

平成26年2月7日

東京工業大学広報センター長  
大谷 清

## ミリ波帯無線機で毎秒 28Gbit の伝送速度を達成 — 64値変復調が可能な世界初の60GHz帯無線機を開発 —

### 【概要】

東京工業大学大学院理工学研究科の松澤昭教授と岡田健一准教授らの研究グループは、28Gb/s(毎秒 280 億ビット)伝送が可能な 60GHz(600 億ヘルツ)ミリ波無線機を開発した。無線信号の位相と振幅の両方を使って一度に 6 ビット分の情報を送る 64QAM<sup>(用語1)</sup>という変調方式に対応した世界初の 60GHz 帯無線機である。従来方式では変調帯域が広げられず、伝送速度を 20Gb/s 以上にできなかった。同グループは広帯域化が可能なミキサファースト型の送信機を開発し、この問題を解決した。

開発した無線機は最小配線半ピッチ 65nm (ナノメートル) のシリコン CMOS プロセスで試作した。IEEE802.11ad/WiGig 規格<sup>(用語2)</sup> など 60GHz 帯ミリ波無線通信の各種国際標準規格に準拠する無線通信が可能である。消費電力は送信機 186mW (ミリワット)、受信機 155mW、発振器 64mW と低く、携帯電話などに搭載可能であり、ミリ波無線通信の実用化につながる。

本成果は 9 日からサンフランシスコで開かれる「ISSCC (国際固体回路国際会議)」で 11 日に発表する。

### ●研究の背景・意義

東工大の松澤教授と岡田准教授らのグループが開発したミリ波帯無線機は、60GHz 帯を用いる無線通信規格 IEEE802.11ad/WiGig<sup>(用語2)</sup> に準拠し、世界で初めて 64QAM<sup>(用語1)</sup> による無線通信を実現した。

特徴を簡単にまとめる。

- ① ミリ波帯無線集積回路として世界で初めて 64QAM<sup>(用語1)</sup> による無線送受信に成功した。
- ② ミリ波帯無線集積回路として世界最高速である 28.16Gb/s の伝送速度を達成した。

- ③ 広帯域特性を新規ミキサファースト型送信機により実現した。
- ④ 60GHz 帯無線規格である IEEE802.11ad 規格<sup>(用語2)</sup>に準拠した。64QAM, 16QAM, QPSK<sup>(用語1)</sup>の規格上すべての変調方式に対応した。
- ⑤ 消費電力は送信機 186mW、受信機 155mW、発振器 64mW と低く、携帯電話等に搭載可能。

現在、携帯電話や無線 LAN などの公衆向け無線通信機器には、6GHz 以下の周波数が利用されている。6GHz 以下の周波数帯は既に様々な無線通信に利用されており、それぞれの無線通信規格で利用できる周波数帯域はごく限られたものである。実用化されている中で一番高速な無線 LAN 規格である IEEE802.11ac でも 5GHz 帯における 160MHz の周波数帯域しか利用できない。無線伝送速度は周波数帯域で制限されるため、このような逼迫した 6GHz 以下の周波数を利用する限り、今以上の大幅な速度向上は期待できない。

そのような中、近年注目を集めているのは 60GHz 帯を用いるミリ波無線通信である。60GHz では最大で 9GHz の周波数帯域が免許不要で利用可能であり、大幅な通信速度の向上が期待できる(図1)。60GHz 帯無線規格には IEEE802.11ad, WiGig, WirelessHD, IEEE802.15.3c, ECMA-387/ISO/IEC13156 等があり、共通して 4 チャンネルの割り当てがあり、それぞれ 2.16GHz の帯域を持つ。4 チャンネルあわせると 8.64GHz 帯域となる。5GHz を利用する IEEE802.11ac 規格で利用される 160MHz 帯域に比べて 54 倍広い。RF フロントエンドのデータレートとして、64QAM 変調<sup>(用語1)</sup>を用いれば 1 チャンネル 2.16GHz 帯域あたり 10.56Gb/s の無線通信が実現できる(表1)。また、16QAM<sup>(用語1)</sup>により、4 チャンネル束ねた 8.64GHz により 28.16Gb/s の無線通信が実現できる(表2)。本開発品では 64QAM による 10.56Gb/s と 16QAM による 28.16Gb/s の両方を実現した。それぞれ世界初の成果である。

