

IEEE802.11ad/WiGigを応用した ミリ波帯無線の動向と今後の展望

Industrial Trends and Future View of Millimeter Wave Wireless Technology
Using IEEE802.11ad/WiGig

高橋和晃 滝波浩二

Abstract

本稿では、ギガビット級の無線通信が可能な周波数帯として期待される 60 GHz 帯無線システムの最新動向について解説する。60 GHz 帯無線システムは 2000 年初頭にシリコン CMOS による集積化の研究発表がされると、システム開発及び国際標準化が一気に加速した。混沌とした国際標準化の中でデファクトとなった IEEE802.11ad 及び WiGig 規格の概要とこれらを応用した実用化動向について解説する。更に IEEE802 委員会傘下の .11 ワーキンググループで議論が始まった次世代無線 LAN 規格の展望について述べる。

キーワード：ミリ波、60 GHz、ギガビット、CMOS、IEEE802.11ad、WiGig

1. はじめに

30 GHz から 300 GHz の周波数は、波長がミリメートルのオーダーであることからミリ波と呼ばれている。中でも 60 GHz 帯は酸素分子の吸収帯があり、大気中における減衰量が大きいため、近距離通信用途に適した周波数帯として世界的に免許不要の帯域が 7 から 9 GHz の帯域幅で割り当てられている。

1990 年頃から超高速無線 LAN システムへの応用を狙った開発が進められ、半導体デバイスとして、ガリウムヒ素 (GaAs) などの化合物半導体によるミリ波帯集積回路の研究開発やシステム開発が活発に行われた⁽¹⁾。我が国においても 2000 年初頭には小形の試作装置開発⁽²⁾などが進み、標準規格⁽³⁾が整備されるなど実用化の機運が高まった。しかしながらマイクロ波帯で高速化を実現する技術として、UWB⁽⁴⁾、(用語) 技術や MIMO⁽⁵⁾、(用語) 技術の出現により、ミリ波帯を使う必然性がなくなった。また化合物半導体デバイスのコストや量産性の課題

が残っていたため、ミリ波帯の活用はアナログ映像伝送やレーダ等の限られた利用にとどまっていた。

こうした背景の中、米国カリフォルニア大バークレー校 (以下、UCB) の研究グループが、低コスト化が期待できる標準 CMOS プロセスを用いた 60 GHz 帯集積回路の研究結果⁽⁶⁾を発表したところ、研究開発が再度活発になり、国際標準における主導権争いも始まった。本稿では国際標準化活動の変遷と、その中でデファクトとなった IEEE802.11ad/WiGig^(用語)の技術的特長を解説する。また IEEE802.11ad/WiGig の実用化動向と 2020 年以後のミリ波帯無線の将来展望について述べる。

2. 国際標準化の現状

2.1 IEEE802.11ad/WiGig 規格に至る経緯

60 GHz 帯無線技術の実用化は、前述の UCB のグループ中心に設立した米国のベンチャー企業 SiBEAM 社がきっかけを作ったと言える。高精細画像の非圧縮伝送を行う HDMI^(用語) インタフェースの無線伝送に関する標準規格を策定する業界団体 Wireless HD を設立し、2009 年には民生用途として世界初の 60 GHz 帯 CMOS チップセットの量産に成功した。このデバイスを用いた薄形 TV も発売され、この頃から国際標準化における主導権争いが始まった。

国際標準規格の中で技術的中核となったのは日本の研究機関、企業、大学等により推進された IEEE802.15.

高橋和晃 正員 パナソニック株式会社オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社

E-mail takahashi.kazu@jp.panasonic.com

滝波浩二 正員 パナソニック株式会社オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社

E-mail takinami.koji@jp.panasonic.com

Kazuaki TAKAHASHI and Koji TAKINAMI, Members (Automotive and Industrial Systems Company, Panasonic Corporation, Yokohama-shi, 224-8539 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.98 No.10 pp.899-904 2015 年 10 月

