

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 28 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360162

研究課題名(和文) 太陽電池で駆動可能な無線通信用低消費電力パワーアンプと発振器の研究

研究課題名(英文) Research on power amplifiers and voltage-controlled-oscillators for wireless communication systems powered by solar cells

研究代表者

吉増 敏彦 (Yoshimasu, Toshihiko)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70367176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：Si CMOS技術を用いて、太陽電池で駆動可能な電圧(0.3～0.5 V)で動作するパワーアンプICと発振器ICの新規回路を考案し、チップ試作(大学外部に委託)後、特性評価を行った。パワーアンプICは、動作周波数=2.5 GHz、動作電圧=0.5 Vで出力パワー=5 dBm、電力効率=29%を達成した。また、発振器ICは、最低動作電圧=0.28 Vで発振周波数=2.48 GHzを達成した。この動作電圧は世界トップレベルの低動作電圧である。また、動作電圧=0.5 Vにおいては、発振周波数=2.1～2.3 GHzを実現した。以上により、本研究課題の目標を上回る成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Novel power amplifier and voltage-controlled-oscillator (VCO) ICs are designed, fabricated and fully evaluated using Si CMOS technology for realizing solar cell powered ICs. The fabricated power amplifier IC has exhibited an output power of 5.0 dBm and an efficiency of 29% at a supply voltage of 0.5 V at an operation frequency of 2.5 GHz. The fabricated VCO IC has achieved minimum operation voltage of only 0.28 V which is the top level in state-of-the-art VCO technologies. In addition, the VCO IC exhibits an oscillation frequency range from 2.1 to 2.3 GHz at a supply voltage of 0.5 V. Therefore, measured performance which exceeds the goal of this study has been obtained.

研究分野：マイクロ波・ミリ波集積回路

キーワード：パワーアンプIC 発振器IC 低消費電力 太陽電池 無線通信

1. 研究開始当初の背景

スマートグリッドは、2008年に米国オバマ大統領が「グリーン・ニューディール政策」の主施策に掲げたことで、日本はじめ欧州でも開発が活発化している。スマートグリッド実現のためには、発電・蓄電技術だけでなく、電力の最適な送電網を構築することが必須である。そのためには、電力消費を適切に管理・調整することが必要となる。その意味で、スマートメータや無線ネットワーク網の構築が極めて重要な役割を担う。

2011年3月に発生した東日本大震災と原子力発電所事故により、スマートグリッド実現のためのスマートメータや無線ネットワーク網を再生可能エネルギーで構築することの重要性が高まった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽電池で駆動可能な無線通信用パワーアンプと発振器の実現にある。具体的には、スマートグリッドにおいて重要なインフラとなる、ネットワーク網とスマートメータを実現するために必要不可欠な近距離無線通信を行う高周波トランシーバ回路実現のため、最も低動作電圧化が困難な回路であるパワーアンプと発振器を取り上げ、太陽電池の標準出力電圧(0.5V)以下で動作する新規回路の創出を行う。さらに、チップ試作(大学外部に委託)とチップ評価を行うことで、動作電圧の限界を理論と実験の両方から見極める。これらにより、バッテリーレスの無線トランシーバが実現し、さらに低炭素化社会実現を加速するスマートグリッドのための近距離無線通信インフラを構成することが可能となると考える。

3. 研究の方法

研究のフェーズを2期にわけ、以下の方法を取った。

(1) 第1フェーズ(平成23年度~24年度)においては、Si CMOS技術を用いて、0.5Vで動作するパワーアンプICと発振器ICの新規回路を考案し、また、チップ試作(大学外部に委託)ならびに評価により、新規回路の有効性を確認する。

(2) 第2フェーズ(平成25年度~26年度)においては、パワーアンプと発振器のさらなる低動作電圧化と低消費電力化を進める。具体的には、MOSFETのスレショールド電圧(V_{th})以下で動作可能な制御回路を考案することで、0.5V以下の電圧で動作するパワーアンプと発振器回路を考案し、スマートメータの無線通信規格として有望な ZigBee 規格に適合することを示す。

4. 研究成果

(1) パワーアンプ IC の研究成果

① 研究目標

動作周波数は ZigBee 規格で用いられている、2.4~2.5 GHz 帯とし、動作電圧=0.5V、

出力パワー>0 dBm (=1 mW)、電力利得>10dB を目標とした。また、パワーアンプの出力・効率と動作電圧の関係を理論と実験の両面から確認するため、動作電圧=0.5V~1.2V の広範囲において実験を実施する。

