



# Understanding Millimeter Wave Wireless Communication

## ミリ波無線通信の概要

Prasanna Adhikari

VP of Business Development for Network Solutions

Loea Corporation, San Diego

©2008 Loea Corporation



**Mitsuhiro**  
TRADING SOLUTIONS

## はじめに

大容量データを利用するアップル社製 iPhone は、企業のデータセンターから 10 代の若者にまで幅広くエンドユーザ層に支持されるが、これまで以上に通信速度の高速化となる新技術開発が求められている。様々な技術は帯域幅を稼ぎ出すためにあり、光ファイバーケーブルが究極の帯域幅を伝送する媒体と考えられていた。しかし、全ての経済的要因を考慮すると、光ファイバーの絶対的優位性が霞んでしまう。

ミリ波無線技術は、光ファイバーに匹敵する帯域幅送信を実現する可能性を有しており、ケーブル敷設での物流課題や資金問題が発生しない。本書では、この新しい技術の制限事項や特性の概要を説明する。

## 技術概要

ミリ波は、一般的に 1mm から 10mm の波長で、30GHz から 300GHz の無線スペクトルに対応している。そして、無線通信の事情として、最近割り当てられた 70GHz から 90GHz の帯域 (E-Band と呼ばれる) は、既存の 38GHz、60GHz そして 94GHz 付近の電波帯域における公衆利用の無線通信目的となら変わらない。

## 経緯

無線通信業界での比較的新しいミリ波技術の歴史は、イタリア人のマルコーニ氏がラジオ通信の発明した時代である 1890 年代に Sir J.C. Bose (1858A.D.~1937A.D.) がミリ波信号の実験をしたことに遡る。Bose 卿の調査によれば、ミリ波技術は、半世紀近く大学や政府の実験室での範囲においてのみ取り扱われてきた。本技術は、1960 年代の電波天文学における初期の使用用途に遭い見え、続いて 70 年代の軍の使用用途となった。そして、80 年代には、ミリ波集積回路の開発が商業用途のミリ波製品の大量生産に拍車をかけた。

1990 年代、40GHz 超のミリ波周波数帯域で、最初の消費者指向の利用として、77GHz の自動車衝突回避用レーダーが登場した。1955 年、FCC (米国連邦通信委員会) は、59~64GHz を免許不要の無線通信の周波数帯域としたことにより、

商業用途の広帯域通信やレーザー装置が一気に開発された。2003 年、FCC が 71~76GHz と 81~86GHz を使った二拠点間通信をする認可を了承したことで、通信機業界はこの帯域の製品やサービスを開発する為の新しい絶好の土壌が生み出された。

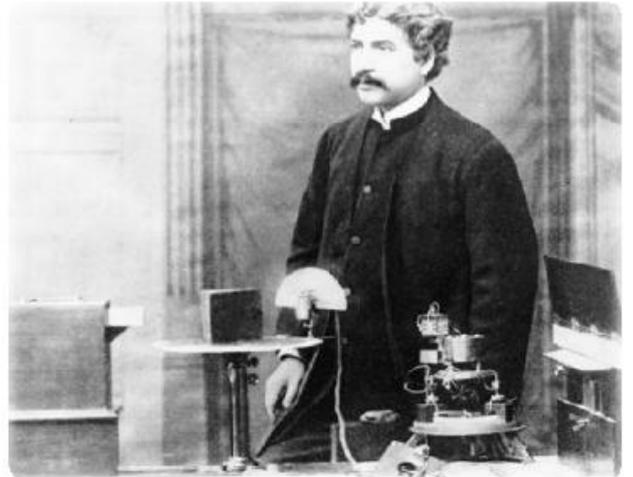


図 1: Sir J.C. Bose によるミリ波実証実験 (1897 年)

