

平成16年度

研究開発成果報告書

準ミリ波帯広帯域固定系無線
アクセスシステム技術の研究開発

委託先：日立国際電気(株)

平成17年5月

情報通信研究機構

平成16年度 研究開発成果報告書

「準ミリ波帯広帯域固定系無線アクセスシステム技術の研究開発」

目 次

1.	研究開発課題の背景	4
2.	研究開発の全体計画	6
2-1	研究開発課題の概要	6
2-2	研究開発目標	7
2-2-1	最終目標	7
2-2-2	中間目標	8
2-3	研究開発の年度別計画	9
3.	研究開発体制	10
3-1	研究開発実施体制	10
4.	研究開発実施状況（平成16年度まで）	11
4-1	システム概要	11
4-1-1	システム諸元	11
4-1-2	システム構成	11
4-2	長距離広帯域伝送に対応する適応変調技術	13
4-2-1	変復調部概要	13
4-2-2	適応変調方式	15
4-2-3	受信特性の評価	16
4-2-3-1	各変調方式の誤り率特性	16
4-2-3-2	適応変調動作の検証	17
4-2-4	適応変調技術の総括	18
4-3	無線アクセス制御の高速化技術	19
4-3-1	無線制御部概要	19
4-3-2	QoS制御方式	20
4-3-2-1	方式概要	20

4-3-2-2	QoS 制御動作	20
4-3-3	QoS 制御の性能評価	21
4-3-3-1	評価方法	21
4-3-3-2	評価結果	22
4-3-4	無線アクセス制御技術の総括	23
4-4	低歪み準ミリ波帯の回路技術	24
4-4-1	高周波部の概要	24
4-4-1-1	IDU・ODU 装置構成	24
4-4-1-2	IDU-IF 部の構成	24
4-4-1-3	ODU-IF 部及び送受信 RF 部の構成	25
4-4-2	高周波部の電气的特性評価	27
4-4-3	送受信 R F 部の再試作	28
4-4-3-1	送受信 R F 部(再試作)の構成	28
4-4-3-2	再試作装置の性能評価結果	30
4-4-4	高周波部に関する総括	31
4-5	屋外評価試験	32
4-5-1	屋外評価試験の概要	32
4-5-1-1	試験装置の設置場所・状況	32
4-5-1-2	回線設計	35
4-5-1-3	測定項目及び測定系	36
4-5-2	測定結果	37
4-5-2-1	適応変調動作の評価	37
4-5-2-2	QoS 制御動作の評価	40
4-5-2-3	評価期間の測定状況	43
4-5-2-4	画像伝送試験	46
4-5-3	屋外評価試験に関する総括	48
4-6	総括	48
5.	参考資料、参考文献	49
5-1	参考文献	49
5-2	研究発表、講演等一覧	50

1. 研究開発課題の背景

無線アクセスシステムは、光ファイバ網のようにケーブルを敷設することなしに、必要な場所に無線機を設置することで回線を構築できる。そのため、ケーブル敷設の困難な地域、利用者の少ない過疎地域に向けた通信手段として期待されている[1]。

しかし、ミリ波を用いた固定系無線アクセス（FWA：Fixed Wireless Access）システム[2]では、降雨減衰による回線の品質劣化および稼働率の低下を避けるため、伝送距離を数km程度の短距離とし数十dBの十分な降雨マージンを確保しており、平常の晴天時には必要以上に高い電力レベルの電波を輻射している。このため、長距離伝送への対応が困難であり、結果的には利用が促進されず、低コスト化が進んでいない。

このような背景の中、小規模な建物にも設置可能で、比較的短期間に低コストで地域内のネットワーク構築を可能とする、映像伝送も可能な固定系無線アクセスシステムのニーズが高まり、新たに準ミリ波18GHz帯が開放された。この準ミリ波18GHz帯を使用した無線アクセスシステムは、「18GHz帯公共業務用無線アクセスシステム」として平成16年2月に法整備を完了した。用途としては、図1-1に示すような、地方公共団体の施設間を接続するネットワーク、地域イントラネット、監視システム、防災行政無線への活用や非常災害時等の大容量臨時回線など、幅広い利用が想定されており、今後の普及促進が期待されている。

本研究開発は、上記準ミリ波18GHz帯を用いた無線アクセスシステムにおいて、最大100Mbit/s以上の高速伝送を10kmという長距離で実現することを目標としている。この目標実現のため、「長距離広帯域伝送に対応する適応変調技術」、「無線アクセス制御の高速化技術」、「低歪み準ミリ波帯の回路技術」の3つの研究課題を挙げ研究開発を行った。

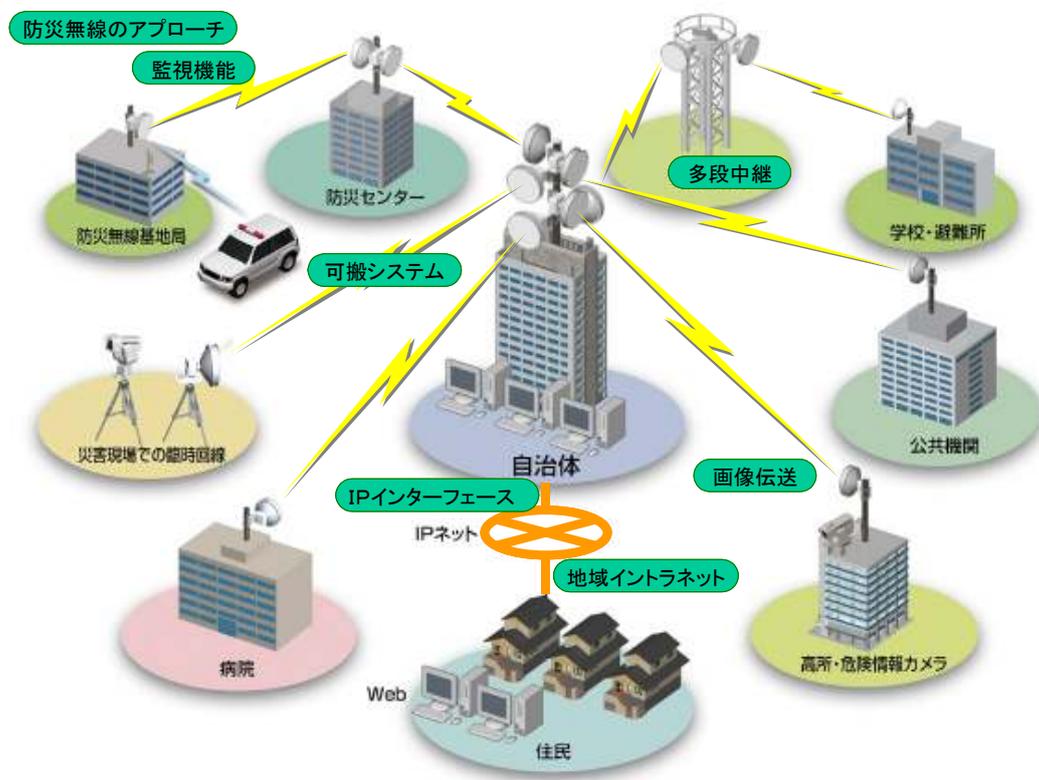


図 1-1 研究開発システムの利用イメージ

2. 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

初年度の平成14年度(期間：平成14年10月～平成15年3月)には、各技術の初期検討、方式／アルゴリズム／アーキテクチャを検討した。2年目の平成15年度(期間：平成15年4月～平成16年3月)は、試験装置の試作、および室内評価試験を行い、本年度は、試作した試験装置により屋外試験評価を実施した。実際に屋外の環境下で連続動作させ、下記に示す各課題テーマについて、検討方式の検証、特性評価を行った。

本委託研究では、無線アクセスシステムの研究開発により、下記に示す技術を確立することを目的とした。

ア 長距離広帯域伝送に対応する適応変調技術

長距離伝送において、多値数最大の変調方式を64QAMとし、降雨による伝搬路状況の変動に対応した最適な変調方式の切替制御を行う、低い不稼働率を実現するための適応変調技術、および、本適応変調方式に最適な誤り訂正技術を確立する。

イ 無線アクセス制御の高速化技術

高速な処理を実現することにより制御処理遅延を少なくし、適応変調方式に対応した無線区間の優先制御を行うことにより、高速伝送におけるスループットを向上させる無線アクセス制御技術を確立する。

ウ 低歪み準ミリ波帯の回路技術

低歪み高出力増幅器の開発、準ミリ波回路の小型化、低コスト化に対応する、準ミリ波増幅技術、準ミリ波回路の小型化実装技術を確立する。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標

- (1) 準ミリ波帯18GHzの電波を利用し、最大100Mbit/sの高速伝送を10kmの長距離で可能とする。
- (2) 降雨による伝搬路状況の変動に対応して、変調方式と誤り訂正の組合せを最適に切替制御する適応変調方式[4][5]を実現する。
- (3) 無線アクセス制御は、イーサネット(100Base)に対応可能な高速処理動作を有する。
- (4) 最大送信出力100mW(20dBm)を可能とする。

以上の項目に対応し、本研究開発では以下の技術を確立することを最終目標とする。

ア 長距離広帯域伝送に対応する適応変調技術

降雨による伝搬路状況の変動に対応して、変調方式と誤り訂正の組合せを最適に切替制御することにより、長距離伝送において低い不稼働率を可能にする適応変調方式を実現する。また、適応変調方式で使用する多値変調方式の所要C/Nの低減には、誤り訂正を適用することが有効であるため、本適応変調方式に最適な誤り訂正技術を確立する。

具体的には以下の技術を確立する。

- ・ 降雨による伝搬路状況の変動に対応した最適な適応変調技術
- ・ 適応変調方式に適合する誤り訂正技術

イ 無線アクセス制御の高速化技術

無線区間の高速伝送に対応した高速な処理動作を実現し、本提案システムの適応変調方式に対応した無線区間の優先制御を行うことにより、高速伝送におけるスループットを向上させる無線アクセス制御技術を確立する。

具体的には以下の技術を確立する。

- ・ 高速制御処理技術

- ・無線区間優先制御技術

ウ 低歪み準ミリ波帯の回路技術

多値変調方式を用いるため、高いバックオフに対応できる低歪な高出力増幅器の技術が必要である。また、システムの経済的運用のために、高周波回路部分の低消費電力化と小型化、低コスト化に向けた準ミリ波回路の小型化実装技術が必要である。

具体的には以下の技術を確立する。

- ・高出力低歪み準ミリ波増幅技術
- ・準ミリ波回路の小型化実装技術

2-2-2 中間目標

ア 長距離広帯域伝送に対応する適応変調技術

適応変調および誤り訂正に関する技術検討を反映させた変復調ベースバンド部試作装置と、高周波部試作装置により、室内評価試験を実施し、採用方式の動作検証および特性評価を行う。

イ 無線アクセス制御の高速化技術

高速処理動作および優先制御に関する技術検討を反映させた無線制御部試作装置と、変復調ベースバンド部により、室内評価試験を実施し、採用方式の動作検証および特性評価を行う。

