

60GHz 帯無線通信デバイスと縦系配線システム

60GHz-band Wireless Communication Devices and Vertically Connected Wireless Link for TV Signal Distribution

末松 英治* 山田 敦史* 田中 啓貴* 吐田 真一*
Eiji Suematsu Atsushi Yamada Hiroki Tanaka Shinichi Handa

佐藤 啓介* 山口 倫史* 伊奈 弘善*
Keisuke Satoh Motofumi Yamaguchi Hiroyoshi Ina

要 旨

ビル・マンション用の共同無線配信システムである縦系配線システムの特性についてCN特性及びMMICの伝送特性の観点から検討した。60GHz帯の免許不要バンドは、大容量のギガビットレベルの伝送が可能であり、地上デジタル放送、BS放送やCS放送を多重化して伝送することができるため、ビル・マンションやアパート等の共同無線配信システムとして期待されている。今回新しく超高速動作のMMICと小型・軽量のアンテナ及び小型の受信モジュールを開発した。この60GHz帯無線技術は、ビル・マンション内の複雑な配線を取り去り、約35mの高さの10F用ビルディングに対応可能な共同無線配信システムを提供する。

The performance of the vertically connected wireless link was investigated in terms of the CN ratio and transmission characteristics of the MMIC.

The 60 GHz-band, which enables high-speed and large capacity transmission up to the gigabit level while it is license-free, is expected to find application in the vertically connected wireless link for BS/CS satellite and terrestrial broadcasts in apartments, condominiums and multi-use buildings. The authors developed an ultra-high-speed MMIC, a small, lightweight antenna and a compact receiver module.

The millimeter-wave wireless link technology dispenses with complicated cable network within buildings, and enables wireless transmission over a 35-meter distance, which is sufficient for implementation in 10-story ones.

まえがき

60GHz帯は、携帯電話や5GHz/2.4GHz帯の無線LANの周波数に比べて周波数が高くかつ酸素による減衰が約20dB/kmと大きく、使用帯域幅は59GHzから66GHzと、7GHzの広い帯域幅を使用できることが電波法では認められている。加えて、伝送速度の基本を決める送信機の伝送帯域幅は、最大2.5GHzまで許容され、無線LAN802.11a/gの伝送帯域幅18MHzに比較して約138倍大きい。そのため、ギガビット伝送が可能な周波数帯である。この広帯域特性により、本無線モジュールが、地上デジタル放送、BS放送やCS放送を多重化

して一度に伝送することが可能となる。

近年のデジタルTVやセットトップボックスは、BSデジタル放送、110度CSデジタル放送（CS110度放送）及び地上デジタル放送の3波共用型が標準となっている。加えて、124度・128度のCSデジタル放送（CS124・128度放送）は、テレビとデジタルラジオ合計で約290チャンネルを提供されており、これら放送波5波のメディアが、全国的に提供されている。ビル・マンションなど、これまで、これら5波の全チャンネルを共同受信するシステムを構築する場合、屋内での同軸ケーブルを2軸化するなど、複雑で高コストな配線工事が必要となっている。

* 技術本部デバイス技術研究所 第2研究室

集合住宅での60GHz帯無線を用いた共同受信システムは、縦系配線システムとして、従来、NHKによりBS放送の難視聴対策として提案されてきたものである¹⁾。今回、当社と株式会社スカパー！と記述)と共同で、BS放送のみならず、複数のCS放送や地上デジタル放送まで含めたビル・マンション等への総合的な共同受信システムの一つとして展開できないか検討を進めてきた。今回この検討状況と60GHz帯無線モジュール開発の推進状況について報告する。

