パーソナルエリアネットワークを進化させる ミリ波技術と標準化活動

Millimeter-Wave Technology and Standard Activity to Evolve Personal Area Network

荘司洋三¹ 原田博司¹ 加藤修三¹ 豊田一彦² 高橋和晃³ 川崎研一⁴
池田秀人⁵ 大石泰之⁶ 丸橋建一⁷ 中瀬博之⁸ 安藤 真⁹

Yozo Shoji¹, Hiroshi Harada¹, Shuzo Kato¹, Ichihiko Toyoda², Kazuaki Takahashi³,
Kenichi Kawasaki⁴, Hideto Ikeda⁵, Yasuyuki Oishi⁶, Kenichi Maruhashi⁷,
Hiroyuki Nakase⁸, and Makoto Ando⁹

Summary

IEEE802.15.3c (TG3c) では、最低データレート 2 Gbit/s 以上、オプションデータレート 3 Gbit/s 以上を目指すミリ波パーソナルエリアネットワークの標準策定活動を進めている。2007 年 1 月に行われたロンドン会議では標準方式の提案者が参照すべき、システム要求条件、選択条件、利用モデル、伝搬路モデルに関する文書がまとめられ、提案者を正式に募り、その意思表示を求める CFI (Call For Intent) が正式発出された。その結果、総勢 27 社 (名) からの意思表示があり、2007 年 5 月会合にて各提案者の方式が示されることになっている。本論文では、IEEE におけるミリ波 WPAN の標準化に話題を特化し、その標準策定の過程において重要となる利用モデル、伝搬モデルを中心に解説する。また早期ミリ波デバイスの国内普及を目指して、国内主要企業を中心に結成したミリ波実用化コンソーシアムの活動概要についても紹介する。

Key words

IEEE802.15.3c, 60 GHz 帯, 利用モデル, ミリ波, 無線 PAN, キオスクファイルダウンロード, 物理層

1. ま え が き

2005 年 3 月、近年通信システムに関しては、事実上の世界標準規格を策定している機関として名高い米国電気電子技術者協会 (IEEE) 内に、免許不要 60 GHz 帯を用いて WPAN (Wireless Personal Area Network) を実現するための物理層/MAC 層標準を策定するタスクグループ、IEEE802.15.3c (以下 TG3c) が設立された[1]。

免許不要 60 GHz 帯は、既に世界主要国において共通的に法制化がなされており、国内では 59 ~ 66 GHz が、米国やカナダ、韓国では 57 ~ 64 GHz が割当済みである。また、ヨーロッパ諸国に関しても基本的にこれらに準じた周波数割当が統一的行われる予定である。

60 GHz 帯はこのように非常に広帯域な周波数が利用可能なため、1 Gbit/s を超える、いわゆるマルチギガビット伝送を実現する有望な周波数帯として期待されている。

現在 TG3c が掲げる要求仕様としては物理層におけるペイロード部のビットレートが 2 Gbit/s 以上を達成することが必須とされており、オプションモードとして 3 Gbit/s 以上の達成が望ましいとされている。

ところで、60 GHz 帯を用いる無線通信システムに関する研究開発例は過去十年以上に及ぶが、いまだ十分な普及化と実用化のめどが立っていない。これらの背景に

- 1 独立行政法人情報通信研究機構、小金井市
National Institute of Information and Communications Technology,
Koganei-shi, 184-8795 Japan
- 2 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所、横須賀市
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan
- 3 松下電気産業株式会社、門真市
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd, Kadoma-shi, 571-8501 Japan
- 4 ソニー株式会社、東京都
Sony Corporation, Tokyo, 108-0075 Japan
- 5 沖電気工業株式会社、東京都
Oki Electric Industry Co., Ltd., Tokyo, 105-8460 Japan
- 6 富士通株式会社、東京都
Fujitsu Limited, Tokyo, 105-7123 Japan
- 7 日本電気株式会社、川崎市
NEC Corporation, Kawasaki-shi, 211-8666 Japan
- 8 東北大学、仙台市
Tohoku University, Sendai-shi, 980-8577 Japan
- 9 東京工業大学、東京都
Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8552 Japan

は、ミリ波デバイスの生産コストの問題もあるが、直進性が強く伝搬損の極めて大きいミリ波帯の電波伝搬特性に起因していると考えられる。すなわち、これらの伝搬特性を十分に踏まえた上での、適切なアプリケーションとマーケットの創出に失敗してきたためと考えられる。

近年、60 GHz 帯のデバイス生産コストの問題については、主要 RF デバイスがシリコンデバイスやシリコンゲルマニウムを用いた CMOS プロセスにて生産するめどが立ち、状況は大量生産を必要とするマーケットを創出できるかどうかにかかっているように見受けられる[2]～[6]。

また、伝搬特性に考慮した適切なミリ波アプリケーションの開発という点では、本論文にて後に詳しく述べるように、近距離見通し通信環境に特化した、大容量ファイル転送を必要とする広帯域アプリケーションの需要が予想されている。

本論文では、TG3c における標準策定活動の最新動向について解説すると同時に、ミリ波デバイスの早期普及と、IEEE 標準への寄与を目的として設立したミリ波実用化コンソシアム (CoMPA: Consortium of Millimeterwave Practical Applications) の活動について紹介する。2. では、TG3c の最新動向と CoMPA の概要について紹介する。3. では TG3c において標準を策定するために採択された利用モデルと伝搬モデルについて解説する。4. では特に上記利用モデルの中で CoMPA が注目しているモデルについて取り上げ、我々が行った独自の懸案事項に対する検討結果について紹介する。5. では今後の物理層提案に向けて CoMPA 内部にて行っている検討結果例について紹介する。