ウ 低歪み準ミリ波帯の回路技術

平成15年度に高周波部試作装置の開発を行い、同年度に開発した変復調ベースバンド部試作装置と連動させ、室内評価試験を実施し、準ミリ波帯における各種性能劣化要因の解析を行う。

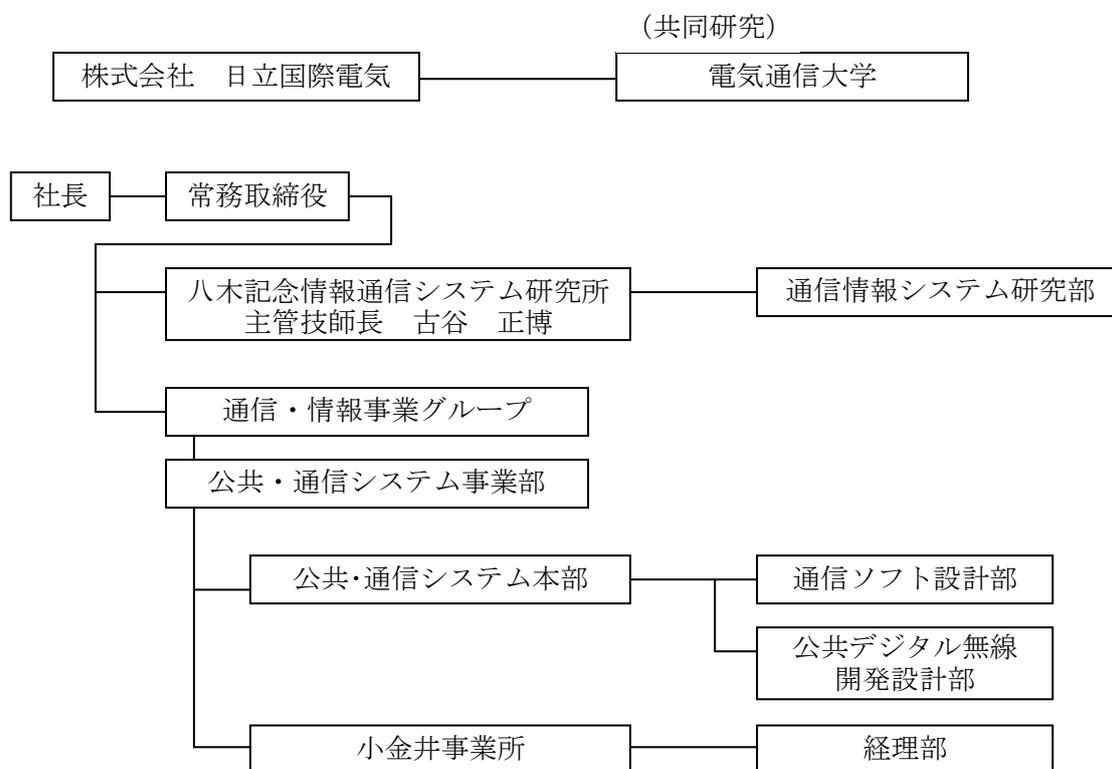
2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

研究開発項目	14年度	15年度	16年度	年度	年度	計	備考
準ミリ波帯広帯域 固定系無線アクセスシステム技術の研究開発							
ア 長距離広帯域伝送に対応する 適応変調技術			中 間 評 価	→			
イ 無線アクセス制御の高速化技術				→			
ウ 低歪み準ミリ波帯の回路技術				→			
間接経費額 (税込み)				→			
合 計							

3. 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



4. 研究開発実施状況（平成16年度まで）

4-1 システム概要

4-1-1 システム諸元

本開発装置の主要諸元を表4-1-1に示す。

表4-1-1 無線システムの主要諸元

項目	諸元
周波数帯	18GHz帯（17.7～19.7GHz）
複信方式	FDD
変調方式	適応変調方式 （BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM）
シンボル伝送速度	26.67 Msymbol/s
ロールオフ率	0.4
伝送速度 （情報伝送速度）	最大100Mbit/s
入出力 インタフェース	100Base-TX
送信出力	最大100mW（20dBm）
伝送距離	10km （回線不稼働率：0.01%以下 ^{※1} ）
規定ビット誤り率	1×10^{-9}

※1 1分雨量（累積分布0.0075%値）：1.31mm/min（東京23区10ヶ所平均） [3]

4-1-2 システム構成

装置の概略構成を図4-1-1に示す。装置は屋外装置（ODU:Outdoor Unit）、屋内装置（IDU:Indoor Unit）より構成され、同軸ケーブルで接続される。

ODUは、高周波信号を処理する送受信RF部、ODU-IF部、ODU制御部、ODU電源部より構成される。IDUは、IDU-IF部、送受信の変復調信号処理を行う変復調部、有線系のネットワークと無線部のインタフェース及びQoS制御を行う無線制御部、IDU制御部、IDU電源部より構成される。ODU及びIDUの装置外観を図4-1-2に示す。

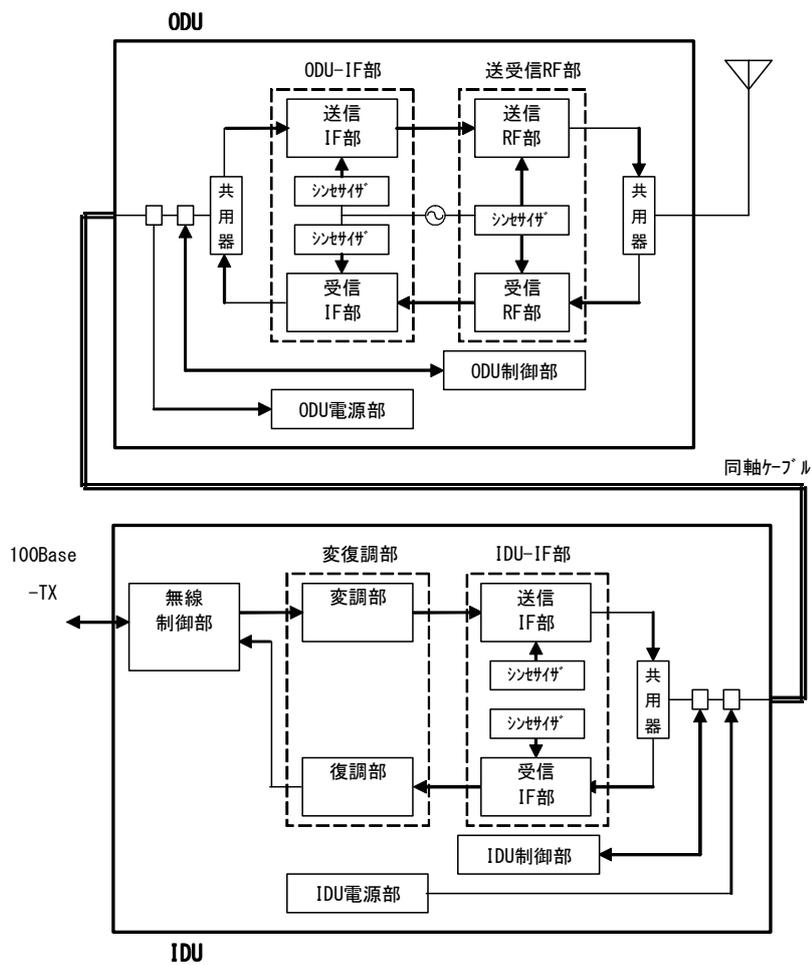


図 4-1-1 試験装置の概略構成



(a) 屋外装置 (ODU) 及び 60cm アンテナ

(b) 屋内装置 (IDU)

図 4-1-2 ODU 及び IDU の装置概観

4-2 長距離広帯域伝送に対応する適応変調技術

4-2-1 変復調部概要

変調部の仕様を表4-2-1に、復調部の仕様を表4-2-2に示す。

伝送フレームは、オーバーヘッド情報とデータブロックサイズを考慮して1フレームを3msecとし図4-2-1に示す構成とした。フレーム先頭には、フレーム同期、等化器の初期収束に用いるトレーニングシンボル(TRN)、及び適応変調時の変調切替情報等の無線回線の制御情報を伝送する無線制御ブロック(RCB)を、フレーム後部にガードタイム(GT)を配置した。

表4-2-1 変調部の仕様

項目	仕様
送信IF出力周波数	60MHz
オーバーサンプリング数	9
サンプリング周波数	240MHz
符号化方式	畳込み符号(拘束長：7)
符号化率	1/2または3/4

表4-2-2 復調部の仕様

項目	仕様
受信IF入力周波数	40MHz
オーバーサンプリング数	6
サンプリング周波数	160MHz
復号方式	ビタビ復号(硬判定)
等化方式	線形等化 (タップ長：9, 収束アルゴリズム：LMS)

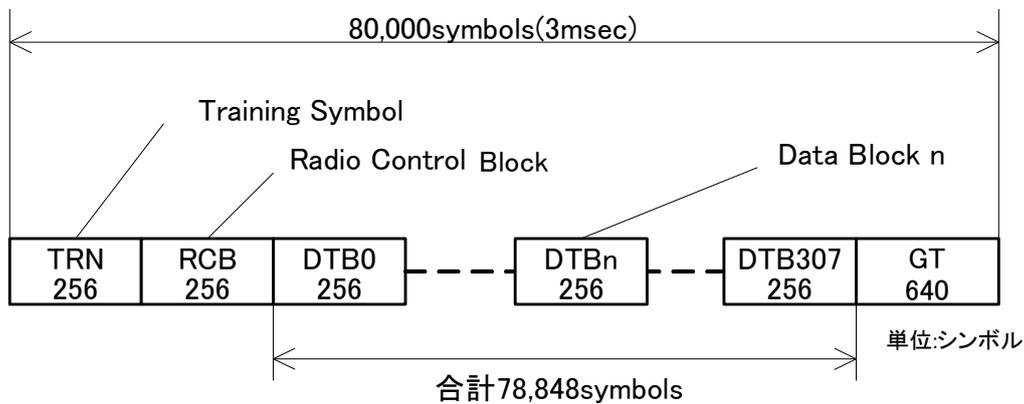


図 4-2-1 伝送フレーム構成

変復調部の機能ブロックを図 4-2-2 に示す。変調処理では無線制御部から出力される送信データを畳込み符号化し、無線伝送フレームに埋め込み、フレーム化されたビットデータを変調方式 (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM) に対応したシンボル信号に変換する。送信フィルタにより帯域制限を行い、直交変調により IF 周波数 (60MHz) に変換し IF 部へ出力する。

復調処理では、IF 部からの受信 IF 信号 (40MHz) を直交復調によりベースバンド信号に変換し、受信フィルタで波形整形を行う。次にこの信号により、伝送タイミングの抽出、及び AFC 処理による周波数偏差の補償を行い、さらに適応等化器により帯域内歪成分や符号間干渉成分の除去を行う。シンボルからビットデータへの変換を行い、ビットデータに対してビタビ復号による誤り訂正を行い、復号データを無線制御部へ出力する。

