

CMOS ミリ波帯無線機の周波数利用効率改善に関する研究開発 (135003011)

Spectrum-Efficient CMOS Millimeter-Wave Transceiver

研究代表者

岡田 健一 東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻

Kenichi Okada Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 25 年度～平成 26 年度

概要

世界で初めて、CMOS 無線機により 64QAM 変復調でのミリ波帯無線通信を実現した。無線通信規格に定められた 60GHz 帯の 2.16GHz 帯域を用いて、10.56Gb/s の通信速度(64QAM)を達成した。通信距離は最大で 14.2m であった。2 チャンネルを束ねて用いることで 21.12Gb/s の通信速度(64QAM)を、4 チャンネルを束ねることで世界最速となる 28.16Gb/s の通信速度(16QAM)を達成した。消費電力は送信時に 251mW、受信時に 220mW であった。これらの無線機の 2 系統分を単一集積回路上チップに搭載することに成功し、アイソレーション特性から 2xMIMO が可能であることを示した。CMOS ミリ波帯無線機による 64QAM の実現は世界初の快挙であり、伝送速度も従来の世界記録より 40%向上させることに成功した。

1. まえがき

2.4/5GHz 帯を用いる無線 LAN 規格である IEEE802.11a/b/g/n/ac では、64QAM や OFDM の利用による周波数利用効率の改善、チャンネルボンディングによる広帯域化、MIMO による空間多重化により、年々伝送速度を向上させている。IEEE802.11ac 規格においては 8 ストリームの MIMO を用いることにより、160MHz の無線帯域に対して 6900Mb/s の伝送速度(帯域の 43 倍)を規定しており、極めて高い周波数利用効率が可能である。IEEE802.11 規格が策定されて約 15 年が経ち、60GHz 帯を用いる IEEE802.11ad が策定されている。1 チャンネルあたり 2.16GHz の帯域が利用可能であり、最大 4 チャンネルで計 8.64GHz の無線帯域が利用可能である(図 1)。その非常に広い帯域を活用し、16QAM 変調により 1 チャンネルあたり最大 7.04Gb/s の RF 伝送レートの実現が可能であるが、周波数利用効率としては高々帯域の 3.3 倍である。64QAM により高速化した 802.11a/g や、チャンネルボンディングと MIMO により高速化した 802.11n/ac に対し、現状の IEEE802.11ad (60GHz, QPSK/16QAM) は未だ IEEE802.11b (2.4GHz, QPSK/CCK)相当であり、高速化の余地が大きい。

2. 研究開発内容及び成果

本研究開発の目的は、ミリ波帯無線機の周波数利用効率を向上させることである。CMOS 無線機において、これまで実現されていなかった 64QAM による通信を可能とし、1 チャンネルあたり 10.56Gb/s の無線伝送速度を実現した。また、60GHz 帯で規定される 4 チャンネルを同時利用することにより 16QAM において 28.16Gb/s、64QAM において 42.24Gb/s の無線伝送速度を実現した。以降、詳細を説明する。

本ミリ波無線の実現にあたり、一般的なデジタル集積回路で用いられる 65nm CMOS プロセスを用いて設計・製造した。無線機の構成として、広帯域化が可能なダイレクトコンバージョン型を採用した(図 2)。直交変復調に必要な局発振信号の生成において、注入同期現象を用いる回路方式により低位相雑音化を実現した。受信ミキサはカレントブリーディングにより変換性能の向上を果たし、また、改良型 Flipped-Voltage-Follower アンプを用いることで 4 チャンネル分の平坦性を実現する周波数特性を実現した。

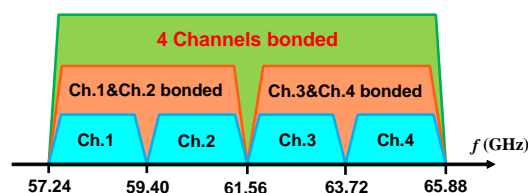


図 1 60GHz 帯チャンネル割り当て(IEEE802.11ad/ay 規格)

