

ワイヤレス ICT スマートグリッドネットワークの研究開発 (101603006)

Research on Wireless ICT Smart Grid Networks

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, The University of Electro-Communications

研究分担者

石川 亮[†] 高山 洋一郎[†] 齊藤 昭[†]
Ryo Ishikawa[†], Yoichiro Takayama[†], Akira Saitou[†]
[†]電気通信大学

[†]The University of Electro-Communications

研究期間 平成 22 年度～平成 24 年度

概要

本研究開発では、スマートグリッドの構成要素となる通信機能付き高効率 5.8GHz 帯無線電力伝送システムの開発を行い、送電効率 60%、情報伝送レート 10Mbps の 10W 級ワイヤレス・スマートグリッドネットワークの試作と有効性の実証を目標とした。無線電力送電系の高効率化に関しては、DC 電力を超高効率にマイクロ波に変換できる 5.8GHz 帯 GaN-HEMT 高調波処理電力増幅器を開発した。付加効率は出力 2.1W で世界最高の 79.5%が得られた。またこの電力を無線で送電するための高効率アレイアンテナを開発し、総合効率 83%を得た。情報伝送に関しては送電用アンテナの周辺に設置された無給電散乱体アレイのリアクタンスを信号により変調し、無変調搬送波から信号の載った受信波を得る空間変調通信方式を開発した。このシステムにおいては、電力伝送に寄与しないサイドロブ電力を通信に活用する。1GHz の変調速度まで、50%以上の変調指数（実測値）が維持され、1Gbps の伝送速度のポテンシャルが確認された。

1. まえがき

地震等の大規模災害時には停電となる場合が多く、折角整備した災害時ネットワーク基盤も使用できなくなる可能性がある。本提案では、多様な発電ソースを需給に合わせて効率よく制御しようというスマートグリッド方式の一形態として、ワイヤレス・スマートグリッドネットワーク実現を目指す。従来の送電ビームを変調して電力/情報両方を伝送する試みでは、スペクトラムの広がりや変調波のピーク電力と平均電力の乖離などに起因する電力伝送効率の低下が懸念される。本提案では、同一搬送波空間変調方式を提案し、電力伝送効率を維持しつつ高速情報伝送も同時に実現できる方式の提案・実証を図った。

2. 研究開発内容及び成果

長距離にわたり無線で高効率に電力を伝送するためには、変換効率・ビーム収束の容易さのトレードオフの観点からマイクロ波帯に変換することが有利と考えられる。そのため、まず無線電力伝送で検討されている 5.8GHz 帯で、10W 級高出力電力増幅器の高効率化を図った。高出力化のためには高耐圧・高利得な GaN-HEMT を用い、高効率化のためには基本波・高調波を最適に処理する設計手法を考案した。図 1 は開発した高調波位相制御 2W 級 GaN-HEMT 電力増幅器の写真を示し、図 2(a)にその特性を示す。5.65 GHz で飽和出力 2.1W/最大電力付加効率 (PAE)79.5%/最大ドレーン効率 90.7%という類を見ない世界最高効率が得られた。図 2(b)は同様な設計で開発した 2GHz 帯 10W 級 GaN-HEMT 電力増幅器の特性を示し、最大出力 12.0W/最大ドレーン効率 84.9%/最大 PAE78.1%と、目標の出力 10W 以上でも高効率な特性が得られた。

無線電力伝送では、最大定格の電力伝送時に加えて出力を絞った状態でも高効率伝送が求められる。出力バックオフを大きくとった状態でも電力効率を大きく保てる増幅器技術として直列接続負荷形 GaN-HEMT ドハティ増幅器を検討した。併せて小型化・広帯域化も図り、 $\lambda/4$ インピーダンス変換回路を用いない新たな構成を提案した。

