

高 SHF 帯ビームフォーミングアンテナ用超小型ダイレクト RF サンプリング受信機の研究開発 (155002005)

R&D of Ultra Compact Direct RF Undersampling Receiver for High SHF Band Beam Forming Antennas

研究代表者

末松 憲治 東北大学

Noriharu Suematsu Tohoku University

研究分担者

亀田 卓[†] 本良 瑞樹[†]

Suguru Kameda[†] Mizuki Motoyoshi[†]

[†]東北大学

[†]Tohoku University

研究期間 平成 27 年度～平成 28 年度

概要

本研究開発では、フリッカ雑音やクロックのジッタ雑音を考慮しながら、CMOS S/H-IC の高速化、高ダイナミックレンジ化を行い、世界最高速となる 28GHz 帯で SNR が 40dB を超える高ダイナミックレンジなダイレクト RF アンダーサンプリング受信機を実現した。さらに、クロック信号の分配を高次高調波を含む矩形波ではなく、基本波成分だけの CW 波とする構成を提案し、クロックジッタの受信特性に与える影響を定式化することで、この条件を満たす CW-矩形波変換回路を設計、前記 S/H IC と 1 チップ化した。1 チップ化 IC を並列接続した 2 ビーム合成実験において、受信機の SNR が 3dB 改善することを示し、ビーム合成が正しく行われたことを確認した。

1. まえがき

第 5 世代(5G)の移動体通信システムでは、増加するトラフィックに対応すべく、LTE-A よりも高い周波数帯である 20GHz~30GHz 帯 (高 SHF 帯) を活用することが検討されている、このように高い周波数で、100m 程度のキャパリティを実現するために、フェーズドアレーアンテナや、Massive MIMO などの、極めて多くのアンテナ素子を用いたビームフォーミング技術の適用が提案されている。これまでのフェーズドアレーアンテナでは、素子アンテナごとに RF 帯移相器を用いた構成が用いられており、ハードウェアの面から、低コスト化、小形化のためのブレークスルーが求められている。30GHz ではアンテナ素子間隔が 1cm を切る寸法となってくる状態で、RF 部の CMOS 化による集積化が 1 つの解決法として考えられるものの、従来のヘテロダイン受信機をそのまま集積しても、寸法的にも、コスト的にも困難が予想される。

本研究開発は、従来の RF アナログ回路を多用するヘテロダイン方式やダイレクトコンバージョン方式とは異なるダイレクト RF サンプリング方式を用いる受信機を提案し、アンダーサンプリング受信の適用と、高 SHF 帯サンプルホールド CMOS IC の開発により、複数の異なる信号を所定の位相でビーム合成可能な、ビームフォーミング受信機を実現することを目的とする。これにより、インダクタ、コンデンサなどの高周波回路の受動素子の寸法によらず、CMOS プロセス微細化により、チップ寸法の縮小が可能となるデジタルリッチな受信機が実現できる。5G システムの調査結果を参考にして、研究開発の具体的な目標を、28GHz 帯で SNR 30dB 以上、EVM 5%以下の受信特性の達成と、ビームフォーミング動作の検証とした。

2. 研究開発内容及び成果

本研究開発で提案する技術内容を図 1 に示す。28GHz の RF 信号を、RF 信号に比べて非常に低い周

波数のクロック信号を用いて、直接アンダーサンプリングし、復調する構成となっている。RF 信号とほぼ同じ周波数の局部発振(LO)信号を生成、分配する必要がなくなり、かつ、ダウンコンバータも不要となるため、受信機の小形化、低消費電力化、低コスト化が可能となる。特にアンテナ素子数が多い場合、LO 信号の分配回路の実現が困難であり、かつ、分配損失を補償するための増幅器も多数必要になる。本提案の構成では、RF 信号に比べて非常に低い周波数のクロック信号(1GHz 程度)を用いているため、分配回路や増幅器も安価、かつ容易に実現できる利点がある。一方、課題としては、(i) 28GHz と従来に比べて高い RF 周波数の信号を直接サンプリングする高速、高ダイナミックレンジ S/H 回路を実現する、(ii) クロック信号の周波数は低いものの、矩形波で給電すると、高次の高調波成分まで伝送させる必要があるため、基本波成分だけの CW 波でのクロック給電を実現する、ことがあげられる。