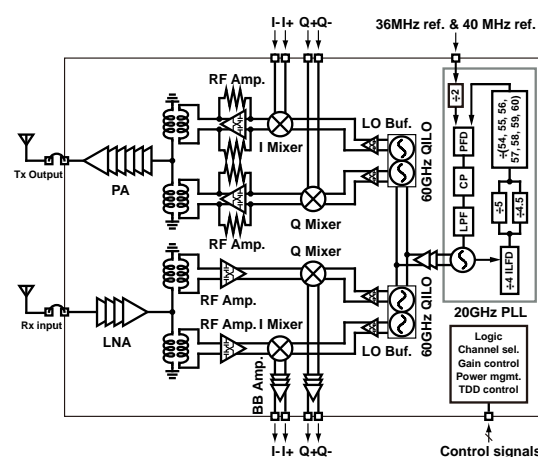


図 2 60GHz フロントエンドのブロック図 (1 系統分)

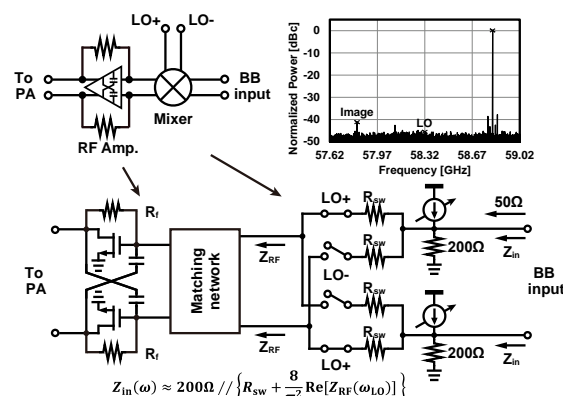


図 3 ミキサファースト型変換器

図 3 に送信ミキサを示す。従来はミキサに前置アンプが必要であったが、受動ミキサのインピーダンス変換作用を利用し、60GHz のインピーダンスをベースバンドにダウ

ンコンバートすることにより、ミキサの入力インピーダンスを 5GHz 以上にわたり平滑化することに成功した。また、シャント抵抗により広帯域化を行い、可変電流源と組み合わせることにより、LO リークをキャンセルすることに成功した。

図4に測定系を示す。開発した CMOS チップはボード上に実装した。送信側ボードには任意波形発生装置により作成した信号を入力し、アンテナにより無線伝送され、受信側ボードからの出力をオシロスコープにより観測し、変調精度(EVM)を測定した。測定結果を表1および図5にまとめる。IEEE802.11ad 規格に準拠し、シンボルレートは 1760MS/s とした。レイズドコサインフィルタ($\alpha=25\%$)により、IEEE802.11ad のスペクトラムマスクを満たすことを確認した。それぞれ伝送速度は 10.56Gb/s である。Channel4において、送信 EVM は-28.8dB であり、送受貫通時の EVM は-26.3dB であった。また、4チャンネル同時使用時に、送受貫通 EVM が-17.2dB を達成し、16QAM の貫通を実測により確認した。この時の伝送速度は 28.16Gb/s である。64QAM は世界初の快挙であり、4チャンネル同時利用による 16QAM も世界初の成果である。同時に2つの世界記録を達成した。伝送距離は、QPSK 変復調時に 14m であった。消費電力は送信機 186mW、受信機 155mW、発振器 64mW であった。また、この無線機を1チップに2系統搭載することで MIMO 化を実現し、どちらの送受信系においても 28.16Gb/s の送受信が可能であることを確認した。また、64QAM においても、2チャンネル同時利用による 21.12Gb/s の無線通信速度を世界で初めて実現した。