② 新規回路方式の考案

MOSFET のスレショールド電圧(V_{th})以下での動作を可能にするため、MOSFET のバックゲート効果を積極的に活用した。その結果、MOSFET の V_{th} は 0.55V から 0.4V 以下に低減することが可能となった。

次に、低動作電圧かつ高効率(低消費電力)で Zigbee に求められるパワー(1mW)を出力するための新規回路を考案した。本回路は、基本的な構成は E 級動作アンプであるが、その出力回路は E 級動作のための共振回路に加えて、3次の高調波を制御する新しい終端回路を付加したものである。この3次高調波終端回路の効果により、出力の電圧波形と電流波形の重なりを少なくし、パワーアンプの効率向上を目指す。

入力のインピーダンス整合回路、バイアス回路、出力のインピーダンス整合回路、E 級動作のための共振回路、3次高調波終端回路を Si CMOS 技術を用いて、1チップに集積した。チップ試作は、富士通 eShuttle(平成24年度)と台湾 TSMC(平成26年度)を用いた。

③ パワーアンプ IC の評価結果

2回目のチップ試作で得られた成果を以下にまとめて報告する。

まず、パワーアンプの小信号特性(Sパラメータ)を評価した結果を図1に示す。ここで、動作電圧は0.5Vである。図1において、実線はICの評価結果であり、点線は設計値である。

図1からわかるように、Zigbeeの周波数帯において、パワーアンプの小信号電力利得=10.8dB、入出力リターンロス=13.5dB以上が得られた。この電力利得は目標値(10dB)を上回る高い利得である。また、良好な入力インピーダンス整合が確認された。

評価結果(実線)は設計値(点線)とよく一致しており、設計精度の高さも実証された。

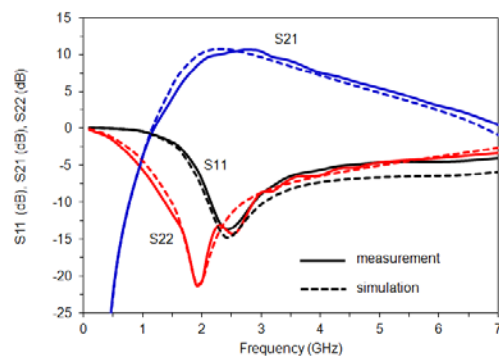


図1. パワーアンプの小信号 S パラメータの測定値。

次に、本パワーアンプ IC の高出力特性を評価するため、入力信号周波数=2.5 GHz、動作電圧=0.5 V の条件で、入出力特性を評価した。その結果を図 2 に示す。線形出力パワー=5 dBm(=3mW)、最大効率は29%が得られた。

また、本パワーアンプ IC の高出力特性を評価するため、入力信号周波数=2.5GHz、動作電圧=0.5V~1.2V の条件で、入出力特性を評価した。測定結果を図 3 に示す。図 3 では、動作電圧 (VDD) を横軸にとり、その時の出力パワー (Pout) と効率 (PAE) を横軸にとり、プロットしている。ここで、赤の実線は新規考案の回路の特性であり、黒の点線は従来の E 級アンプの特性である。

この評価結果より、目標の動作電圧=0.5 V において、出力パワー=5dBm(=3mW)、効率は29%が得られた。この出力パワーは本研究目標の3倍にあたり、目標を大きく上回る成果が得られたことを示している。

最新の太陽電池の出力電圧は 0.6V が可能である。その条件では、出力パワー=6dBm(=4mW)、効率は30%が得られることが確認された。

本研究で得られたパワーアンプの特性を表 1 にまとめる。本表より、研究目標を大きく上回る成果が得られたことが確認できる。

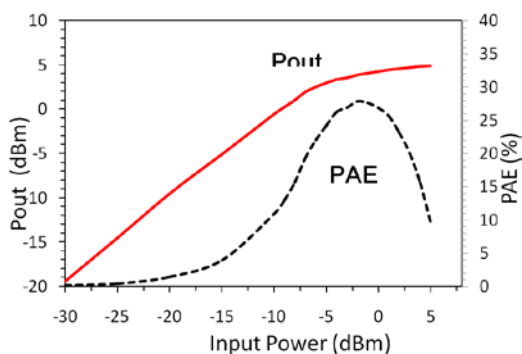


図 2. パワーアンプ IC の入出力特性の評価結果 (動作電圧=0.5V, 周波数=2.5GHz)