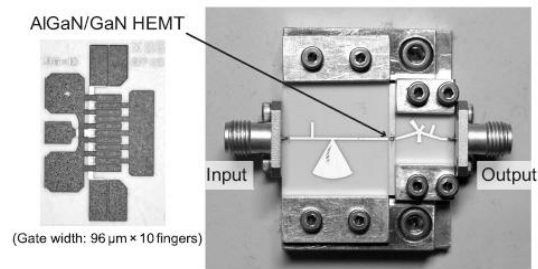
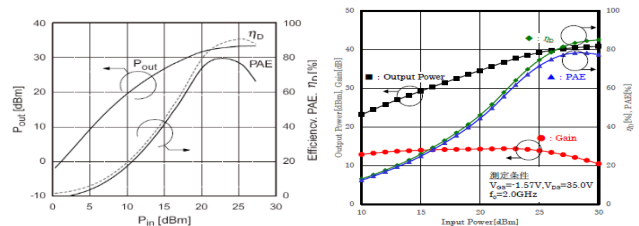


図 1 開発した高調波位相制御 2W 級 GaN-HEMT 電力増幅器



(a)5.8GHz 帯 2W 増幅器 (b)2GHz 帯 10W 増幅器

図 2 開発した GaN-HEMT 電力増幅器の特性 (実測値)

開発した 1.8GHz 帯ドハティ小型電力増幅器では、300MHz 帯域で付加電力効率 48%以上の広帯域な特性と、飽和出力から 11dB 入力バックオフ時(出力電力 29dBm)でも付加電力効率 51%の高い効率を得た。

以上の開発した増幅器を用いて、アンテナと組み合わせた電力伝送モジュールの開発を図り、図 3 に示す高効率・高利得円偏波アレイアンテナを設計・試作した。テフロン基板上に作製した 4 素子アレイの 5.66GHz における実測評価で、 S_{11} は -15dB 以下/利得 11.5dBi/トータル効率 83% が得られた。また軸比も 1.2 と良好な円偏波である。電力増幅器の付加効率とアレイアンテナのトータル効率の積として送電効率が定義されるが、この指標で見積もった送電効率は 2W 級電力増幅器に関しては 66%、10W 級電力増幅器では 65%と目標とした 60%を達成した。

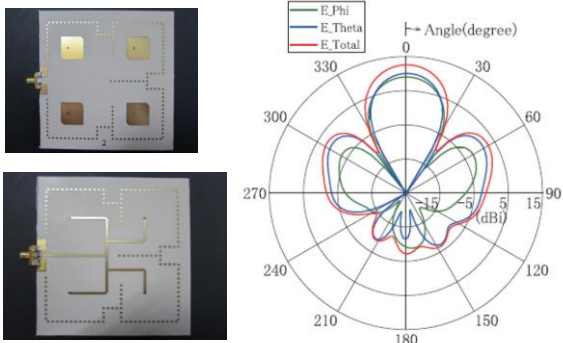


図3 開発した4素子アレイアンテナの写真と特性（実測値）

次にこのような無線電力伝送システムに通信機能を付加する場合の有効な通信手法を検討した。送電ビームに振幅変調成分があると伝送効率は低下してしまうため、送電ビームは無変調とした。通信のための電力として電力伝送に寄与しないサイドロブ電力を活用し、2つの散乱体を用いて受信アンテナに入射する2つの散乱波を作り出した。2つの散乱波は各散乱体の特性に応じて干渉するが、ここで一方の散乱体の特性を内蔵したバラクタに印加する信号電圧で変調すると、その干渉が信号電圧に応じて変化し、受信アンテナには変調された散乱波が入射する。この結果、無変調の電力ビームから信号の載った受信波を取り出すことができる。これは等価的に空間を介した伝達関数を変調することに相当し、空間変調通信方式と名付けた。

図4に示したように、散乱体の特性を制御しやすいよう集中定数素子を内蔵した構成を考案し、そのなかの容量をバラクタとした。バラクタへの印加電圧に信号を載せることで散乱体の特性が変調される。

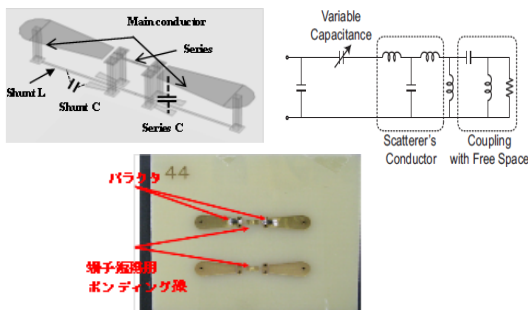
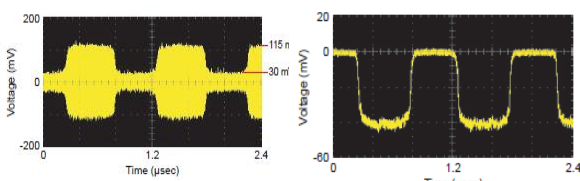