©電子情報通信学会 2015

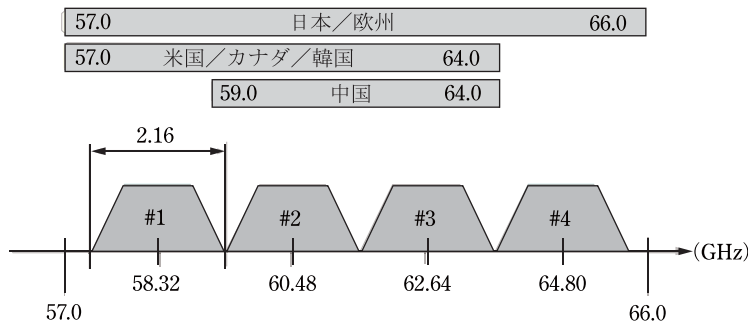


図1 主要国における周波数割当と規格化されたチャンネル配置 9 GHz が使用できる日本や欧州では4チャンネル, 7 GHz が使用できる米国や韓国では3チャンネルが使用できる。IEEE802.15.3c で規格化され, IEEE802.11ad 等でも採用された。

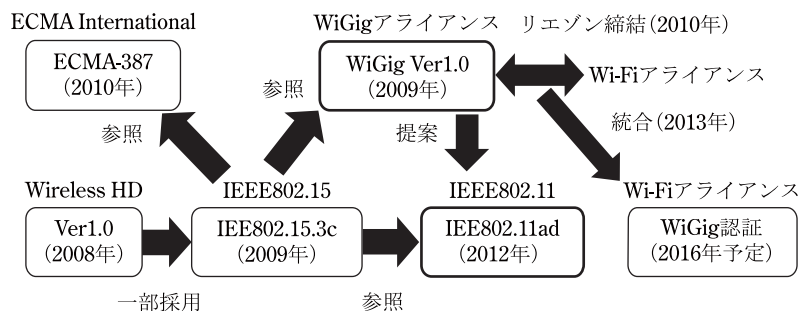


図2 60 GHz 帯国際標準規格の変遷 技術的なりファレンスは IEEE802.15.3c であるが Wi-Fi アライアンスとの統合の結果 WiGig 及び IEEE802.11ad が業界デファクトとなった。

3c⁽⁷⁾である。IEEE802.15.3c は IEEE802 委員会^(用語)傘下のタスクグループで 2009 年に規格化完了した。図 1 に主要国における 60 GHz 帯の周波数割当と IEEE802.15.

■ 用語解説

UWB ウルトラワイドバンド (Ultra Wide Band) の略。日本では 3.4~4.8 GHz と 7.25~10.25 GHz が割り当てられた超広帯域通信システム。

MIMO Multi-Input and Multi-Output の略で送信機, 受信機の双方で複数のアンテナを用いて, 高速化などの伝送性能を向上させる技術。

WiGig Wireless Gigabit Alliance の略で, 60 GHz 帯無線規格を策定することを目的に 2009 年設立された業界団体。

HDMI 高精細度マルチメディアインタフェース (High-Definition Multimedia Interface の略) で映像や音声をデジタル伝送するインタフェース規格。

IEEE802 委員会 IEEE 標準規格のうち, ローカルエリアネットワークなどの規格を定める委員会, 傘下の 802.11 ワーキンググループが無線 LAN 規格を定める。

ECMA 欧州電子計算機工業会として発足した標準化団体で, 現在は ECMA International として情報通信分野の国際標準規格を策定。

EIRP 等価等方ふく射電力 (Equivalent Isotropically Radiated Power の略) でアンテナ入力電力とアンテナ利得の積値で, 空間に放射される電力の強さを示す値。

3c で定義されたチャンネル配置を示す。IEEE802.15.3c 規格化作業においては, 低消費電力化のために, シングルキャリア変調での 2 値位相変調 (BPSK) 方式を必須モードとして採用し, シンボル速度を 1,760 MHz と定義した。オプション方式としてマルチキャリア変調方式も定義し, 一部 WirelessHD の機能も入れる形で発行された。

図 2 に示すように一部のグループは IEEE802.15.3c と並行し, 欧州系の標準化団体である ECMA^(用語)を活用し, 2010 年に ECMA-387 を発行した。また新たに設立された WiGig は 2009 年に WiGig 規格を発行した。更に WiGig 参画グループを中心に IEEE802.11 での規格化作業を行い, WiGig 規格を IEEE802.11ad として採用させる形で 2012 年に仕様書が発行された⁽⁸⁾。

