

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289094

研究課題名(和文)電流モード・ダイレクト・デジタル・コンバージョンRF-ICの開発

研究課題名(英文)Development of Current-Mode Direct Digital Conversion RF-IC

研究代表者

末松 憲治 (SUEMATSU, Noriharu)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：20590904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波/ミリ波帯でのマルチバンドとマルチモード特性を持つダイレクト・デジタルRF送受信回路技術を開発した。送信系に関しては、電流モードDACの電流出力を直接、局発信号でスイッチングしてRF信号を生成するダイレクトデジタルRF変調器を提案した。0.8-5.7GHzのマルチバンド特性と、DACのビット数、クロック周波数を可変することでマルチモード特性を実現した。受信系に関しては、低い周波数のクロックでRF信号を直接サンプリングするダイレクトRFアンダーサンプリング受信機を提案した。S/H回路や高速電源スイッチングLNAなどを試作し、高ダイナミックレンジかつ低消費電力な特性を実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed RF circuit technologies for multi-band / multi-mode direct digital RF transceiver. For transmitter, we proposed direct digital RF modulator which consists of current mode DAC and broad-band (multi-band) LO circuits (90degree divider and LO switches). By selecting number of active bit and clock frequency (over sampling number) of the DAC, multi-mode characteristic can be achieved. For receiver, we proposed direct RF undersampling receiver which consists of high speed ON/OFF LNA and high frequency BPF type S/H IC's. By using these circuits, both high dynamic range and low power consumption can be obtained.

研究分野：無線回路

キーワード：マイクロ波 RFIC 無線 送受信機 衛星通信 CMOS

1. 研究開始当初の背景

携帯電話や無線 Local Area Network(LAN)などの急速な普及とともに、UHF～マイクロ波帯の周波数資源が逼迫しており、ミリ波帯の開拓とともに、周波数や、変調方式、ベースバンド帯域の異なる複数のワイヤレスシステムに対応することが可能なマルチバンド・マルチモード無線機の実現が望まれている。具体的には、既存のワイヤレスシステムとして、0.8GHz帯～2.1GHz帯の Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA)をはじめとする携帯電話、2.45GHz～5.8GHz帯の無線 LAN 系、5.8GHz帯の Intelligent Transport Systems (ITS)などがあり、将来的には、これらの周波数帯のほかに Digital TeleVision (DTV)などに使われる 0.4GHz帯までの UHF帯の活用、6GHz以上の高 SHF帯を用いた第5世代携帯電話などの将来ブロードバンド通信、さらには 60GHzのミリ波通信も望まれている。これらに対応できる超ブロードバンド通信用送受信機の高周波部としては、(a)UHF帯～ミリ波帯の広帯域な周波数帯をカバーすること、(b)少なくとも 100MHz以上のベースバンド帯域を持ち、かつ、多値変調に対応可能な高ダイナミックレンジ特性を低消費電力で実現することが求められている。

このような送受信機の高周波部を実現する技術として、Si-ICに集積されてきたロジック回路あるいはベースバンドアナログ回路と、化合物半導体を用いて構成されてきた高周波アナログ回路とをシリコン上に1チップ集積化した Radio Frequency IC (RF-IC)が開発され、微細化プロセス技術の進展に伴い、UHF帯～6GHz帯の無線通信機に使われるようになってきた。プロセス微細化に頼った RF-ICの高性能化に関しては、プロセス技術の先端を行く欧米、台湾などが先行しているが、第4世代携帯電話以降のブロードバンド化、ミリ波の周波数帯の開拓など、更なる広帯域・低消費電力・高ダイナミックレンジ化に対応するのが難しい状況である。

2. 研究の目的

シリコン(Si)の微細化プロセス技術の進展に伴い、UHFからマイクロ波帯の Radio Frequency IC (RF-IC)が実用化されている。プロセス微細化に頼った RF-ICの高性能化に関しては、プロセス技術の先端を行く欧米、台湾などが先行しているが、我々は、デバイス性能ではなく、アナログ回路手法を用いて高性能な RF-ICを研究・開発し、携帯電話や ETC 車載器をはじめとする各種移動体通信端末用に世界に先立ち実用化してきた。本研究では、ブロードバンド通信の発達とともに開拓されつつあるミリ波帯を含めた広帯域な特性と、多値変調を実現するための高ダイナミックレンジな特性を低消費電力で実現する広帯域な電流モード・ダイレクト・デジタル・コンバージョン RF-ICの回路技術を

