

コグニティブ無線向け SiGe-BiCMOS直交変調器

堤 恒次*
新庄真太郎**
谷口英司**

SiGe-BiCMOS Quadrature Modulator for Cognitive Radio

Koji Tsutsumi, Shintaro Shinjo, Eiji Taniguchi

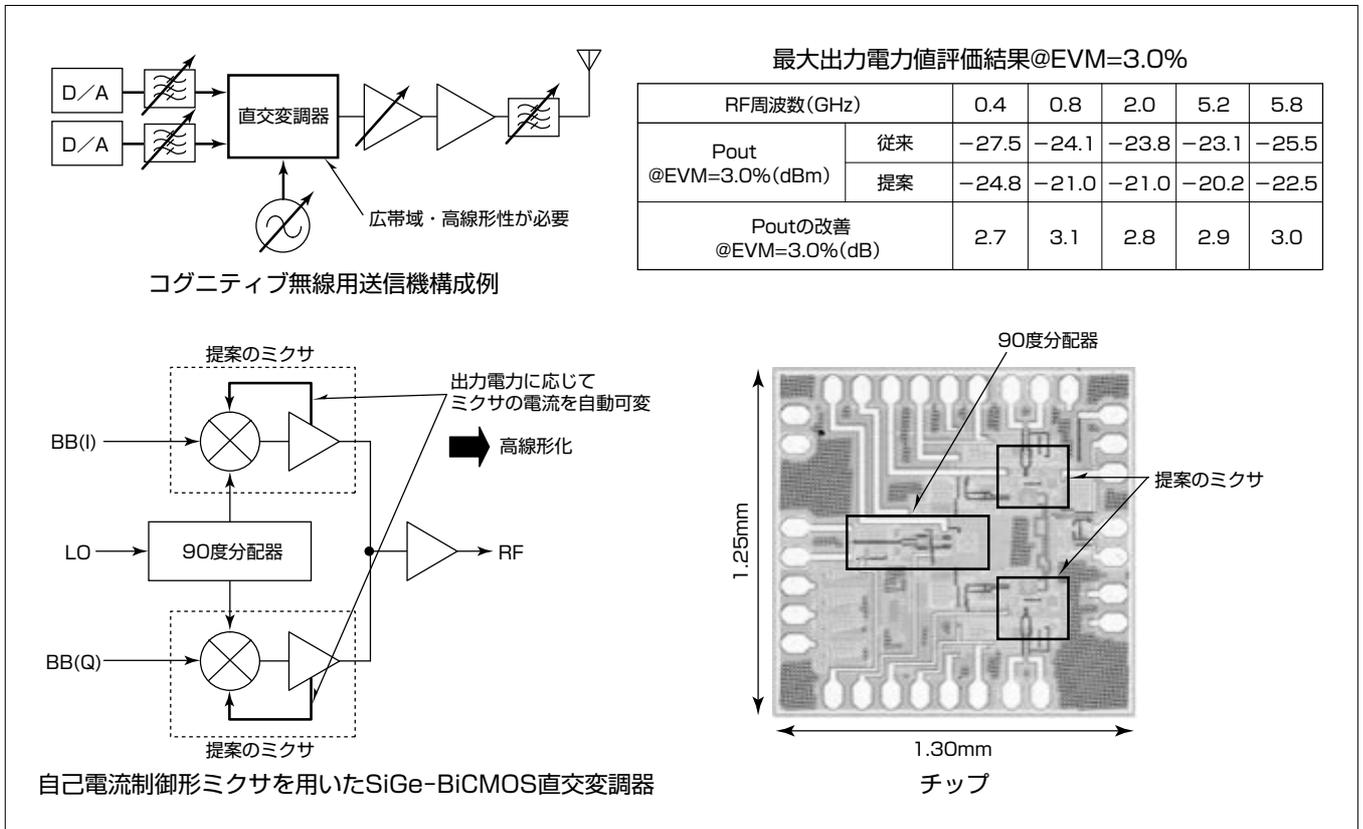
要 旨

コグニティブ無線は、端末や基地局が周囲の環境や電波状況を感じ、その状況に応じて自動的に周波数や方式を切替える無線通信システムである。このシステムに対応する無線通信機の高周波(RF)部では、想定される様々な周波数帯や変調方式に対応するため、広帯域かつ高線形なデバイスが必要となる。

