017.

(2) 赤尾 貴志, 太郎田 智史, 安昌俊, ``共通分散 SMI アルゴリズムの性能改善,`` IEICE General Conference, no.B-8-2, pp.175, March 2017.

(3) 勝野 将人, 樋口 翔一, 安昌俊, ``上下リンク相関を利用した送信セクター選択法,`` IEICE General Conference, no.B-8-3, pp.176, March 2017.

(4) 紫垣 大斗, 田 治, 手塚 賢, 安昌俊, ``加重最小二乗法による高精度屋内位置検出の検討,`` IEICE General Conference, no.B-8-4, pp.177, March 2017.

(5) 藤城 真祥, 太郎田 智史, 安昌俊, ``プリアンプルレス OFDM システムにおける相関ブロックを用いた同期取得法,`` IEICE General Conference, no.B-8-5, pp.178, March 2017.

(6) 小島 駿, 手塚 賢, 安昌俊, ``中継ノードのモビリティを考慮した最適化適用変調,`` IEICE General Conference, no.B-8-6, pp.179, March 2017.

(7) Shoichi Higuchi, Chang-Jun Ahn, and Ken-ya Hashimoto, ``A Reduced Complexity and Latency of Massive MIMO using Parallel Detection Algorithm,`` Proc. of IEEE International Technical Conference of Region 10 (TENCON2016), pp.1998-2001,

Marina Bay Sands, Singapore, November 2016.

(8) Ken Tezuka, Chang-Jun Ahn, and Ken-ya Hashimoto, ``AF Cooperative Communications with Expansion of Channel Matrix and QRM-MLD for MU-MIMO,`` Proc. of IEEE International Technical Conference of Region 10 (TENCON2016), pp.1990-1993, Marina Bay Sands, Singapore, November 2016.

(9) Satoshi Taroda, Chang-Jun Ahn, and Ken-ya Hashimoto, ``Signal Separation Method with Polarization Antennas for Downlink MU-MIMO Systems,`` Proc. of IEEE International Technical Conference of Region 10 (TENCON2016), pp.1994-1997, Marina Bay Sands, Singapore, November 2016.

(10) Masaya Okamura, Chang-Jun Ahn, and Ken-ya Hashimoto, ``Novel Channel Estimation and Compensation for massive MIMO-OFDM,`` Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications

(11) Chang-Jun Ahn, Takeshi Kamio, Hisato Fujisaka, and Kazuhisa Haeiwa, ``Power Conversion Efficiency of RF-DC Rectifier for RF Energy Harvesting,`` Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2016), pp. 89-90, Yugawara, Japan, November 2016.

(12) Atul Sewaiwar, Samrat Vikramaditya Tiwari, Yeon-Ho Chung, and Chang-Jun Ahn, ``Color Cell based Bidirectional VLC with User Mobility,`` Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC2016), pp. 1-5, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.

(13) Chang-Jun Ahn, ``Power Conversion Efficiency of RF-DC Rectifier for Energy Harvesting,`` IEICE General Conference, no. B-8-11, March 2016.

(14) Chang-Jun Ahn, ``Adaptive Spatio-Temporal White Space Sensing in Multiple Antenna,`` Proc. of International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications (ADAPTIVE2016), pp. 16-19, Rome, Italy, March 2016.

(15) Asato Kurihara, Chang-Jun Ahn, Tatsuya Omori and Ken-ya Hashimoto, ``An Application of OFDM-IDMA to Uplink Multiuser Visible Light Communication System,`` Proc. of IEEE International Symposium on Intelligent Signal

Processing and Communication Systems (ISPACS2015), pp. 412-416, Bali, Indonesia, November 2015.

(16) Chang-Jun Ahn, ``Wireless power transmission with rough beamforming method,`` Proc. of IEEE NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS2015), pp. 263-267, Ho Chi Minh, Vietnam, September 2015.

(17) Wenjian Wang, Ye Tian, and Chang-Jun Ahn, ``A Novel Time Synchronization Scheme for OFDM Systems Based on Variational Pseudo-Noise Preamble,`` Proc. of Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT 2015), pp. 4-6, Colombo, Sri Lanka, August 2015.

(18) Chang-Jun Ahn, ``Wireless power transmission with rough beamforming method,`` IEICE Technical Report, CS2014-107, vol. 114, no. 463, pp. 87-90, February 2015.

(19) Hikaru Oka, Chang-Jun Ahn, Tatsuya Omori, and Ken-ya Hashimoto, ``IQ Imbalance and Carrier Frequency Offset Compensation Schemes for TFI-OFDM,`` Proc. of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2014), pp. 17-22, Kuching, Malaysia, December 2014.

[その他]  
ホームページ等  
[www.te.chiba-u.jp/~junny/index.html](http://www.te.chiba-u.jp/~junny/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

安 昌俊 (AHN CHANGJUN)

千葉大学大学院 工学研究科 教授

研究者番号 : 90453208