確立する。

3. 研究の方法

本研究では、RF-ICの広帯域・高精度化、高ダイナミックレンジ・低消費電力化を目指して、アナログ、デジタル両方の回路手法および制御技術を、高周波アナログ回路に適用するとともに、直接デジタル信号を高周波信号に変換するダイレクト・デジタル・コンバージョン回路を開発し、RF-ICのさらなる発展を目指すものである。本研究において確立する回路技術は以下の2つである。

(1) 広帯域・高精度 RF-IC 技術

広帯域な多値変調信号を用いた超ブロードバンド通信の実現のためには、広帯域にわたり高精度な高周波アナログ回路が必要となる。本研究では、高周波アナログ送信回路に対して電流モードの DA コンバータのデジタル回路的な手法を取り入れることで、広帯域かつ高精度なダイレクト・デジタル RF 送信機回路技術を確立する。

(2) 高ダイナミックレンジ・低消費電力 RF-IC 技術

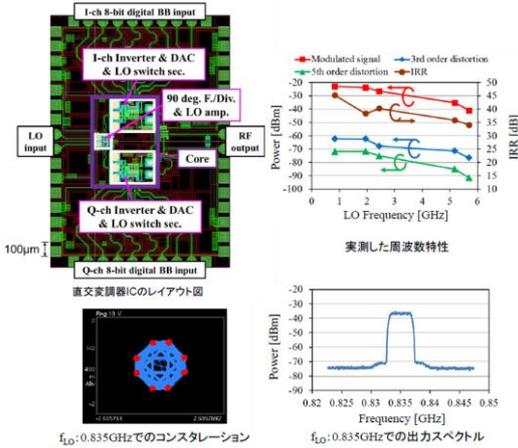
超ブロードバンド通信では、変調帯域が広がるため受信帯域雑音が増加する上に、多値変調が進むために S/N の高い送受信回路が必要となる。一方、高速化のために CMOS プロセスの微細化が進められているが、FET の耐圧は下がり、フリッカ雑音は増加してしまうため、RF 信号を直接ベースバンド信号に変換するダイレクトコンバージョン受信回路においては、十分なダイナミックレンジが確保できない問題がある。本研究では、耐圧が低くフリッカ雑音の問題となる微細 CMOS 用いても十分なダイナミックレンジを実現することができ、かつ、受信機の低消費電力化が可能なダイレクト・デジタル RF 受信回路技術を確立する。

4. 研究成果

(1) 広帯域・高精度 RF-IC 技術

0.8-5.7GHz まで動作するデジタルベースバンド信号を直接 RF 信号に変換するダイレクトデジタル RF 変調器を開発した。電流モード DAC の電流出力を直接 RF 帯の局発(LO)信号でスイッチングする構成を採用するとともに、広帯域な LO 信号の 90 度分配器としてスタティック分周器を採用することで、デジタルベースバンド信号を直接 RF 信号に変換するダイレクト・デジタル RF 変調動作と、マルチモード特性に必要なとされる広帯域な RF 出力を実現した。さらに、8bit 電流モード DAC を高次のオーバーサンプリング動作(最高で 300MS/s)させることで、広帯域にわたり低スプリアス化、高ダイナミックレンジ化が可能となり、RF 帯の狭帯域フィルタを不要とすることができた。なお、DAC のクロック周波数とビット数をベースバンド信号の帯域や変調度により調整することで、マルチモード動作が可能であ

る。



他文献におけるデジタルRF変調器との比較

	本研究	[1]	[2]
Process	90 nm	90 nm	130 nm
DAC structure	8 bit	1 bit	1 bit
Sampling rate	~300 MS/s	-4 GS/s	700 MS/s
Spurious free range	197MHz@100MS/s ⁻¹	50 MHz ²	~5 MHz ²
RF frequency	0.8-5.7 GHz	1 GHz	175 MHz
Power consumption	10 mW	120 mW	139 mW
Active area	0.14 mm ²	0.15 mm ²	5.2 mm ²