このような要求を実現する上で、コンバータ回路はキーデバイスであり、様々な回路方式が提案されている。広帯域化のためには、ダイレクトコンバージョン方式によるSiGe-MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)直交変調器が提案されている。高線形化のためには、インダクタ負荷を用いた回路方式や高機能バイアス回路の適用が有効である。インダクタ負荷は基本的に狭帯域特性のため、コグニティブ無線への適用は難しい。一方、高機能バイアス回路に関しては、微細化が進んだCMOS(Complementary

Metal Oxide Semiconductor)やSiGe-BiCMOS(Bipolar CMOS)では、高速なP型トランジスタが使用可能であるため、広帯域な特性が求められるデバイスでも高線形化を実現する有効な手法である。

ここでは、直交変調器でベースバンド(BB)に対する広帯域動作時に高線形化を図る手法として、自己電流制御形ミキサ構成を述べる。この構成のミキサを用いることによって、ミキサの動作電流を出力電力に応じて自動的に変化させることを可能にし、高い線形性を得ることができる。また提案のミキサ構成に用いる帰還回路に高速なCMOSを適用することによって、信号における広帯域変調信号に対する動作も可能にする。自己電流制御形ミキサ構成をコグニティブ無線端末用SiGe-BiCMOS直交変調器に適用し、その有効性を確認した。



SiGe-MMIC直交変調器の構成と試作結果

開発したコグニティブ無線用SiGe-BiCMOS直交変調器の回路構成、チップ写真、EVM(Error Vector Magnitude)3%時の最大出力電力値評価結果を示す。提案する自己電流制御形ミキサによって従来の構成と比較し約3dBの最大出力電力改善を実現した。

1. ま え が き

周波数資源の有効利用を目的としたコグニティブ無線⁽¹⁾は、端末や基地局が周囲の環境や電波状況を検知し、その状況に応じて自動的に周波数や方式を切替える無線通信システムである。このシステムに対応する無線通信機の高周波(RF)部では、想定される様々な周波数帯や変調方式に対応するため⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾、ベースバンド(BB)に対して広帯域かつ高線形なデバイスが必要となる。

このような要求を実現する上で、コンバータ回路はキーデバイスであり、様々な回路方式が提案されている。広帯域化のためには、ダイレクトコンバージョン方式によるSiGe-MMIC直交変調器が提案されてきた。一方、高線形化のためには、インダクタ負荷を用いた回路方式や高機能バイアス回路⁽⁵⁾の適用が有効である。インダクタ負荷は基本的に狭帯域特性のため、コグニティブ無線への適用は難しい。一方、高機能バイアス回路に関しては、微細化が進んだCMOSやSiGe-BiCMOSでは、高速なP型トランジスタが使用可能であるため、広帯域な特性が求められるデバイスでも高線形化を実現する有効な手法である。

本稿では、直交変調器でBBに対する広帯域動作時に高線形化を図る手法として、自己電流制御形ミキサ構成を述べる⁽⁶⁾。この構成を用いることによって、ミキサの動作電流を出力電力に応じて自動的に変化させ、高い線形性を得ることができる。また提案のミキサに用いる帰還回路に高速なCMOS回路を適用することで、BBに対する広帯域動作も可能である。

2. 自己電流制御形ミキサの動作原理

図1に提案する自己電流制御形ミキサの回路図を示す。提案のミキサは、従来のギルバートセルミキサと自己電流制御回路の組合せ構成であり、自己電流制御回路は電流帰還回路と出力バッファ増幅器からなる。インダクタ素子を用いないため小型でかつSiGeやCMOSプロセスでは容易に実現することができる回路構成である。