デジタル回路で一般に用いられるシリコン CMOS 集積回路として実装され、回路面積は 3.9mm<sup>2</sup> と小さい。消費電力は送信機 186mW、受信機 155mW、発振器 64mW と低く、携帯電話などのモバイル機器に搭載可能な成果である。

## ●技術内容

今回開発した回路は、64QAM<sup>(用語1)</sup> 変復調による無線送受信が可能な世界初の 60GHz 帯ミリ波無線機である。16QAM 変調においては、最大 28Gb/s の無線通信速度を実現した。従来方式では変調帯域が広げられず、伝送速度を 20Gb/s 以上にできなかった。同グループはミキサファースト型の送信機を開発し、この問題を解決した。

図3に無線機全体の回路ブロック図を示す。ミキサファースト型送信機によりベースバンドにおける超広帯域特性を実現した。受信機では Flipped Voltage Follower による広帯域高線形開ループアンプを用いた。また、位相雑音改善のために、以前同グループから報告のあ

った注入同期型の発振器(QILO)を用いた。

図4に送信機の回路を示す。従来、ソフトウェア無線用受信機として知られていたミキサファースト型受信機の技術を、ミリ波帯送信機に応用した。ミキサファースト型受信機ではRF信号がミキサに入力され、BB信号(BaseBand: ベースバンド)に変換される。RF入力側から見ると、ベースバンドのLPF特性がアップコンバートされてBPF特性を実現できる。一方、ミキサファースト型送信機では、BB入力側からみると、RF側のBPF特性がダウンコンバートされてLPF特性を実現できる。この作用を用いると、BB側において5GHz以上の非常に広帯域な利得および入力インピーダンス特性を実現できる。ミリ波帯において10GHz以上の利得の平坦性を実現するのはBB帯に比べて容易であることに基づく。ミリ波帯側の利得および入力インピーダンスの広帯域平坦性を、抵抗帰還型の差動増幅器とパッシブミキサを組み合わせることにより実現した。

図5にチップ写真と各部の消費電力を示す。CMOS 65nmプロセスにより製造した。デジタル回路で一般に用いられるシリコン CMOS 集積回路として実装されている。回路面積は、送信機 1.035mm<sup>2</sup>、受信機 1.25mm<sup>2</sup>、発振器 0.90mm<sup>2</sup>、制御回路 0.67mm<sup>2</sup>である。

表3に、測定結果をまとめる。60GHz帯で規定される4チャンネルすべてにおいて64QAM変調による送受信を確認した。変調性能を表すEVMで-29dBを達成した。送受信込みのEVMにおいて-26dBの性能を達成した。64QAM利用時の伝送速度は1チャンネルあたり10.56Gb/sである。4チャンネルすべて束ねて利用することにより16QAM変調で28.16Gb/sの伝送速度を達成した。

表4および図6に、これまでに学会等で報告のあったミリ波帯無線機に対する性能比較を示す。今回開発した無線機は、世界で初めて64QAMによる無線送受信をCMOSミリ波無線機により実現した。60GHz帯で規定される4チャンネルすべてにおいて送受信を確認した。4チャンネルすべて束ねて利用することにより世界で初めて16QAM無線通信により28.16Gb/sの伝送速度を達成した。

#### ●発表予定

この成果は、2月9日～13日にサンフランシスコで開催される「2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2014):2014年IEEE国際固体回路国際会議」のセッション「Session 20 – Wireless Systems」で発表する。講演タイトルは「A 64-QAM 60GHz CMOS Transceiver with 4-Channel Bonding (4チャンネルボンディングを実現した64QAM 60GHz帯CMOS無線機)」である。現地時間2月12日9時30分から発表する。