このように混沌とする 60 GHz 帯無線システム規格の中で, 最終的には IEEE802.11ad/WiGig 規格がデファクト標準を獲得した。その大きな要因は「ワイファイ (Wi-Fi)」として広く認知されている, 無線 LAN 規格の相互接続認証を行っている Wi-Fi アライアンス (以下, WFA) の影響力による。WiGig では 2010 年に相互接続認証作業に対し WFA との協力関係を締結した。最終的に 2013 年に WFA と WiGig が統合されたため,

IEEE802.11ad/WiGig 規格は WFA が持つ無線 LAN のエコシステムを活用できることになり、デファクト標準の地位を勝ち取った。現在は WFA で「WiGig」のブランド名を残し、60 GHz 帯無線 LAN として 2016 年から相互接続性の認証プログラムを提供する準備をしている。

表 1 IEEE802.11ad/WiGig 規格の主な特長

レイヤ	解決課題	採用技術
物理層	低消費電力化	シングルキャリア変調 $\pi/2$ -BPSK
	高効率伝送	LDPC 符号
MAC 層		CSMA/TDMA のハイブリッド
	遮蔽対策	ビームフォーミング

表 2 IEEE802.11ad で定義された SC 変調 (一部抜粋)

番号	変調方式	符号化率	実効変調速度 (Mbit/s)
0	$\pi/2$ -DBPSK	1/2 (32 チップで拡散)	27.5
1	$\pi/2$ -BPSK	1/2 (2 回送信)	385
2	$\pi/2$ -BPSK	1/2	770
3	$\pi/2$ -BPSK	5/8	962.5
4	$\pi/2$ -BPSK	3/4	1,155
5	$\pi/2$ -BPSK	13/16	1,251.25
6	$\pi/2$ -QPSK	1/2	1,540
7	$\pi/2$ -QPSK	5/8	1,925
8	$\pi/2$ -QPSK	3/4	2,310
9	$\pi/2$ -QPSK	13/16	2,502.5

2.2 IEEE802.11ad/WiGig 規格概要

WiGig では、実用性の高い技術の採用を重視し、既存の規格も有効活用しながら規格化を進めていった。表 1 に WiGig で採用した特長な技術を示す。WiGig での変調方式の選択にあたり、既存の無線 LAN 規格 (IEEE802.11a/g/n/ac) と同じマルチキャリア変調 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を採用するか、先行して規格化された IEEE802.15.3c で必須モードとして採用されたシングルキャリア変調 (SC: Single Carrier) を採用するかで意見が分かれていた。一般的に OFDM は SC に比べて、周波数利用効率が高いため高速化に適するが、消費電力が大きくなる傾向にある。スマートフォンに代表されるモバイル端末への搭載が市場展開に大きなインパクトを与えることから、低消費電力化を重視して SC を必須機能、OFDM をオプション機能として定義した。また SC の中でも、変調信号の振幅がほぼ一定で、電力増幅器の効率を高めることができる IEEE802.15.3c と同じ $\pi/2$ シフト BPSK 方式を必須モードとして採用した。表 2 に WiGig で定義した主な SC 変調のパラメータを示す。変調番号 0 は制御用 PHY (Control PHY) と呼ばれ、主に親機 (アクセスポイント) と端末 (ステーション) との接続を確立するための制御信号のやり取りに使われる。このため、差動符号変調と 32bit の拡散符号により、ロバスト性を高めている。誤り訂正符号には誤り訂正能力の高い低密度パリティ検査符号 (LDPC: Low Density Parity Check code) を採用した。

メディアアクセス制御 (MAC: Media Access Control) 層は、従来の無線 LAN では CSMA (Carrier Sense Multiple Access) と呼ばれるアクセス方式が採用