ハードウェアの実現にあたっては、高速でかつリアルタイム性が要求される変復調処理については FPGA、フレーム単位での比較的低速な同期・適応変調制御などの処理は DSP で実現することとし、各デバイスへの機能分割は図 4-2-2 に示す分割とした。

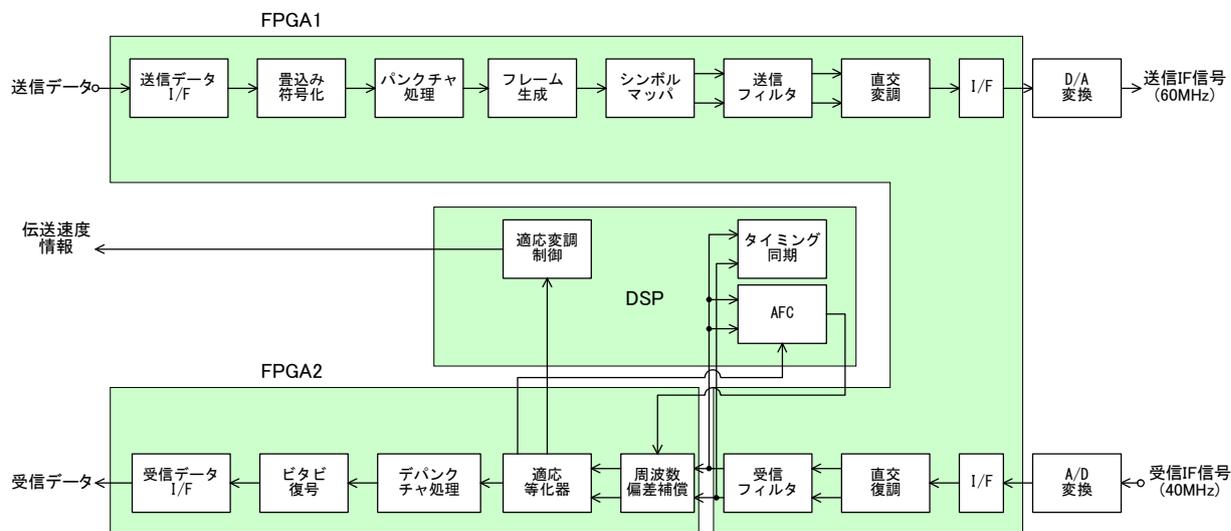


図 4-2-2 変復調部の機能ブロック図

4-2-2 適応変調方式

変調方式と誤り訂正の符号化率については、表 4-2-3 に示すような 4 段階の組合せとした。

適応変調方式は、受信C/Nに相当する等化器の誤差出力を使用して回線品質を推定し、その結果を基に変調方式と誤り訂正の符号化率を切替える方式とした。

表 4-2-3 変調方式と誤り訂正符号化率の組合せ

変調方式	符号化率
BPSK	1/2
QPSK	1/2
16QAM	1/2
64QAM	3/4

4-2-3 受信特性の評価

4-2-3-1 各変調方式の誤り率特性

室内評価試験における、BPSK~64QAM各変調方式の端末局側、基地局側の誤り率特性を、図4-2-3、図4-2-4に示す。各変調方式で、表4-2-4に示すように受信感度仕様を満足する特性を得た。ただし、端末局側の受信感度は、基地局側と比べて1~2dB程度悪い特性であり、特性の劣化要因検討と対応策については、製品開発の課題として対処する。

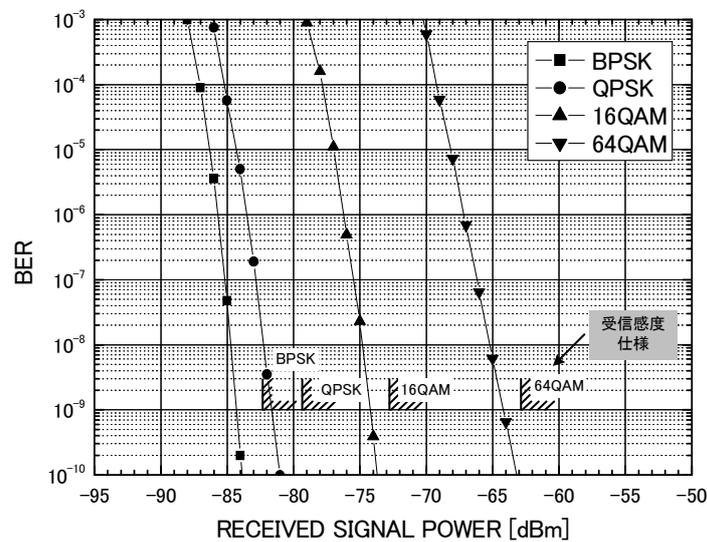


図4-2-3 誤り率特性 (端末局側 : 19.250 GHz)

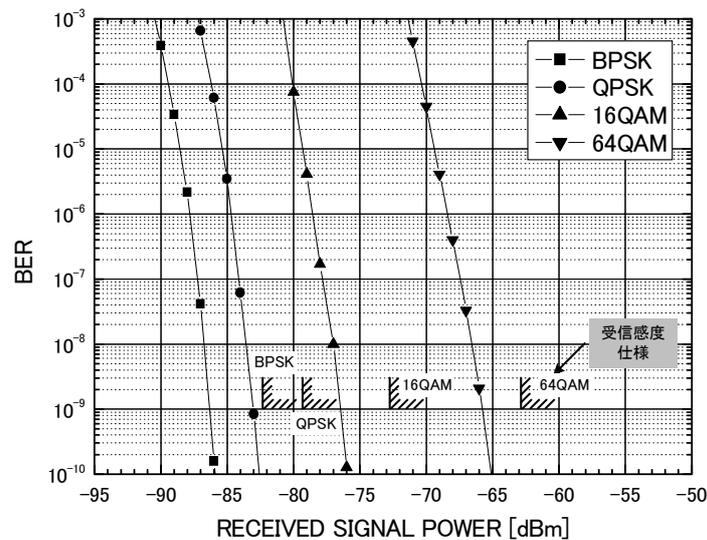


図4-2-4 誤り率特性 (基地局側 : 18.000 GHz)

表 4-2-4 受信感度特性 (BER=1×10⁻⁹)

受信局(受信周波数)	受信感度 (dBm)			
	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
端末局(19.250(GHz))	-84	-82	-74	-64
基地局(18.000(GHz))	-87	-83	-77	-65
仕様	-82以下	-79以下	-72以下	-63以下

4-2-3-2 適応変調動作の検証

適応変調切替動作を、受信入力レベルを変化させて検証した。

対向接続した無線機の間に入れた可変減衰器を変化させ、受信電力レベルを変えて変調方式の切替動作、ビット誤りの有無について評価した。表 4-2-5 に変調方式切替の受信電力閾値を示す。受信電力閾値は上昇時と下降時について、ヒステリシスを持たせた値とした。

端末局における、受信電力上昇時及び下降時の特性を図 4-2-5、図 4-2-6 に示す。

受信電力の上昇時及び下降時において、切替時のビット誤りを発生せず、設定した閾値で適切な変調方式に切替えられることを確認した。

表 4-2-5 変調方式切替の受信電力閾値

受信電力レベル	変調方式切替	受信電力閾値
上昇時	BPSK→QPSK	-78dBm
	QPSK→16QAM	-70dBm
	16QAM→64QAM	-61dBm
下降時	64QAM→16QAM	-63dBm
	16QAM→QPSK	-73dBm
	QPSK→BPSK	-79dBm

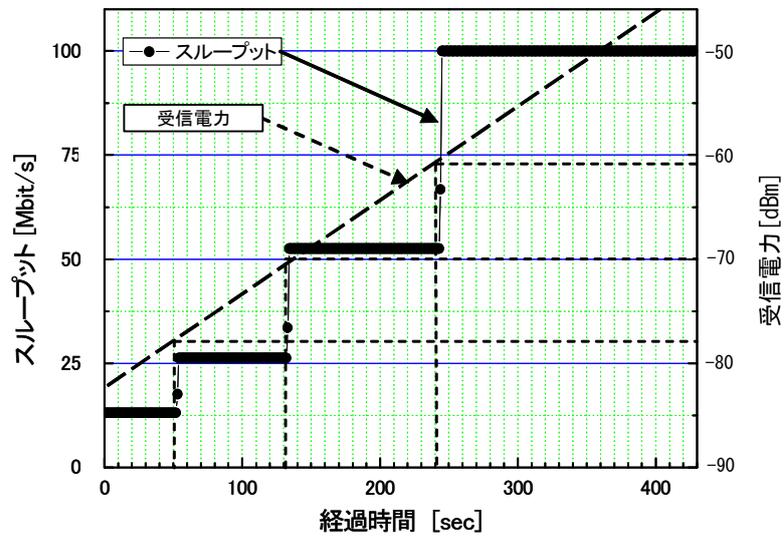


図 4-2-5 端末局受信特性 (受信レベル上昇時)

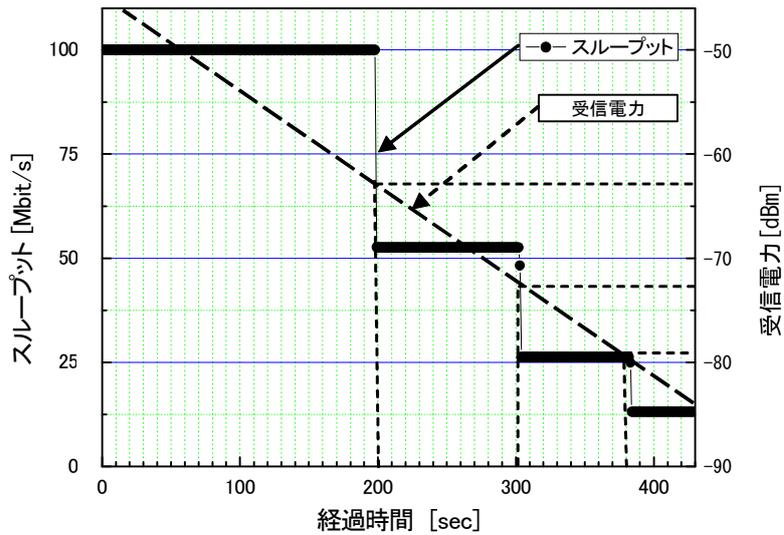


図 4-2-6 端末局受信特性 (受信レベル下降時)

4-2-4 適応変調技術の総括

適応変調方式には 4 種類の変調方式を誤り訂正と組合せて使用し、同期を含めた基本的な変復調機能をFPGAを中心としたデバイスに実装し実現した。本機能については、室内評価試験により所期の仕様を満足することを確認した。