以下に、自己電流制御回路を用いた場合の動作原理を示す。出力電力が小さく、出力バッファ増幅器が小信号で動作する場合、ミキサの動作電流 I_{mix_small} と出力バッファ増幅器の動作電流 I_{buff} は、式(1)の関係にある。

$$I_{mix_small} = N \cdot (I_{bias_ref} + \frac{1}{M} \cdot I_{buff}) \dots\dots\dots(1)$$

一方、出力電力が大きく、出力バッファ増幅器が大信号で動作する場合、 I_{buff} は指数関数的に増加する。 I_{buff} の電流増加量を ΔI_{buff} とすると、大信号時のミキサの動作電流 I_{mix_large} は式(2)のように表される。

$$I_{mix_large} = I_{mix_small} + \frac{N}{M} \cdot \Delta I_{buff} \dots\dots\dots(2)$$

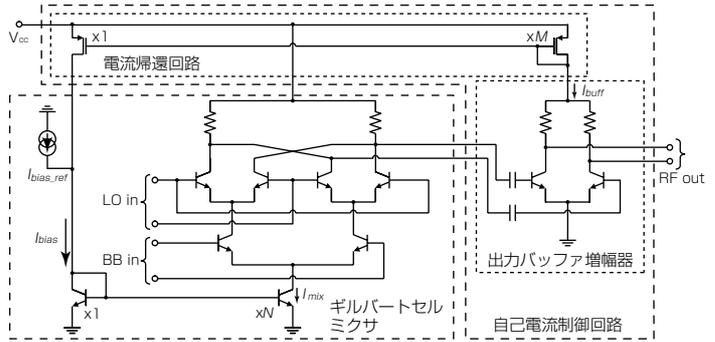


図1. 自己電流制御形ミキサの回路図

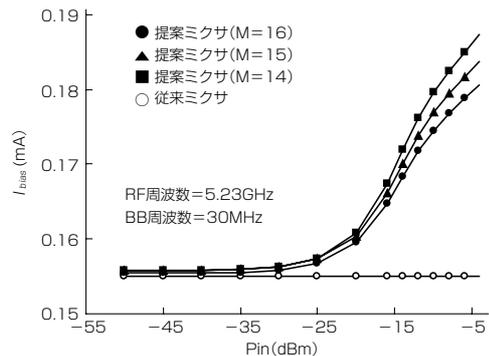


図2. ミキサの電流(I_{bias})特性シミュレーション結果

式(1)と式(2)から、高出力電力時にはミキサの動作電流が増加していることが分かる。さらにその増加量はミラー比 N 、 M 及び I_{buff} の電流増加量 ΔI_{buff} によって調整可能である。

図2に、回路シミュレーションによって求めた I_{bias} のミキサ入力電力依存性を示す。この結果から、従来のギルバートセルミキサの I_{bias} は入力電力レベルによらず一定であるのに対し、提案のミキサでは高入力電力時に I_{bias} が増加していることが分かる。また I_{bias} 増加量は、式(2)で表されるとおり、ミラー比 M を小さくするほど大きくなる。

3. 実回路設計

3.1 自己電流制御形ミキサの設計

自己電流制御形ミキサの設計は、高線形性に寄与する電流帰還回路のミラー比の設計と広帯域化に寄与する出力バッファ増幅器の電流密度の設計の2点に分けられる。

まず、電流帰還回路のミラー比の設計について述べる。図3に提案のミキサと従来のミキサの入出力特性シミュレーション結果を示す。この結果から、 -20dBm 以上の入力電力レベルで提案ミキサの変換利得(G_c)低下が抑圧されていることが分かる。ここで M を14に設定した場合には最も高い出力電力が得られるものの、15より小さくした場合には、逆に変換利得が上反る特性となる。その場合、振幅特性の非線形性によって変調特性を劣化させてしまうことが予想される。したがって、最適な M は15とした。その場合、 $P1\text{dB}$ (1dB 利得抑圧時出力)は -21.5dBm であり、従来のミキサからの $P1\text{dB}$ 改善量は 3.3dB となる。

