ミリ波ワイヤレスアクセスシステムの動向

非会員 小川 博世*

Recent Trend of Millimeter-Wave Access Systems

Hiroyo OGAWA*, Non-member

This paper describes the recent trend of millimeter-wave wireless access systems which utilize the advantages of millimeter-waves. The fixed wireless access systems are first discussed and newly developed testbed at Yokosuka city area for broadband transmission is introduced. Then three promising short distance wireless access systems using 60-GHz frequency are discussed. The first one is on video transmission in the house, the second on vertically -connected link for the apartment infrastructure, and the third on wireless personal area ad-hoc system. Lastly millimeter-wave self-heterodyne transmission method is briefly introduced which can decrease the complex and cost of millimeter-wave local oscillators.

キーワード：ミリ波，ワイヤレスアクセス，60GHz，WPAN

Keywords: Millimeter-Wave, Wireless Access, 60GHz, WPAN

1. まえがき

近年，携帯電話や無線 LAN に象徴されるように無線アクセスシステムは，目覚ましい発展を遂げており，さまざまなサービスの提供や高度化に向けた研究開発が移動通信分野および固定通信分野で盛んに行われている。使用する周波数はマイクロ波からミリ波に至り，サービス速度，サービス環境等によって最適な周波数が適用されている。特にミリ波帯の周波数はその広帯域特性から超高速（100Mbps 以上の情報伝送速度）アクセスシステムを実現する上で，有効な周波数帯と考えられ，すでにいくつかのアクセスシステムが標準化，さらには実用化されている。本稿では，このようなミリ波帯の特徴に着目して，最近のミリ波システムの取り組みについて紹介する。

固定や低速移動の無線アクセスシステムの利用シーンとしては，ホットスポットでのインターネットアクセス

（WLAN: Wireless Local Area Network），住宅やマンションなど各家庭のインターネットアクセスや家庭内ネットワーク（WPAN: Wireless Personal Area Network），アクセスポイントへの中継用回線，オフィス・企業網等における加入者系アクセス（WMAN: Wireless Metropolitan Area Network），が挙げられる。最近は ADSL 等による

インターネットの爆発的な普及とブロードバンド化（ギガビット・イーサネットの普及）を背景に，上記の無線アクセスシステムでは，移動通信システム以上にブロードバンド化の波が押し寄せており，DVD，HDTV 画像など大容量のコンテンツをストレスなく扱うことのできる 100Mbps を超える無線アクセスシステムの早期実現が求められている。近年では，UWB（Ultra Wide Band）システムが近距離で屋内利用に限った 100Mbps 超（最大で 480Mbps）の無線通信システムとして実用化に向けて動き出しており，今後の動向が注目されている。

本稿では，ミリ波周波数の利用状況を踏まえ，今後のミリ波帯システムの超高速ワイヤレスアクセスの展開について独立行政法人通信総合研究所で検討されている内容について述べる。

2. ミリ波周波数の利用状況

（1）加入者系無線アクセス

（a）22-GHz 帯（800MHz）

周波数 22.0-22.4GHz, 22.6-23.0GHz

（b）26-GHz 帯（1750MHz）

周波数 25.25-27.0GHz

（c）38-GHz 帯（900MHz）

周波数 38.05-38.5GHz, 39.05-39.5GHz

（2）成層圏プラットフォーム（WRC00 でアジアを中心に 13 カ国に分配）

周波数帯 27.5-28.35GHz, 31.0-31.3GHz

（3）簡易無線（データ伝送，画像伝送等）

* 独立行政法人通信総合研究所

〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 3-4

Communications Research Laboratory, Incorporated Administrative Agency

3-4, Hikarino-oka, Yokosuka 239-0847

- 周波数帯 50.4-51.4GHz
- (4) 列車監視システム
周波数帯 45GHz 帯
- (5) 高速無線回線(電気通信業務及び自営用), 放送番組素材システム等
周波数帯 54.25-59GHz
- (6) 映像多重伝送, 超高速無線 LAN, 無線ホームリンク, 移動体アクセス, 衛星放送番組再伝送, ケーブル TV 無線伝送, 車々間通信等
周波数帯 59-66GHz
- (7) 自動車レーダー
周波数帯 60-61GHz, 76-77GHz