2. IEEE802.15.3c におけるミリ波 WPAN の標準化プロセスとミリ波実用化コンソシアム

60 GHz 帯を用いる WPAN デバイスの IEEE 標準策定において、まず重要となるプロセスが、利用モデルの設定とこれから導かれるシステム要求値の明確化である。これは同ミリ波デバイスが通信上用いる物理層及び MAC 層の標準化を目指す上で、想定すべき利用環境(距離や伝搬環境など)、アプリケーション(ビデオ伝送なのかファイル転送なのかなど)、伝送品質(所要 BER など)を含む、一つの利用シナリオを定めることである。標準会合では各提案者が、自身の提案方式のこれら利用モデルにおける通信性能を示すことで他方式と比較検討されることとなる。また更に複数想定される利用モデルから重要なものを必須利用モデルとして選択し、事実上すべての提案者にその利用モデルを用いた場合の性能評価を示すことを義務づける場合がある。TG3c の議論においては後に示すように五つの利用モデルが会合によって採

択され、そのうち二つが必須利用モデルとして定められた。

さて、このように国際的に始まった本格的なミリ波デバイスの標準化の動向を背景に、シングルキャリアや伝送方式を用いて早期にミリ波デバイスの実用化を目指すべきといった声が高まり、同じ意見をサポートする国内主要企業と情報通信研究機構 (NICT) が中心となって、2006 年 7 月、ミリ波実用化コンソシアム (以下 CoMPA) を結成した。同コンソシアムの発起人は、NICT, NEC, NTT, 沖電気, ソニー (株), 松下電器産業 (株), 富士通(株), 東北大学, 東京工業大学からなる。

現在、CoMPA は国内 19 機関、海外 1 機関から構成されており、更に活動分野を六つに分けてワーキンググループ(WG)を構成して、活動中である。2006 年度における、CoMPA からの TG3c への提出寄与文書は 30 件以上に及び、標準策定において重要な位置付けとなる利用モデル、伝搬モデルの多くについて、最終的には CoMPA の意図が反映された形で最終ドキュメントが出版されるに至っている。

3. 利用モデルと伝搬モデル

3.1 利用モデル [7],[8]

IEEE802.15.3c において定められたミリ波 WPAN 標準策定の基準となる利用モデルは、CoMPA より提案されたものを含めて五つある。中でも以下でも述べるポイント-ポイント型の通信を定義している #1 と #5 が今回の TG3c においては必須利用モデル (提案者が性能評価することが必須とされている利用モデル) として定められている。各利用モデル、及びそこで定義されているパラメータについて述べる。

3.1.1 利用モデル #1: ポイント-ポイント型非圧縮映像伝送

図 1 に利用モデル #1 として定義されたポイント-ポイント型非圧縮映像伝送モデルのイメージを、表 1 に主要パラメータを示す。

近年、HD 映像伝送用途として普及する HDMI ケーブルの無線化を想定した、TG3c においては実現を望む声が高かったアプリケーションを反映したものであり、必須利用モデルとして採択されている。ただし、実現上の観点からは高データレート及び Pixel エラーレートにして、 10^{-9} 以下という低誤り率品質が要求されると同時に、実際の HDMI の無線化に限定した場合、制御信号となる低レート双方向通信のリンクをどのように実現するかなどの課題が残されている。

3.1.2 利用モデル #2: ポイント-マルチポイント型非圧縮映像伝送

図 2 に利用モデル #2 として定義されたポイント-マ

図 1 利用モデル #1 のイメージ

表 1 利用モデル #1 の主要パラメータ

通信距離	5 m/10 m
スループット	1.78 Gbit/s/3.56 Gbit/s
伝搬環境	見通し / 見通し外家屋内
所要 BER/PER	10^{-9} Pixel Error Rate (PiER) (10^{-6} BER in simulation)

BER : Bit error rate, PER : Packet error rate

図 2 利用モデル #2 のイメージ

表 2 利用モデル #2 の主要パラメータ

通信距離	STB-各テレビ間 : 5 m テレビ間 : 5 m
スループット	1.78 Gbit/s+0.62 Gbit/s
伝搬環境	見通し + 見通し外家屋内
所要 BER/PER	10^{-9} Pixel Error Rate (PiER)

ルチポイント型非圧縮映像伝送モデルのイメージを、表 2 に主要パラメータを示す。

利用モデル #1 をポイント-マルチポイント型に拡張した利用モデルであるが、3.1.1 で述べた課題に加えて、指向性を有するミリ波アンテナを用いてこのような多元接続を実現する方法が今後の開発課題となる。TG3c では適応アンテナ技術を用いた空間ビームスイッチングの利用などが議論されている。

3.1.3 利用モデル #3 : オフィスデスクトップ

図 3 に利用モデル #3 として定義されたオフィスデスクトップモデルのイメージを、表 3 に主要パラメータを示す。

図 3 利用モデル #3 のイメージ

表 3 利用モデル #3 の主要パラメータ

リンク	PC-TV	PC-HDD	PC-PR
通信距離	1 m	1 m	5 m
スループット	1.78 Gbit/s/ 3.56 Gbit/s	250 Mbit/s	500 Mbit/s
伝搬環境	見通し外 机上	見通し机上	見通し外 オフィス
所要 PiER/PER	10^{-9} Pixel Error Rate	8 % PER (再送制御前)