【論文著者】 Kenichi Okada (岡田健一：准教授), Ryo Minami (南亮：修士課程卒業生), Yuuki Tsukui (津久井裕基：修士課程卒業生), Seitaro Kawai (河合誠太郎：修士課程学生), Yuuki Seo (瀬尾有輝：修士課程学生), Shinji Sato (佐藤慎司：修士課程学生), Satoshi Kondo (近藤智史：修士課程学生), Tomohiro Ueno (上野 智大：修士課程学生), Yasuaki Takeuchi (竹内康揚：修士

課程卒業生), Tatsuya Yamaguchi (山口達也 : 修士課程卒業生), Ahmed Musa (博士課程卒業生), Rui Wu (博士課程学生), Masaya Miyahara (宮原正也 : 助教), and Akira Matsuzawa (松澤昭 : 教授)

なお、本研究は総務省委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施された。

#### 【用語説明】

用語 1 : QPSK 変調、16QAM 変調、64QAM 変調

変調方式の種類。QPSK は位相偏移変調の一種。一回の変調でそれぞれ 4 値を用い、それぞれ 2bit の情報伝送が可能である。16QAM および 64QAM は振幅情報も用いる直交位相振幅変調の一種であり、位相と振幅の両方に変調をかけることにより、一回の変調でそれぞれ 4bit, 6bit の情報伝送が可能である。

QPSK, 16QAM, 64QAM の順に必要な信号純度が高くなり、回路の設計が難しくなる。

用語 2 : IEEE802.11ad 規格

IEEE802.11ad 規格は、IEEE802 委員会下の IEEE802.11 ワーキンググループが標準化を行った 60GHz 帯のミリ波を用いる無線通信であり、最大約 7Gb/s(プリアンプル含まず)の無線通信が可能である。その他、IEEE802.11ad 規格、WiGig 規格、WirelessHD 規格などが 60GHz 帯を用いる無線通信であり、RF フロントエンドでは共通のものが利用可能である。