4-3 無線アクセス制御の高速化技術

4-3-1 無線制御部概要

無線制御部はQoS制御部とインタフェース部から構成する方式とした。無線制御部の構成を図4-3-1に示す。QoS制御部では、TCP/IPのプロトコル処理、QoS制御を行い、インタフェース部ではイーサネットと変復調部とのインタフェース処理を行う。

伝送速度が100Mbit/s以上の場合には、QoS制御部をバイパスした図中(a)の経路でデータを転送する。適応変調の変調切替により伝送速度が100Mbit/s未満となった場合には、図中(b)の経路で、QoS制御部によるQoS制御を行ないデータを転送する。

復調部からの受信データは、インタフェース部の処理でイーサネットへ転送する。

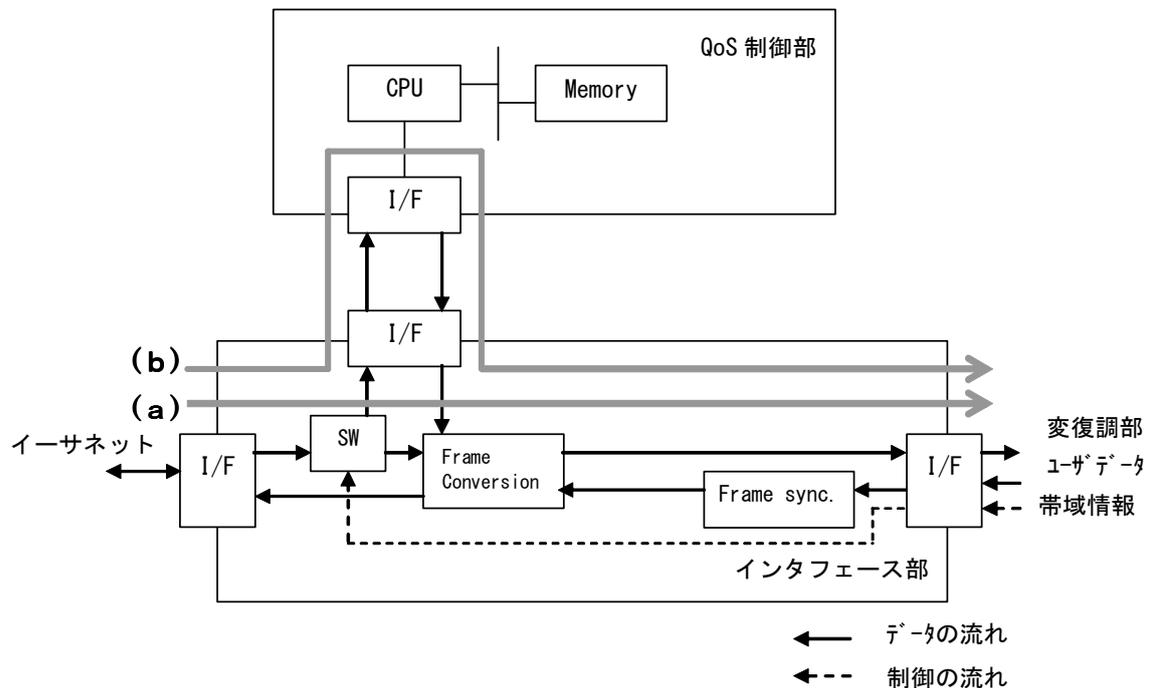


図4-3-1 無線制御部の構成

4-3-2 QoS 制御方式

4-3-2-1 方式概要

QoS制御のスケジューリング方式[6]には、CBQ(Class Based Queuing)を採用した。CBQではユーザやサービス毎に帯域保証、および階層構成が可能なため特定ユーザのQoSを保証し、更にそのユーザのアプリケーションにも所定のQoSを保証できるなど、使い勝手の良いサービスを実現することが可能である。

図4-3-2に、CBQにおける階層クラス構成例を示す。クラス1-1の下にクラス1-2とクラス1-13を定義し、各々にクラス1-1に割当てた帯域を60%、40%の割合で割当て、さらにクラス1-2の下にクラス1-11とクラス1-12を定義し、各々にクラス1-2に割当てた帯域を70%、30%の割合で割当てた場合を示す。この場合、クラス1-11が使い残した帯域はクラス1-12が原則として利用し、さらに、クラス1-11とクラス1-12が使い残した帯域はクラス1-13が利用する。すなわち、CBQはクラス間での割当て帯域を保証しつつ、クラスの使い残した帯域を他のクラスが使用できるという柔軟な方式である。

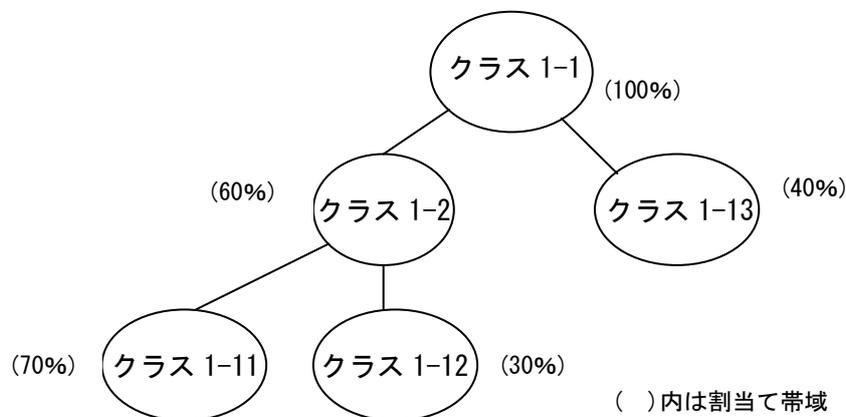


図4-3-2 階層クラス構成例

4-3-2-2 QoS 制御動作

図4-3-3にQoS制御動作を示す。QoS制御は変復調部から帯域情報である変調方式切替データを読み取り、帯域情報毎に予め設定されている制御ポリシーを実行する。制御ポリシーは、プロトコル種別、送信元IPアドレス、宛先IPアドレス、ポート番号等によりトラフィックを分類し、各クラスに対応させるト

ラフィックフローを集約し、個々のクラスに対する帯域保証を規定する。

帯域情報から得られる無線伝送速度が100Mbit/s以上の場合、有線側インタフェースが100Base-TXであることから回線の輻輳は生じないので、QoS制御は行わない方式とした。

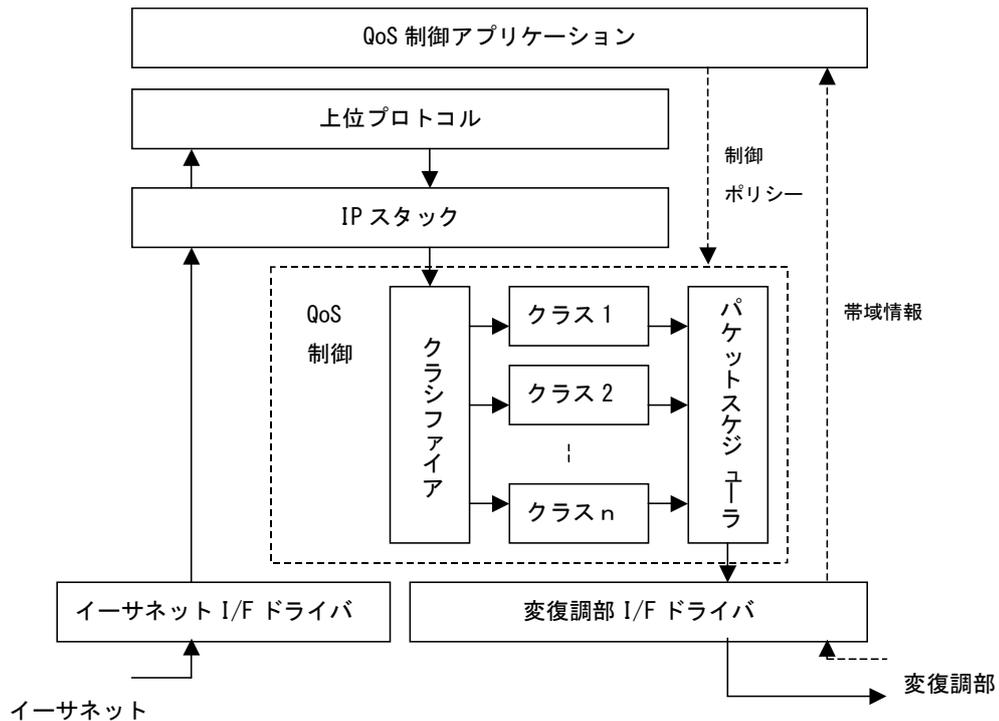


図 4-3-3 QoS 制御動作

4-3-3 QoS 制御の性能評価

4-3-3-1 評価方法

図 4-3-4 に示す測定系により性能評価を行った。

スループット測定器のPORT1から、各々伝送速度33Mbit/sのクラスA、クラスB、クラスCの packets を混在させPORT2に向けて送信する。CPU部へ外部から帯域情報を手動で設定し、表 4-3-1 に示すような各変調方式に対応する無線伝送速度を切替え、QoS制御によるスループットを測定した。

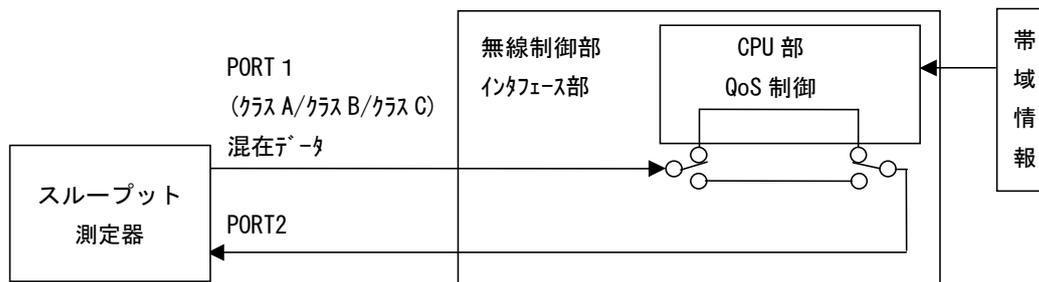


図 4-3-4 QoS 制御性能評価の測定系

表 4-3-1 無線伝送速度に対応した各クラスの保証帯域

無線伝送速度 [Mbit/s] (対応変調方式)	100 (64QAM)	48 (16QAM)	24 (QPSK)	12 (BPSK)
クラス/サービス				
クラスA 専用線型 [Mbit/s]	QoS制御無し	6	6	6
クラスB 回線品質適応型 [Mbit/s]	QoS制御無し	12	8	4
クラスC ベストエフォート型 [Mbit/s]	QoS制御無し	30	10	2

4-3-3-2 評価結果

スループットの測定結果を図 4-3-5 に示す。

無線伝送速度が100Mbit/sの場合はQoS制御を行わないため、各クラスのスループットは、設定した伝送速度33Mbit/sとなっている。

変調方式の切替により無線伝送速度が48Mbit/s以下となる場合には、表 4-3-1 に示した帯域が確保されており、無線伝送速度に対応した適正な帯域制御が実現されていることを確認した[7]。ただし、パケット伝送を行うために制御情報を挿入しており、スループットは帯域よりも若干低い値になっている。