図 4 利用モデル #4 のイメージ

表 4 利用モデル #4 の主要パラメータ

リンク	PC#n-PC#k	PC#1-WB	PC-BP/TV
通信距離	1 m	1 m	5 m
スループット	41.6 Mbit/s	125 Mbit/s	1.78 Gbit/s
伝搬環境	見通し外机上	見通しオフィス	
所要 PER/PiER	8 % PER (再送制御前)		10^{-9} PiER

本来の PAN 利用イメージに最も近い利用モデルと考えられるが、利用モデル #2 以上に複雑な多元接続をサポートする必要がある、適応アンテナ技術のみならず、これをサポートする MAC プロトコルの新たな開発が必要と考えられている。

3.1.4 利用モデル #4 : 会議アドホック

図 4 に利用モデル #4 として定義された会議アドホックモデルのイメージを、表 4 に主要パラメータを示す。

3.1.5 利用モデル #5 : キオスクファイルダウンロード

図 5 に利用モデル #5 として定義されたキオスクファイルダウンロードモデルのイメージを、表 5 に主要パラメータを示す。

図5 利用モデル #5 のイメージ

表5 利用モデル #5 の主要パラメータ

リンク	Server-PDA	PDA-PC/STB
通信距離	1 m	1 m
スループット	1.5 Gbit/s/2.25 Gbit/s ノースト	
伝搬環境	見通しオフィス / キオスク環境	
所要 PER	8 % (再送制御前)	

利用モデル #5 は CoMPA 提案による利用モデルであり，利用モデル #1 と併せて，TG3c では必須利用モデルとして採択されている。

3.2 IEEE802.15.3c 標準のための MAC 拡張について

IEEE802.15.3c 標準における MAC は基本的に 15.3b MAC により実現することになっている。しかし，15.3c がミリ波帯の周波数を扱う物理層の標準であるため，例えば指向性アンテナを用いることに起因した特別な端末発見機能などを 15.3bMAC に加える必要があると見られている。

3.3 IEEE802.15.3c 標準のためのチャネルモデル [9] ~ [13]

標準となる物理方式を決める上で，対象とする周波数帯の伝搬特性の把握とモデル化は非常に重要である。TG3c では表 6 に示すように，環境を八つに分類し，それぞれについて伝搬データの取得と伝搬路モデル化を検討してきた。それぞれの検討状況と採択されたものについてはその提出機関先を表 6 に示す。

表 6 から明らかなように，見通し外の机上環境や図書館の環境など完成しなかったものがあるが，それ以外についてのほとんどの伝搬モデルが NICT により提出され採用されている。ここで採用された伝搬モデルは，従来から IEEE 標準などで利用されてきた Salah 及び Valenzuela によって開発された散乱波伝搬モデル “SV モデル [9]” に，Shoji 及び Sawada によって開発された見通し波伝搬モデルを合成した “TSV モデル (Triple-S-V モデル) [10]” と呼ばれる，ミリ波固有の伝搬特性を考慮した伝搬モデルとなっている。

図 6 は TSV モデルの概念図を示している。波の到来

表6 TG3c における伝搬モデルの分類

環 境	見通し(-LOS-)	見通し外(-NLOS-)
オフィス	利用可 (NICT)	利用可 (NICT)
家 屋	利用可 (NICT)	NICT データより抽出
机 上	利用可 (NICT)	N/A
図 書 館	利用可 (IMST/Intel)	N/A

図6 TSV モデルの概念図

時間 (ToA : Time of Arrival) と到来方向 (AoA : Angle of Arrival) の観点からの図面となっており，振幅に統計分布特性をもつ見通し (LOS : Line-of-sight) 波と，それ以外の見通し外 (NLOS : Non-line-of-sight) 散乱波統計モデルとの合成により表される。図面では見通し波成分の振幅を α_{LOS} として表し，複数のクラスタと呼ばれる遅延波群の集合については，第 1 クラスタの第 1 遅延波成分に対して振幅 Ω_0 を与えている。更に本振幅を起点に生起率 Λ ，減衰係数 Γ で，第 2，第 3 と順次クラスタが生起し，また，これらクラスタ内では生起率 λ ，減衰係数 γ で遅延波が発生するモデルとなっている。なお各遅延波の到来方向については無指向性を基本として $0 \sim 360$ 度の一様分布で与えるが，ミリ波では送受指向性アンテナが利用されることを考慮してアンテナパターンを畳み込み，最終的に受信される遅延波成分が選択される。

ところで，既に触れたようにミリ波帯の電波は直進性が強く，伝搬損も極めて大きい。これに加えて，十分に成熟していないミリ波デバイスの普及を考えた場合には，見通し環境下で需要の見込めるシステムを目指すことが望ましいのは明らかである。

上記のような観点から NICT は見通し環境モデルを重要伝搬モデルと位置づけ，多くの伝搬データ測定を実施すると同時に伝搬モデルを完成させた。

更に NICT は，提案した伝搬モデルに基づいて伝搬

路をシミュレートする Matlab コードについても、併せて開発し、これを TG3c のメンバに配布している [12], [13]。TG3c における提案者はこれを使用して、自身の提案方式の性能を示すことになる。