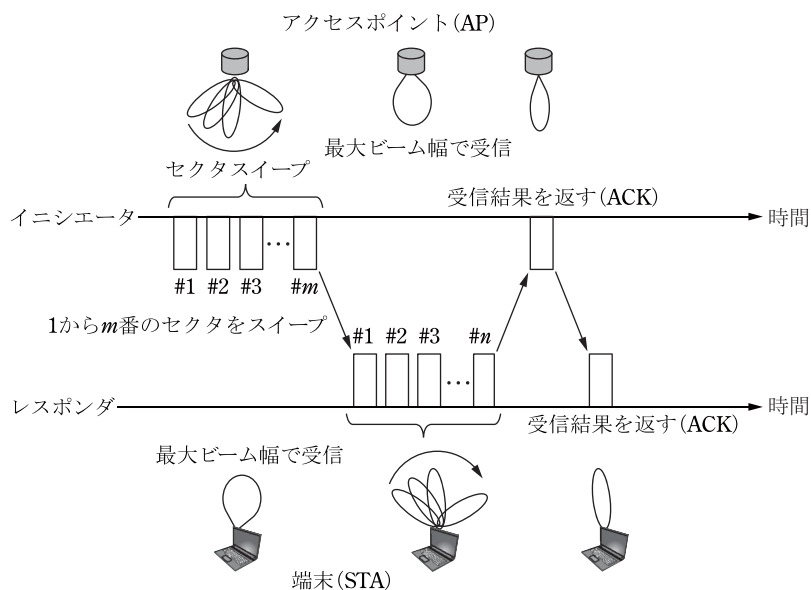


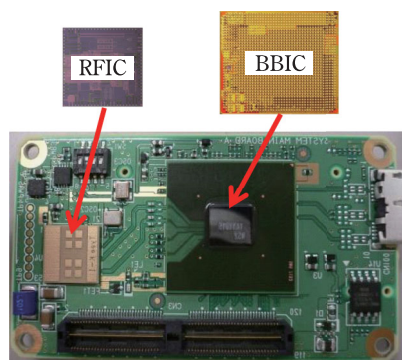
図 3 ビームフォーミング制御手順

されていたのに対し、TDMA (Time Division Multiple Access) と呼ばれるアクセス方式とのハイブリッド構造になっている。CSMA は送信前にチャネルの空きを検出し、空いていたら送信するというシンプルなプロトコルであるがパケットの衝突が起きるため伝送効率は低い。一方 TDMA は、あらかじめ割り当てられたタイミングでパケットを送出するプロトコルで伝送効率が高くなるが、収容端末が増えると制御が複雑になる。

もう一つの特長は、アンテナ指向性を制御しながら通信を行うビームフォーミングへの対応である。親機はビーコンと呼ばれる信号を定期的に送信し、端末はビーコン信号を見つけて接続を行っていく。ビーコンの送出間隔はビーコンインターバルと呼ばれ、この中でビームフォーミングの制御が行われる。図3に代表的なビーム制御プロトコルの手順を示す。ビーム制御機能のあるイニシエータ (通常は親機 (AP: Access Point)) は各ビーム角度でのビーコン信号を各々送信する。図3の例では1から m 番のセクタをスイープした。その際レスポнда (通常は端末 (STA: Station)) は設定可能な最大ビーム角で受信する。この手順を双方で行った後に、各々の受信信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) をフィードバックし、最適な送信ビーム角を決定する。

3. 実用化に向けた開発状況

SiBEAM 社 (米国) が発表した標準 CMOS プロセスによる 60 GHz 帯トランシーバの開発事例⁽⁹⁾が 60 GHz 帯無線システムの開発に大きなインパクトを与えた。また WiGig 規格の策定が進むにつれて、WiGig 規格に対応した CMOS チップセットの開発も活発となっていった。IEEE802.11ad/WiGig の特長の一つであるスマートフォン等の小形モバイル端末への搭載を狙いピークの消費電力として 1 W 以下の低消費電力化を実現したダイレクトコンバージョン方式の CMOS チップセットの研究開発も進んでいる^{(10)~(12)}。図4はモバイル端末への搭



WiGig評価ボード (40mm×70mm)