## 帯域と帯域幅

米国では、高域のミリ波領域のうち、4 つの帯域が商業用途に解放されている。4 つの帯域のうち、59~64GHz 帯域 (一般的に V-Band または 60GHz Band と呼ばれる) は、免許不要の利用目的で FCC Part15 ルールにより管理されている。FCC Part15 の規定では、60GHz 帯域の電波が基準大気中の酸素による吸収性により、近距離での 1 対 1、もしくは 1 対 N の用途に適するとされている。また、92~95GHz 帯域 (一般的に W-Band または 94GHz Band と呼ばれる) においては、屋内用途に限り免許不要の利用目的で FCC Part15 の規定により管理されている。但し、94GHz 帯域では、FCC Part101 の規定適用により、屋外用途における二拠点間無線通信を認可制で使用することができる。しかしながら、94~94.1GHz を除外した 94GHz 帯域は、他の 3 つの帯域よりスペクトル的に効率が劣る。

これに対し、米国では、ミリ波帯域の 71~76GHz と 81~86GHz (一般的に E-Band またはそれぞれを 70GHz Band、80GHz Band と呼ばれる) が多くの場合、二拠点間無線通信用途に最適とされ、FCC Part101 ルールによる許認可制として管理されている。この 2 つの帯域で利用可能な帯域幅は、各 5GHz に達するので、利用可能な総スペクトル帯域幅として

は、他のマイクロ波スペクトルに割り当てられた全ての帯域を超えている。本書は、この2つの電波帯域の話に限定して記述する。

E-Band 周波数帯における利用可能な2つの5GHz帯域幅は、連続する一つのデータ転送路(チャンネル化不要を意味する)として、それぞれ独立して使用できるので、結果的に、各帯域をそのまま使用することが最も効果的となる。既に確立済みのOOK(オンオフ変調)方式やBPSK(二位相偏移変調)方式の変調技術を用いれば、現時点においてもそれぞれの帯域で1~3Gbpsのデータ通信処理が達成されており、他の帯域で認可された周波数での上位変調方式を用いれば、それ以上の高性能化を達成することができる。E-Bandにその様な変調技術を転位できれば、更に高いデータ通信処理が達成できる。その様なミリ波接続での高処理通信化が商業展開されるかどうかは、十分な市場の需要による。

## 伝搬特性

全ての種類の電波信号は、大気を媒体として伝えられるので、大気成分により電波強度が降下する。この減衰の現象は、殆どの場合、電波信号の吸収および拡散であり、どれぐらいの送信信号が実際に受信機に届き、また大気中でどれだけ損失したかで決まる。一般的に、大気中の損失は、1kmあたりの伝搬におけるデシベル損失(dB)で定義される。信号の損失率は、送信距離を示す指標となるが、実際の信号損失は大気効果が接続距離に直接左右するので、規定のミリ波接続で実測する必要があることを読者には知っておいてほしい。

大気を通したミリ波の伝搬特性は、主に大気中の酸素、湿度、霧そして雨によって決まる。大気中酸素による信号損失は、60GHz帯域の致命的な制限の原因となるが、70GHzおよび80GHz帯域においては1kmあたり0.2dBにも満たないレベルとなる。しかしながら、絶対湿度として示される水蒸気の影響としては、非常に高い湿度・気温下で、1kmあたり50%までの損失(3dB/km)を与えてしまう。また、霧や雲を通過する伝搬に際しての更なる信号の損失は、湿度による損失と同様で、空气中に液体化した水滴の量とサイズに影響される。ところが、これら大気効果による50%の信号の損失は重大に思えるが、5km以上の長距離通信でなければ、雨による損失と比較しても問題とはならない。

表 1: 大気を通過する信号損失

分類	摘要	信号損失 (dB/km)
酸素	海面レベル	0.22
湿気	100% (30°C)	1.8
濃霧	10°C 1 gm/m <sup>3</sup> (視界 50m)	3.2
雨	25 mm/時	10.7