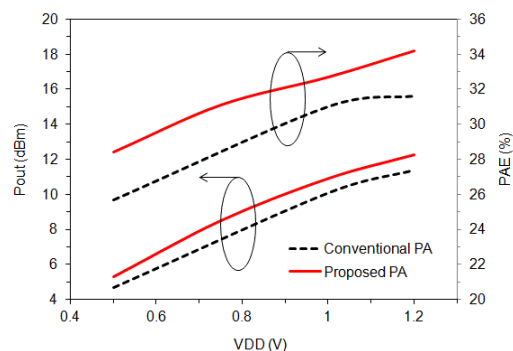


図 3. パワーアンプ IC の出力パワー (Pout)、効率 (PAE) の動作電圧依存性 (VDD) の評価結果。

表 1. パワーアンプ IC の性能まとめ

性能項目	研究目標	研究成果
動作電圧	0.5 V	0.5 V
出力パワー	1 mW 以上	3 mW
利得	10 dB 以上	10.8 dB

(2) 発振器 IC の研究成果

① 研究目標

発振周波数帯は、2.4GHz 帯をカバーし、動作電圧 0.5V 以下、出力は-10 dBm(=0.1mW) 以上である。さらに、動作電圧は理論と実験から下限値を求める。

② 新規回路方式の考案

発振器の低動作電圧化、低消費電力化のため、トランジスタを C 級で動作させる新規発振回路を考案した。本発振器は、電圧制御発振器、電力センシング回路、発振器動作モード制御回路から構成される。発振器動作モード制御回路により、電圧制御発振器は発振立ち上がり時は AB 級で動作し、発振の電力が十分高くなったところで、C 級に移行して低消費電力化が実現する。電力センシング回路は電圧制御発振器の出力電力のセンサーの役割を担う。

電圧制御発振器の低動作電圧化のため、従来の発振器で用いられていたバイアス電流源を無くし、代わりに抵抗による電圧印加方式とした。

パワーアンプ IC と同様 Si CMOS 技術を用いて 2 回のチップ試作を実施した。

③ 発振器 IC の評価結果

新規考案の発振器 IC の特性評価結果を図 4 に示す。図 4 は、動作電圧 (Vdd) を 0.3V~0.5V に設定し、制御電圧による発振周波数の可変動作を示している。

本研究の目標である動作電圧=0.5V においては、発振周波数=2.1~2.3 GHz が得られた。さらに、動作電圧を 0.3V まで下げた場合、発振周波数=2.25~2.48GHz が得られた。これらの評価結果より、Zigbee 規格が用いる電波の周波数を本発振器 IC は満たしていることが確認された。

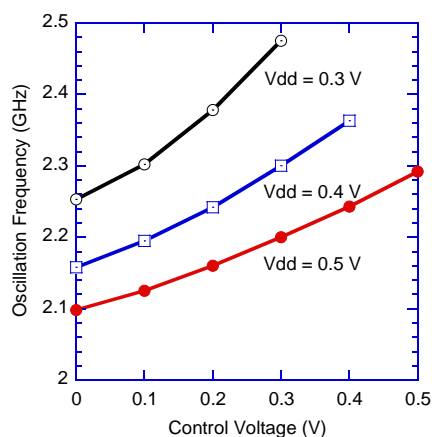


図 4. 発振器 IC の発振周波数特性の評価結果。

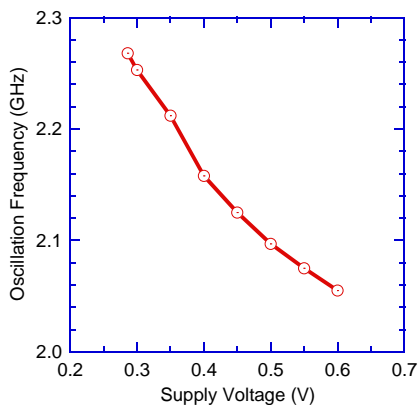


図 5. 発振器 IC の動作電圧特性の評価結果

さらに、本発振器 IC の動作電圧の下限を評価するため、実験した結果を図 5 に示す。図 5 より、発振器 IC の動作下限電圧は 0.28V であることが確認された。この動作電圧は本研究の挑戦的目標であった 0.3V を上回る成果である。