次に、出力バッファ増幅器のトランジスタにおける電流密度設計について述べる。図4は、回路シミュレーションで

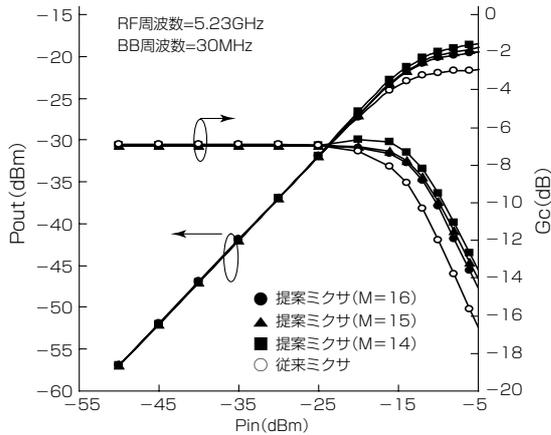


図3. ミキサの入出力特性シミュレーション結果

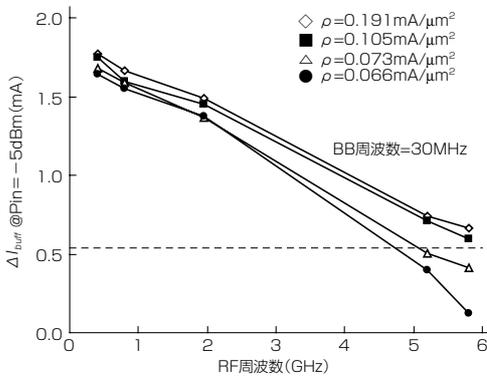


図4. ΔI_{buff} 特性のRF周波数依存性シミュレーション結果

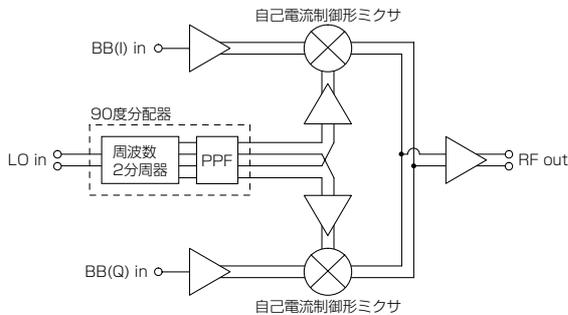


図5. 提案の直交変調器のブロック図

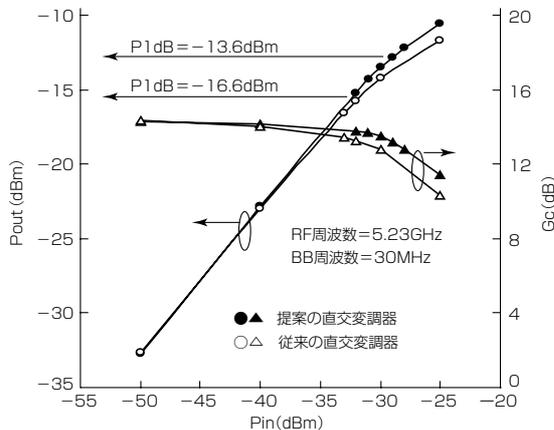


図6. 直交変調器の入出力特性シミュレーション結果

求めた、入力電力が -5 dBm の時の電流増加量 ΔI_{buff} のRF周波数依存性である。グラフから、電流密度が低いほど高周波での電流増加量 ΔI_{buff} は低下することが分かる。この結果から、提案のミキサの線形性を改善するためには、電流密度として $0.105\text{ mA}/\mu\text{m}^2$ が最適であることが分かった。

3.2 直交変調器

図5に提案のミキサを適用した直交変調器のブロック図を示す。直交変調器は局部発振信号(LO)を分配する90度分配器、自己電流制御形ミキサ、及びBB/LO/RF増幅器で構成している。LO信号を分配する90度分配器は、周波数2分周器と1段ポリフェーズフィルタ(PPF)の組合せである。PPFと組み合わせることによって高位相精度が得られ、またPPFのみを多段化した場合と比較すると広帯域化が実現できる⁽⁷⁾。