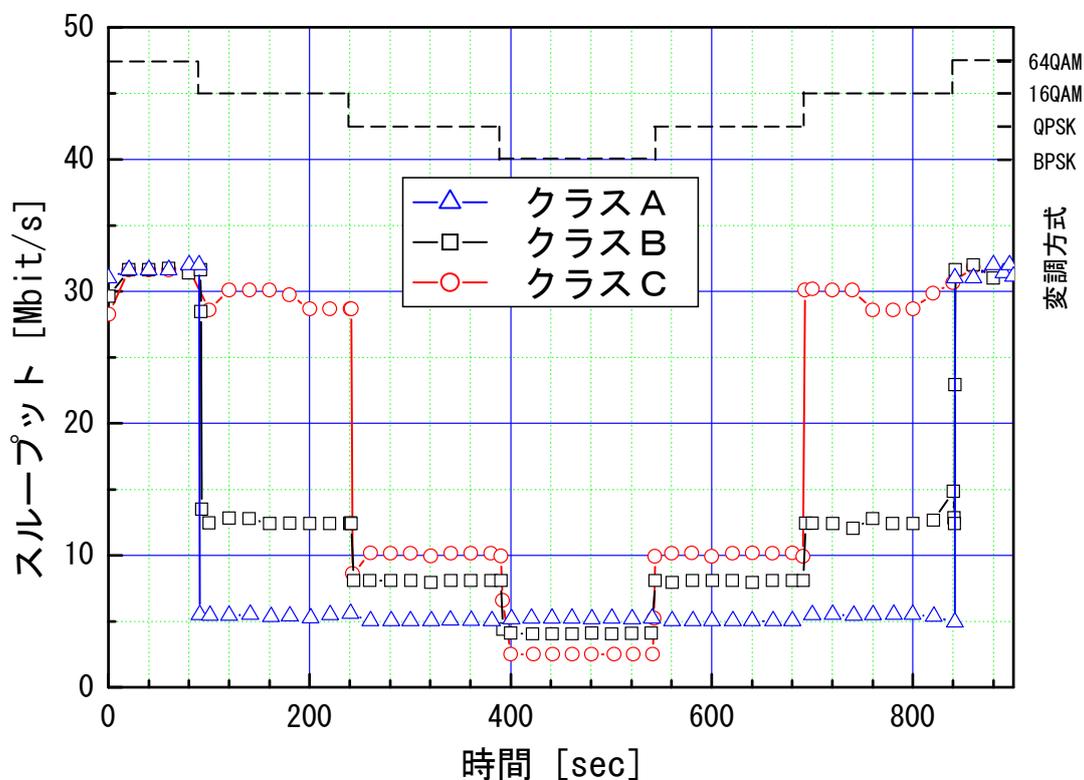


図 4-3-5 スループット測定結果

4-3-4 無線アクセス制御技術の総括

高速処理動作およびQoS制御に関する、方式設計、技術検討を反映させた無線制御部の試作装置を開発した。

伝送速度が100Mbit/s以上の高速伝送の場合には、QoS制御部をバイパスしインターフェース部のハード処理によるデータ転送を行うことで、高速なパケット転送が実現できることを確認した。また、QoS制御については、適応変調方式の変調切替により無線伝送速度が変化した場合において、必要とされる帯域が保証されることを確認した。本機能の最終評価、検証については、屋外評価試験の項で後述する。

4-4 低歪み準ミリ波帯の回路技術

4-4-1 高周波部の概要

4-4-1-1 IDU・ODU 装置構成

高周波部は、IDU内のIDU-IF部、ODU内のODU-IF部および送受信RF部に分かれており、それぞれのブロックは、図4-4-1に示す構成とした。

IDUとODU間は1本の同軸ケーブルで接続され、ODUの電源(DC-48V)、送信IF信号(455MHz)、受信IF信号(290MHz)、制御用ASK信号(1.25MHz, 3.15MHz)を重畳し伝送する。各ブロックの制御は、ODUについてはODU制御部、IDUについてはIDU制御部により行う。

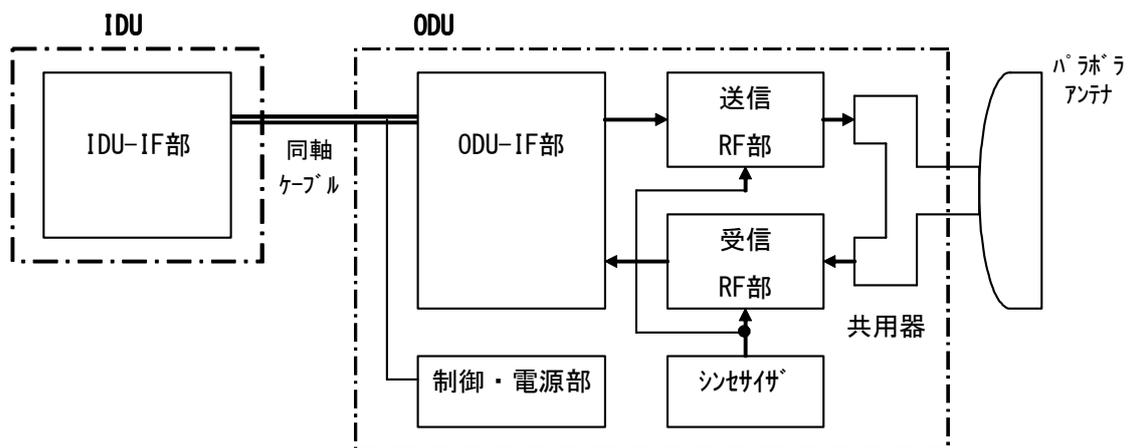


図4-4-1 高周波部の概略構成

4-4-1-2 IDU-IF部の構成

IDU-IF部の構成図を図4-4-2に示す。IDU-IF部は、送信IF部、受信IF部、シンセサイザより構成され、送信IF部では送信信号60MHzを455MHzに変換しODUに伝送する。受信IF部ではODUからの受信IF信号290MHzを40MHzに変換し、AGCにて一定レベルになるよう調整しベースバンド部に伝送する。