3. 加入者系無線アクセスシステム

無線アクセスシステムのうち, 無線 LAN や準ミリ・ミリ波帯を用いた加入者系無線アクセスシステムのラストワンマイル型や携帯基地局間の中継回線に使われる無線エントランス回線などは, これまで WLL(Wireless Local Loop) や LMDS(Local Multipoint Distribution Service) など, さまざまな名称で呼ばれてきたが, ITU の 1997 年世界無線通信会議において FWA(Fixed Wireless Access) が統一用語として採用された。また, 日本国内では平成 10 年 3 月に社団法人 電波産業界(ARIB)によって 22GHz 帯, 26GHz 帯および 38GHz 帯の標準規格が策定され, 現在多数のサービスが行われている。

加入者系無線アクセスシステムには, 基地局と加入者局の 2 地点間を 1 対 1 で結ぶポイント・ツー・ポイント(P-P: Point-to-point)方式と 1 つの基地局に対して複数の加入者局を 1 対多方向で結ぶポイント・ツー・マルチポイント(P-MP: Point-to-multipoint)方式の 2 種類がある。現在, P-P 方式は最大 156Mbps の通信速度で通信距離 4km 程度の構成, P-MP 方式は 10Mbps 程度の通信速度で半径 1km 程度のセル構成を用い, 加入者を収容するサービス形態が一般的である。しかし昨今はさらに広帯域であるとともに P-MP 方式のスター型に加えダブルスター型, リレー型およびメッシュ型などトポロジー的に多様で柔軟なネットワークが望まれるようになってきている。

3・1 38GHz 帯加入者無線アクセスシステム 本システムは, 通信速度が 622Mbps(片方向)である 3 組の P-P リンクから構成される。また, データフォーマットは, ATM 網での運用も考慮し SDH STM-4(SONET OC-12)を使用している。各 P-P リンクは電波を送受信する屋外装置(ODU: Outdoor unit)と, 変復調などを行う屋内装置(IDU: Indoor unit)の対で構成される。各 P-P 方式において, 複信方式は周波数分割複信方式(FDD: Frequency division duplex)を用いている。中心周波数は, 下り回線で 37.00GHz, 上り回線で 36.25GHz である。そして各 P-P リンクは, 下り回線と上り回線でそれぞれ 1 キャリア当たり 156Mbps の 4 マルチキャリア方式を用いて 622Mbps を実現している。なお, 周波数の利用効率を高

図 1 YRP 地区における FWA のテストベッド構成図

Fig. 1. Testbed at yokosuka research park.

める検討を目的として, 各リンクでは 16QAM, 64QAM 及び 128QAM の異なった変調方式を用いている。周波数利用効率の向上を目指して検証を重ねた結果, 16QAM から 64QAM, そして 128QAM と多値化を進めるとともにキャリア間隔を 80MHz(16QAM), 40MHz(64QAM), 31MHz(128QAM)と狭くすることを本システムでは実現した。128QAM においては, 99%電力帯域幅: 120MHz, 周波数利用効率: 5.2bit/Hz(16QAM に比べて 2.4 倍の利用効率)を実証している。