図1に本無線共同受信システム（以下縦系配線システムと記述）のモデルの概念図を示す。現在開発中のミリ波無線伝送システムは、広い占有周波数帯域幅(2.5GHz)を利用できる60GHz帯を利用し、ビルやマンションなどの屋上に設置されたパラボラアンテナで受信したBSデジタル放送やCS110度放送と地上デジタル放送のすべてのチャンネルを、建物内の同軸ケーブル配線工事を必要とせず、各階の住居へ無線で伝送することを可能とするシステムである。また、ミリ波送受信機をもう1セット付け足すことによって、CS124・128度放送のすべてのチャンネルも伝送でき、合計5波を無線伝送する共同受信システムを構築できることが大きな特長である。これら、計5波の伝送モデルにおいては、2.5GHz帯域の周波数では不足するため、送受信機2セットで対応する必要がある、水平/垂直偏波や複数の周波数帯域を利用すること、つまり伝送帯域幅2.5GHz×2の帯域幅で対応することで可能となる。

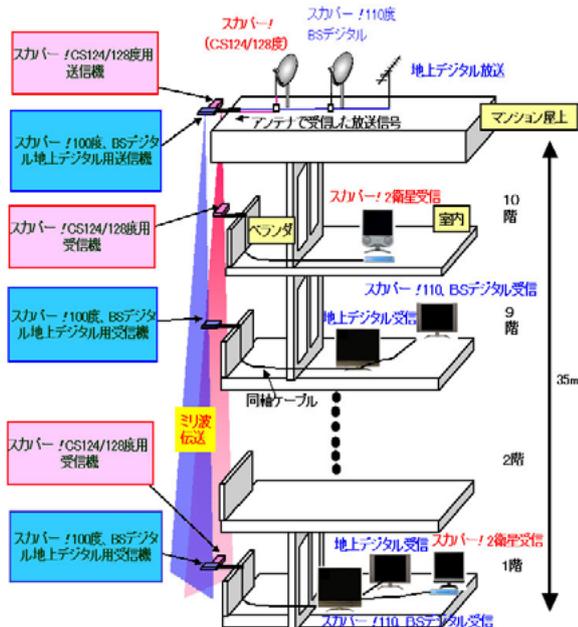


図1 ビル・マンションにおけるミリ波無線共同受信システム
Fig. 1 Vertically Connected Wireless Link for TV signal distribution.

今回試作した送信機および受信機は、アンテナ一体型構成で、12cm×6cm×4cmの小型化を実現し、無線伝送距離は35m、10階建程度のビル・マンションへの対応を基本としている。

今回は上記5波伝送モデルの骨格となる片側伝送（地上デジタル放送・BS・CS110度放送、もしくはCS124・128度放送）の基本特性と、ミリ波送受信モジュールの構成・デバイス特性について基礎的な検討をおこなった。

1. ミリ波無線モジュールの構成

本ミリ波帯は、電波法上の無線設備としては特定小電力機器に属し、アンテナ端での送信出力は、電波法上10mW以下に定められている。上記送受信機をより長い伝送距離まで使えるようにし、ミリ波回路部を簡素化するためには、回路構成は、送受信機もそれぞれで中間周波数段階を得る、ダブルヘテロダイン(Wヘテロダイン)構成が望ましい。

1.1 Wヘテロダイン構成のメリット・デメリット

送信側での本構成は、入力信号を一旦中間周波数(IF)段階まで周波数を上昇させ、IF信号を生成し、さらにもう一度、無線周波数帯域まで周波数上昇させるシステムである。本ヘテロダイン構成は、1) 高CNの確保が容易で、伝送距離も長くなること、また、2) IF帯域幅を拡大でき、かつ、3) イメージ除去が容易になりイメージ除去フィルタをMMIC化できるというメリットがある。従って、本ヘテロダイン構成によりデジタル放送波の周波数である280MHz～2100MHzの周波数範囲に対応させることが可能である。

ヘテロダイン構成のデメリットは、従来より、デジタル変調された信号の無線伝送では、60GHz帯の局部発振器において、低位相雑音で高安定度の発振器を構成することが極めて困難なことである。これは、発振器中の共振器材料の高周波特性から、発振器の負荷Q値を向上させることが難しいこと、PLLを構成するための少なくとも30GHz帯で使用できるようなプリスケラー技術も、未成熟なためである。従って、QPSK、8PSK、64QAM-OFDMのデジタル変調の無線伝送を可能とするような、60GHz帯の超小型軽量の高安定度・低位相雑音の発振器を構成することは現状難しい。