更に方式提案に際しては、伝搬モデルにアンテナパターンを加味してシミュレーションを行うことになっている。IEEE の標準化では、各提案者からの提案方式を比較検討し、必要であれば提案のマージを行い、方式を決定する。このため、各提案を公平に比較するためにシミュレーションの前提条件をそろえる必要がある。CoMPA では、アンテナモデルとして次のようなモデルを提案し、リファレンスアンテナモデルとして採用されている [24]。

$$G(\theta, \phi) [\text{dB}] = G_0 - 3.01 \cdot \left(\frac{2\theta}{\theta_{-3\text{dB}}} \right)^2$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_{ml}/2$$

$$G(\theta, \phi) [\text{dB}] = -0.4111 \cdot \ln(\theta_{-3\text{dB}}) - 10.597$$

$$\theta_{ml}/2 \leq \theta \leq 180^\circ$$

$$\theta_{ml} = 26 \cdot \theta_{-3\text{dB}}$$

$$G_0 = 10 \log \left(\left(\frac{1.6162}{\sin \left(\frac{\theta_{-3\text{dB}}}{2} \right)} \right)^2 \right)$$

ここで、 $G(\theta, \phi)$ は z 軸に回転対称なビームを表す。また、 $\theta_{-3\text{dB}}$ はビームの半値角であり、これを与えることにより指向性パターンを決定することができる。 θ の単位は degree である。

4. キオスクファイルダウンロードと実用上の懸案事項 [14], [15]

キオスクファイルダウンロードはミリ波デバイスの早期実用化を願う CoMPA 参加企業間の議論のもと、重要と位置づけられた利用シナリオの一つである。本章で

図 7 キオスクファイルダウンロード

は、キオスクファイルダウンロードの概要を改めて述べると同時に、これを実現する上での懸案事項とされた、端末の手ぶれの影響 (PDA ジッタ) についての検討結果について解説する。

4.1 キオスクファイルダウンロードの利用イメージ

図 7 にキオスクファイルダウンロードのアプリケーションイメージを示す。

駅構内やコンビニエンスストアなどに、ミリ波デバイスが搭載されたキオスクサーバが設置され、ユーザが所持する携帯電話や PDA などの携帯端末に、これと通信可能なミリ波デバイスが搭載されている環境を想定している。

ユーザは所望の映像や音楽、ゲームソフトなどのコンテンツを指定することで、自身の携帯端末に数秒程度でこれを無線にてダウンロードする。

この場合の通信に想定される所要スペックとしては、通信距離は 1 m 以下の非常に短距離で十分であると同時に、データレートについても、最大 1 Gbit/s 未満で十分と考えている。これはまだ数年先を見越しても、ストレージのデータレートが 1 Gbit/s 以上には及ばないとの予測からである。

4.2 キオスクファイルダウンロードにおける PDA ジッタの影響調査

CoMPA が推進する利用シナリオ、キオスクファイルダウンロードはユーザ端末の位置が人の手によって支持されることを想定している。したがって、通信中に手ぶれ (PDA ジッタ) によって受信電力の時変動が発生すると考えられる。したがって、これが信号品質に与える影響を考慮すべきとの議論が TG3c 会合内であった。

これを受け、CoMPA では実際にキオスクダウンロードを想定した送受通信環境を整え、複数の試験者に依頼することで、PDA ジッタの影響測定を実施した。本測定の主なパラメータを表 7 に示す。

本測定では、ネットワークアナライザを用いて構成した送受信アンテナ間のリンクをキオスクダウンロードの送受信リンクとみなして、複数の試験者におよそ距離 1 m 点で、試験中には結果が試験者には分からない状態、すなわち試験者の目安のみで受信機となる受信アンテナを送信アンテナに向けてもらい 20 秒間静止してもらうという測定を複数回実施した。これにより得られた結果の 1 サンプルを例として図 8 に示す。

表 7 PDA ジッタの影響測定のパラメータ

通信距離	1 m
使用周波数	62.5 GHz
アンテナビーム幅	送信 : 60° / 受信 : 30°
掃引(観測)時間	20 秒 (801 点)
サンプル数	20 (4 人 × 5 回) サンプル

取得した 20 サンプルの結果を集計し、これを相対振幅値対確率密度で表示したものを図 9 に、相対振幅値対累積確率密度で表示したものを図 10 に示す。

これらの集計結果から、PDA ジッタとして現れる受信振幅の揺らぎは、測定では 99% 累積値で 0.45 dB を

図 8 PDA ジッタ測定結果の 1 サンプル例

図 9 PDA ジッタ測定の集計結果 (相対振幅値と確率密度の関係)

図 10 PDA ジッタ測定の集計結果 (相対振幅値と累積確率分布の関係)

示しており、最大の振幅揺らぎ値を考慮した場合でもたかだか 0.7 dB 以下という結果を得た。

以上の結果から、実際のキオスクダウンロードシステムの設計若しくは運用上、PDA ジッタの影響はほとんど無視してよいと結論づけられた。また、この結果は TG3c 内においても受け入れられた。

5. IEEE802.15.3c 標準のための物理層検討

5.1 物理層検討において考慮すべき利用モデル及びチャンネルモデル

3.でも述べたように TG3c では五つの利用モデルが定義されており、このうち、二つのモデルが必須利用モデルとして定められている。一つはポイント-ポイント型非圧縮映像伝送アプリケーションを想定した利用モデル #1 であり、もう一つは駅構内やコンビニエンスストアなどに設置されたキオスクサーバに対して携帯電話や PDA などの携帯端末で音楽、ゲームソフト等のコンテンツをダウンロードすることを想定した利用モデル #5 である。この二つの利用モデルのシステム要求条件を改めて表 8 に示す。

各利用モデルにおいて想定すべき環境や所要条件についても併せて同表に示している。

5.2 物理層案として検討すべき項目

物理層の設計を行う上で重要となる検討項目には、以下の四つが挙げられる。

- (1) 周波数プラン
- (2) 回線設計
- (3) フレームフォーマット
- (4) 変調方式、誤り訂正方式

(1) に関しては現在、免許不要 60 GHz 帯の使用帯域が各国で異なるため、可能な限り各国共通に使用できる周波数プランが望ましい。また、TG3c が求める 2 Gbit/s 以上の伝送レートをできるだけ簡易な機器構成で実現すると同時に米国、日本それぞれで割り当てられている 7 GHz 帯で最低 3 チャンネルが割当可能であるこ