#### 【お問い合わせ先】

東京工業大学大学院理工学研究科電子物理工学専攻 岡田健一

TEL: 03-5734-2258 FAX: 03-5734-3764

Email: okada@ssc.pe.titech.ac.jp

#### 【会議公開情報】

<http://isscc.org/>

<http://www.miracd.com/ISSCC2014/PDF/ISSCC2014AdvanceProgram.pdf>

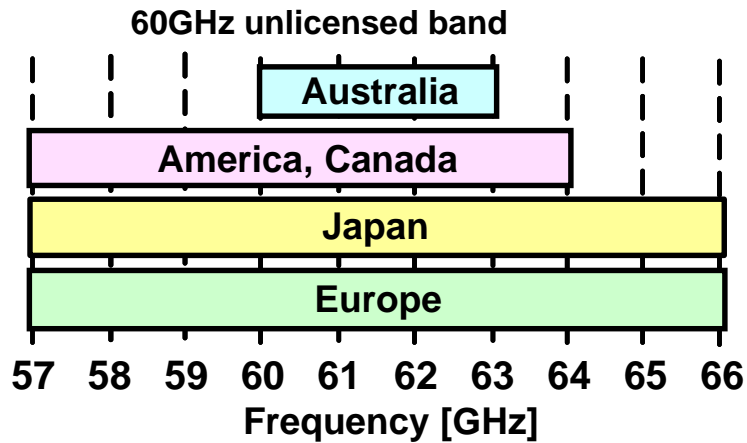


図1：各国の60GHz帯周波数割当

特徴：国ごとに利用できる周波数帯域は異なるが最大で9GHzの周波数帯域が免許不要で利用できる。

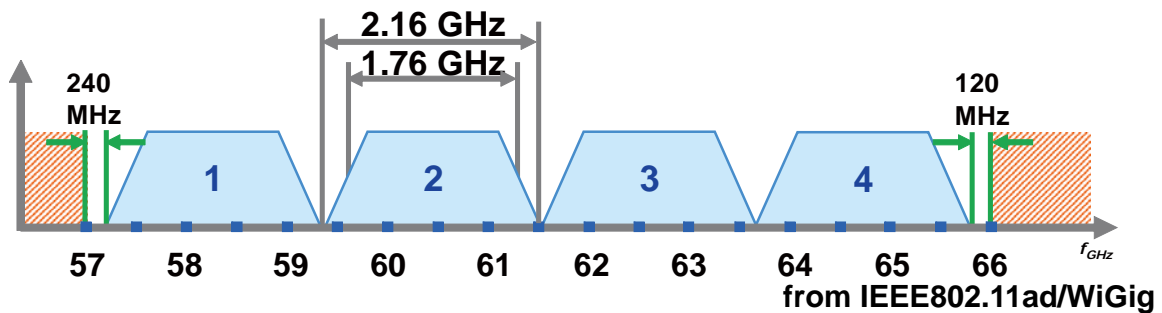


図2：IEEE802.11ad規格におけるチャンネル割り当て

特徴：60GHz帯無線規格にはIEEE802.11ad, WiGig, WirelessHD, IEEE802.15.3c, ECMA-387/ISO/IEC13156等があり、共通して4チャンネルの割り当てがあり、それぞれ2.16GHzの帯域を持つ。4チャンネルあわせると8.64GHz帯域となる。5GHzを利用するIEEE802.11ac規格(いわゆる無線LAN)で利用される160MHz帯域に比べて54倍広い。

表1：60GHz帯無線機における変調方式と伝送速度(1チャンネルあたり)

変調方式	伝送速度	備考
QPSK	3.52Gb/s	
16QAM	7.04Gb/s	
<b>64QAM</b>	<b>10.56Gb/s</b>	<b>本成果の前に報告例なし</b>

表 2 : 16QAM 変調による帯域と伝送速度

チャンネル数	帯域幅	伝送速度	備考
1	2.16GHz	7.04Gb/s	
2	4.32GHz	14.08Gb/s	
3	6.48GHz	21.12Gb/s	本成果の前に報告例なし
<b>4</b>	<b>8.64GHz</b>	<b>28.16Gb/s</b>	<b>本成果の前に報告例なし</b>

特徴：RF フロントエンドのデータレートとして、64QAM 変調を用いれば 1 チャンネル 2.16GHz 帯域あたり 10.56Gb/s の無線通信が実現できる。また、16QAM により、4 チャンネル束ねた 8.64GHz により 28.16Gb/s の無線通信が実現できる。本開発品では 64QAM による 10.56Gb/s と 16QAM による 28.16Gb/s の両方を実現した。それぞれ世界初の成果である。