ここでは、送信側で基準信号を付加し、TV放送信号である所望信号と同時に伝送する。受信側において最後のダウンコンバート時に本基準信号の周波数と位相情報により、伝送段階に生じた周波数の変動や位相雑

音を含んで局部発振信号を再生する。この再生された局部発振信号により、所望信号の伝送段階に生じた周波数の変動や位相雑音の影響を本ダウンコンバートのプロセスで除去してしまう構成を用いている。

1・2 送受信機の性能と伝送距離

表1に試作した送受信機の性能・仕様を示し、写真1に試作機の写真を示す。

送受信周波数は50.0GHz～61.5GHzである。送信機の入力周波数と出力周波数は280MHz～2100MHzまで対応可能であり、1) 地上デジタル放送・BS・CS110度放送、2) CS124・128度放送に対応可能である。送信側のアンテナ利得は22dBi（指向性±4度）、受信側のアンテナ利得は23dBi（指向性±3度）である。写真1に示すように試作機の大きさは12cm×6cm×4cmであり、アンテナは2次放射機として半円球上のレンズアンテナを搭載している。

図2に地上波デジタル放送6波とBS・CS110度放

送全波をまとめて（多重化して）無線伝送したときの、伝送距離と、地上デジタル放送各チャンネルの平均CN値と、BS・CS110度放送の平均アンテナレベル値の関係を示す。これらCN値、アンテナレベル値とも、当社製の地上・BS・110度CS Digital Tuner TU-HD100中の評価機能から取得した値である。地上デジタル放送の場合、CN18dBが映像のスレッシュホールドであり、18dB以下では、ブロック雑音が発生し映像が途切れる。一方、アンテナレベルにおいては、BSデジタル放送では34以下、CS110度放送では18以下になると、ブロック雑音が発生し映像が途切れる。各放送波において、これらの値以上では映像特性は劣化のない映像を取得することができる。これから、地上デジタル放送とBS・CS110度放送を、多重化した際、3つの放送波を同時に取得できる伝送距離は約140mである。

この伝送距離は、あくまでも試作機での実験値であり、送信機の線形性や受信機のNF、変換利得、歪特性等、の個々のパラメータが、十分最適点にあるかどうか、今後の検討が必要である。

表1 ビル・マンションにおけるミリ波無線共同受信システム
Table 1 Specification of TX & RX.

項目	送信機(TX)
送信周波数	59.0～61.5GHz
IF入力周波数	280～2100MHz
占有周波数帯域幅	≦2.5GHz
送信電力	10dBm
アンテナ利得	22dBi
電源	15V230mA (typ)
項目	受信機(RX)
受信周波数	59.0～61.5GHz
IF出力周波数	280～2100MHz
NF	7dB (typ)
変換利得	25dB (typ)
アンテナ利得	23dBi
電源	15V160mA (typ)



写真1 RX (上) と TX (下)

Photo 1 RX (top) and TX (bottom).