表 8 利用モデル #1 及び M#5 の要求条件

利用モデル #1	
通信距離	5 m/10 m
スループット	1.78 Gbit/s/3.56 Gbit/s
伝搬環境	LOS/NLOS Residential model
所要 BER/PER	10^{-9} Pixel Error Rate
利用モデル #5	
通信距離	1 m
通信速度	1.5 Gbit/s/2.25 Gbit/s パースト伝送
伝搬環境	LOS office model
所要 BER/PER	8% PER

図 11 周波数割当プラン (Channelization) の例

表 9 リンクバジェット解析の例

利用モデル	UM#5	単 位
伝搬モデル	Kiosk	
所要 PER	PER=0.08	
シンボルレート	1.664	Gsymbol/s
変調方式	QPSK	
符号化方式	RS (255, 239)	
PHY-SAP ベイロードデータレート (R_b)	3.119	Gbit/s
送信電力 (P_T)	10	dBm
送信アンテナ利得 (G_T)	15	dBi
中心周波数 (f_c)	60	GHz
パスロス (1 m) (PL_0)	68	dB
受信アンテナ利得 (G_R)	15	dBi
ビット当りの雑音電力 ($N = -174 + 10 \log_{10}(R_b)$)	-79.1	dBm
雑音指数 (N_F)	10	dB
雑音電力 ($P_N = N + N_F$)	-69.1	dBm
所要 E_b/N_0 (S) (PER=0.08)	6.6	
シャドーイングマージン ($M_{\text{shadowing}}$)	1	dB
実装損 (I)	5	dB
受信感度 ($P_{th} = S + P_N + M_{\text{shadowing}} + I$)	-56.5	dBm
リンクマージン	28.5	dB

とが必要とされる。仮に周波数分割方式によりチャンネル割当を実現すると、図 11 に示すようにチャンネル当りの最大帯域幅は 2.317 GHz となる。

(2) に関しては受信感度を検討するために表 9 に示すような回線設計を行う必要がある。TG3c にて採択された伝搬モデルを用いて提案方式の BER や PER 特性を評価し、利用モデルが要求する通信距離を満たすか、またマージンが何 dB あるかを示す必要がある。

また (3) に関しては TG3c においては 802.15b で規定されているスーパーフレームとフレームフォーマットが前提となり、同期、伝搬路状況を推定する PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) プリアンブル、物理層と MAC 層のヘッダを送信する PLCP ヘッダ、並びにデータペイロードである PSDU (PHY Service Data Unit) からなる。

このような基本フレームフォーマット構成から、システム上必要となるスループットを実現できるように具体

図 12 基本フレームフォーマット構成

図 13 物理層特性の評価方法

的なフレームの構成を検討する必要がある。また (4) の変調方式、誤り訂正方式を検討するためは、やはり伝搬モデルを考慮した、シミュレーションにより BER/PER 特性の評価検討を行うことで候補が見えてくる。特にミリ波増幅器の非線形性に対して耐性をもつ変調方式や、高速処理に耐えると同時にミリ波伝搬特性による誤り訂正に適した誤り訂正方式を検討する必要がある。

5.3 物理層評価で用いる通信モデル [16], [17]

図 12 で示したフレームの伝送特性を評価するために、図 13 に示す評価系で、MATLAB を用いた計算機シミュレーション手法によって実現する。この評価におい

図 14 伝搬路のモデル化

ては(1)伝搬特性、(2) PA の非線形特性、(3)位相雑音をシミュレータの中で使用できるようにモデル化を行い、それを組み込む必要がある。

(1) 伝搬特性のモデル化は既に 3. にて解説したように TSV モデルが利用できる状態にある。シミュレーション検討に必要となる各パラメータの概要を図 14 に示す。

なお、TSV モデルのチャネルレスポンスは次式で表される。

$$h(t) = \beta \delta(t) + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{l,m} \delta(t - T_l - \tau_{l,m}) \delta(\varphi - \psi_l - \psi_{l,m})$$

$$\beta = \frac{\mu_D}{D} \left| G_{r1} G_{r1} + G_{r2} G_{r2} \Gamma_0 \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda_f} \frac{2h_1 h_2}{D} \right] \right|$$

$$|\alpha_{l,m}|^2 = \Omega_0 e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{l,m}/\gamma} e^{-k[1-\delta(m)]} \sqrt{G_r(0, \psi_l + \psi_{l,m})}$$

$$\angle \alpha_{l,m} \propto \text{Uniform}(0, 2\pi]$$

ここで、 β は見通し波の振幅係数、 $\alpha_{l,m}$ は l 番目クラスタ中における m 番目レイの遅延波の振幅係数、 T_l は l 番目クラスタの遅延時間、更に $\tau_{l,m}$ は l 番目クラスタにおける m 番目レイの遅延波の遅延時間となっている。更に、 ψ_l は l 番目クラスタの到来方向、 $\psi_{l,m}$ は l 番目クラスタ中 m 番目レイ到来方向を指す。また、 G_{t1} や G_{r2} などについてはその t や r の下付き記号によりそれぞれ送信信号及び受信信号に対するアンテナ利得を意味するが、ここで見通し波が 2 波モデルで表現できることを考慮して、更に便宜上、直接受信信号に相当するものを 1、机上による 1 回反射信号に相当するものを 2 として表している。

