

# スマートデバイスモジュールを用いた双方向ワイヤレス電力・情報同時伝送システムの研究開発 (135003001)

## Research and Development on Wireless Two-way Power/Information Transmission Using Smart Device Modules

### 研究代表者

本城和彦 電気通信大学大学院情報理工学研究所  
Kazuhiko Honjo Graduate School of Informatics and Engineering

### 研究分担者

高山 洋一郎<sup>†</sup> 石川 亮<sup>†</sup> 斉藤 昭<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>電気通信大学  
Yoichiro Takayama, Ryo Ishikawa, Akira Saitou  
<sup>†</sup>The University of Electro-Communications

研究期間 平成 25 年度～平成 26 年度

### 概要

遠方から無線で電力を供給することで、地震等の大規模災害時における電源線遮断時も途切れることなくかつ経済的な、電力・情報伝送システムの構成を提案した。また、プロトタイプを試作しその有効性の検証を行った。単一モジュールで送受電が兼用できるよう、送電用 DC/マイクロ波変換電力増幅器、受電用マイクロ波/DC 変換整流器が切り替え可能な構成を提案し、この構成で 5.8GHz 帯 10W 級高効率送受電モジュールを開発した。さらに、効率を維持したまま伝送電力を可変とする、パルス伝送方式の有効性を実証した。また、高い空間収集効率と低いサイドローブに加えて、送受電兼用にも対応する施策として、送受電アンテナ上の電力密度分布の等しいガウスビームアレイアンテナを簡易に実現する手法を提案するとともに、試作を行いその有効性を実証した。さらに通信機能を付加するため、電力ビームを可変しない空間変調方式及び電力ビームのパルス位置変調方式の有効性を実証した。

### 1. まえがき

東北大震災の経験から、大規模災害時にも途切れない電力・情報の伝送システムが強く求められている。この施策として、遠方から無線で電力を供給する手法を検討した。このようなシステムは平時の稼働に際しても有効であることが望ましく、高い伝送効率とともに経済的なシステムであることも要求される。ここでは、送受電装置が兼用できかつ通信機能も有するシステムの基盤となるスマートデバイスモジュールに関して、適切な構成の提案と試作による有効性の検証を目指し、開発を行った。

### 2. 研究開発内容及び成果

無線電力伝送では、送電時には電力増幅器を用いて DC をマイクロ波に変換し、送電アンテナで空間を伝送する。アンテナで受電されたマイクロ波は、整流器を用いて逆に DC に変換され、電力伝送が行なわれる。単一のモジュールで DC/マイクロ波あるいはマイクロ波/DC の変換を可能にする手法として、切り替え型増幅/整流モジュールの開発を行った。この切り替えは“時間反転双対原理”によって可能なこと、また我々の提案してきた R 級（高調波リアクティブ終端型）超高効率増幅器に適用することで、増幅器と切り替え可能な双対 R 級高効率整流器が可能であることを理論的に示した。理論解析から、出力側整合回路は共通でよいが入力側整合回路は機能に応じて変える必要のあることが導かれたので、入力側回路は機能ごとに最適化して、GaN-HEMT を用いた、双対関係にある増幅器ならびに整流器を試作した。試作品の 5.4GHz における実測特性を図 1 に示す。印加電圧/出力/効率は、増幅時で 20V/1.66W/82%、整流時で 23V/2.11W/79.4%であり、双対な超高効率 R 級増幅器/整流器が実現できることが実験的にも実証された。また高出力化の検討を行い、出力/効率は増幅器で 27.5W/69%、整流器で 13.8W/49.9%を得た。