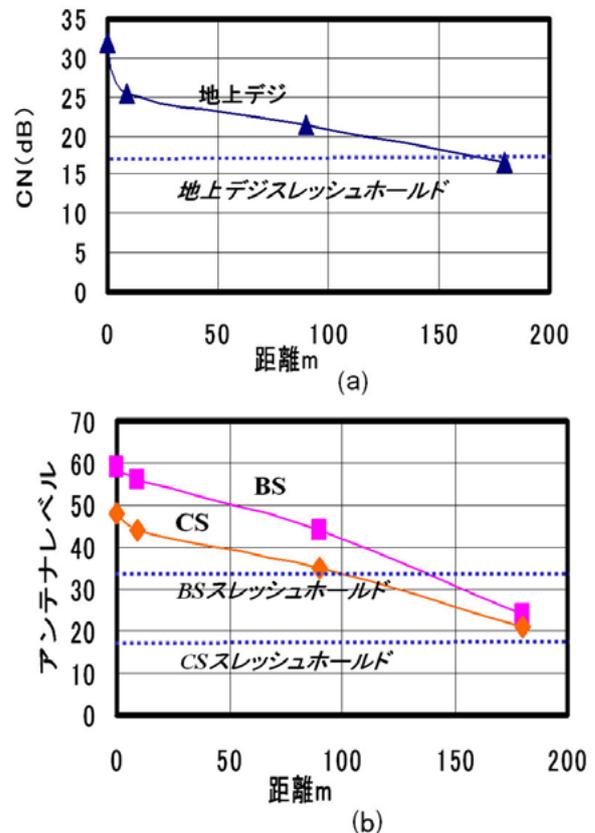


図2 (a) 地上デジタル放送の伝送距離依存性

(b) BS・CSの伝送距離依存性

Fig. 2 (a) Transmission distance dependence of CN ratio.
(b) Transmission distance dependence of antenna level of BS・CS.

2. アンテナ一体化送受信モジュール

2.1 アンテナ一体化基板

60GHzの送受信装置は、これまでは、金属の筒体で構成されていた導波管を基本伝送線路として構成されていた。従来の導波管伝送路と個別素子による構成を排除し、平面回路であるマイクロストリップ線路を基本伝送線路とし、これに複数のトランジスタを集積化したMMICを使用することによって小型・軽量化した。

2.2 アンテナと回路の接続

図3にアンテナ一体化ミリ波MMICモジュールの構成図、(a)断面図、(b)ミリ波モジュール基板の表面と裏面を示す。(a)の断面図に示す様に、誘電率5.7、厚さ150 μ m、3層の低温焼成セラミック基板(LTCC)を使用した。表面には4素子のマイクロストリップパッチアンテナを構成し、裏面には回路面が構成され、MMIC搭載部にはキャビティが構成され、本キャビティにMMICが搭載される。本キャビティを設けることによって、ワイアボンド長を短くし、寄生成分を極力小さくしている。さらにキャビティの上面はグランド面(アース)となっており、マイクロストリップ線路を基本伝送線路とするMMICでは、本ICの一方の面がグランドであり、本基板のグランドとMMICのグランドを直接接続することができるため、寄生インダクタンスが生じ難い良好なグランド特性を実現することができる。

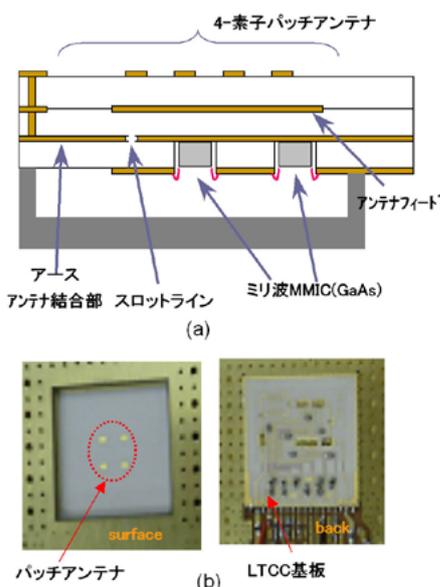


図3 (a) アンテナ一体化MMICの断面図
 (b) アンテナ一体化MMICの写真
 Fig. 3 (a) Cross section of antenna integrated with MMIC.
 (b) Photograph of the antenna integrated with MMIC.

MMICとアンテナフィードは、グランド面に設けたスロット線路で結合させる構成である。アンテナフィード部とパッチアンテナは電磁界結合で接続され、アンテナとアンテナフィード部間にコネクタ端子を有することなく、基板の裏面と表面で直接接続される構成である。そのため、超小型で低損失(60GHzで1.1dB)の接続が可能である。