3・2 FWA テストベッドの構築 38GHz 帯広帯域ミリ波加入者無線アクセスシステムの 3 本の P-P リンクは物理層とデータリンク層で構成されるため, ルータを用いて上位レイヤであるネットワーク層で接続することにより, スター型のネットワークを構成し, 4 地点を結ぶ 1 対 3 の P-MP 方式と同等の機能を実現した。図 1 に, 神奈川県横須賀市の横須賀リサーチパーク内に構築したテストベッドの構成および使用する無線装置の写真を示す。従来 P-MP 方式には TDMA などの多元接続方式がとられているが, 同じ周波数を共有でき効率的な反面, 複数の加入者により帯域を固定的または動的にシェアしなければならず, 加入者数の制約もあるため広帯域化は望めなかった。本システムは, 無線リンクを広帯域化が比較的容易な P-P リンクで構成し, IP 機器(ルータ)で結ぶことにより広帯域かつ多様なネットワークを実現できることを示している。つまり ISP などの WAN 側のインターフェースに十分な帯域があり, ルータに十分な処理能力があれば, P-MP においても P-P 間相当の通信が可能になることである。また, 通常の LAN と同等の考え方で扱えるのでリレーや分岐などの柔軟性は高いといえる。基地局—加入者局間および加入者—加入者局間の基本的なネットワーク評価を行い, イーサネットベースで最大スループット 530Mbps が得られた。今後アプリケーション伝送等も含めた応用について検討する予定である。

図 2 東京都内における 32GHz 帯伝搬試験の概要

Fig.2. 32GHz propagation experiment at Tokyo metropolitan area.

3.3 新たな周波数への展開 2000 年の世界無線通信会議において、新たに固定サービス用周波数として 6 つのバンドの使用が確認された。具体的には、31.8-33.4GHz, 37-40GHz, 40.5-42.5GHz, 51.4-52.6GHz, 55.78-59GHz, 64-66GHz であり、今後の展開が期待されている。そこで、32GHz 帯については、東京都内において青山を中心とする伝搬試験系を構築し、降雨時伝搬特性を取得している(図 2)。青山から四谷(2.30km)、麻布(2.35km)、赤坂(2.09km)に放射状に設置された 32GHz 帯 3 区間で降雨減衰測定を、送受信点を含む 10 地点で雨滴計数型雨量計により降雨強度測定を実施している。

3.4 ギガビットミリ波無線アクセス IP 網との親和性を高めるため物理レイヤから上位レイヤまで含んで設計することのできる FWA システムとして機能の向上を図ったギガビットミリ波無線アクセスの検討が行われている(図 3)。本システムは加入者のブロードバンドアクセス手段のみならず、広帯域伝送を活用して新旧様々な無線アクセスポイントへのエントランス網にも使用可能であり、将来のヘテロジニアスアクセス網のインフラとしても利用できる。

本システムはミリ波帯を使用し、1Gbps P-P リンクで構成されたメッシュ型基幹網とユーザ当たり数十 Mbps の P-MP アクセスリンクの 2 階層構造から構成される。P-P 方式の基地局は中継機能を持ち、同時に P-MP リンクのアクセスポイントとなる。降雨減衰による低品質リンクの迂回やトラヒック分散のため P-P 基地局は無線ルーティング機能を具備し、効率的な伝送を行う。経路制御をレイヤ 2 トンネリングにより実現し、任意の ISP が使用可能とする。

3.5 不感知対策 FWA 用光ファイバ無線 都市内では高層ビル等のために基地局からの見通し率には限界がある。図 4 はビル影により加入者が直接基地局を見ることができない状況を示している。そのため基地局からリモート基地局へ光ファイバで給電することにより、P-MP アクセスリンクを実現している。リモート基地局では、4 本のアンテナを用いて 4 セクタに分割している。そこで、光多重方式として、これまで主にデジタル伝送で用いられてき

図 3 ギガビットミリ波無線アクセスシステム

Fig.3. Giga-bit millimeter-wave wireless access system.

図 4 ファイバ無線による不感知対策

Fig.4. Remote wireless access through fiber radio.

図 5 基地局およびリモート基地局光伝送装置の構成

Fig.5. Base station and remote base station.