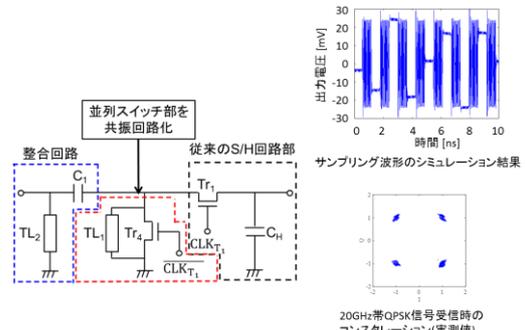
[1] Antoine Frapelet et al., "An all-digital RF signal generator using high-speed $\Delta\Sigma$ modulators," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 10, Oct. 2009.
 [2] J. Somrak et al., "A digital modulator with bandpass delta-sigma modulator," ESSCIRC, pp. 159-162, Sept. 2004.

(2) 高ダイナミックレンジ・低消費電力 RF-IC 技術

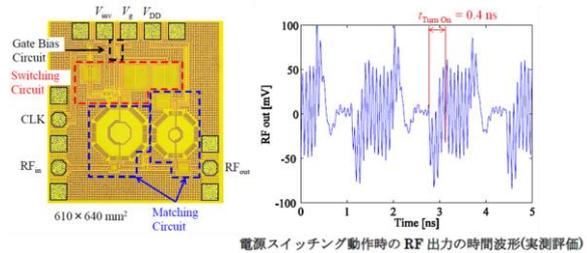
本研究では、耐圧が低くフリッカ雑音が問題となる微細 CMOS 用いても十分なダイナミックレンジを実現することができ、かつ、受信機の低消費電力化が可能な受信機構成として、直接 RF 信号を、比較的低い周波数のクロック信号で高次のアンダーサンプリングをするダイレクト RF アンダーサンプリング受信機を検討した。RF 信号を直接アンダーサンプリングする受信機に関しては、これまで、最高で 3.5GHz 帯までの論文報告がなされているが、そのサンプル/ホールド(S/H)回路をシミュレーションで動作確認をしたところ、この周波数がほぼ上限の動作周波数であることがわかった。従来の S/H 回路は、通常の ADC に使われている直流成分からサンプリング可能な回路構成となっているため、サンプリングスイッチなどによる寄生容量により、カットオフ特性がでてしまう。高周波を受信する場合、RF 帯域内の信号成分だけをサンプリングできればよいことに注目し、バンドパスタイプの S/H 回路(具体的には、スイッチ特性を改善するための、自己共振インダクタ付きの直並列スイッチ、リアクティブ整合回路の採用)を用いることで、世界最高周波数である 20GHz 帯までの動作を可能とした。この成果により、マイクロ波の国際学会である APMC2015 で Best Student Paper Award を受賞した。

このように、RF 周波数が高くなると、高次(本研究では 20 次程度)のアンダーサン

プリングを行うにも関わらず、クロック周波数が 1GHz を超えてしまう問題が出てくる。これを解決する方法として、サンプリング周波数を従来の RF アンダーサンプリング受信機の 1/2 とする方式を提案し、シミュレーションと実験により、動作検証を行った。



本受信機構成は、消費電力の大きな LO 系の回路が不要になるため、従来の受信機に比べて、ある程度の低消費電力化が見込まれるが、一方で、低雑音増幅器(LNA)の利得を高くする必要があるので、LNA の消費電力が増加する問題が出てくる。これに対し、LNA をサンプリングクロックに同期させて ON/OFF 動作することで、低消費電力化が実現できる。本研究では、従来に比べて RF 周波数が高く、クロック周波数も数百 MHz~1GHz となるため、このクロックに対応できる高速な電源スイッチング動作可能な LNA が必要となる。ここでは、12GHz 帯で 0.4nS で電源スイッチング動作可能な LNA を開発した。スイッチング速度としては、世界最高速(従来は、1.3nS)であり、1GHz 程度のクロックでアンダーサンプリング可能な受信系が実現できると考えられる。



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)

[査読付き雑誌論文, 査読付き国際学会プロシーディング論文] (計 12 件, うち 1 件招待論文)

(1) T.Koizumi, T.Owada, M.Motoyoshi, S.Kameda, N.Suematsu, "A 0.4-nS Power Switching Ku-Band Amplifier for Direct RF Undersampling Receiver," 9th Global Symp. on Millimeter Waves (GSMM 2016), June 6-8 2016, Helsinki (Finland). (to be published.)