あらゆる大気の状態において、雨は、マイクロ波信号の場合と同様に70GHzと80GHzの信号強度にも最も顕著な損失を引き起こす。雨による信号損失量は、1時間あたりに計測される降水量による。表1は、雨に関連する分類での1kmあたりのミリ波信号の伝搬の減衰量を示す。読者には、1km以上の伝搬による損失が10dBである場合、2km以上の伝搬では損失が20dBになる事を覚えておいてほしい。

表 2: 降水時の信号損失

種別	降水量	信号損失 (dB/km)
雨具を使い始める	1mm/時	0.9
水溜ができる程度	4mm/時	2.6
大雨注意報目安	25mm/時	10.7
大雨警報目安	50mm/時	18.4

表2より、ミリ波無線通信は、雨に対する厳しい減衰値から、雨の実態に応じた対応ができないかもしれないという結論にたどりつくかもしれない。しかし、結論はその様にならない。ミリ波接続は、1時間に100mmを超える豪雨に時折遭遇する様な状況であっても、毎年毎年、途絶することなくスムーズで確実な通信を実現できている。ミリ波接続の実績値は、いくつかの要因に依存しており、特に送受信機の設置距離と電波のリンクマージンに因る。また、必要に応じて冗長化した経路の多様性が追加要因となる。

## 通信性能の信頼性

通信システムにおける通信性能の信頼性は、頻繁に提供されるシステムやサービスの稼働率で性能を評価している。その比率は、システムを仕様通り操作できるとした時の平均値であり、使用可能度の意味で、これをもって有効判定としている。

前述の通り、ミリ波接続の性能は、いくつかの要因で決まる。激しい雨が降るとミリ波信号の減衰値の重大な原因となるが、通信接続で十分なリンクマージンがあれば、ミリ波データ接続において通信停止の状況にはならない。設置距離において通信接続ができるかどうかは、激しい雨を克服する為の十分なリンクマージンが製品の技術仕様(具体的には送信出力、受信感度、ビーム照射角の広がり)に備わるかどうかである。

接続の使用可能度は、通信不能に陥る様なとても強い雨が発生する確率があるかに因る。例えば、1時間当たり100mmを超える降水量の確率が殆ど無い米国南西部における2kmの接続の稼働率は、99.999%となる。しかしながら、同じ2kmの接続の使用可能度において、1時間当たり、100mmを超える降水確率が平均以上となる米国南東部では、99.9%を下回るかもしれない。したがって、ミリ波接続の使用可能な確率は、通信接続する経路の距離と同様に、設置場所の降雨特性で決められる。

世界中の降雨特性は、様々な活動機関によって詳しく調査されている。その調査に基づき、ITU(国際電気通信連合)では、様々な地理的位置での降水量の発生確率を計算するフォーマットを開発した。このフォーマットで、マイクロ波システムの性能を評価する規格を利用できるようになり、世界中のどの地域でもミリ波接続の性能評価ができるようになった。

表3は、世界中のいくつかの大都市エリアで市販のミリ波装置をITUフォーマットで予想した性能比較表である。表の2列目(接続距離)は、99.999%の稼働率が達成できる最大の通信距離を示す。表3列目(接続稼働率)は、2kmの距離における通信の稼働率を示す。

表3: 性能比較表

設置場所	接続距離 (稼働率 99.999%)	接続稼働率 (2km 接続時)
ロサンゼルス	1.75km	99.998%
ニューヨーク	1.25km	99.991%
ロンドン	1.65km	99.998%
ミラノ	1.35km	99.994%
シドニー	1.20km	99.99%
リヤド	2.85km	>99.999%

## 周波数の認可

世界の様々な独立した行政区における無線周波数を使用するコーディネートや許認可は、それぞれの当局によって管理されている。E-Band ミリ波帯域は、世界で解放されている地域がある一方、世界の多くの地域では許認可制度の詳細がまだ決まっていない為に公衆利用に開放されていない。しかし、米国やヨーロッパ連合では、積極的に利用する為に、ミリ波帯の明確な規則を作成して一般に開放している。