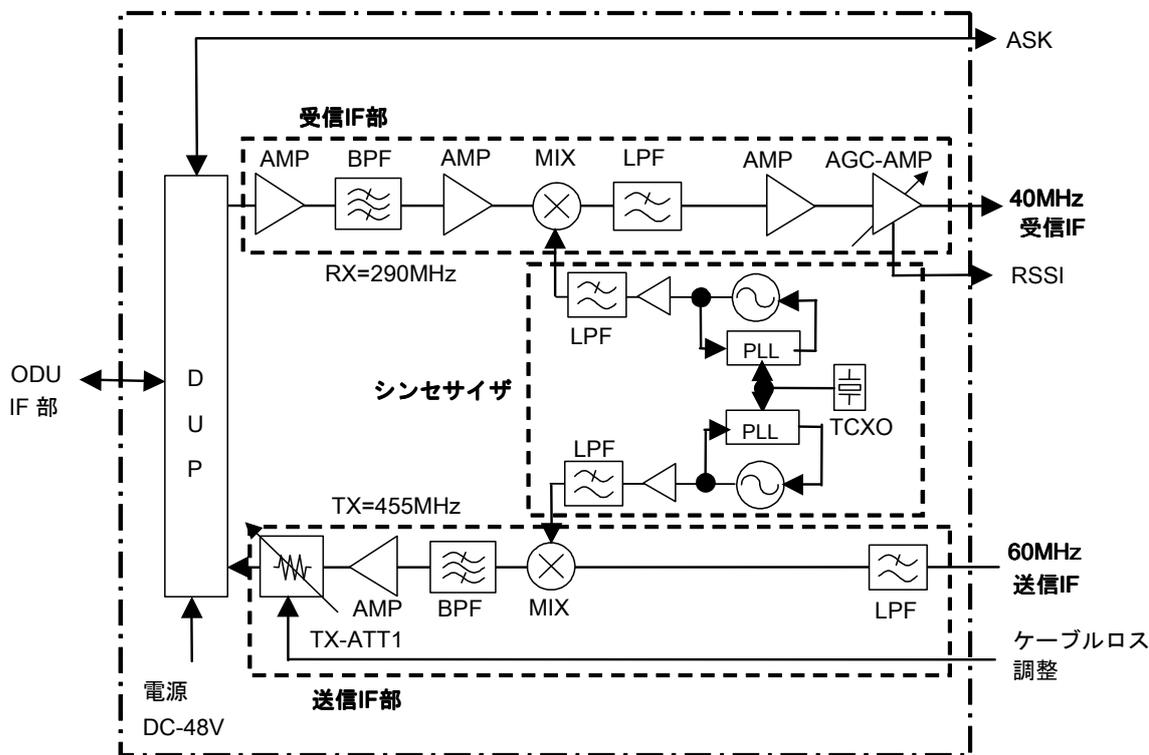


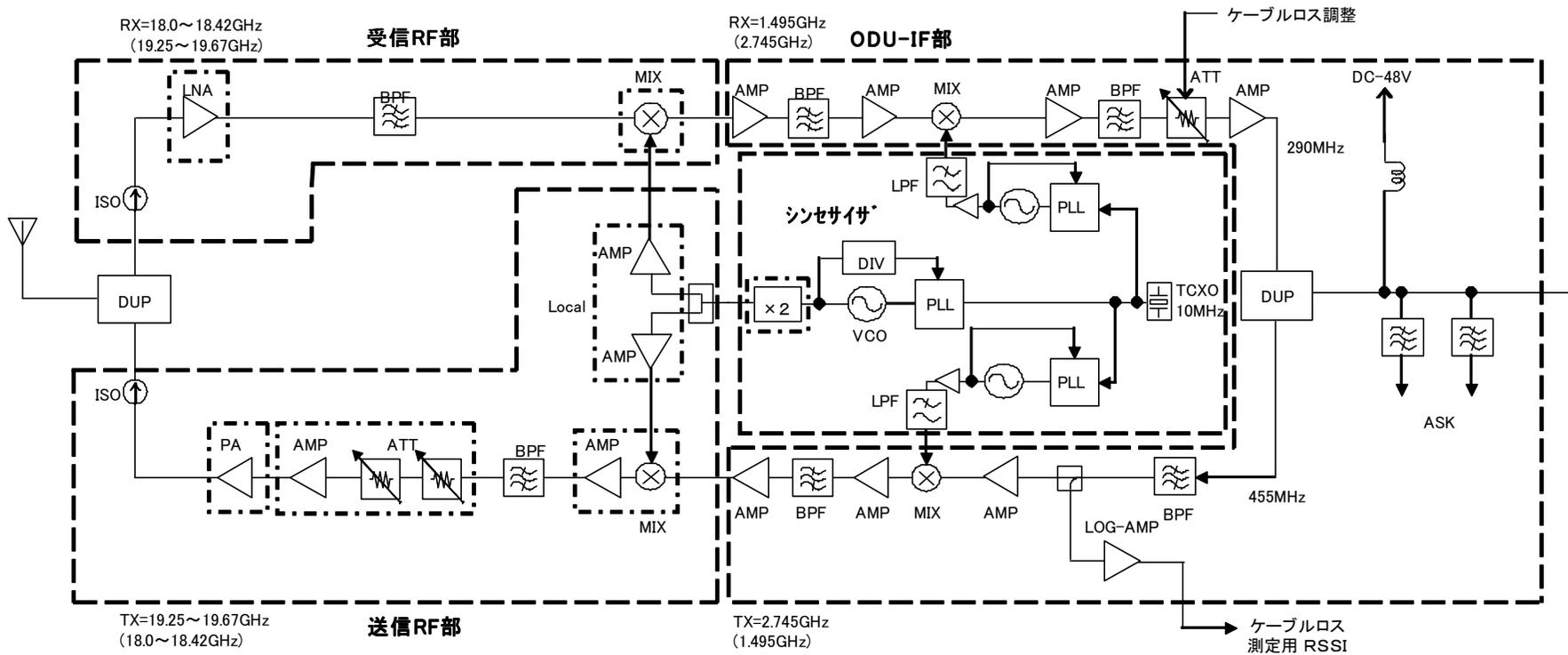
図 4-4-2 IDU-IF 部のブロック構成

4-4-1-3 ODU-IF 部及び送受信 RF 部の構成

ODU-IF部及び送受信RF部の構成を図 4-4-3 に示す。

送受信RF部、シンセサイザ用に、RFモジュール7個(図中の一点鎖線部)を新規開発した。また、特性劣化の要因となる回り込みによる影響を少なくするため、送信RF部及び受信RF部は別ユニット構成とした。

送信RF部と受信RF部の概観を図 4-4-4 に示す。



*()内は端末局周波数

図 4-4-3 ODU-IF 部及び送受信 RF 部のブロック構成

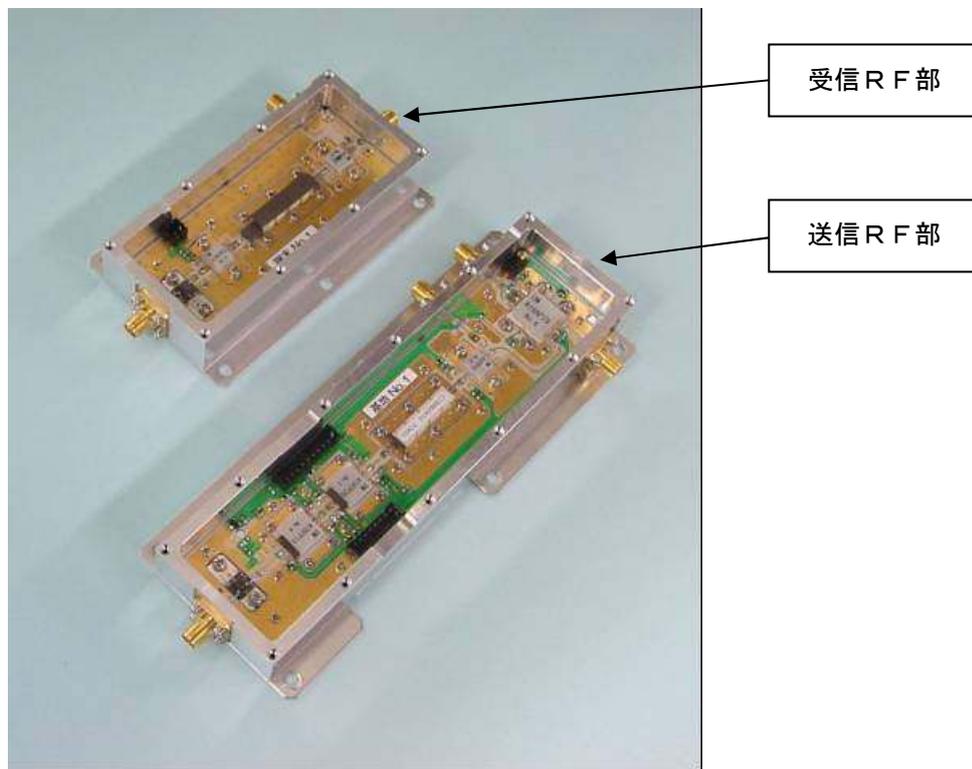


図 4-4-4 高周波部の送受信 RF 部の概観

4-4-2 高周波部の電气的特性評価

電气的特性については、(財)テレコムエンジニアリングセンター制定の試験方法[8]に従い評価を行った。基地局、端末局についてそれぞれ測定評価した結果を、表 4-4-1、表 4-4-2 に示す。

基地局、端末局とも、各項目について仕様を満足する結果を得た。

表 4-4-1 電气的特性 (基地局 19.250GHz)

項目 \ 変調方式	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM	装置仕様
周波数偏差 (ppm)	+0.26				±3ppm以下
占有周波数帯幅 (MHz)	32.5	32.25	32.5	32.25	34.67MHz以下
スプリアス発射の強度 (dBm)	-30以下	-30以下	-30以下	-34以下	-13dBm(50μW)以下
空中線電力 偏差 (%) <出力電力> (dBm)	-11.4 <19.5>	-15.8 <19.3>	-9.5 <17.6>	-32.0 <15.3>	偏差±50% BPSK, QPSK:20dBm 16QAM:18dBm, 64QAM:17dBm
隣接チャネル漏洩電力 lower/upper (dBc)	-44.2/-44.7	-46.2/-47.0	-47.5/-47.5	-46.9/-47.0	-33dBc以下
副次的に発する 電波等の強度 (dBm)	-58以下	-58以下	-58以下	-58以下	-56dBm(4nW)以下

表 4-4-2 電气的特性 (端末局 18.000GHz)

項目 \ 変調方式	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM	装置仕様
周波数偏差 (ppm)	-0.12				±3ppm以下
占有周波数帯幅 (MHz)	32.0	32.0	31.5	31.75	34.67MHz以下
スプリアス発射の強度 (dBm)	-34以下	-35以下	-34以下	-36以下	-13dBm(50μW)以下
空中線電力 偏差 (%) <出力電力> (dBm)	-17.8 <19.1>	-21.6 <18.9>	-15.9 <17.2>	-37.0 <15.0>	偏差±50% BPSK, QPSK:20dBm 16QAM:18dBm, 64QAM:17dBm
隣接チャネル漏洩電力 lower/upper (dBc)	-45.6/-45.4	-47.8/-47.6	-48.3/-48.0	-47.5/-47.2	-33dBc以下
副次的に発する 電波等の強度 (dBm)	-58以下	-58以下	-58以下	-58以下	-56dBm(4nW)以下

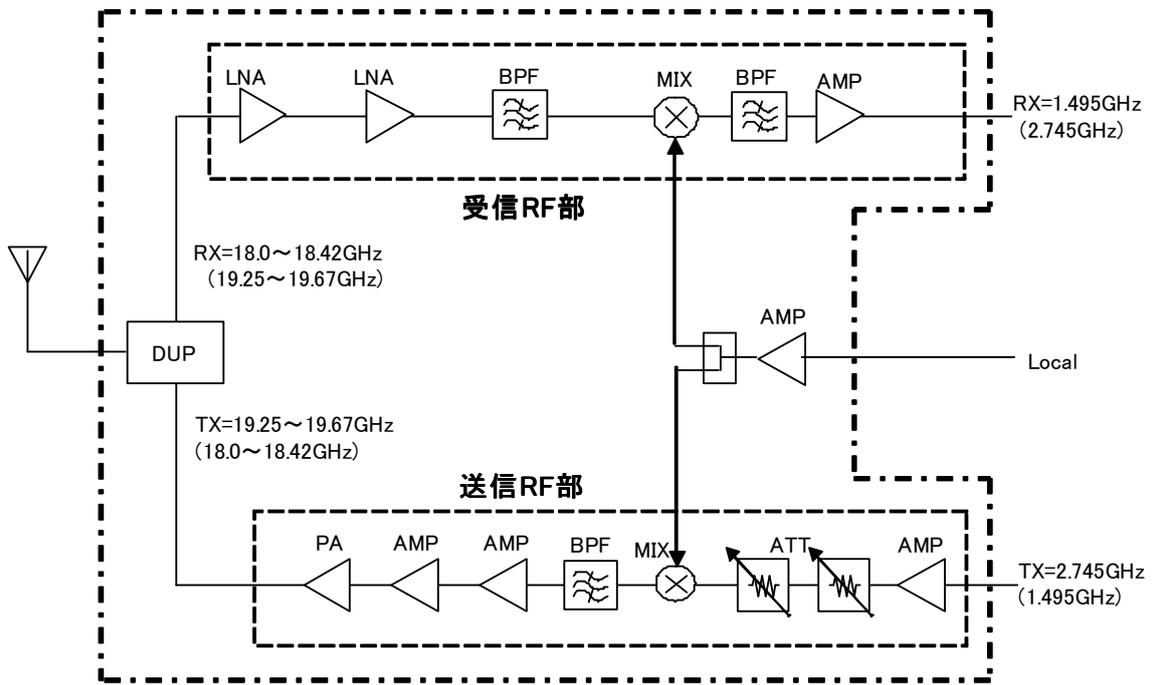
4-4-3 送受信RF部の再試作

送受信RF部については、製品化に向け広帯域化を図るため、再試作を行った。

4-4-3-1 送受信RF部(再試作)の構成

再試作した送受信RF部のブロック構成を図4-4-5に示す。基本的な回路構成を変えずに、送信PA前置増幅器、および受信入力段の増幅器をそれぞれ2段に増やした。また、低コスト化を狙い共用器を含めて一体型構造とし、各部をシールドにより分離する実装構造にすることで特性の向上を図った。