図6に提案の直交変調器とギルバートセルミキサを用いた従来の直交変調器の入出力特性シミュレーション結果を示す。提案のミキサの設計結果と同様、直交変調器でも自己電流制御形ミキサを用いることによって高入力電力レベル時の変換利得の低下を抑圧し、その結果P1dBが改善されることが確認できた。従来の直交変調器からのP1dB改善量は3.0dBである。

4. 評価結果

図7に試作したコグニティブ無線端末用SiGe-BiCMOS直交変調器のチップ写真を示す。使用したプロセスは、 $0.18\mu\text{m}$ SiGe-BiCMOSである。

図8に提案の直交変調器と従来の直交変調器の入出力特性評価結果を示す。シミュレーション結果と同様、提案の直交変調器は高入力電力レベルで利得低下を抑圧し線形性が改善している。その結果、P1dBもまた改善する。従来の直交変調器からのP1dB改善量は3.2dBであり、シミュレーション結果とはほぼ一致する結果を得た。

試作した直交変調器の変調特性を、各種システムを想定した信号を用いて評価した。図9に各条件時のコンスタレーションと変調スペクトラムをそれぞれ示す。また、表1に変調特性のまとめ、表2に、EVM3.0%を満足する最大出力電力値の評価結果を示す。EVM = 3.0%時の出力電力

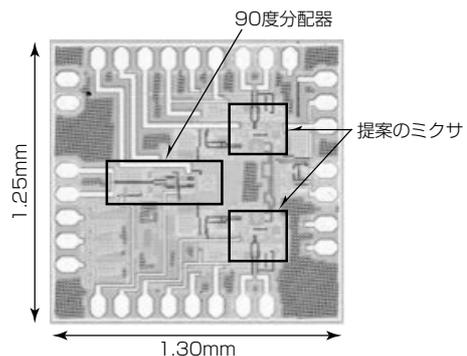


図7. 試作したコグニティブ無線端末用直交変調器のチップ

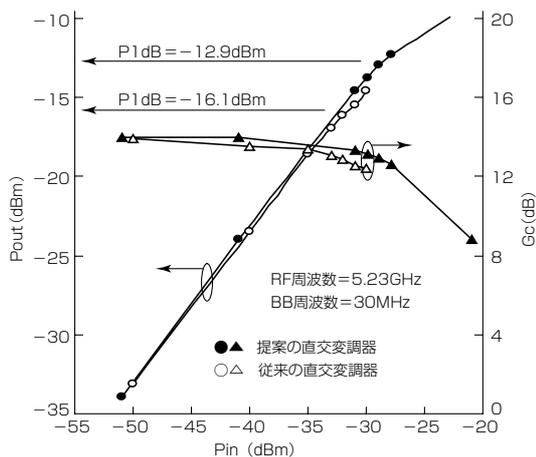


図8. 直交変調器の入出力特性評価結果

表1. 変調特性のまとめ

システム	UHF	W-CDMA		無線LAN(IEEE 802.11a)	
変調方式	OFDM/16QAM	HPSK/QPSK		OFDM/64QAM	
RF	0.4GHz	0.8GHz	1.95GHz	5.2GHz	5.8GHz
EVM	2.7%rms	1.9%rms	1.8%rms	2.4%rms	2.3%rms
Pout	-23dBm	-17.8dBm	-19.4dBm	-24.8dBm	-26dBm
LOリーク	21.2dBc	21.3dBc	22.7dBc	25.3dBc	26.8dBc

表2. EVM3.0%を満足する最大出力電力値評価結果

RF周波数 (GHz)		0.4	0.8	2.0	5.2	5.8
Pout	従来	-27.5	-24.1	-23.8	-23.1	-25.5
	提案	-24.8	-21.0	-21.0	-20.2	-22.5
Poutの改善 @EVM=3.0% (dB)		2.7	3.1	2.8	2.9	3.0

5. む す び

広帯域かつ高線形なコンバータを実現するために、自己電流制御形ミキサを開発した。自己電流制御形ミキサを直交変調器に応用して試作した結果、従来形ミキサを用いた直交変調器に比べ、0.4から5.8GHzの各種変調信号で2.7dB以上の高出力電力化を実現した。提案の回路構成は、コグニティブ無線のような無線通信システムで用いられる高線形ミキサ及び高線形直交変調器で有効な手法である。