図4 CMOS チップセットの試作例

載を目指した CMOS チップセットの試作例であり、CMOS の特長を生かしたデジタル校正機能を内蔵することにより、ばらつきを抑えながら低消費電力を実現させた。

また IEEE802.11ad/WiGig はハイエンドのモバイル端末用としてノート PC やタブレット端末等への搭載を目的に、10 GHz 前後の中間周波数を用い、RF 部とベースバンド部の 2 体型を実現するチップセットの開発も進んでいる⁽¹³⁾。16 素子のフェーズドアレーを搭載しており、ノート PC のような準静止で使用する場合に、ビームフォーミングプロトコルにより、最適な方向にアンテナビームを制御することができる。このようなチップセットを活用したノート PC とドッキングステーションは既に市販が始まっている。

このように IEEE802.11ad/WiGig 規格に対応した機器の実用化により、2016 年初頭には図5に示すようなドッキングやファイル交換など主として 1 対 1 通信のギガビット化が実現されていくであろう。

4. 普及・商品化への課題

2. に示したように、WFA では相互接続性を認証するプログラムを 2016 年に提供開始する予定である。現在複数のベンダが開発した機器間の相互接続テストをしながら、テスト規格の策定とテスト環境の整備を進めている。ギガビットを超える高速の無線伝送であること、ビームフォーミング技術という新技術の導入に対し、課題も多く、2015 年に予定されていた認証プログラムが 2016 年に延期された経緯がある。

特にビームフォーミングプロトコルについては、異な



(a) モバイル端末やPC等からのドッキング



(b) モバイル端末間のコンテンツ交換

図5 実用化が期待される利用シーン

るベンダ間での接続テストを進めてきた中で以下のような課題が見えてきた。

- ① ビーム制御プロトコルに対しオプション機能が多い
- ② ビーム制御プロトコル動作中の切断に対するリカバリ手順が不明確
- ③ イニシエータとレスポнда間のタイミング同期

詳細な定義がされておらず、各ベンダの実装に差異があることに起因した課題は解決されつつあり、複数のベンダ間での安定したギガビット通信が実現されようとしている。普及に向けては、市場全体の活性化が必要であり、WFAの提供する認証プログラムが大きな起爆剤になることは間違いない。WFAの予測では2019年までには60GHz帯を含むチップセットの出荷が世界市場において10億台規模に達すると予想されており⁽¹⁴⁾、IEEE802.11ad/WiGig技術は大きく発展すると見込まれる。

5. 将来展望

5.1 次世代規格の取組み

IEEE802.11ad/WiGigの実用化により、PCやタブレット、スマートフォンなどの機器間の接続の利便性が高まるであろう。しかしながら、全てのもがネットワークに接続される2020年頃のIoT (Internet of Things) 時代に向けて、モバイルネットワーク環境が大きく変わろうとしている。既存のモバイルネットワークの高度化だけでは収容し切れないデータトラフィックの一部に60GHz帯を含むミリ波を活用することが検討され始めた。更に流通する映像コンテンツが4K・8Kと高精細になるなどIEEE802.11ad/WiGigの高度化、高速化の検討が必要となっている。

そこで2020年頃の実用化を目指し、IEEE802.11adの後継となる規格化作業としてIEEE802.11ayタスクグループが2015年5月に発足した。様々な用途が定義さ

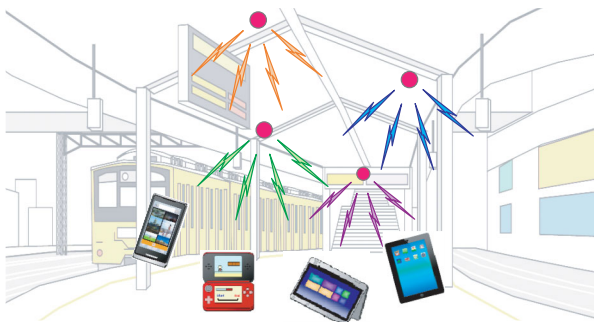


図6 公衆エリアで期待される利用シーン例

れる中で、図6のような駅、スタジアムや会議場など多くの人が集まる環境での多ユーザの収容、かつギガビット級の高速性の確保に対応した技術議論が始まっている。IEEE802.11ayでは、IEEE802.11adで導入されたビームフォーミング技術について、相互接続性の課題を解決し通信品質の高い伝送技術の確立が望まれる。また機器の大きな普及をにらみ、高密度利用時の干渉制御の技術も重要となる。