図 5 において、動作電圧=0.3V 時の消費電流はわずか 1.92mA であり、0.576mW の超低消費電力で発振器は動作できることを実証した。また、動作電圧=0.3V における出力パワーは -7dBm (=0.2mW) であり、目標値 (0.1mW) の 2 倍の性能を達成した。

さらなる発振器の性能評価として、位相雑音を測定した。Zigbee では位相雑音はそれほど厳しい規格ではないが、本発振器の応用展開を考える時、位相雑音特性は重要である。測定結果を図 6 に示す。動作電圧=0.3V、発振周波数=2.43GHz、キャリアからの離調周波数=1MHz において、位相雑音 = -111dBc/Hz の良好な特性が得られた。

図 7 は、発振器の動作電圧と位相雑音特性を比較、評価した図である。ここで、● は本研究に発振器の性能であり、● は、最新の論文発表から抜粋した性能である。

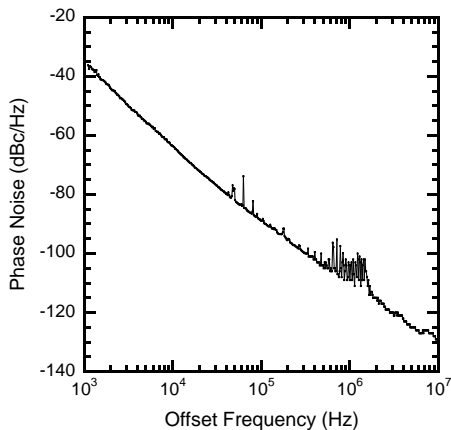


図 6. 発振器 IC の位相雑音評価結果。動作電圧=0.3V、発振周波数=2.43GHz。

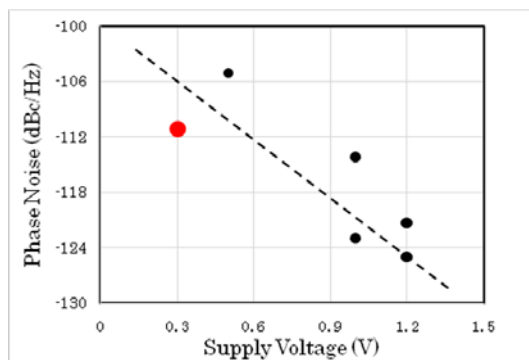


図 7. 本研究の発振器 IC の特性 (●) と最新の発表論文 (●) の性能比較。

動作電圧が低くなれば位相雑音性能が悪化するため、動作電圧と位相雑音を公平に評価するため、点線を付記している。本研究の発振器は最新の発表成果と比較して、低電圧で動作し、また位相雑音特性も優れていることが確認できた。

表 2 に、本発振器 IC の性能をまとめる。本表より、本研究の目標を大幅に上回る性能が達成されたことが確認でき、また、本研究成果は Zigbee 以外の無線通信システムへの応用も期待される

表 2. 発振器 IC の性能まとめ

性能項目	研究目標	研究成果
動作電圧	0.5 V 以下	0.28 V
発振周波数	2.4 GHz 帯	2.1~2.48GHz
出力パワー	0.1mW 以上	0.2 mW

(3) 得られた成果のまとめ

本研究課題の推進により、太陽電池の標準出力電圧である 0.5V において、Zigbee 規格を満たすパワーアンプ IC と発振器 IC を Si CMOS 技術を用いて実現できることを実証した。パワーアンプ IC においては、動作電圧 = 0.5V で出力パワー = 3mW、効率 = 29% が得られた。また、発振器 IC においては、動作電圧 = 0.28V において発振動作を確認した。また、位相雑音特性は、Zigbee のみならず他の無線通信にも応用可能な良好な特性を確認した。

以上により、本研究課題の推進により当初の目標を上回る成果が得られた。

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 2 件)

① X. Yang, Y. Uchida, K. Xu, W. Wang, T. Yoshimasu, "A 0.3-V Power Supply 2.4-GHz-Band Class-C VCO IC With Amplitude Feedback Loop in 65-nm CMOS," Springer: Analog Integrated Circuits and Signal