さらに図 2 に示すスイッチで入力回路を切り替える単一素子整流・増幅切替モジュールを開発し、出力 2W、効率は増幅時 76%/整流時 66%を得た。

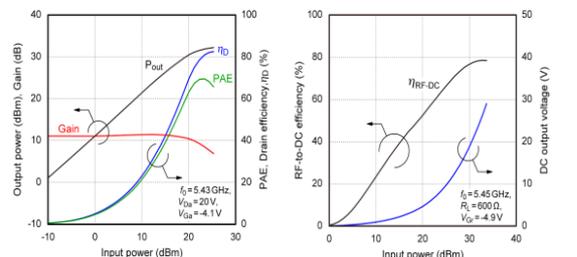


図 1 試作した装置な GaN HEMT 増幅器(左)、整流器(右)の出力・効率特性実測値

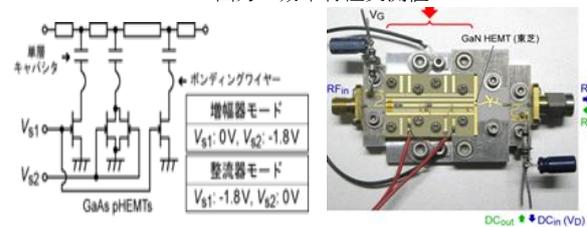


図 2 試作した増幅・整流切り替えモジュールの回路と写真

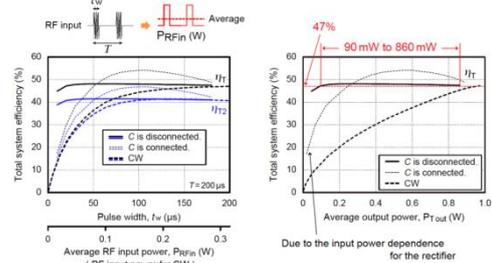


図 3 パルス幅制御 DC-5.4GHz-DC 電力変換特性

電力伝送システムの評価に関しては、屋外の電磁波放射実験ができないことから、増幅器と整流器を直結して評価した。所望の電力に制御するため、DC バイアスをパルス化し、ON 時のパルス幅を変えて出力を制御した。図 3 に実測結果を示し、最大出力の 5%以上の出力で、空間収集効率を除く送受電の総合効率 47%以上を確認した。

送受電アンテナに関しては、高い空間収集効率と不要輻射を抑制するための低サイドローブ化が要求されるが、さらに送受電兼用に対応するため、電力密度分布が送受電アンテナ上で等しくなる構成を検討した。このようなガウスビームを形成するための給電理論を確立するとともに、導出した伝送距離・電流分布の関係から伝送距離に関するスケージング則を導出し、所望の距離で送受電アンテナ上の電力分布が等しくなるガウスビームを簡素に実現する手法を開発した。また、伝送距離 500m/アンテナ半径 3.6m(空間収集効率 98%)の場合を、電波暗室内距離 2m にスケージングしたモジュールを試作した。図 4 に示したこのモジュールは、ガウス励振振幅制御のための減衰器と焦点距離制御のための位相器を備えた、16 素子線形パッチアレイアンテナで構成される。送受電アンテナ上で等電力密度分布となることは実測値でも確認でき、サイドローブはビーム中心に比べ-18dB 以下と良好な結果が得られた。また励振位相を制御することで焦点距離を変え、より近距離ではより絞られたビームが実現できることも実証した。

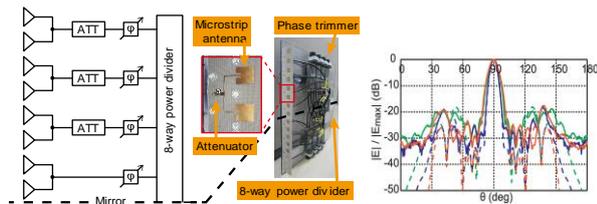


図 4 可変焦点ガウスビームアレイアンテナの試作品と焦点距離を変えた場合の放射特性 (実線:計算値 破線:実測値)

上記ではガウス入力電力分布を簡易に実現するためアッテネータを用いたが、この場合伝送効率が低下してしまう。この対策として、低損失可変不等電力分配器の開発を並行して進めた。図 5 に試作した 2 分配器の写真と実測特性を示す。分配比が±3.15dB の範囲で 2 次試作品では挿入損失は 1.2dB 以下の低損失な特性が得られた。

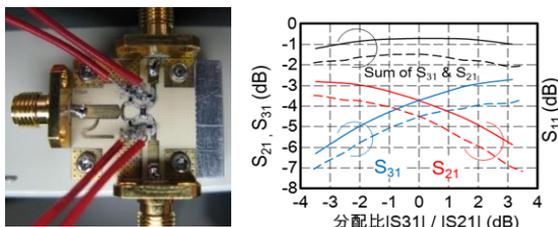


図 5 試作した 5.8GHz 帯ウィルキンソン型可変電力分配器の写真と、実測特性 破線:1 次試作 実線:2 次試作

また焦点距離を可変にするため、図 6 のガウスビーム制御用 GaN-MMIC 位相器を開発した。入力電力が大きくなると位相制御範囲は縮小するものの、5W でも 20° の位相が制御できた。GaN-MMIC は世界初の試みである。