参考文献

- (1) J. Mittra III: Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications, MoMuC'99, 3~10 (1999)
- (2) 原田博司: コグニティブ無線機の実現に向けた要素技術の研究開発, 電子情報通信学会論文誌B, **J91-B**, No.11, 1320~1331 (2008)
- (3) 末松憲治, ほか: マルチバンド・マルチモード送受信機用Si-RFIC技術, 電子情報通信学会論文誌B, **J91-B**, No.11, 1339~1350 (2008)
- (4) Tsutsumi, K., et al.: A Low Spurious 400M-6GHz SiGe-MMIC Direct Conversion Transceiver using 2fLO LO Switching Configuration for Cognitive Radio, RFIC Symposium 2008, 585~588 (2008)
- (5) Taniguch, E., et al.: Dual bias feed SiGe HBT low noise linear amplifier, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **51**, No.2, 414~421 (2003)
- (6) Shinjo, S., et al.: 0.4-5.8GHz SiGe-MMIC Quadrature Modulator Employing Self Current Controlled Mixer for Cognitive Radio, IEICE Transactions on Communications, **E92-B**, No.12, 3701~3710 (2009)
- (7) Suematsu, N., et al.: Multi-Band/Multi-Mode RFIC for SDR/Cognitive Radio Terminals, MWE2005, Microwave Workshop Digest, 249~254 (2005)

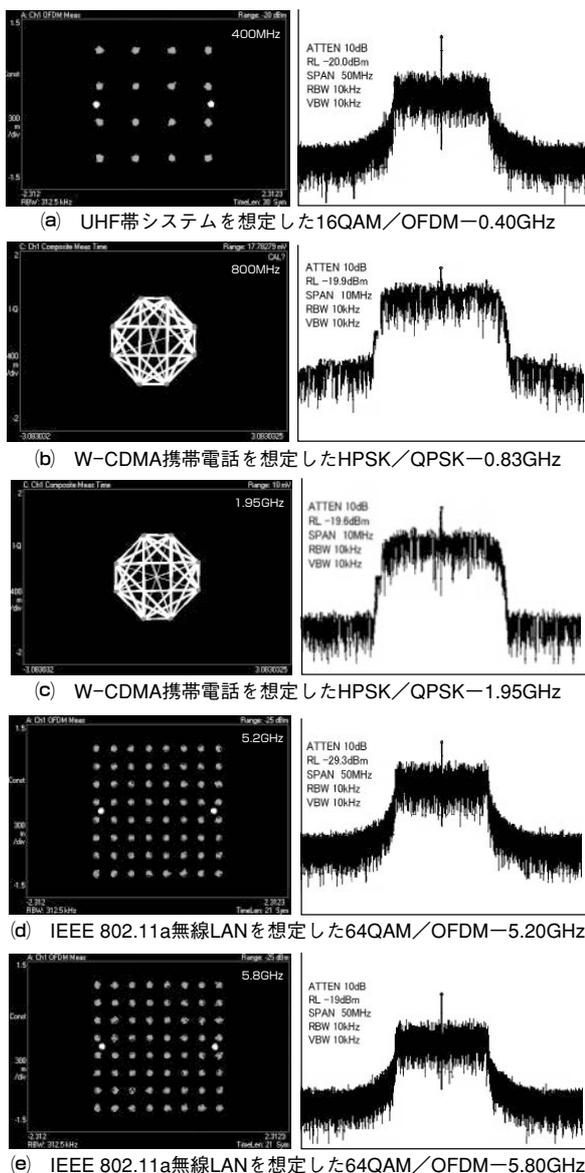


図9. コンスタレーションと変調スペクトラム評価結果

は提案構成では2.7dB以上改善しており、P1dB改善量とほぼ同等の値を得た。したがって、自己ミキサ電流制御回路は変調信号入力時でも、広帯域に線形特性改善効果を持つことが確認できた。