上記の TSV モデルに従ったチャネルレスポンスを実現する MATLAB ブロック、並びにこのブロックから生成される家屋伝搬モデル及びオフィス伝搬モデルの実現例は既に CoMPA より TG3c に提出され、正式な伝

(a) 測定例

(b) TSV モデル生起例

図 15 チャネルレスポンスの比較

搬路モデル生成ブロック及びその参照データとして採用されて、IEEE サーバに公開されている。

例として、家庭内環境において実測したチャネルレスポンスと TSV モデルにより得たチャネルレスポンスの比較例を図 15 に示す。見通し波成分の生起と遅延波のクラスタの様子がうまくシミュレートできている様子がうかがえる。

(2) PA の非線形特性のモデル化については、TG3c においては次式で示される Modified Rapp モデルが採用されている。

$$F_{AM-AM}(y) = \frac{Gx}{\left(1 + \left(\frac{Gx}{V_{sat}}\right)^{2p}\right)^{\frac{1}{2p}}}$$

$$F_{AM-PM}(\theta) = \frac{Ax^q}{\left(1 + \left(\frac{x}{B}\right)^q\right)}$$

ここで G : 小信号利得、 V_{sat} : 飽和出力電力、 p : フィッティングパラメータである。また、 A 、 B 、 q は、実測値から得られるフィッティングパラメータである。

図 16 PER 特性(BPSK, 見通しオフィス)

図 17 PER 特性(QPSK, 見通しオフィス)

モデル化の例は文献[16]に示されている。

最後に (3) 位相雑音のモデル化は TG3c においては次式で示されるモデルが採用されている [17]。

$$PSD(f) = K \cdot \frac{\left[1 + \left(\frac{f}{f_z}\right)^2\right]}{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right]}$$

ここで K は PLL の低周波数ノイズ, f_p は極周波数そして f_z は零周波数である。以上のモデルを利用して物理層の評価を行う必要がある。

なお f_z が 100 MHz, f_p が 1 MHz, そして K が -87 dBc/Hz の場合の特性例が [25] に示されている。

5.4 物理層の基礎検討と評価結果例

5.4.1 基礎検討

ミリ波 WPAN という比較的近距離での利用形態を想定すると端末を小電力で駆動することが望ましく、ま

表 10 評価で使したパラメータ

帯域	7		GHz
チャンネル数	3		
帯域 / チャンネル	2.33		GHz
変調方式	QPSK	BPSK	
検波方式	同期	同期	
変調多値数レベル	2	1	
シンボルレート	1.6	1.6	Gsps
ロールオフファクタ	0.35	0.35	
PHY ペイロード長	2048		byte
PSDU コードレート	3/4		
PSDU 伝送時間	6827	13653	ns
伝送レート(符号化なし)	3.2	1.6	Gbit/s
ペイロードデータレート	2.4	1.2	Gbit/s

たデジタル信号処理においては、できるだけ低ビット分解能で処理できることが望ましい。これらの観点から CoMPA ではシングルキャリア (SC : Single Carrier) 方式を基本提案方式として標準化を目指している。

しかしながら、TG3c が求める 2 Gbit/s 以上を ASK, FSK, BPSK 等で伝送を行うと図 11 に示した周波数プランを満たすことが難しくなる。

また、ミリ波帯での高度な多値変調方式の利用は位相雑音による劣化を受けやすい。そこで、QPSK, オフセット PSK 等が基本伝送モードとなる。MSK も帯域制限の面からは有効な手段と考えられるが、マルチパス環境での使用も想定すると、受信側で周波数軸等化を行う場合に周波数軸上での振幅が安定しないため、安定な等化性能を得ることが難しいという課題がある。なお、誤り訂正については近距離通信を行う場合はリードソロモン符号が中心と考えられるが、見通し外環境や高効率符号化性能を考えた場合、畳込み符号や LDPC 符号の利用も候補として考えられる。

5.4.2 基礎伝送特性例

図 16 及び図 17 に、表 10 に示した評価パラメータを用いて QPSK 若しくは BPSK 変調で 2048 Byte パケットを伝送した場合の PER 伝送特性を示す。同図には、誤り訂正の使用した場合と使用しなかった場合 (w/coding または w/o coding) 及び 5.3 に示したモデルに従う位相雑音の影響を信号に重畳した場合と使用しなかった場合 (w/PN または w/o PN) のそれぞれについて結果を示している。

PA に対する出力バックオフ値は 3 dB としている。同図より見通しオフィス伝搬環境下において BPSK 方式及び QPSK 方式が PER=8% を満足するためには E_b/N_0 としては、4.8 dB 以上及び 6.7 dB 以上が、それぞれ必要であることが分かる。

6. む す び

本論文では、近年注目を浴びている免許不要 60GHz 帯 WPAN の標準化活動を行う IEEE802.15.3c (TG3c) の動向について解説した。また、シングルキャリア方式をベースとして物理層提案を TG3c へ共同検討し、早期ミリ波デバイスの実現と普及を目指しているミリ波実用化コンソシアムの設立概要と、同コンソシアムが提案検討中の利用モデルであるキオスクファイルダウンロードの詳細、また検討中の物理層に関する評価項目、評価に必要な各種モデル、物理層特性 (PHY) の基礎検討結果例について紹介した。