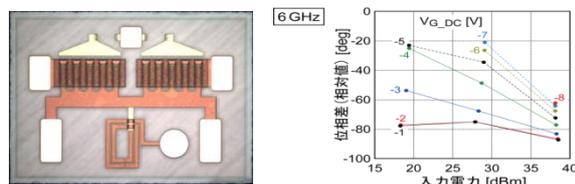


図 6 GaN HEMT 可変移相器 MMIC およびその位相変化特性

さらに、電力伝送装置に好適な、情報伝送機能も付加する方式の開発を行った。電力伝送に寄与しないサイドローブ電力を活用し、2つの散乱体の片側の散乱体特性を信号で変調することで、信号の載った散乱波を作り出し、それを受信して通信を行う空間変調方式の改善を行った。また、所望の電力を得るため DC バイアスをパルス化する場合、パルス変調波形とすることで通信を行う方式の開発とそれに用いるスイッチ MMIC の開発を行った。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本プロジェクトで開発された、送受とも R 級とした超高効率 DC-DC コンバータの動作周波数は 5 GHz 以上である。電源装置で用いられる DC-DC コンバータの動作周波数は、近年開発されたものでも 200MHz 程度であり、これを更に一桁以上上回る。今後電源装置部品の一層の超小型化に貢献できる。また、現在進められている無線電力伝送に関する規格標準化作業を経て、災害時の活用以外にも山間部・離島への給電、防衛装備品、宇宙太陽光発電システムへの活用が考えられ、実用化を進めたい。

### 4. むすび

地震等の大規模災害時における電源線遮断時も、遠方から無線で電力を供給することで、対災害性に優れかつ経済的な電力・情報の無線伝送システムの有用性を実証する検討を行い、その有効性を実証した。今後は実用化に向けた検討を進めたい。

#### 【誌上发表リスト】

- [1] S. Watanabe, Y. Takayama, R. Ishikawa, K. Honjo, "A Miniature Broadband Doherty Power Amplifier With a Series-Connected Load," IEEE Trans. on MTT, Vol. 63, No. 2, pp. 572-579, Feb., 2015
- [2] R. Ishikawa, K. Honjo, "Efficient Supply Power Control by PWM Technique for Microwave Wireless Power Transfer Systems," Proc. of APMC, pp. 1101-1103, Nov., 2014
- [3] 井上泰平, 石川亮, 斉藤昭, 本城和彦, "5.8 GHz 帯可変焦点型ガウスビームアレイアンテナの簡素化," 信学会論文誌 B, Vol. J98-B, No.9, Sept. 2015.

#### 【申請特許リスト】

- [1] 石川亮, 本城和彦, 高山洋一郎 特願 2013-126169 "増幅・整流一体型装置および通信システム" 日本平成 25 年 6 月 14 日出願
- [2] 神山仁宏, 石川亮, 本城和彦, "High Efficiency Power Amplifier", 米国, 2014/8/14 公開, US2014/0225671A1

#### 【登録特許リスト】

- [1] 黒田健太, 本城和彦, 「マイクロ波高調波処理回路」、日本、2009/09/18、2014/05/30、特許第 5549007 号
- [2] 高山洋一郎, 安藤晃洋, 本城和彦, 石川亮, 吉田剛, 「歪補償回路」、日本、2010/07/01、2014/06/27、特許第 5565727
- [3] 本城和彦, 斉藤昭, 「無線通信システム及び無線送信機」、日本、2010/10/27、2014/09/12、特許第 5608947

#### 【受賞リスト】

- [1] 吉田慎悟 平成 26 年度電子情報通信学会エレクトロニクスサイエティ学生奨励賞
- "パルス応答特性を用いた GaN HEMT 大信号モデル用多段はしご型 RC 熱等価回路の抽出手法," 2014 年 9 月