た CWDM 技術を採用した(図 5)。CWDM 技術を導入することにより、厳密な波長安定化が不要で、しかも光/電気変換部の小型化を図ることができる。また、この技術は、波長多重方式であるため、各セクタ間での干渉の影響がないというメリットがある。

4. 60GHz 帯無線システム

平成 12 年に電波法が改正され 54.25GHz から 59GHz までの帯域幅 4.75GHz が免許要バンド、59GHz から 66GHz までの帯域幅 7GHz が免許不要バンドとして種々の無線システムでの利用が可能になった。表 1 に免許不要バンドの強制規格を示す。このように 60GHz 帯を用いる免許不要バンドはマイクロ波帯における免許不要バンドと比較して

表 1 免許不要バンドの主な規格

Table 1. Technical requirement of unlicensed band.

Output Power	$\leq 0.01\text{W}$
Output Power Deviation	$+50\%, -70\%$
Gain	$\leq 47\text{dBi}$
Frequency Deviation	$\pm 500\text{ppm}$
Occupied Bandwidth	$\leq 2.5\text{GHz}$
Spurious	$\leq 100\mu\text{W}$

極めて広い周波数帯域が利用可能であり、さらに通信方式や変調方式、周波数の許容偏差などに対する規定が緩いことに特徴がある。上述したような特徴と技術的条件から、免許不要バンドとしての 60GHz 帯は伝送距離においては短距離であり、非常に高速大容量の無線伝送に適した周波数帯である。家庭、オフィスなどの屋内では、超高速無線 LAN や無線ホームリンクなどの利用、また屋外ではビル間的高速通信や車車間通信、車載衝突防止レーダなどが主に検討されている。

4.1 ミリ波映像多重伝送システム 図 6 にシステムの概念図を示す。地上波や BS 放送、CS 放送などの放送信号が屋外の受信アンテナで受信された後、これらの信号が IF 帯において周波数多重化されて、小型のミリ波送信機に入力される。周波数多重化は周波数幅を最大 2.5GHz まで利用できるため、上記放送波の全てのチャンネルの同時伝送も可能である。ミリ波送信機は IF 帯の多重信号を 60GHz 帯へ周波数変換してアンテナより室内へ送信する。一方、受信チューナ機能を内蔵した各テレビ受像機にはミリ波受信機が内蔵もしくは取り付けられており、送信機より送信された信号を受信して、もとの IF 帯の映像多重信号へダウンコンバートされたのち、これがテレビチューナーへと入力される。このようにすることで、屋内にむけてテレビ多重信号を再放送するような形式となるため、本システムでは異なる場所の複数のテレビ受像機で同時に異なるチャンネルを受信することが可能となる。なお、60GHz 帯の電波は家屋内における一般的な内壁材程度であれば透過するので、テレビ受信に必要なアンテナ配線がされていない部屋で、隣の部屋に設置されているミリ波送信機からのテレビ信号を受信してテレビを楽しむといった使い方も可能である。このように、テレビ受像機の設置自由度を高めるだけではなく、壁掛けテレビ等への無線による配線も可能となり、各家庭におけるテレビの使用形態を変える可能性を秘めていると考えられる。図 7 は、モノリシック集積回路技術 (MMIC) を用いたミリ波送信機の概観写真を示す。表 2 は、60GHz 帯信号の透過特性例を示す。このようなパラメータを参考に家屋内における回線設計を行うことが重要である。本方式は、電波産業会 (ARIB) で「特定小電力無線局ミリ波画像伝送用無線設備 (ARIB STD-T69)」として平成 12 年 12 月に規格化されている。

4.2 ミリ波縦系配線システム 現在、一部の集合

図 6 ミリ波映像多重伝送システム

Fig. 6. Millimeter-wave video distribution system.

図 7 ミリ波送信機概観写真

Fig. 7. External view of millimeter-wave transmitter.

表 2 60GHz 帯信号の透過損失特性

Table 2. Transmission loss characteristics of 60GHz frequency.