2.3 MMICについて

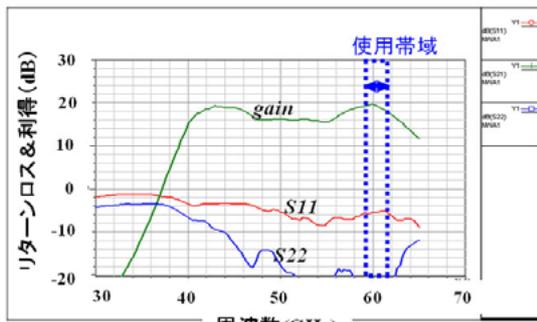
本アンテナ基板に搭載するGaAs-MMICについても、新規に開発をおこなった。基本トランジスタにゲート長0.15 μ mのp-HEMTを用いて集積化し、各機能MMICである送受信用60GHz帯増幅器、イメージリジェクション偶高調波ミキサ、3通倍器、5通倍器、30GHz帯ドライバンプを開発した。ここでは送受信用60GHz帯増幅器、イメージリジェクション偶高調波ミキサについて示す。尚、GaAs p-HEMTのカットオフ周波数(f_t)は110GHz、最大発振周波数(f_{MAX})は170GHzである。

2.3.1 送受信用60GHz帯MMIC増幅器

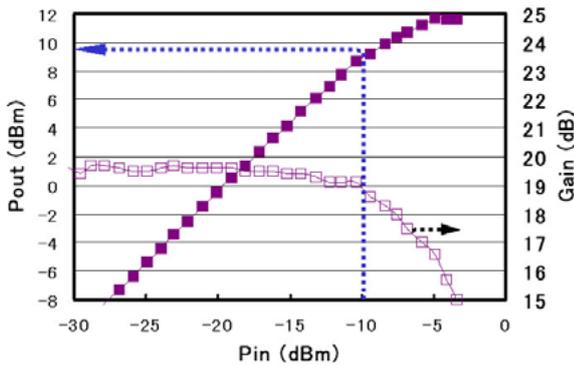
図4(a)(b)(c)にMMIC増幅器の小信号特性、入出力特性とチップ写真を示す、チップサイズは1.0mm \times 2.0mm、厚さ0.1mmである。これらの特性は、入出力線路において、ワイアボンドも含めた特性であり、動作帯域59GHz \sim 61.5GHzで、利得19dB \pm 1dB、パワー特性として、P1dBは9.8dBm、飽和出力11.5dBmを実現した。また、雑音特性NFは、帯域内で2.5dBの低雑音特性を有している。送信機出力は、電波法では10dBm(上限:11.7dBm、下限:4.8dBm)であるため、本MMIC増幅器は、送信機、受信機どちらにも使用することが可能である。

2.3.2 イメージリジェクション偶高調波ミキサ

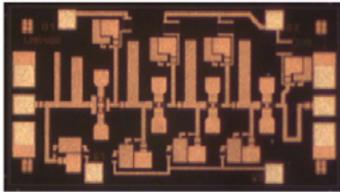
偶高調波ミキサは、アンチパラレルダイオードペア(APDP)で構成され、局部発振信号の周波数fLOは、基本波ミキサのfLOに比較し、周波数1/2で動作可能であり、かつ、変換損失も、基本波ダイオードミキサと略同程度である。加えて、2 \times fLO成分は、原理的にキャンセルされるため、59GHz \sim 62GHz帯のBPFの設計が、容易になる。ここでは、Wヘテロダインの構成であるため、60GHz帯への周波数アップコンバート時に発生するイメージ周波数も、本来の所望信号から6GHz以上、低域側へ離れてくる。従って、急峻な抑圧特性を必要としないため、低Q材料のGaAsを用いて、フィルタを構成することが可能となり、本ミキサMMICに、BPFフィルタを集積化することが可能となる。



(a)



(b)



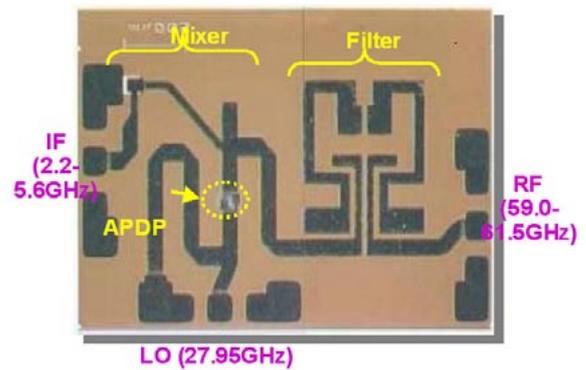
(c)