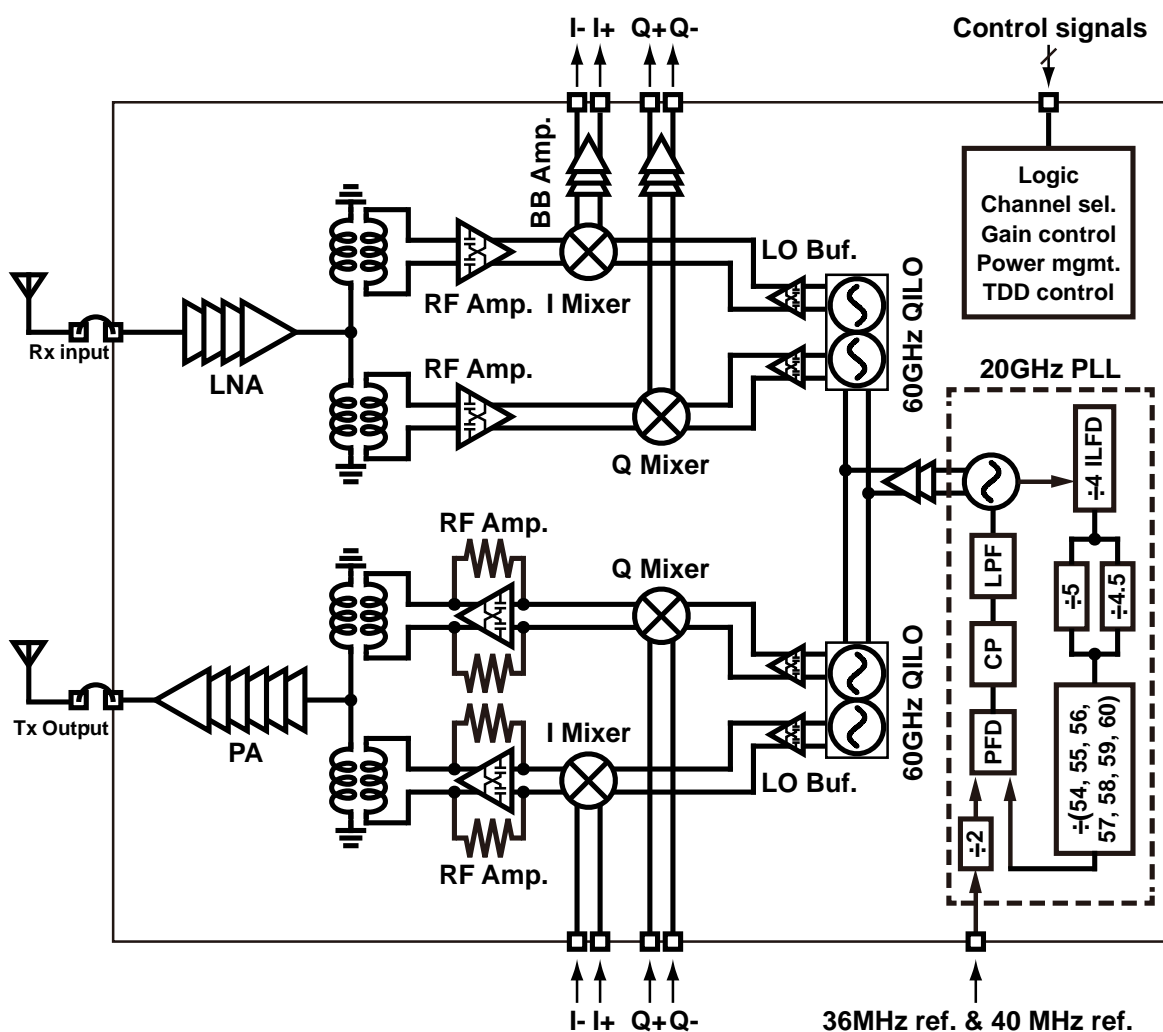
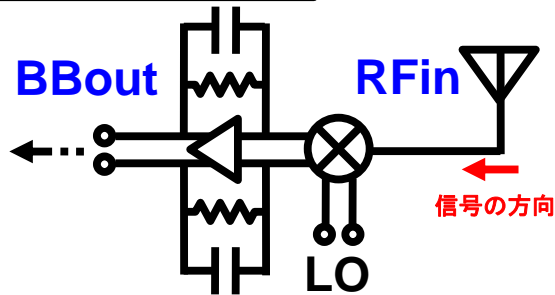


図 3 : RF フロントエンドのブロック図

特徴：送受信ともダイレクトコンバージョン型とした。Mixer-first 送信機によりベースバンドにおける超広帯域特性を実現した。受信機では Flipped Voltage Follower による広帯域高線形開ループアンプを用いた。また、位相雑音改善のために、以前本グループから報告のあった注入同期型の発振器(QILO)を用いた。