米国では、2003年に70GHzと80GHzの帯域使用の認可をFCCが開放した。認可の仕組みは、2段階の手法を採用している。第1段階として、ミリ波帯域を使った装置は、非独占的に米国内で電波を発射する認可をFCCから取得する。FCC認可は、それ自体がミリ波接続を勝手に設置する承認ではなく、むしろ第2段階への必要条件となる。第2段階は、唯一存在する接続登録システム(LRS)に、FCCが任命するデータベースマネージャーによって、設置する二拠点間接続を重複しない様に順次個別登録することで”許可”を発給する。全国におけるFCC認可および各接続登録の費用は、1案件につき数百ドルである。

登録手続では、先行した接続登録を妨げない様に接続の登録を検証する。この手続きにおいては、干渉保護優先権として登録日を基準とすることが確約されており、全てに先行された許可は以後の展開から干渉されない権利が与えられている。帯域の専有使用権は、全国や地域単位ではなく、接続システム毎に与えられる。

ヨーロッパ連合においては、FCCの手続きと若干の差異はあるが同様の対処をすることで、帯域の使用認可を可能にしました。EUでは、250MHz毎の各チャンネルを束ねる事で帯域のチャンネル化として規定し、特定の帯域幅要求に応じて、保護帯域なしに連続するチャンネルとして結合を許可しました。

また、世界の他の地域においても、E-Band帯域の開放が始まっている。メキシコやオーストラリアの様な国においては、帯域の使用認可の開放に向け、既に大きな前進がなされている一方、同様な取り組みとして、最近ではアイルランドやサウジアラビアの様な国においても始まっている。帯域が開放されていく事に際し、それらの地域をはじめ、世界で普及するのは時間の問題と思われる。

## 主要な利点

### 拡張性のある容量が備わる優れた帯域幅

ミリ波通信技術の重要な利点の 1 つは、利用可能な広帯域の二つの帯域幅である。70GHz Bandと80GHz Bandで利用可能な帯域幅(合計で10GHz)は、無線通信に利用可能な他の全ての認可された周波数帯の合計以上となる。その様な利用可能な広い帯域幅を持つとすると、低周波のRF無線技術では、ミリ波無線接続に匹敵できる可能性は極めて低い。

また、この並はずれた広帯域幅の利用は、市場ニーズに応じてミリ波無線接続におけるデータ容量が、将来、拡大できる能力を秘めている。現在、一般に利用可能な典型的なミリ波通信装置は、周波数利用効率を1Hzあたり0.5ビットとして換算されている。しかし、より大容量の接続が求められるとき、ミリ波技術は、更に効率的な多重化手法を用いることで高まる需要に答えることができるようになる。

### 設置自由度の高いナロービーム

マイクロ波接続ではとても大きな足形な様な電波が掃射されるので、受信機側で受ける電波の周波数の再生に取込むデータ量が低減してしまうに対し、ミリ波接続での電波の掃射は、図2に示すとおり鋭利なナロービームとなる。ミリ波接続におけるナロービームは、複数の個別接続を近接して配置することができる。例えば、70GHz接続の電波掃射幅は、18GHz接続に比べ4分の1であり、掃射内のE-Bandミリ波接続の電波密度は最大16倍となる。