このようにミリ波帯無線のネットワーク応用が進めば、既存の無線LANやセルラ網などほかの無線ネットワークと融合した利活用が進み、第5世代通信で求められる異種無線によるヘテロネットワークへと進化していくであろう。

5.2 技術基準の改正

表3に示すように60GHz帯の技術基準は主要各国において差異がある。我が国の技術基準は、空中線電力の上限が10mW以下と低い値となっている。また占有帯域幅の上限が2.5GHzに制限されている。前節で示したように、将来公共エリアでの利用には空中線電力を増力し、サービスエリアの拡大が望まれる。また高速化に向けてより広い帯域の利用ができることが望ましい。

このような業界の要望を受けて、2014年11月から情報通信審議会において60GHz帯無線設備作業班が設置され、技術基準の見直しの審議が行われてきた⁽¹⁵⁾。改正案では、空中線電力の上限を+24dBm、占有帯域幅の上限を9GHzまでと緩和している。一方、膨大な数の機器の普及に備え、空中線電力が10dBmを超える装置はEIRP⁽¹⁶⁾の上限値を40dBmかつ10dBi以上の指向性アンテナを使用すること、また不要発射強度の上限を-30dBm/MHzまで引き下げるなど、60GHz帯周辺

表3 主要国の技術基準 (2015年5月現在)

国名	周波数 (GHz)	EIRP	空中線電力及び空中線利得
日本	57~66	規定なし	空中線電力：10 dBm (10 mW) 以下 空中線利得：47 dBi 以下
米国	57~64	屋外	・空中線利得：51 dBi 未満の場合 EIRP = 82 dBm - 2* (51 - 空中線利得) ・空中線利得 51 dBi 以上 EIRP = 2 dBm
		屋内	40 dBm 空中線電力：27 dBm (0.5 W) 以下*
韓国	57~64	43 dBm または 57 dBm (固定：ポイントツーポイント)	指向性アンテナの場合 空中線電力：27 dBm (0.5 W) 以下 無指向性アンテナの場合 空中線電力：20 dBm (0.1 W) 以下
欧州	57~66	40 dBm*	規定なし

* 狭帯域の場合にはスペクトル密度で定義される。

を利用する機器間干渉低減への配慮も行った検討がなされている。

6. ま と め

大きな普及が期待される 60 GHz 帯無線システムのデファクト標準規格である IEEE802.11ad/WiGig を中心とした国際標準化の変遷や技術的な特長について解説した。またこれらの規格を応用した実用化に向けた取り組みや、相互接続性を確保するための技術課題について紹介した。これらの技術課題を克服し、ミリ波帯無線システムは大きな市場へと広がることが期待される。また 2020 年頃には更に技術が成熟し、第 5 世代通信の一翼を担う通信技術へと発展が期待される。

謝辞 本研究は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」のうち「ミリ波帯における高度多重化干渉制御技術等に関する研究開発」に関する研究開発成果である。

文 献

- (1) ミリ波技術の基礎, 電気学会(編), 2007.
- (2) K. Takahashi, S. Fujita, M. Inoue, W. Gang, and H. Yabuki, "A compact Ka-band 156 Mbps transceiver for a wireless LAN system using PTFE/FR-4 laminated MCMs," 2002 IEEE MTT-S International Symp. Dig., pp. 787-780, June 2002.
- (3) ARIB-STD-T74, "特定小電力無線局(超高速無線 LAN システム)," 電波産業会, 2001 年 5 月発行, (2005 年 11 月改定).
- (4) A. Batra, J. Balakrishnan, G.R. Aiello, J.R. Foerster, and A. Dabak, "Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 52. no. 9, pp. 2123-2138, 2004.
- (5) G.D. Golden, C.J. Foschini, R. Valenzuela, and P.W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture," Electron. Lett., vol. 35, pp. 14-16, Jan. 1999.
- (6) C. Doan, S. Emami, A.M. Niknejad, and R.W. Brodersen, "Design of CMOS for 60 GHz applications," ISSCC Digest of Technical Papers 2004, pp. 440-538. Feb. 2004.
- (7) IEEE Std., 802.15.3c-2009, "Part 15.3: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for high rate wireless personal area network (WPANs)," Oct. 2009. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.3c-2009.pdf>
- (8) IEEE Std., IEEE802.11ad, "Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 3: Enhancements for very high throughput in the 60 GHz band" Dec. 2012.