図4 散乱体の構造と試作した空間変調モジュール

図5に、空間変調モジュールに内蔵されたバラクタに1MHzの正弦波を印加した場合の、5.8GHz帯無変調波からの散乱・受信波形を示す。受信波形は1MHzの変調波で明瞭に変調されており、AM変調度は59%と実用上十分な大きさが得られた。また空間変調方式の伝送速度の上限を評価するため、変調周波数を1GHzまで高くしたが変調度は50%以上が保たれ、1Gbpsまでの速度が期待できる。



(a) 5.8GHz帯の受信波形 (b)復調器を用いて復調した波形

図5 空間変調で得られた受信波形（実測値）

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

今後は、本研究開発で得られた超高効率増幅器技術を、受電系のレクテナにも適用して、今回実現したDC/マイクロ波高効率変換と同様な高効率マイクロ波/DC変換を達成し、有線電力伝送の効率に匹敵する無線電力伝送システムの実用化を図る。今回の東北大地震でも見られたように、堅牢な通信基地局といえども電力線が遮断されると通信が途絶してしまうというリスクは、このような通信システムでは大幅に低減される。

またマイクロ波無線電力伝送は、数mの範囲にある可動な機器への給電に適しており、Active Japan^{ICT}戦略に挙げられているような種々のマルチメディア機器への無線給電の手段として有望である。このように、スマートグリッドにおいて無線電力伝送は有線電力伝送を補完する役割を担うと期待され、それに向けた研究も継続してゆく。

成果の水平展開に関しては、増幅器高効率化の手法は消費電力低減の手法として無線機器全般に波及しうる。また空間変調方式は新規な無線通信方式であり、様々なニーズを抱える通信の中の一部を担えるよう実用化を図る。

4. むすび

通信機能も有する高効率な無線電力伝送システムの開発を行った。今後はスマートグリッドの中で有線電力伝送を補完するシステムとして、実用化に向け発展させてゆく。

【誌上发表リスト】

- [1] S. Kawai, Y. Takayama, R. Ishikawa, and K. Honjo, "A High-Efficiency, Low-Distortion GaN HEMT Doherty Power Amplifier with a Series Connected Load," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 60, NO2, pp.352-360, Feb., 2012
- [2] M. Kamiyama, R. Ishikawa, K. Honjo, "5.65-GHz High-Efficiency GaN HEMT Power Amplifier with Harmonics Treatment up to Fourth Order," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 22, No. 6, June, pp. 315-317, 2012
- [3] A. Saitou, R. Ishikawa, K. Honjo, "Spatially modulated communication method using dual scatterers embedded with lumped elements for wireless power transmission," *IEICE Trans.* Vol. E96-B, No.10, Oct., 2013 (To be published)

【申請特許リスト】

- [1] 本城和彦、斉藤昭、無線通信システム及び無線送信器、日本、平成22年10月27日
- [2] 神山仁宏、石川亮、本城和彦、高効率電力増幅器、日本、平成23年8月29日
- [3] 石川亮、高山洋一郎、本城和彦、トランジスタ最適負荷特性測定装置およびトランジスタ最適負荷特性測定方法、日本、平成24年8月27日

【受賞リスト】

- [1] 神山仁宏、電子情報通信学会マイクロ波研究会優秀学生発表賞、「4次までの高調波位相制御を行ったC帯高効率電力増幅器の実験的検証」、平成23年10月21日
- [2] Kenta Kuroda, 2011 IEEE MTT-S Japan Young Engineer Award、「Parasitic Compensation Design Technique for a C-Band GaN HEMT Class-F Amplifier」、2011年12月1日
- [3] Shintaro Watanabe, APMC2012 Student Prize, "A Broadband Doherty Power Amplifier Without a Quarter-Wave Impedance Inverting Network," 2012年12月7日