(2) N. Suematsu, S. Kameda, M. Motoyoshi, "Direct RF undersampling receiver for high-SHF band digital beam forming," 2015 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC2015), pp.133-135, Dec. 10-12 2015, Hyderabad (India). (Invited)
DOI:10.1109/IMaRC.2015.7411448.

(3) T. Koizumi, K. Norishima, M. Motoyoshi, Daliso Banda, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "A CMOS Series/Shunt Switching Type S/H IC for Ka-Band Direct RF Under Sampling Receive," 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2015), MO1H-P.19, Dec. 6-9 2015, Nanjing (China).
DOI: 10.1109/APMC.2015.7411669.

(4) T. Koizumi, M. Motoyoshi, Daliso Banda, Osamu Wada, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "A Ku-band series/shunt switching type S/H IC for direct RF under sampling reception," 2015 45th European Microwave Conference (EuMC2015), pp.897-900, Sep. 7-10 2015, Paris (France).
DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345909.

(5) T. Owada, M. Motoyoshi, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "RFIC flip-chip interconnection using a fiber type anisotropic conductive film," 2015 IEEE Radio-Frequency Integration Technology (RFIT 2015), pp.118-120, Aug. 26-28 2015, Sendai (Japan).
DOI: 10.1109/RFIT.2015.7377906.

(6) N. Suematsu, O. Wada, S. Kameda, T. Takagi, K. Tsubouchi, "A 0.8-1.9GHz-band CMOS direct digital RF quadrature modulator," 2015 IEEE Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2015), pp.148-150, Aug. 26-28 2015, Sendai (Japan).
DOI: 10.1109/RFIT.2015.7377916.

(7) D. Daliso, M. Motoyoshi, T. Koizumi, O. Wada, T. T. Ta, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "1/2fs Direct RF Under Sampling Receiver for Multi Channel Satellite Systems," IEICE Trans. Electron., vol. E98-C no.7, pp.669-676, 2015.
DOI:10.1587/transele.E98.C.669.

(8) T. Koizumi, M. Motoyoshi, D. Banda, O. Wada, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "A Series/Shunt Switching Type Sample and Hold CMOS IC for 1GHz-Band Direct RF Under Sampling Reception," 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2014), pp.426-428, Nov. 4-7 2014, Sendai (Japan). ISSN: 2165-4727.

(9) D. Banda, O. Wada, T. T. Ta, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi,

"1/2fs Direct RF Under Sampling Reception in Different RX Channels," 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2014), pp.944-948, Nov. 4-7 2014, Sendai (Japan). ISSN: 2165-4727.

(10) D. Banda, O. Wada, T. T. Ta, S. Kameda, N. Suematsu, K. Tsubouchi, "Direct RF under sampling reception method with lower sampling frequency," 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2013), pp.500-502, Nov. 5-8 2013, Seoul (Korea).
DOI:10.1109/APMC.2013.6695103.

(11) T. T. Ta, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "A calibrationless Si-CMOS 5-bit baseband phase shifter using a fixed-gain-amplifier matrix," IEICE Trans. Electron., vol. E96-C, no.10, pp.1322-1329, Oct. 2013.
DOI:10.1587/transele.E96.C.1322.

(12) O. Wada, T. Tan, S. Tanifuji, S. Kameda, N. Suematsu, T. Takagi, K. Tsubouchi, "5 GHz-Band CMOS Direct Digital RF Modulator Using Current-Mode DAC with Idle Current," IEEE International Wireless Symposium 2013 (IWS2013), WE3B-1, April 14-18 2013, Beijing (China).
DOI:10.1109/ieee-iws.2013.6616844.

[学会発表] (計 12 件, うち招待講演 1 件)

(1) 則島 景太, 小泉 友和, 本良 瑞樹, 亀田 卓, 末松 憲治, "Ku 帯ダイレクト RF イメージ除去アンダーサンプリング CMOS 受信 RFIC," 信学ソ大, C-2-4, Mar. 15-18 2016, 九州大(福岡県福岡市).