Material	V.P.	H.P.	C.P.
Concrete Wall	$\geq 40\text{dB}$	$\geq 40\text{dB}$	$\geq 40\text{dB}$
Concrete Board	23.7dB	25dB	24.2dB
Plaster Board	6.5dB	5dB	4.6dB
Glass	1.5dB	1.3dB	2dB

住宅では、衛星方向に障害物が存在するといった立地上の問題や、南西に面したベランダがなく受信アンテナの設置が困難といった建物構造上の問題から、衛星放送サービスを受受できない世帯が数多く存在している。平成 12 年度に実施された総務省の調査によると、このような衛星放送視聴困難状況にある集合住宅内世帯数は全国推計で約 90 万世帯にのぼるという報告がある。この問題を解決する手段として、ミリ波映像多重伝送システムの拡張として、ミリ波縦系配線システムを集合住宅用配線に応用することが考えられる。縦系配線システムとは、集合住宅の屋上と各

図 8 ミリ波縦系配線システム

Fig. 8. Millimeter-wave vertically-connected wireless link.

世帯との間を縦方向に、ミリ波の電波を使用して無線接続し、衛星放送をはじめ様々なメディアの信号を各家庭に伝送するシステムである。建物の構造によっては上下配線のみではなく地上に対して平行にミリ波配線することもありえる。図 8 にシステムイメージを示す。建物屋上で受けた BS 放送や CS 放送、地上波放送といった屋外アンテナからの信号が送信機に入力され、送信機から送信された信号（ミリ波帯）が、各世帯や別の建物に設置された受信機で受信される様子を示す。このように縦系配線システムは、簡易な設置が可能であるだけでなく、送信機から複数チャネルの同時伝送が可能であるため、衛星放送等の広帯域信号を受信するために屋上と各家庭との間に同軸ケーブルあるいは光ファイバ等の有線を敷設する必要がなく、配線工事のコストを削減できるという特徴がある。さらに、60GHz 帯は比較的大きな伝搬減衰を持ち、またアンテナの指向性も鋭いため、アンテナ間の干渉は無視できると考えられる。また送受信器が非常に小型であるため、建物の美観を損なうといった問題も解消される可能性が高い。設置具体例の写真を図 9 に示す。

4.3 ミリ波アドホックアクセスシステム 本システムは、ミリ波の短距離伝搬特性を利用したシステムであり、必要に応じて複数の端末が寄り集まり、即時的にネットワークを構築して相互通信を行う。図 10 はミリ波の極限られたエリアのみサービスを提供できる特長を生かしたアドホックホットスポットサービスと、ミリ波による非再生中継回線を使った面的なサービスエリアの拡張性を有したアドホックシステムの概念図を示す。アクセスポイント的な役割を果たす高所に設置された固定マスター局は、ネットワークに接続されており、その下部にスポット状のサービスエリアを展開するが、さらに P-P リンクによって異なる場所の固定マスター局と非再生中継リンクを張ることで、別の固定マスター局についても同等のスポットサービスを展開することが可能となっている。これによって有線によ

図 9 集合住宅における送信機および受信機設置状況

Fig. 9. Millimeter-wave TX and RX at apartment.

図 10 ミリ波アドホックアクセスシステム

Fig. 10. Millimeter-wave ad-hoc access system.

Mobile Terminal (MT)

Access Point Terminal (APT)

図 11 アドホック無線装置概観

Fig. 11. External view of ad-hoc equipment.

図 12 ミリ波自己ヘテロダイン方式

Fig. 12. Millimeter-wave self-heterodyne transmission system.