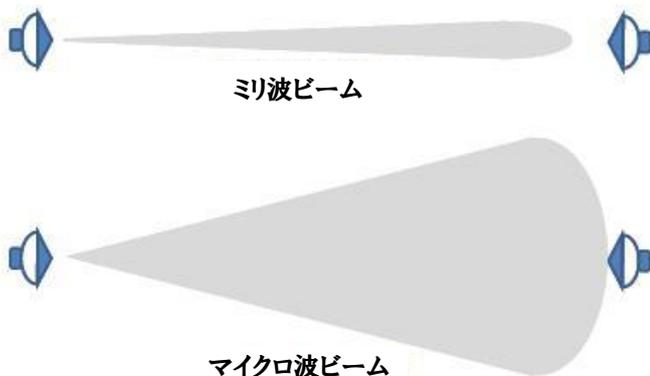


図2: ミリ波接続の際のナロービーム

装置の配置自由度は、高度なナロービームのミリ波接続における主要な利点である。例えば、ミリ波は、二拠点間メッシュ型、高密度の一極集中型または環状型のネットワーク接続形態においても問題なく適合する。他の無線技術においては、それらのネットワーク接続形態を全て実現しようとする前に、クロス干渉を起こしてしまい、大抵の場合、拡張性の限界に達する。

### 認可された周波数帯の安価なライセンス

周波数帯使用に際しての許認可保護制度なしには、LAN 拡張サービスや携帯電話バックホールサービスに係わらず、無線事業における実行可能なビジネス事例となることができない。70GHz Bandと80GHz Bandの主要な利点の一つとして、許認可制度が顧客や事業提供者に安心を与えるということである。しかしながら、大きな投資を要するマイクロ波帯の許認可費用とは異なり、E-Band接続の認可費用は、10年間の干渉保護として、1接続あたり500ドル以下と例外的に抑えられている。

伝統的な周波数帯域の認可の形態は、既に認可を受けている人にとっても受けていない人にとっても問題となっている。ライセンス所有者に対して、周波数帯を特殊利用する際の法的義務に抵触する場合、これに関連してしばしば投資という形で大きく押し掛かる。このライセンスを所有していない人にとっては、この特定市場の競争に参加することが障害となる。E-Bandミリ波帯域の認可制度には、これら2つの問題を解決する重要な便益がある。

### マルチベンダソリューションで高められた技術

ミリ波通信技術は通信の用途ではかなり新しいが、並々ならぬ歴史と裏打ちされた技術の進化にある。ミリ波の特徴は、マイクロ波と同様に数十年にわたって十分に理解されてきた。ミリ波伝搬の特性は、大気や物質を通した十分な研究がなされ、報告された。また、ミリ波伝搬に影響ある降水量の様な気象現象は、世界中の地域別で十分に特徴づけられ、理解されている。何十年にもわたる軍や政府受託研究を背景に、ミリ波技術は、ラジオ技術の規則形に匹敵する完成域に到達した。

ミリ波通信における技術の成熟やビジネスチャンスの可能性として、複数の業者がミリ波無線ソリューションの提案で市場に参

入することにある。これは、結果として他社にひけをとらない製品の価格設定だけではなく、特殊用途や市場に向けた差別化された特徴のある対象となる。この競合する展開は、ミリ波無線技術の採用担当者に、製品の選択肢の幅が広がるばかりか、少数の参加者で独占される様な不確実性の高い将来への投機行為でなく、またニッチ技術でもない安心感をもたらす。

## 応用分野

### メトロネットワークサービス

経済活動は更なる情報通信を求めるようになり、民間企業の帯域幅需要は、大なり小なり際限なしに明らかな成長を続けている。しかし、多くの企業ビルでは、1秒あたり数メガビット程度の送信がわずかに可能な原始的な銅線によってのみ、いまだ頼っている。

米国の環状地下鉄網にはファイバーループが敷設されているが、驚くべきことにオフィスビルの90%はこのループから外れている一方、これらビルの大多数がループがつながる広帯域メロリングから1-2マイル内に存在する。見逃している点は、既存のメロリングからメトロネットワークサービスを、現実的にリングから離れた商用ビルにも拡張できることである。ミリ波技術は、費用対効率の良い方法で投資分を埋めつくす機会を創出した。図3に示すとおり、メロリングと商用ビルの連結は、1リンクのミリ波接続で実現できる。ミリ波接続で実現する帯域幅はメロリング自体の帯域幅に匹敵するので、この1リンクの無線接続により広帯域幅を必要とするオフィスビルに対して十分に供給可能となる。