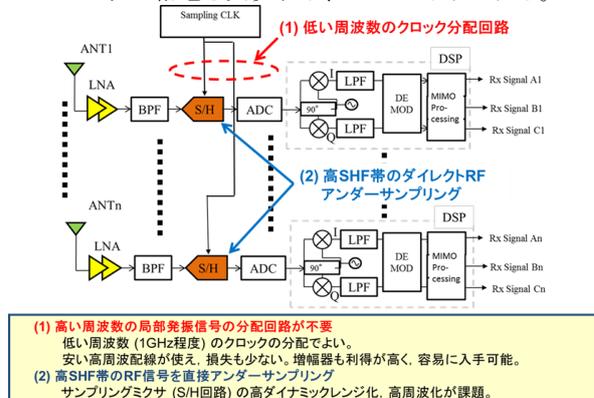


図 1 本研究開発の技術内容

(i) 28GHz 帯ダイレクト RF アンダーサンプリング受信機
平成 25 年度 SCOPE 先進的電波有効利用型(フェーズ I)で採択された「Ka/Ku デュアルバンド PAA 用ビームフ

オーミング回路の研究開発」において、当時、世界最高周波数である 12GHz 帯(それまでの最高周波数は 3.5GHz)で、ダイレクト RF アンダーサンプリング CMOS ミキサを試作し、QPSK 信号の復調動作を確認した。本研究開発では、受信 RF 周波数を 28GHz まで高速化することを目標に、半導体プロセスを 90nm CMOS から 65nm CMOS に変更し微細化することで、サンプリング用 FET スイッチの高速化、低寄生容量化を図るとともに、出力バッファ回路の低フリッカ雑音化、高ダイナミックレンジ化、整合回路などの見直しを行った。図 2 に S/H-IC の回路図および試作 IC のチップ写真を示す。28GHz 帯の RF 信号を約 1GHz の矩形波のクロック信号で 28 次のアンダーサンプリングで受信できており、CW 信号を用いた 5MHz の帯域幅での SNR は 40.5dB、16Mbps の QPSK 信号を受信した際の EVM は 3.0%であった。16QAM の多値変調の受信も可能である。

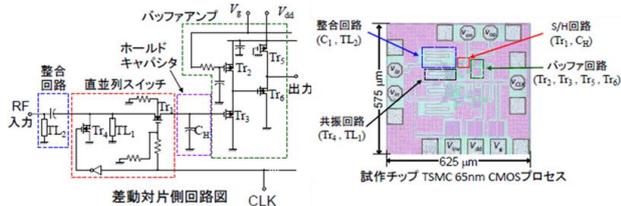
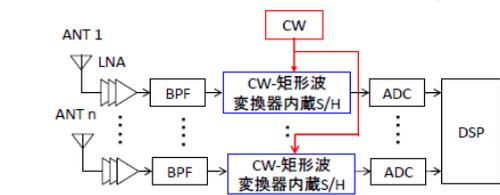


図 2 28GHz 帯 CMOS S/H-IC 回路図と IC チップ写真

(ii) クロック信号 CW 化とビーム合成検証

クロック信号を CW で給電する場合、S/H 回路を CW 波のクロックでスイッチングすると SNR が劣化するため、S/H 回路のクロック入力段に CW-矩形波変換回路を付加し、IC 内に集積する構成を提案する(本構成は特許出願済)。図 3 に提案構成を示す。机上検討で求めたクロックジッタ許容値 250fs 以下を実現する変換回路として、2 段 CMOS インバーター回路を採用し、設計値として許容値を下回る 116fs を得た。この回路を(i)で開発した 28GHz 帯 S/H-IC と一体化したものを試作した。さらに、この IC を同軸結線が可能なように、基板実装し、モジュール化したものを 2 台並列に接続して、アンテナ 2 素子分のビーム合成実験を行った。2 素子合成により、1 素子に比べて、SNR が 3dB 改善されていることを確認した。