文 献

- [1] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>
- [2] B. Razavi, "A mm-Wave CMOS heterodyne receiver with on-chip LO and divider," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.188-189, Feb. 2007.
- [3] S. Emami, C. H. Doan, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, "A highly integrated 60 GHz CMOS front-end receiver," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.190-191, Feb. 2007.
- [4] B. Heydari, M. Bohsali, E. Adabi, and A. M. Niknejad, "Low-power mm-Wave components up to 104 GHz in 90nm CMOS," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.190-191, Feb. 2007.
- [5] A. Natarajan, B. Floyd, and A. Hajimiri, "A bidirectional RF-combining 60 GHz phased-array front-end," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.202-203, Feb. 2007.
- [6] B. Floyd, S. Reynolds, U. Pfeiffer, T. Beukema, J. Grzyb, and C. Haymes, "A silicon 60 GHz receiver and transmitter chipset for broadband communication," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.182-183, Feb. 2006.
- [7] A. Sadri, "802.15.3c Usage Model Document (UMD)," 06-0055-21-003c, May 2007.
- [8] Y. Shoji, C.-S. Choi, S. Kato, I. Toyoda, K. Kawasaki, Y. Oishi, K. Takahashi, and H. Nakase, "Re-summarization of merged usage model definitions parameters," IEEE 802.15-06-0379-02-003c, Sept. 2006.
- [9] A. A. M. Saleh, et al., "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.5, no.2, pp.128-137, Feb. 1987.
- [10] H. Sawada, Y. Shoji, Chang-Soon Choi, K. Sato, R. Funada, H. Harada, S. Kato, M. Umehira, and H. Ogawa, "LOS office channel model based on TSV model," IEEE 802.15-06-0377-02-003c, Sept. 2006.
- [11] H. Sawada, Y. Shoji, Chang-Soon Choi, K. Sato, R. Funada, H. Harada, S. Kato, M. Umehira, and H. Ogawa, "LOS residential channel model based on TSV model," IEEE 802.15-06-0393-00-003c, Sept. 2006.
- [12] H. Harada, R. Funada, H. Sawada, Chang-soon Choi, Y. Shoji, and S. Kato, "A proposed plan to merge Intel MATLAB code and NICT MATLAB code," IEEE 802.15-06-0516-01-003c, Dec. 2006.
- [13] H. Harada, R. Funada, H. Sawada, and S. Kato, "CM Golden Set for PHY Simulation of TG3c (CM1.3)" IEEE 802.15-07-0580-00-003c, Jan. 2007.
- [14] Y. Shoji, R. Funada, H. Sawada, Chang-Soon Choi, K. Sato, H. Harada, and S. Kato, "Solutions-to-LOS-mmW-WPAN," IEEE 802.15-06-327-00-003c, July 2006.
- [15] Y. Shoji, Chang-Soon Choi, H. Sawada, S. Kato, I. Toyoda, K. Kawasaki, Y. Oishi, K. Takahashi, and H.

Nakase, "Performance degradation due to PDA jitter in UM5 simulation," IEEE 802.15-06-0440-02-003c, Nov. 2006.

- [16] C.-S. Choi, Y. Shoji, H. Harada, R. Funada, S. Kato, K. Maruhashi, and I. Toyoda, "Behavioral model of 60GHz-band power amplifier for SYS/PHY evaluation," IEEE 802.15-06-0396-01-003c, Sept. 2006.
- [17] Chang-Soon Choi, Y. Shoji, H. Harada, R. Funada, S. Kato, K. Maruhashi, and I. Toyoda, "RF impairment models for 60 GHz-band SYS/PHY simulation," IEEE 802.15-06-0477-01-003c, Nov. 2006.
- [18] H. Harada, et al., "CM MATLAB Release 1.1 Support Document," IEEE 802.15-07-0559-03-003c March 2007.
- [19] 加藤修三ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (1) 総論, 移動通信ワークショップ, pp.175-178, March 2007.
- [20] 荘司洋三ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (2) ターゲットアプリケーションとユーセージモデル, 移動通信ワークショップ, pp.174-182, March 2007.
- [21] 沢田浩和ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (3) チャネルモデル, 移動通信ワークショップ, pp.183-186, March 2007.
- [22] 原田博司ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (4) 物理層構成, 移動通信ワークショップ, pp.187-190, March 2007.
- [23] 児島史秀ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (5) 15.3cMAC における必要事項の検討, 移動通信ワークショップ, pp.191-194, March 2007.
- [24] 豊田一彦ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (6) アンテナ, 移動通信ワークショップ, pp.195-198, March 2007.
- [25] C.-S. Choi ほか, "IEEE802.15.3c ミリ波 WPAN に関する研究開発と標準化活動- (7) ミリ波 RF フロントエンド, 移動通信ワークショップ, pp.199-201, March 2007.

(平成 19 年 3 月 22 日受付, 5 月 18 日再受付)

荘司 洋三 (正員)

▶ 平 7 阪大・工・電気卒。平 11 同大学院博士後期課程工学研究科通信工学専攻了。同年、郵政省通信総合研究所 (現在の独立行政法人情報通信研究機構) に入所。以来、主としてミリ波通信システムの研究開発と標準化活動に従事。主任研究員。米国電気電子学会 (IEEE) 会員。平 12 本会学術奨励賞、平 15 CRL 優秀業績賞 (個人)、平

19 本会エレクトロニクス ソサイエティ賞各受賞。

原田 博司 (正員)

▶ 平 7 大阪大学大学院通信工学専攻博士課程了。同年、郵政省通信総合研究所入所。以来、デジタル信号処理を利用した高速移動通信技術、ソフトウェア無線通信技術、コグニティブ無線通信技術に関する研究に従事。平 8 オランダ・デルフト工大ポストドクトラルフェロー。現在、独立行政法人情報通信研究機構新世代ワイヤレス研究センターユビキタスマバイルグループ研究マネージャー。工博。平 18 本会業績賞、平 18 文部科学大臣表彰若手技術者賞各受賞。平 17 ~ 19 本会ソフトウェア無線研究専門委員会委員長。IEEE 会員。