Processing, Vol.80, 8 pages, July, 2014.
DOI: 10.1007/s10470-014-0351-8, 査読有。

② X. Yang, K. Xu, W. Wang, Y. Uchida, T. Yoshimasu, "2.4-GHz Band Ultra-Low-Voltage LC-VCO IC in 130-nm CMOS", ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications, Vol.12, No.1, pp.30-36, Feb., 2014.
http://www.ecti-thailand.org/assets/papers/1388_pub_59.pdf, 査読有。

[学会発表] (計 11件)

① T. Kurniawan, X. Yang, X. Xu, T. Yoshimasu, "A 2.5-GHz Low Voltage High Efficiency CMOS Power Amplifier IC Using Parallel Switching Transistor for Short Range Wireless Applications," in Proc. European Microwave Integrated Circuits Conference, Sept, 2015. 査読有、(採択済)

② X. Xu, X. Yang, T. Yoshimasu, "2.4-GHz Band Ultra-Low-Voltage LC-VCO IC in 180-nm CMOS," in Proc. IEEE Electron Devices and Solid State Circuits Conference (EDSSC), 4 pages, June, 2015. Singapore, 査読有、(採択済)

③ X. Xu, X. Yang, T. Yoshimasu, "An Ultra-Low Power Supply 2.4-GHz-Band Class-C VCO IC With Amplitude Feedback Loop in 65-nm CMOS," in Proc. LSI and System Workshop, May, 2015. 北九州市、査読有。

④ T. Kurniawan, X. Yang, X. Xu, N. Itoh, T. Yoshimasu, "A 2.5-GHz Band, 0.75-V High Efficiency CMOS Power Amplifier IC With Third Harmonic Termination Technique in 0.18- μ m CMOS," in Proc. IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 3 pages, April, 2015. Florida (USA), 査読有。

⑤ T. Kurniawan, X. Yang, X. Xu, Z. Sun, T. Yoshimasu, "A 2.5-GHz Band Low-Voltage High Efficiency Class-E Power Amplifier IC With Body Effect," in Proc. International Symposium on Integrated Circuits, pp.160-163, Dec., 2014. Singapore, 査読有

⑥ T. Kurniawan, X. Yang, Z. Sun, X. Xu, T. Yoshimasu, "A 2.5-GHz 1-V High Efficiency CMOS Class-E Amplifier IC Using Back-gate Voltage Injection," in Proc. Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp.744-746, Nov, 2014. 仙台市、査読有。

⑦ X. Xu, Z. Sun, K. Xu, X. Yang, T. Kurniawan, T. Yoshimasu, "A 2.5-GHz Band Low-Voltage Class-E Power Amplifier IC for Short-Range Wireless Communications in 180-nm CMOS," in Proc. IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, TH2A, 2 pages, Aug., 2014. 南

京市 (中国)、査読有。

⑧ K. Xu, X. Yang, W. Wang, T. Yoshimasu, "44-GHz, 0.5-V Compact Power Detector IC in 65-nm CMOS," in Proc. IEEE International Wireless Symposium (IWS), TU4D, 3 pages, March, 2014. 西安市 (中国), 査読有。

⑨ X. Yang, Y. Uchida, K. Xu, W. Wang, T. Yoshimasu, "2.4 GHz-Band Ultra-Low-Voltage Class-C LC-VCO IC in 65nm CMOS Technology," in Proc. Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp.325-327, Nov. 2013. ソウル市 (韓国)、査読有。

⑩ X. Yang, K. Xu, W. Wang, Y. Uchida, T. Yoshimasu, "2-GHz Band Ultra-Low-Voltage LC-VCO IC in 130nm CMOS Technology," in Proc. IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 2 pages, June, 2013. 香港市 (中国)、査読有。

⑪ X. Yang, Y. Uchida, Q. Liu, T. Yoshimasu, "Low-Power Ultra-Wideband Power Detector IC in 130 nm CMOS Technology," in Proc. IEEE International Microwave Workshop Series on Millimeter-Wave Wireless Technology and Applications (IMWS2012), pp.52-55, Sept, 2012. 南京市 (中国)、査読有。

6. 研究組織

(1) 研究代表者 吉増 敏彦
(Toshihiko Yoshimasu)
早稲田大学 大学院情報生産システム研究科、教授
研究者番号 : 70367176

(2) 連携研究者 伊藤 信之
(Nobuyuki Itoh)
岡山県立大学 情報工学部 教授
研究者番号 : 10598519