### Mixer-first受信機 (従来研究)



### Mixer-first送信機 (本研究)

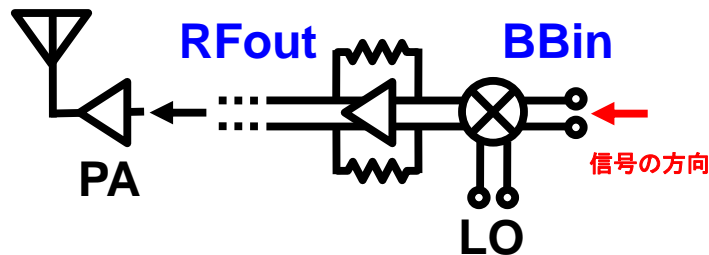


図4：ミキサファースト送信機

特徴：従来、ソフトウェア無線用受信機として知られていたミキサファースト受信機の技術を、ミリ波帯送信機に応用した。Mixer-first 受信機では RF 信号がミキサに入力され、BB 信号(BaseBand: ベースバンド)に変換される。RF 入力側から見ると、ベースバンドの LPF 特性がアップコンバートされて BPF 特性を実現できる。一方、ミキサファースト送信機では、BB 入力側からみると、RF 側の BPF 特性がダウンコンバートされて LPF 特性を実現できる。この作用を用いると、BB 側において 5GHz 以上の非常に広帯域な利得および入力インピーダンス特性を実現できる。ミリ波帯において 10GHz 以上の利得の平坦性を実現するのは BB 帯に比べて容易であることに基づく。ミリ波側の利得および入力インピーダンスの広帯域平坦性を、抵抗帰還型の差動増幅器とパッシブミキサを組み合わせることにより実現した。

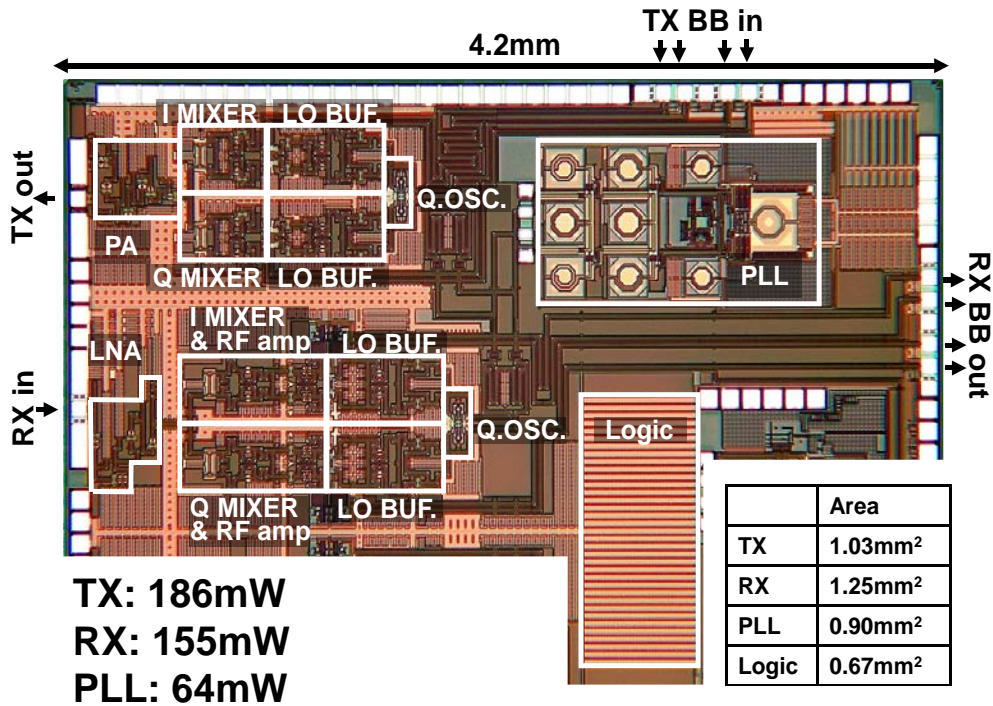


図5：チップ写真と各部の消費電力

特徴：CMOS 65nm プロセスにより製造した。

表3：64QAM および 16QAM 変調による伝送速度

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

\*チャンネルあたりの伝送速度、もしくは、4チャンネルボンディング時の伝送速度

\*\*送信機 EVM

\*\*\*送信機と受信機を含めて測定した EVM



特徴： 60GHz 帯で規定される 4 チャンネルすべてにおいて 64QAM 変調による送受信を確認した。4 チャンネルすべて束ねて利用することにより 16QAM 変調で 28.16Gb/s の伝送速度を達成した。