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

本研究開発では安価で大量生産が可能な CMOS トランジスタ技術を用いており、その成果はスマートフォン、タブレット、ノート PC などの携帯端末への組み込みが可能である。また、実際に動作する CMOS 集積回路による無線機として既に実装されており、デジタルベースバンド回路と組み合わせることで、早期の実用化が可能な成果である。具体的な取り組みとして、60GHz 帯を用いる短距離超高速無線機として協力会社を通して製品化に取り組んでいる。その他、第四世代の LTE-Advanced に続くミリ波を用いた第五世代(5G)携帯電話としての展開や、また、そのための大容量無線バックホールとしての利用が期待できる。

4. むすび

ミリ波無線機の研究は世界中の研究機関や企業が参画する国際的にも非常に競争の激しい分野であるが、その中においても一定の成果を残すことができたのは、本研究開発推進制度の支援によるところが大きい。ここに感謝の意を示すとともに、今後、研究自体の深化および実用化に向けて邁進したい。



図4 測定系の構成

Channel/Carrier freq.	ch.1 58.32GHz	ch.2 60.48GHz	ch.3 62.64GHz	ch.4 64.80GHz	ch.1-ch.4 Channel bond
Modulation	64QAM				16QAM
Data rate*	10.56Gb/s	10.56Gb/s	10.56Gb/s	10.56Gb/s	28.16Gb/s
Constellation**					
Spectrum**					
TX EVM**	-27.1dB	-27.5dB	-28.0dB	-28.8dB	-20.0dB
TX-to-RX EVM***	-24.6dB	-23.9dB	-24.4dB	-26.3dB	-17.2dB

表1 測定結果のまとめ

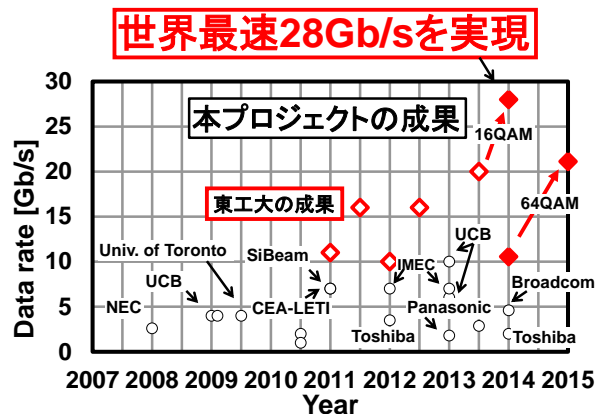


図5 伝送速度の国際競争

【誌上发表リスト】

- [1] K. Okada, "60GHz WiGig Frequency Synthesizer Using Injection Locked Oscillator," Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (2014年6月1日)
- [2] K. Okada, "A Millimeter-Wave CMOS Transceiver Toward More Than 300Gbps," Asia-Pacific Microwave Conference (2014年11月7日)
- [3] K. Okada, "28Gbps Millimeter-Wave CMOS Transceiver," Thailand-Japan MicroWave (2014年11月27日)

【参加国際標準会議リスト】

- [1] IEEE・802.11 Working group, Atlanta, 2015年1月11日~16日

【受賞リスト】

- [1] 岡田健一、末松安晴賞、2015年6月4日
- [2] D. Yang, W. Deng, T. Ueno, T. Siriburanon, S. Kondo, K. Okada, A. Matsuzawa, IEEE/ACM ASP-DAC, Best Design Award, 2015年1月20日
- [3] 岡田健一、日本学術振興会賞、2014年2月10日

【報道掲載リスト】

- [1] "東工大、ホットキャリアによりトランジスタ性能を回復する技術を開発"、マイナビニュース、2015年2月24日
- [2] "28Gb/s wireless data rate achieved with millimeter-wave transceiver"、Tokyo Tech News、2014年11月18日
- [3] "ミリ波無線技術の研究—世界最速の28Gb/sの伝送速度を達成—"、東京工業大学 産学連携推進本部 若手研究者紹介、2014年10月10日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.ssc.pe.titech.ac.jp/~okada/>