図4 (a) MMIC増幅器の小信号特性(ボンディングワイヤの影響含む)(b)入出力特性(c)チップ写真(1.0mm×2.0mm)

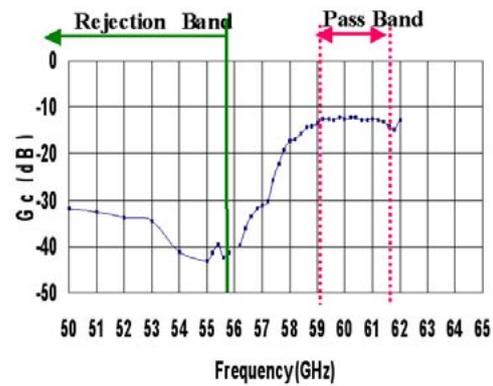
Fig. 4 (a) Small-signal frequency performance included wire-bonding influence, (b) input output characteristic and (c) photograph of the 60GHz-band MMIC amplifier (1.0mm×2.0mm).

図5 (a) (b) にチップ写真とアップコンバータとしての周波数変換特性を示す。チップサイズは1.0mm×1.5mm、厚さ0.1mmである。本チップ写真に示すようFilter部は、マイクロストリップ線路と結合線路の分布定数線路で構成され、線路間のライン&スペース(L&S)は最小 $20\mu\text{m}$ & $20\mu\text{m}$ で構成されている。ICプロセスにより $0.5\mu\text{m}$ レベルで制御することが可能となる。そのため、特性ばらつきが極めて小さい良好なフィルタを構成することが可能となる。一方、本MMICフィルタは、容量ばらつきの大きいMIMキャパシタ等の集中定数線路は一切使用していない。

図5 (b) に示すアップコンバータは、入力周波数と



(a)



(b)

図5 (a) APDPミキサのチップ写真(1.0mm×1.5mm)(b)アップコンバータとしての特性

Fig. 5 (a) Photograph of the APDP MMIC mixer (1.0mm×1.5mm). (b) Frequency characteristic of the APDP MMIC mixer.

して $f_{IF}=0.1\text{GHz}\sim 6.1\text{GHz}$ であり、局部発振周波数は $f_{LO}=27.95\text{GHz}$ を入力している。アップコンバータの周波数変換特性として、出力信号である60GHz帯にアップコンバートされた信号は、通過帯域である $f_{RF}=59\text{GHz}\sim 61.5\text{GHz}$ では、変換損失 $12\text{dB}\pm 0.5\text{dB}$ であり、 $2\times f_{LO}$ の周波数に相当する 55.9GHz では、抑圧度 40dB 以上の損失であり、イメージ帯域の 53GHz から下側では 30dB 以上の損失となっている。十分なLO抑圧と、イメージリジェクションが可能である。上記フィルタ、APDPダイオードともに受動素子のため、受信側でも使用でき、この際、ミキサのダウンコンバージョン特性は、上記アップコンバージョン特性と全く同等である(この場合、入力が f_{RF} 、 f_{LO} で、出力が f_{IF} となる)。

2・4 アンテナの特性

上記2・2で述べたように、LTCC、3層基板の表面に4素子のマイクロストリップパッチアンテナを構成しているが、アンテナ利得が約 12dBi と小さいため、筐体に構成した2次放射器のレンズアンテナを用いて、アンテナ利得を大きくする構成としている。これは

LTCC, 3層基板表面に16素子, 64素子のパッチアンテナを構成すると, アンテナ給電部の線路損失により理想的なパッチアンテナの利得特性に比べて, アンテナ利得は著しく小さくなってしまふからである。ここでは給電損失が殆ど無い4素子パッチアンテナから放射された電波を, レンズアンテナで絞る構成としている。fRF=59GHz ~ 61.5GHzの帯域内において, レンズアンテナ口径D=40mmでトータルアンテナ利得22.5±0.5dBi, D=47mmで, トータルアンテナ利得23.5±0.5dBiとなっている。