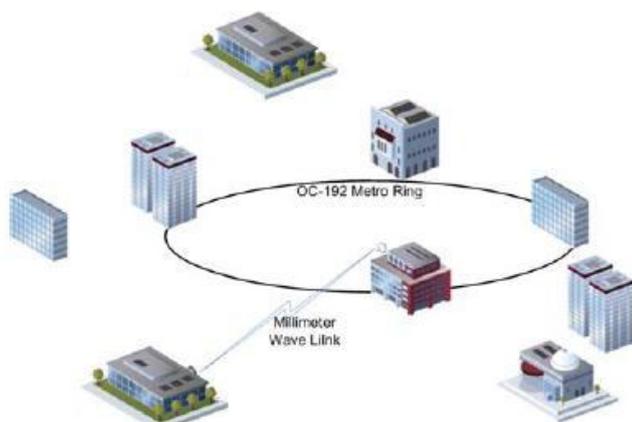


図3: メトロネットワークの広が

### 携帯電話 / WiMAX バックホール

携帯型移動端末の利用増加につれ、帯域に極度の集中利用が発生しない様、携帯利用者に広帯域幅を供給する必要性が上昇し続けるであろう。アクセスポイントで必要に応じて利用される様な WiMAX や 700MHz 等の新しい帯域の技術ではなく、ある地点からネットワークのコア部に接続する為の帯域幅の転送技術の必要性が急上昇する事になる。今日、その様なニーズの多くは、T1/E1 専用電話回線の様な低容量データ転送媒体を用いて実現されている。しかしながら、これらの手段では次世代モバイルネットワークの要求を現実的に満たすことができないだろう。

ミリ波の基礎技術は、予見できる未来に到るまで、これら用途のニーズに対し、つぼを押さえた様である。低周波数のマイクロ波無線システムの通信手段は、次世代の無線ネットワークでの帯域幅(データ伝搬速度)の需要に対し、瞬間的には応えられるかもしれない。しかし、その様な通信手段の費用や周波数許認可の費用を加味すると、ミリ波通信手段はより魅力的に感じ始める。帯域幅や配置密集度を拡大させる能力を考えれば、ミリ波通信手段は更なる魅力を発する。アンテナ塔にファイバーを配線する費用と比較すると、唯一の拡張性のある通信手段として、ミリ波通信手段が当然の選択となる。

### セルラー分散型アンテナシステム (DAS)

携帯電話のネットワークでは、アンテナを中心にした通信範囲だけでなく、分散した遠隔アンテナをネットワーク化することが、増大するネットワークの負荷分散の観点から必要とされ、更に効率的となる。その様な分散型アンテナシステム(DAS)は、基本的に基地局のアンテナ域の拡大となる。DASは、基地局アンテナからビルのような巨大構造物で影になる場所において、携帯電話通信範囲を確保する為にしばしば用いられる。また、DASは、基地局を設置するのに効果的でない地域を適用範囲として確保する為にも用いられるかもしれない。

例えば、図4の巨大な商用ビルの影となる場所では、ビルの背後に遠隔アンテナを設置し、最寄りの基地局へ無線信号を送信することで上手にカバーできる。そして、もう一つの検討内容として、たくさんの加入対象者がいるテナントビルでは、ビル全体にアンテナを分散配置し、いくつかの無線経路を通して基地局に伝送することが望ましいといえる。

業界標準のセルラーシステムの DAS 技術では、遠隔アンテナへ伝送する前にアンテナ信号のデジタル化が義務付けられている。このデジタル化で、最大 3Gbps のデジタルデータ処理能力を生み出すが、遠隔アンテナへの信号送信が可能な技術は非常に限られる。光ファイバーケーブルが DAS 信号の伝送にしばしば用いられ、DAS 信号を無線で伝送する必要がある場合、ミリ波は理想的な技術となり、唯一の技術といえる。