加藤 修三 (正員:フェロー)

▶ 昭 52 東北大学大学院博士課程了。同年日本電信電話公社入社。昭 52 ~ 平 7 NTT 研究所にて衛星通信及び、パーソナル通信の研究に従事し、変復調・同期制御・誤り訂正方式の研究開発及び TDMA 装置の ASIC 化をリード。この間、世界初の TDMA 装置の ASIC 化に成功、また、世界初の 2 V 動作商用 ASIC の開発に成功。その後、米国で携帯電話 (IS-136) 用ベースバンド ASIC の開発に成功し、更に携帯電話の開発と製造に従事。日米でのビジネス経験を経て、現在、情報通信研究機構プログラムディレクタ、東北大学電気通信研究所客員教授、パシフィック・スター・コミュニケーションズ代表等を務める。IEEE フェロー。

豊田 一彦 (正員)

▶ 昭 60 阪大・工・通信卒。平 2 同大学院通信工学専攻博士後期課程了。工博。同年日本電信電話 (株) 入社。平 2 ~ 13 NTT 研究所及び NTT エレクトロニクス (株) にて、三次元 MMIC の研究及び事業化に従事。平 13 より NTT 研究所にて、60 GHz 帯ミリ波を使ったギガビットワイヤレスシステムの研究開発並びにミリ波 WPAN・ミリ波放送素材伝送システムの標準化に従事。平 16 ~ 19 新潟大学大学院客員助教授。現在、NTT 未来ねっと研究所主任研究員。平 6 本会学術奨励賞、Japan Microwave Prize (APMC'94)、平 15 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞、平 18 本会エレクトロニクスソサイエティ賞受賞。IEEE 会員。

高橋 和晃 (正員)

▶ 昭 63 横浜国立大学大学院工学研究科電子情報工学了。同年松下電器産業 (株) 入社、Bi-CMOS、GaAs デバイス、RF-MEMS 応用デバイスなどの研究に従事。松下技研 (株) 勤務を経て現在、松下電器産業 (株) ネットワーク開発センター勤務。ミリ波広帯域無線システム、デバイスの研究開発に従事。博士 (工学)、IEEE 会員。

川崎 研一 (正員)

▶ 昭 58 九大・工・電子卒。同年ソニー (株) 入社。TV 事業部にて衛星放送受信機の開発設計に従事。平元 ~ 2 テキサス大学オースティン校客員研究員。平元 ~ 8 ソニー (株) にて衛星放送受信機の開発設計に従事。平 8 ~ 17 米国 Sony Electronics, Inc 社 テクノロジーセンターサンディエゴに赴任。衛星放送受信機の開発、米国地上波 DTV 受信機の研究開発、60 GHz 無線システムの研究に従事。平 17 よりソニー (株) RF・信号処理開発部にてミリ波 CMOS システムの研究開発に従事。IEEE 会員。

池田 秀人

▶ 昭 50 山梨大・工・電気卒。同年沖電気工業 (株) 入社。昭 56 ~ 平 6 国内及び同社米国法人において AMPS・TACS 方式携帯電話機の設計開発及び製造に従事。平 7 ~ 11 同社シンガポール R&D センタ勤務。WCDMA 関連技術の研究開発を支援。現在同社横須賀 R&D センタ勤務。ミリ波ホームネットワークプロジェクトに従事。

大石 泰之 (正員)

▶ 昭 59 筑波大・第三学群・基礎工学類卒。同年 (株) 富士通研究所入社。以来、PDC、WCDMA 等の携帯電話システムをはじめとする移動無線通信の研究開発に従事。現在、ネットワークシステム研究所先端ワイヤレス研究部長。平 15 電気科学技術奨励賞 (オーム技術賞) 受賞。IEEE 会員。

丸橋 建一 (正員)

▶ 平元神戸大・理・物理卒。平 3 同大学院理学研究科修士課程了。同年日本電気 (株) 入社。化合物半導体低雑音 FET、ミリ波集積回路、ミリ波モジュールの研究開発に従事。現在、日本電気 (株) デバイスプラットフォーム研究所主任研究員。IEEE 会員。

中瀬 博之 (正員)

▶ 1989 東北大・工・電気卒。1995 同大学院工学研究科博士課程 (電気及通信) 了。博士 (工学)。同年日本電信電話 (株) ワイヤレスシステム研究所入社。1999 より東北大電気通信研究所助手。2005 同助教授。現在に至る。移動通信ネットワーク、無線通信技術に関する研究に従事。1994 第 4 回 PIMRC 学生論文賞。1996 第 11 回電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術賞) 2005 FPGA/PLD Design Conference ユーザプレゼンテーション審査員特別賞各受賞。IEEE、エレクトロニクス実装学会各会員。

安藤 真 (正員)

▶ 1979 東京工業大学大学院博士課程了。同年電電公社入所。1982 東京工業大学助手。1995 同教授。電磁界理論、アンテナの研究に従事。国際電波科学連合 Commission B 委員長、IEEE アンテナ伝搬ソサイエティ AdCom、EU ACE Scientific Council、本会エレクトロニクスソサイエティ会長。1992 第 8 回井上賞、1993 本会業績賞、論文賞、2004 電波功績賞、2006 情報化促進貢献に対し総務大臣表彰。