るネットワークを構築することなく面的な広がりを持つミリ波アドホック通信ネットワークを実現している。図 11 に無線装置概観の写真を示す。

5. ミリ波自己ヘテロダイン方式

ミリ波システムにおいては、送受信機内に含まれる局部発振器の周波数安定度、位相雑音が信号伝送特性及ぼす影響が深刻な課題である。従来方式の送信機では局部発振器を用いて IF 信号をミリ波帯 (RF) 信号に変換し、受信機はこれを IF 信号に再変換を行う。原信号の忠実な再生には送信機および受信機それぞれの局部発振器の周波数が高安定であり、かつ低位相雑音特性が要求されている。そのため局部発振器が高価になり、ミリ波装置のコスト高の最大の原因となっていた。

このような問題を解決するため、図 12 に示すミリ波自己ヘテロダイン方式が提案されている。この方式では、送信機において RF 帯周波数変換するための局部発振機のローカル信号を RF 変調信号と共に送信する。一方受信回路においてはこれらの信号を受信アンテナで受信して増幅した後、二乗検波 (自己ヘテロダイン検波) することで元の IF 帯信号へ周波数変換する。自己ヘテロダイン方式の適用によって受信回路ではコスト高の要因となる局部発振器そのものが不要になると同時に、送信回路の RF 部で使った局部信号の周波数ドリフトおよび位相雑音を完全にキャンセルすることができる。ただし自己ヘテロダイン方式を適用した場合、送信電力を、信号伝送だけでなくローカル信号の伝送にも振り分ける必要があるため、自己ヘテロダイン方式適用による NF 劣化は従来方式と比較して 9dB 劣化するが、位相雑音や周波数オフセットの問題を完全にキャンセルできるため、低コストなミリ波システムを実現するためのキー技術として、ミリ波自己ヘテロダイン方式を考えることができる。

6. むすび

本稿で紹介したミリ波システムは、毎年横須賀リサーチパーク (YRP) で開催されているシンポジウム『Topical Symposium on Millimeter Waves』(TSMMW) において議論されており、今後の進展が期待される。特に FWA システムに関しては、これまで通信総合研究所では広帯域ミリ波無線アクセスシステムのテストベッドを YRP 地区及び横須賀市役所等を中心とした横須賀地区に構築する予定である。このテストベッドを用いて、次世代インターネットをサポートし、且つ FTTH を速度において凌駕する高速広帯域のアプリケーションに関する検討を進める予定である。60GHz 帯システムは広帯域ミリ波無線アクセスシステムのラストマイルシステムとして有効であり、今後はこれらシステムをネットワーク的に接続していく予定である。

(平成 15 年 11 月 10 日受付)

文 献

- (1) 2nd Topical Symposium on Millimeter Waves, March (2000)
- (2) 3rd Topical Symposium on Millimeter Waves, March (2001)
- (3) 4th Topical Symposium on Millimeter Waves, March (2002)
- (4) 5th Topical Symposium on Millimeter Waves, March (2003)

小 川 博 世 (非会員) 1974 北海道大学工学部卒業。1976 年北海道大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) に入社。以来、マイクロ波・ミリ波技術、無線装置の研究開発に従事。1990 年 ATR 光電波通信研究所出向、マイクロ波・ミリ波フォトニクスの研究に従事。1993 年 NTT ワイヤレスシステム研究所復帰、衛星搭載機器、フェーズドアレーアンテナの開発に従事。1998 年

郵政省通信総合研究所入所、以来、ミリ波高速ワイヤレスアクセスシステムの研究開発、標準化に従事。現在、横須賀無線通信研究センター研究主管、工学博士。1998 Asia-Pacific Microwave Conference TPC 委員長、1999 Topical Meeting on Microwave Photonics Co-実行委員長、2002 Topical Meeting on Microwave Photonics 財務委員長、2002 Asia-Pacific Microwave Conference 実行副委員長、1999-2002 マイクロ波研究会副委員長、1999-2000 マイクロ波フォトニクス副委員長、2001-2002 マイクロ波・ミリ波フォトニクス委員長、2003 Microwave and Workshop 実行委員長、1997-2002 IEEE Microwave and Guided Wave Associate Editor。電子情報通信学会、IEEE 会員。