(2) 小泉 友和, 本良 瑞樹, バンダ ダリソ一, 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, "Ka 帯ダイレクト RF アンダーサンプリング受信用サンプル・ホールド CMOS IC," 信学ソ大, C-2-8, Sep. 9-11 2015, 東北大(宮城県仙台市).

(3) 大和田 健夫, 本良 瑞樹, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内和夫, "ファイバ型異方性導電接着フィルムを用いた RFIC フリップチップ実装の検討," 信学ソ大, C-2-9, Sep. 9-11 2015, 東北大(宮城県仙台市).

(4) 小泉 友和, 本良 瑞樹, バンダ ダリソ一, 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, "ダイレクト RF アンダーサンプリング受信用 Ku 帯直並列スイッチ形 S/H-IC," 信学技報, MW2015-51, pp. 29-24, July 16 2015, 釧路市生涯学習センター(北海道釧路市).

(5) 大和田 健夫, 本良 瑞樹, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内和夫, "ファイバ型異方性導電接着フィルムを用いた RFIC フリップチップ実装の検討," 信学技報, MW2015-52, pp. 35-39, July 16 2015, 釧路

市生涯学習センター(北海道釧路市).

(6) 小泉 友和, 本良 瑞樹, バンダ ダリソー, 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, “Ku 帯ダイレクト RF アンダーサンプリング受信サンプル・ホールド CMOS IC,” 信学総大, C-2-6, Mar. 10-13 2015, 立命館大(滋賀県草津市).

(7) 小泉 友和, 本良 瑞樹, バンダ ダリソー, 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, “1GHz 帯ダイレクトアンダーサンプリング受信機用シリーズ/シャント型サンプル・ホールド CMOS IC,” 信学技報, MW2014-82, pp. 203-208, July 18 2014, 室蘭工業大(北海道室蘭市).

(8) 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 平 明德, 高木 直, 坪内 和夫, “0.8-5.7GHz 帯マルチバンドダイレクトデジタル RF 直交変調器,” 信学総大, C-2-31, Mar. 18-21 2014, 新潟大(新潟県新潟市).

(9) 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 平 明德, 高木 直, 坪内 和夫, “電流モード DAC を用いた 2GHz 帯 CMOS ダイレクトデジタル RF 変調器のオーバーサンプリング特性,” 信学ソ大, C-2-14, Sep. 17-20 2013, 福岡工業大(福岡県福岡市).

(10) N. Suematsu, D. Banda, O. Wada, T. T. Ta, S. Kameda, T. Takagi, K. Tsubouchi, “Direct RF under sampling receiver for portable VSAT application,” Thailand-Japan Microwave (TJMW2013), Dec. 2-4 2013, Bangkok (Thailand). (招待講演)

(11) 和田 平, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, “オーバーサンプリング電流モード DAC を用いた 2GHz 帯 CMOS ダイレクトデジタル RF 変調器,” 信学技報, vol. 113, no. 141, MW2013-63, pp. 97-102, July 18 2013, 稚内総合文化センター(北海道稚内市).

(12) バンダ ダリソー, 和田 平, タトアンタン, 谷藤 正一, 亀田 卓, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, “低サンプリング周波数を用いたダイレクト RF アンダーサンプリング受信方式,” 信学技報, vol. 113, no. 57, SR2013-11, pp. 57-62, May 24 2013, アステールプラザ(広島県広島市).

[図書] (計 1 件)

太郎丸, 阪口, 高田, 荒木, 眞田, 横野, 末松, 上原, 藤井, 原田, 宮本, 小島, 科学情報出版株式会社, 「ソフトウェアで作る無線機的设计法」(印刷中) 2016 年発行予定

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

○受賞 (計 1 件)

・APMC2015 Best Student Paper Award

小泉 友和, “A CMOS Series/Shunt Switching Type S/H IC for Ka-Band Direct

RF Under Sampling Receiver”

○ホームページ

末松・亀田研究室

<http://www.wit.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末松 憲治 (SUEMATSU, Noriharu)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号: 20590904

(2) 研究分担者

亀田 卓 (KAMEDA, Suguru)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号: 10343039

(3) 連携研究者

なし