表 4：最新のミリ波無線機との比較

	Data rate / Modulation	TX-to-RX EVM	Integration	Power consumption
SiBeam [1]	7.14Gb/s(16QAM)	-19dB	65nm, 32x32-array heterodyne, TX, RX, LO	TX: 1,820mW RX: 1,250mW
Tokyo Tech[2, 3]	16Gb/s(16QAM) 20Gb/s(16QAM)	-21dB	65nm, direct-conversion, TX, RX, LO, antenna, analog & digital BB	TX: 319mW RX: 223mW
IMEC [4]	7Gb/s(16QAM)	-18dB	40nm, direct-conversion, TX, RX, w/o PLL	TX: 167mW RX: 112mW
Toshiba [5]	2.62Gb/s(QPSK)	N/A	65nm, heterodyne, TX, RX, LO, antenna, analog & digital BB	TX: 160mW RX: 233mW
IMEC [6]	7Gb/s(16QAM)	-15dB	40nm, 4-array direct-conversion, TX, RX, LO, antenna	TX: 330mW RX: 284mW for 1 stream
Panasonic [7]	2.5Gb/s(QPSK)	-22dB	90nm, direct-conversion, TX, RX, LO, antenna, analog & digital BB	TX: 347mW RX: 274mW
本成果	<b>10.56Gb/s(64QAM)</b> <b>28.16Gb/s(16QAM)</b>	<b>-26dB</b>	65nm, direct-conversion, TX, RX, LO	TX: 251mW RX: 220mW

[1] S. Emami, *et al.*, ISSCC 2011. [2] K. Okada, *et al.*, ISSCC 2012. [3] S. Kawai, *et al.*, RFIC Symp. 2013. [4] V. Vidojkovic, *et al.*, ISSCC 2012. [5] T. Mitomo, *et al.*, ISSCC 2012. [6] V. Vidojkovic, *et al.*, ISSCC 2013. [7] T. Tsukizawa, *et al.*, ISSCC 2013.

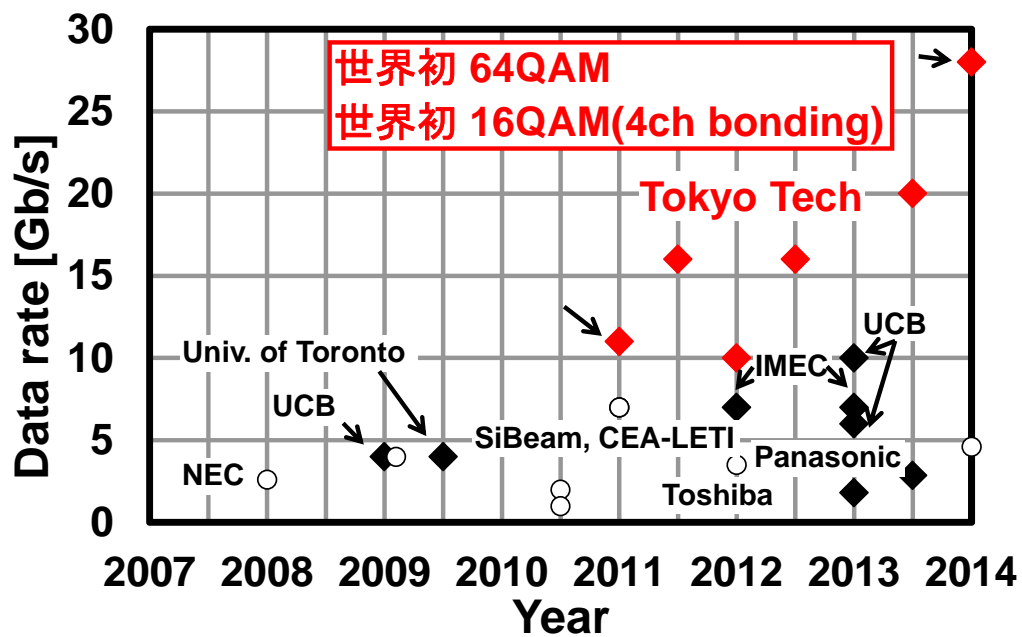


図6：ミリ波帯無線機の伝送速度比較

特徴：世界で初めて 64QAM による無線送受信を CMOS ミリ波無線機により実現した。60GHz 帯で規定される 4 チャンネルすべてにおいて送受信を確認した。4 チャンネルすべて束ねて利用することにより世界で初めて 16QAM 無線通信により 28.16Gb/s の伝送速度を達成した。