再試作を行った送受信RF部の概観を図4-4-6に示す。



* ()内は端末局の周波数

図4-4-5 送受信RF部(再試作)のブロック構成

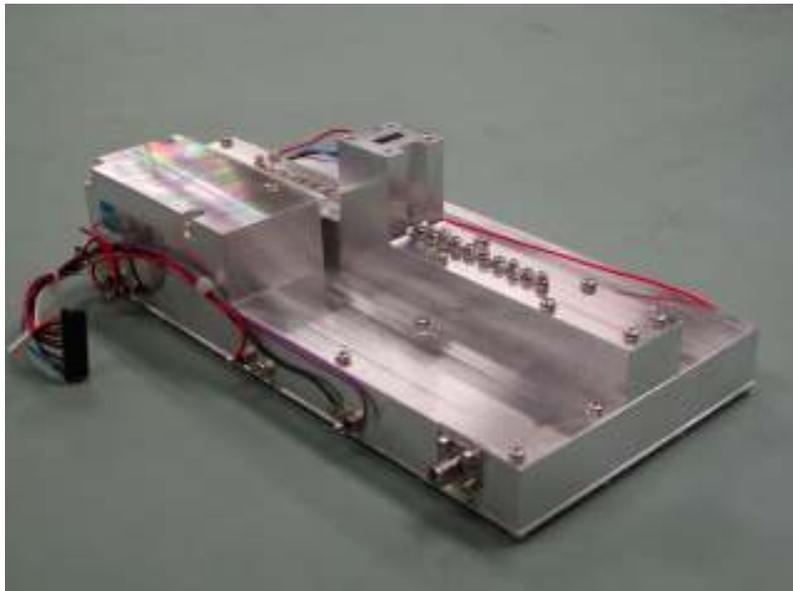


図4-4-6 送受信RF部(再試作品)概観

4-4-3-2 再試作装置の性能評価結果

チャンネル周波数に対応した送信出力周波数特性を、高群周波数(基地局)と低群周波数(端末局)について評価した結果を図4-4-7、図4-4-8に示す。

高群周波数、低群周波数共に、規定出力(20±3dBm)を満足する結果を得た。

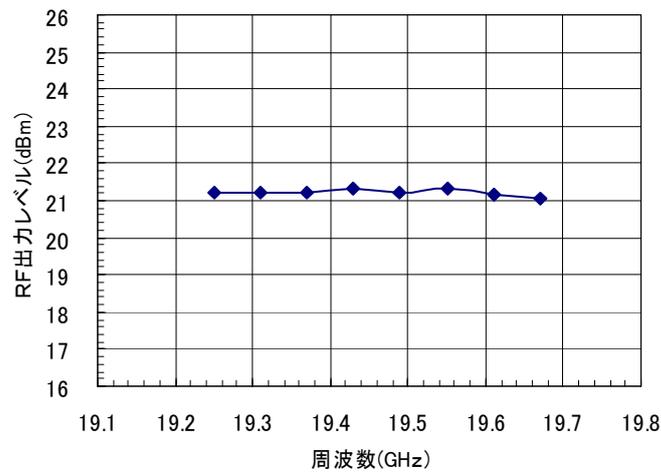


図4-4-7 送信出力周波数特性 (基地局, 高群周波数)

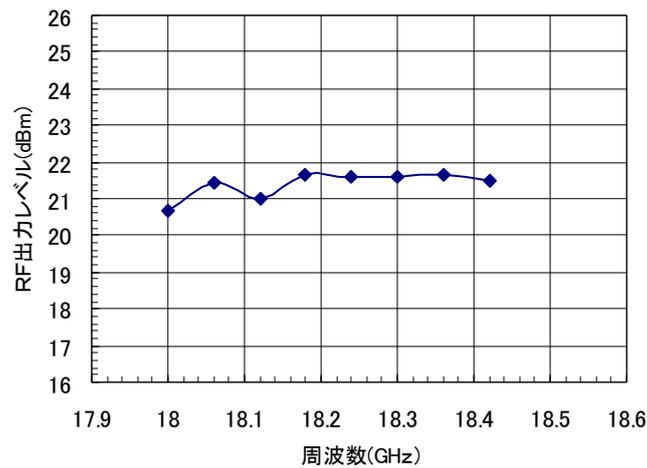


図4-4-8 送信出力周波数特性 (端末局, 低群周波数)

4-4-4 高周波部に関する総括

(1) 試験装置

送受信RF部は送信RF部と受信RF部を分離した構造とした結果、大きな支障もなく全ての性能を満足することができた。

しかし、広帯域化については課題を残したため、製品化に向けた再試作を行った。

(2) 再試作装置

低コスト化を考慮して送受信RF部を一体化し、シールドにより分離する構造で試作を行った。目標の周波数帯域において仕様を満足する性能を得た。

4-5 屋外評価試験

4-5-1 屋外評価試験の概要

4-5-1-1 試験装置の設置場所・状況

(1) 設置場所

試験装置は、スカイタワー(基地局)と電気通信大学(端末局)に設置した。設置条件を表4-5-1に示す。

スカイタワーでは地上高105mの位置に、電気通信大学では総合研究棟の屋上に設置された鉄塔の地上高40mの位置に、アンテナ-ODU装置を取付けた。伝搬路は見通しの環境である。

図4-5-1に実験装置設置位置の標高値、地表高を示す。

表4-5-1 試験装置の設置条件

項目	無線局名称	ひたちとうきょうじっけん 18001 (スカイタワー)	ひたちとうきょうじっけん 18002 (電気通信大学 総合研究棟)
経度		E 139° 31' 23"	E 139° 32' 36"
緯度		N 35° 44' 05"	N 35° 39' 27"
海拔高 (m)		64.9	37.0
地上高 (m)		105.0	40.0
相手局方向 (°)		TN 167.9	TN 347.9
距離 (Km)		8.7	

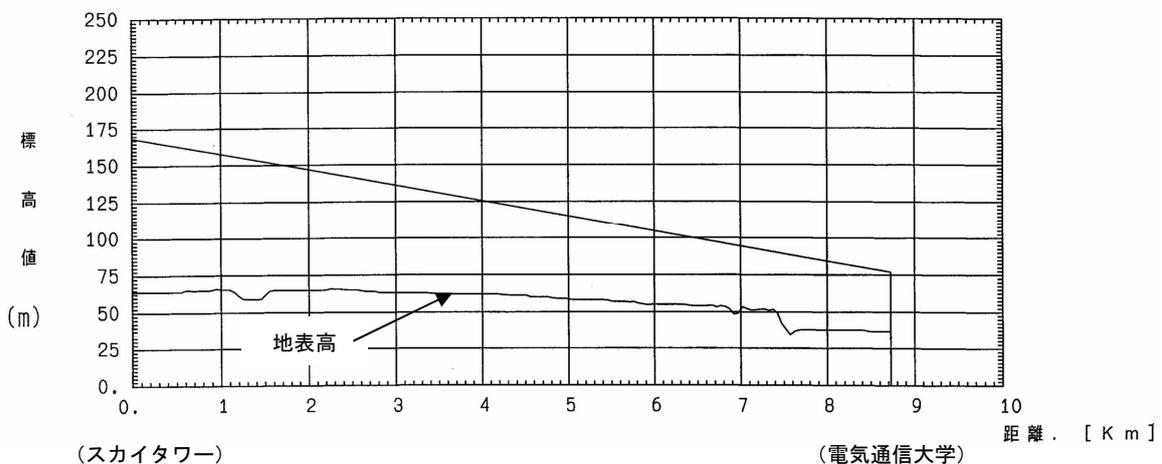


図4-5-1 実験装置の設置高

(2) 設置状況

スカイタワーと電気通信大学における、試験装置のIDU装置とODU装置の設置状況を図4-5-2、図4-5-3に示す。

スカイタワーでは、アンテナ-ODU装置をテラス上に取り付けた。電気通信大学では、総合研究棟屋上の鉄塔テラス横側にアンテナ-ODU装置を取り付けた。また、両方の設置場所に雨量計、降雨強度計を設置した。



(a) アンテナ-ODU装置



(b) アンテナ-ODU装置の遠景



(c) IDU装置・記録用パソコン等(室内)



(d) 雨量計(左側)・降雨強度計(右側)

図4-5-2 スカイタワー(基地局)試験装置の設置状況



(a) アンテナ-ODU装置



(b) アンテナ-ODU装置の遠景



(c) IDU装置・記録用パソコン等(室内)



(d) 雨量計(右側)・降雨強度計(左側)

図4-5-3 電気通信大学(端末局)試験装置の設置状況

4-5-1-2 回線設計

φ0.6mパラボラアンテナを使用した場合の、試験区間8.7kmおよび目標伝送距離10kmにおける回線設計値を表4-5-2に示す。不稼働率と降雨マージンの関係を図4-5-4に示す。

伝送距離10kmの回線設計による不稼働率は0.007%(BPSK)であり、目標0.01%を満足できる設計である。この条件に相当する伝送距離8.7kmの不稼働率は、0.004%(BPSK)となる。

表4-5-2 屋外評価試験の回線設計値

伝送距離 (km)	8.7				10			
	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
変調方式	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
送信出力 (dBm)	20	20	18	17	20	20	18	17
受信電力 (dBm)	-40.6	-40.6	-42.6	-43.6	-41.8	-41.8	-43.8	-44.8
受信雑音電力 (dBm)	-92.6				-92.6			
算出C/N (dB)	52	52	50	49	50.8	50.8	48.8	47.8
所要C/N (dB)	10.3	13.3	20	28.8	10.3	13.3	20	28.8
降雨マージン (dB)	41.7	38.7	30.0	20.2	40.5	37.5	28.8	19
不稼働率 (%)	0.004	0.006	0.01	0.03	0.007	0.009	0.02	0.04

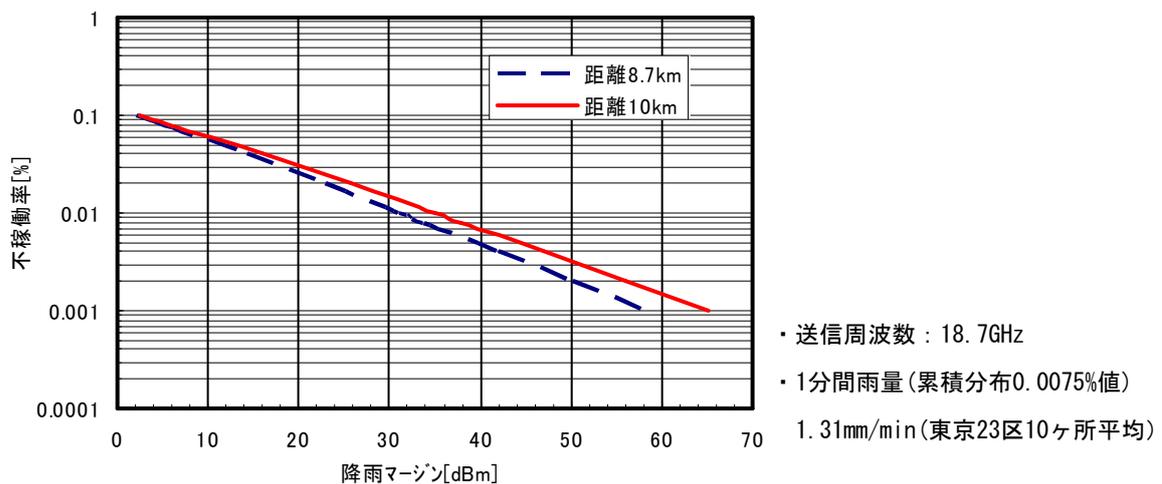


図4-5-4 不稼働率に対する所要降雨マージン

4-5-1-3 測定項目及び測定系

屋外における適応変調方式の変調切替動作、ビット誤り率(BER)、QoS制御動作、画像伝送アプリケーションについて評価を行った。屋外評価試験の測定系を図4-5-5に示す。