CW信号分配
広帯域な矩形波と比較し分配が容易、広帯域な分配器が不要

CW-矩形波変換器内蔵S/H回路
回路内部で矩形波生成可能、分配時のジッタ増加を低減可能

図 3 クロック CW 化時の受信機構成

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

本研究開発においては、高 SHF 帯でのデジタルビームフォーミングアンテナ用受信機として 28GHz 帯でのダイレクトアンダーサンプリング受信機技術を開発した。この技術は、Beyond 5G(あるいは 5G+)での実現が想定される 28GHz 前後の周波数帯のフルデジタル方式 Massive MIMO への適用が期待される。さらに高周波化を進めることで、ミリ波(EHF)帯のビームフォーミングアンテナへの適用も期待される。これらの技術に関しては、大学単独

でなく、企業を含めた形で実用化開発を目指している。また、28GHz 帯の周波数帯は、衛星通信にも使われており、本技術は、リコンフィギャラブルビームやデジタルビームフォーミングアンテナと、チャネライザを搭載し、複数の送受信機を必要とする高スループット衛星(High Through-put Satellite: HTS)への適用も可能であり、装置の小形化、低消費電力化による衛星搭載機器の差別化が可能となる。

本研究開発の技術により、アンダーサンプリング次数の異なる複数周波数帯の信号をリアルタイムに一括受信することもできる。リアルタイムスペクトラムアナライザとしては、ダイレクト RF ナイキストサンプリングを用いた製品がすでに発売されているが、GHz 帯をカバーするものはない。ダイレクト RF アンダーサンプリング受信技術を適用することで、リアルタイムスペクトラムアナライザを数 GHz 帯に高速化、広帯域化できると考えられる。平成 29 年度における電波資源拡大のための研究開発「狭空間における周波数稠密利用のための周波数有効利用技術の研究開発」にて、実用化を目指した研究開発が開始された。

4. むすび

以上に示した研究開発成果を通じて、多素子アレーにも適用可能な構成として、CW 波クロック分配を可能とするダイレクト RF アンダーサンプリング受信機を 28GHz 帯で開発し、16QAM を含む多値変調への適用も可能であることを示した。今後、Beyond 5G、HTS 衛星、リアルタイム広帯域電波モニタなど様々な用途への展開、実用化が見込まれる。

【誌上发表リスト】

- [1]N. Suematsu, K. Norishima, T. Koizumi, T. Owada, M. Motoyoshi, S. Kameda, "Direct RF Undersampling Receiver for High-SHF Applications (Invited)," 2016 Thailand-Japan Microwave (TJMW2016), FR4-04, (2016 年 6 月).
- [2]則島景太、小泉友和、本良瑞樹、亀田卓、末松憲治、"Ku 帯イメージリジェクション型ダイレクト RF アンダーサンプリング CMOS 受信機," 信学技報、Vol. 116, No. 254, MW2016-111, pp. 113-118, (2016 年 10 月).
- [3]桂陽、則島景太、本良瑞樹、亀田卓、末松憲治、"ダイレクト RF アンダーサンプリング受信 CW-CLK 変換回路内蔵 28GHz S/H CMOS IC," 信学総大、C-2-18, (2017 年 3 月).

他 計、国際学会 2 件、研究会 4 件、大会 5 件。

【申請特許リスト】

- [1]末松、亀田、本良、「イメージリジェクション形 RF アンダーサンプリング受信機」、日本国特願 2016-035852、2016 年 2 月出願済。
- [2]末松、亀田、本良、「受信装置」、日本国特願 2017-034506、2017 年 2 月出願済。
- [3]末松、亀田、本良、「マルチチャネル受信機」日本国特願 2017-070736、2017 年 3 月出願済。

【受賞リスト】

- [1]M. Kazuno, TJMW Young Researcher Encouragement Award, 2016 年 6 月。
- [2]則島景太、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ学生奨励賞、2017 年 3 月。

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

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