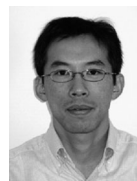
- <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ad-2012.pdf>
- (9) S. Emami, R.F. Wiser, E. Ali, M.G. Forbes, M.Q. Gordon, G. Xiang, S. Lo, P.T. McElwee, J. Parker, J.R. Tani, J.M. Gilbert, and C.H. Doan, "A 60 GHz CMOS phased-array transceiver pair for multi-GB/s wireless communications," ISSCC Digest of Technical Papers 2011, pp. 164-166, Feb. 2011.
 - (10) K. Okada, K. Matsushita, K. Bunsen, R. Murakami, A. Musa, T. Sato, H. Asada, N. Takayama, L. Ning, S. Ito, W. Chaivipas, R. Minami, and A. Matsuzawa, "A 60 GHz 16QAM/8PSK/QPSK/ BPSK direct-conversion transceiver for IEEE 802.15.3c," ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 160-162, Feb. 2011
 - (11) T. Tsukizawa, N. Shirakata, T. Morita, K. Tanaka, J. Sato, Y. Morishita, M. Kanemaru, R. Kitamura, T. Shima, T. Nakatani, K. Miyayama, T. Urushihara, H. Yoshikawa, T. Sakamoto, H. Motozuka, Y. Shirakawa, N. Yosoku, A. Yamamoto, R. Shiozaki, and N. Saito, "A fully integrated 60 GHz CMOS transceiver chipset based on WiGig/IEEE802.11ad with built-in self-calibration for mobile applications," ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 230-231, Feb. 2013.
 - (12) V. Vidojkovic, V. Szortyka, K. Khalaf, G. Mangraviti, S. Brebels, W.V. Thillo, K. Vaesen, B. Parvais, V. Issakov, M. Libois, M. Matsuo, J. Long, C. Soens, and P. Wambacq, "A low-power radio chipset in 40 nm LP CMOS with beamforming for 60 GHz high-data-rate wireless communication," ISSCC Digest of Technical Papers, pp. 236-237, Feb. 2013.
 - (13) M. Boers, B. Afshar, I. Vassiliou, S. Sarkar, S.T. Nicolson, E. Adabi, B.G. Perumana, T. Chalvatzis, S. Kavvadias, P. Sen, W.L. Chan, A.H.-T. Yu, A. Parsa, M. Nariman, Y. Seunghwan, A.G. Besoli, C.A. Kyriazidou, G. Zochios, J.A. Castaneda, T. Sowlati, M. Rofougaran, and A. Rofougaran, "A 16TX/16RX 60 GHz 802.11ad chipset with single coaxial interface and polarization diversity," ISSCC Digest of Technical Papers 2014, pp. 344-345, Feb. 2014.
 - (14) http://www.soumu.go.jp/main_content/000327714.pdf
 - (15) http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/60ghz.html

(平成 27 年 4 月 29 日受付 平成 27 年 6 月 22 日最終受付)



高橋 和晃 (正員)

1988 横浜国大大学院工学研究科博士課程前期(修士)了。同年松下電器産業株式会社(現パナソニック株式会社)入社。ミリ波無線システム、デバイスの研究開発、国際標準化などに従事。現在 AIS 社・技術本部無線技術開発部長。博士(工学)。著書「ミリ波技術の基礎」(共著)など。



滝波 浩二 (正員)

1995 京大・工・電気卒。1997 同大学院修士課程了。同年松下電器産業株式会社(現パナソニック株式会社)入社。高周波回路設計、ミリ波 CMOS 回路、システム開発などに従事。現在 AIS 社・技術本部無線技術開発部主幹。博士(工学)。