3. フィールド試験

以上送受信機の構成について述べた。デバイス・回路特性の視点から, 本ミリ波モジュールの実用性について, 実際のビル・マンションを用いて試験・検討を行った。場所は当社独身寮のラポール天理 (10F) を使用した。

3・1 設置構成

使用した放送波は, 地上デジタル放送6波, BS放送 (アナログ, デジタル) の全波 (8トランスポンダ), CS124度放送 (パーフェクTV!サービス) の75% (20トランスポンダ中の15トランスポンダ) である。ミリ波送信機に入力される信号の周波数帯域は, 地上デジタルの470MHz ~ 550MHz, BS放送の1000MHz ~ 1340MHz, CS放送の1380MHz ~ 1900MHzの信号である。これらの信号波は, それぞれブースターでレベル調整・混合し, 電源を介して, ミリ波送信機へ入力する構成である。ミリ波受信機は, 6Fと3Fのベランダに設置した。

ミリ波受信機はベランダから同軸ケーブルで部屋まで導き電源部介した後, 出力分配して, TVチューナとレベル・CNメーターで測定する構成である。このレ

ベル・CNメーターはPC制御により1時間に1度上記の全波・全トランスポンダのCNを測定し, 平均値を算出する。これら1回の測定時間はトータル10分程度である。

3・2 試験結果と降雨減衰の影響

2005年7月中旬から8月下旬までの各放送波のミリ波受信CN平均値と, アメダスによって求めた降水量 (mm/h)とを合わせて, 図6に評価結果を示す。ここで, デジタル放送の映像の途切れるスレッシュホールド値は, 地上デジタル放送 (64QAM-OFDM) では18dB, BSデジタル放送 (8PSK変調) では10dB, CS放送 (QPSK変調) では6dBである。本データのBS放送, CS放送のミリ波無線伝送には, 衛星区間 (アップ・ダウンリンク) での降雨減衰の影響も含まれている。470MHz ~ 720MHzの地上デジタル放送の帯域は, 降雨減衰は殆ど無視することができる²⁾ため, ほぼ純粋にミリ波区間でのCN変動としてみる事ができる。

図6から, 地上デジタル放送のCN変動は, 7月26日のデータのみ, 一瞬2dB低下しているだけであり, 他は大きな減衰は認められない。一方, 衛星放送波の場合, 2dB ~ 3dBの変動が認められ, 降水量と相関関係は大きくなっている。その他の日についても, 地上波放送については, CN変動0.5dB以下の変動であるのに対し, 衛星放送 (BS・CS) の場合, 降雨減衰の影響は1dB ~ 3dB程度の変動が認められる。また衛星放送 (BS・CS) の場合, 降雨がなくても1dB程度の減衰が認められる。これは衛星区間 (アップリンク) によるものと推定される。また, BS・CS放送で, 約1dBずつ矩形状に定期的に変化 (例えば7月14日~7月23日) しているのは, 明け方に, 点検・検査等により放送電波を停止したチャンネルが存在するためである。結果として, この実験期間中に本データからはCNスレッシュホールド以下になって映像が途切れることは発生していないと推測