## 障害復旧と冗長化

光ファイバーケーブルへの接続を直に利用可能な状況にしようとする時、広い帯域幅を使い切る様な使用用途の要求の為に、光ファイバーケーブルの様な広帯域の接続手段がしばしば選択される技術となる。しかし、ファイバー接続が地下掘削作業の事故であちこち分断されてしまう様な場合、相当な一定期間で極めて重要なネットワークの停止状態をしばしば引き起こしてしまう。したがって、その様な問題発生頻度を最小限にする為に、極めて重要なネットワークを冗長化する設計にすることが非常に望ましい。

ミリ波無線接続は、その様な冗長化の構築に非常に適している。例えば、データセンターは、ネットワークサービス事業者のポイント・オブ・プレゼンス (PoP) に、あたかも光ファイバーケーブルで PoP に接続されているかの様に、大容量ミリ波無線通信で接続できる。光ファイバーネットワークの不具合が検出されると、ネットワークの利用可能性や通信性能に影響させることなく、データ通信はミリ波接続に切り替えられることになる。

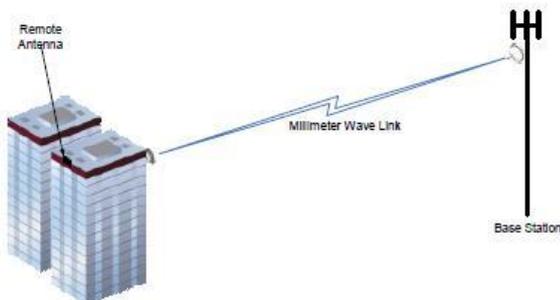


図 4: 分散型アンテナシステムでのミリ波無線

## 企業ネットワーク及び構内ネットワーク

あるビルから隣のビルへの LAN 拡張の企業ニーズは、無視で

きないものであり、その様な利用用途のユーザーは二拠点間無線技術の先駆的企業となっている。近隣ビルを取り込みことで施設の拡大を目論む組織体は、一つにつなぎ合わせる通信サービスへの支払い費用が莫大となってしまう為に、結局は代替え解決方法の模索を強いられることになる。

拡張を続ける施設や既存施設と接続する必要のある大きな組織体にとって、広域ネットワークの観点から組織体の為かどうかに関係なく、ミリ波接続は、長期施策・短期施策のどちらにも非常に適している。回線サービスの提供が開始されるまでに数週間要するのに対し、無線接続は数時間でセットアップできるので、ミリ波無線は短期施策に有力となる。また、長期にわたる混信保護や十分な帯域幅による需要の増大に応えることが、長期施策にも非常に有力となる。組織体がミリ波接続を配備する多くの場合、ブロードバンドサービスの賃貸費用を節約する事で、その様な設備費用はすぐに取り戻すことができる。

## REFERENCES AND FURTHER INFORMATION

- [1] Loea のミリ波製品についての情報 については: <http://www.loecom.com>
- [2] ミリ波の歴史については: <http://www.tuc.nrao.edu/~demerson/bose/bose.html>
- [3] ITU モデルの詳細は、ITU 資料 “Recommendation ITU-R P.837-5” に記述。
- [4] ミリ波に関する FCC の情報は: [http://wireless.fcc.gov/services/index.htm?job=service\\_home&id=millimeter\\_wave](http://wireless.fcc.gov/services/index.htm?job=service_home&id=millimeter_wave)
- [5] EU のミリ波標準仕様である ETSI 資料 “ETSI TS 102 524” は <http://www.etsi.org> から入手可能。



10455 Pacific Center Court  
San Diego, CA 92121-4339  
858.646-5700  
[www.loecom.com](http://www.loecom.com)



Mitsubishi  
TRADING SOLUTIONS

Loea 日本地区総輸入元

株式会社 満 宏

福岡県北九州市小倉北区浅野 3-8-1  
TEL 093-531-3185  
FAX 093-531-3835  
<http://www.e-mitsubishi.jp>  
[loea@e-mitsubishi.jp](mailto:loea@e-mitsubishi.jp)