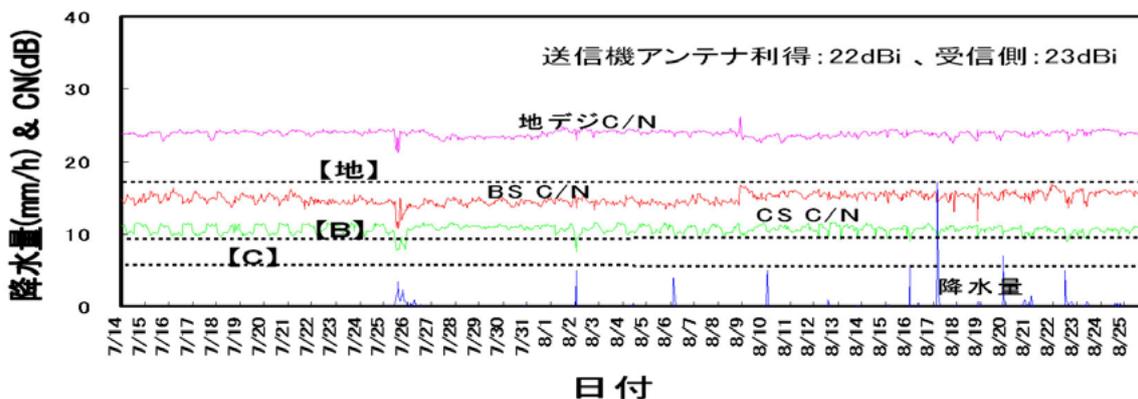


図6 フィールド試験結果 【地】, 【B】, 【C】は, CNのスレッシュホールドを示す。

Fig. 6 Measurement results of field test. 【地】, 【B】 and 【C】 indicate CN threshold values.

される。

60GHz帯における降雨減衰は、降雨20mm/hに対して、減衰率が高々20dB/km程度と報告されている³⁾。また、他の報告では、降雨25mm/hに対して減衰率10dB/km、さらに降雨100mm/hに対しては減衰率は30dB/kmとされる⁴⁾。降雨減衰は降雨区間を通過する距離に比例する。従って、60GHz帯ミリ波伝送区間35mに対しては、20mm/hの降雨でレベル減衰は0.7dB～0.3dB、100mm/hの降雨でもレベル減衰は1.1dBとなり、降雨減衰の影響は小さい。

通常、衛星放送・衛星通信は、周波数が高く降雨減衰は大きな課題の一つである。この衛星放送・衛星通信の周波数12GHz以下は、電波の窓といわれ、降雨減衰は比較的損失が小さいところである（周波数10GHzにおいて降雨25mm/hに対して減衰率0.6dB/km）。しかしながら、衛星からの距離が3万7000km×2（アップリンク+ダウンリンク）もあるため（この区間すべてが降雨ではないが）、降雨減衰は大きくなっている。60GHz帯の降雨減衰として、本ビル・マンション系の約50m弱での伝送区間では、降雨減衰のマージンとして2dBをみておけば十分と考えられる。上記図6のデータにおいては、1時間ごとの測定のうち測定時間は約10分であるため、CN測定時間と雨の降る時間のタイミングが合ったかどうかの課題は残る。加えて、本図に示したアメダスのデータは、天理市近くの奈良市と針町の平均値であって直接天理市のデータではないために、極所的な雨量・豪雨は含まれていない。今後、さらにデータを増やすこと、また他の地区での実験を加える

ことが必要である。一方、降雪に対しても検討が必要である。乾雪に対しては、ミリ波帯では、殆ど無視できるとされている^{2) 5)}。しかしながら、みぞれの影響やミリ波アンテナへの着雪・積雪の影響等も、今後評価検討してゆく必要がある。

むすび

ミリ波帯のアプリケーションの一例として、本稿では、小型アンテナ一体化無線モジュールの構成と、ビル・マンションにおけるTV放送信号の縦系配線システムについて、基本伝送特性とモジュール・デバイス特性について報告した。試作したミリ波モジュールの大きさは、送受信機とも12cm×6cm×4cmであり、Wヘテロダイン構成により、アンテナのサイズを大きくすることなく伝送距離を確保することが可能である。今年、秋からスカパー！及び関係会社と協力し、本格的にフィールド試験・実証実験に着手する予定である。

参考文献

- 1) 清水, 他, “ミリ波を用いた集合住宅向け衛星放送再送信システム”, 電子情報通信学会王号大会, SA-9-4, pp.S65-S66 (2004).
- 2) 上瀧, 他, “ミリ波技術の基礎と応用”, pp.205-210, 株)リアライズ社 (1998)
- 3) G.Timms et al., “Early results of rain attenuation study in the 60GHz band”, TSMMW2004, pp.159-162, March 2004.
- 4) 金原渡邊, “衛星放送受信の手引”, pp.33-41, 株)コロナ社(1996)
- 5) 手代木, 米山, “新ミリ波技術”, pp.131-142, 株)オーム社(1999)

(2005年9月21日受理)