適応変調動作の評価は、基地局及び端末局からPNデータを送信し、両局で受信電力、変調方式を無線装置から読取り、10秒間隔でパソコン③、④に記録した。ビット誤り率は基地局のみで測定し、誤りビット数を10秒間隔でパソコン③に記録した。

QoS制御動作の評価は、スループット測定により行った。測定用ソフトツール(Chariot)を両局のネットワーク測定用パソコン①、②にセットしておき、基地局から測定用データを送信し、端末局で返送して基地局でそのデータを受信し、スループット測定結果を基地局側のパソコン①に10秒間隔で記録した。受信電力、変調方式のデータについては、適応変調動作評価と同様に無線装置から読取り10秒間隔でパソコン③、④に記録した。

また、両局の雨量と降雨強度を、降雨データ記録専用パソコン⑤、⑥に1分間隔で記録した。

記録用パソコンについては、GPS時計ツールを用いて時刻合せを行った。

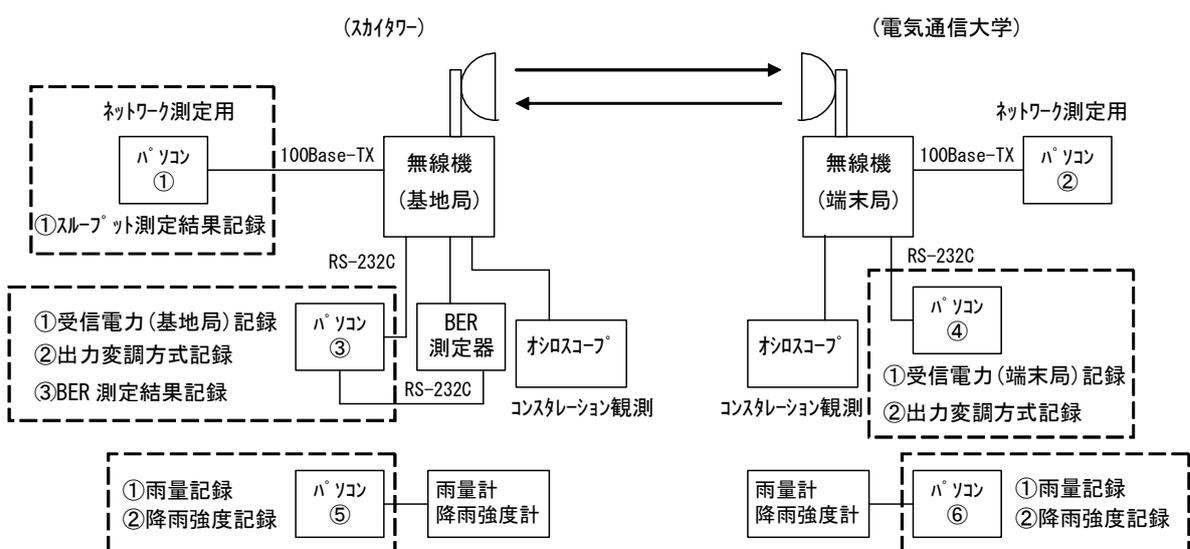


図4-5-5 屋外評価試験の測定系

4-5-2 測定結果

4-5-2-1 適応変調動作の評価

(1) 晴天時の変調切替状況

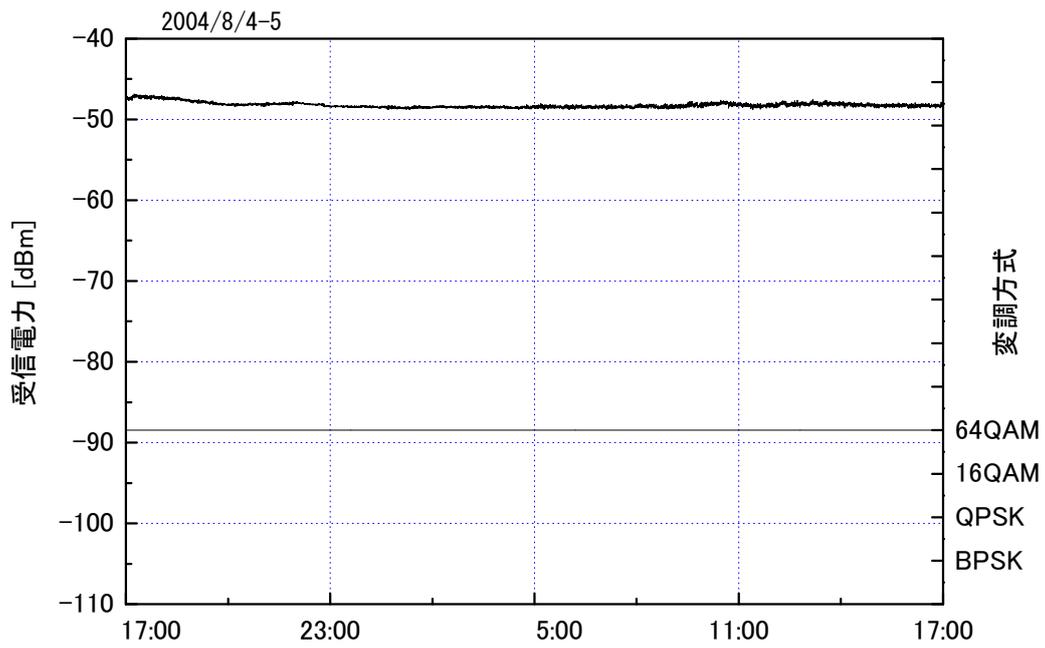
晴天時のデータ例として、期間8/4(17:00)～8/5(17:00)の測定データを図4-5-6に示す。受信電力は安定しており、変調方式は64QAMのまま切替は発生していないことを確認した。

(2) 激しい降雨時の変調切替状況

適応変調が機能したデータ例として、台風22号の到来時の、期間10/9(15:00)～10/9(19:00)の測定データを図4-5-7に示す。

降雨による受信電力の低下によりBPSKまで変調方式が切替っている。BPSK変調期間において、10/9(15:38:00～15:38:30)、10/9(15:51:50～15:53:10)、10/9(17:22:30～17:28:30)の3回、受信電力が規定回線品質(-83dBm以上)を満足しない期間が発生している。

各変調方式は、受信電力閾値の設計値で切替っており、変調切替が正常に行われていることを確認した。

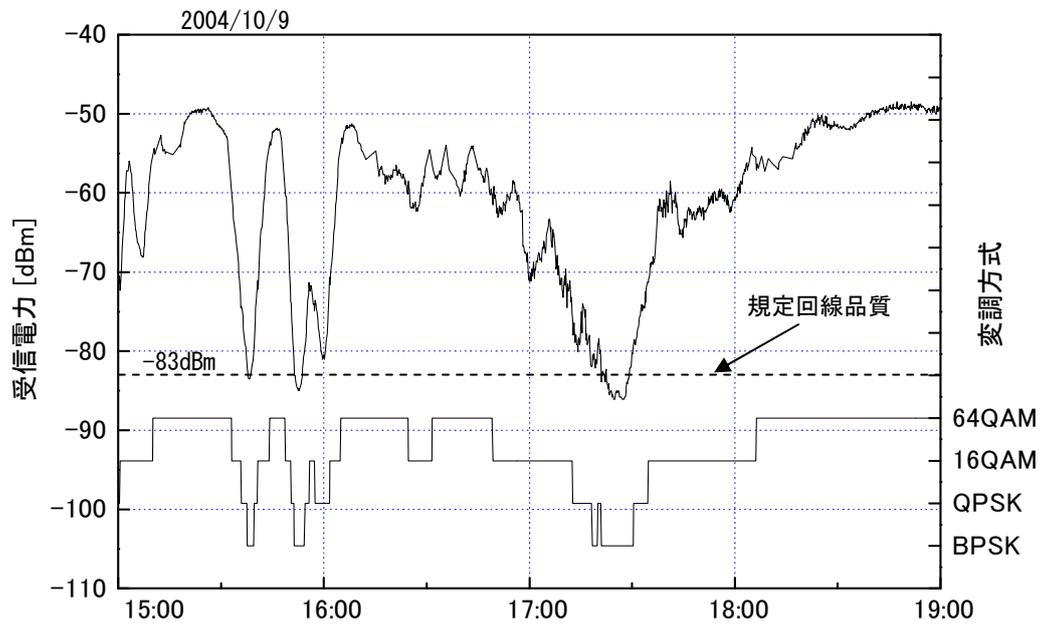


(a) 変調方式・受信電力

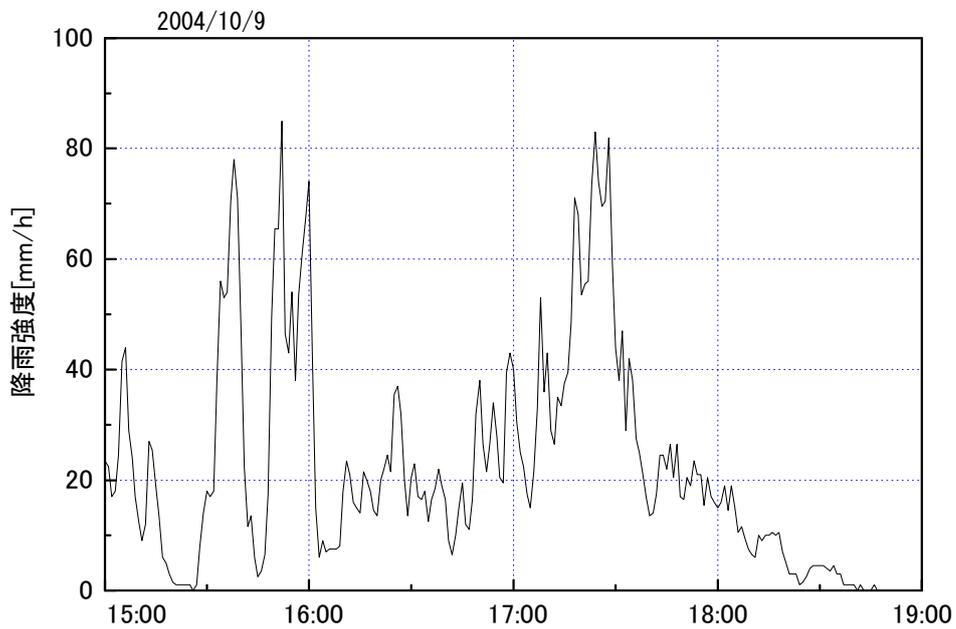


(b) 降雨強度

図 4-5-6 晴天時の変調切替状況の測定データ(基地局)



(a) 変調方式・受信電力



(b) 降雨強度

図 4-5-7 激しい降雨時の変調切替状況の測定データ(基地局)

4-5-2-2 QoS 制御動作の評価

各々の伝送速度が33Mbit/sのクラスA、クラスB、クラスCのパケットを混在させて送信し、各クラスのスループットを測定した。各変調方式の伝送速度に対応した各クラスの保証帯域は、表4-3-1に示す通りとした。

(1) 晴天時の切替状況

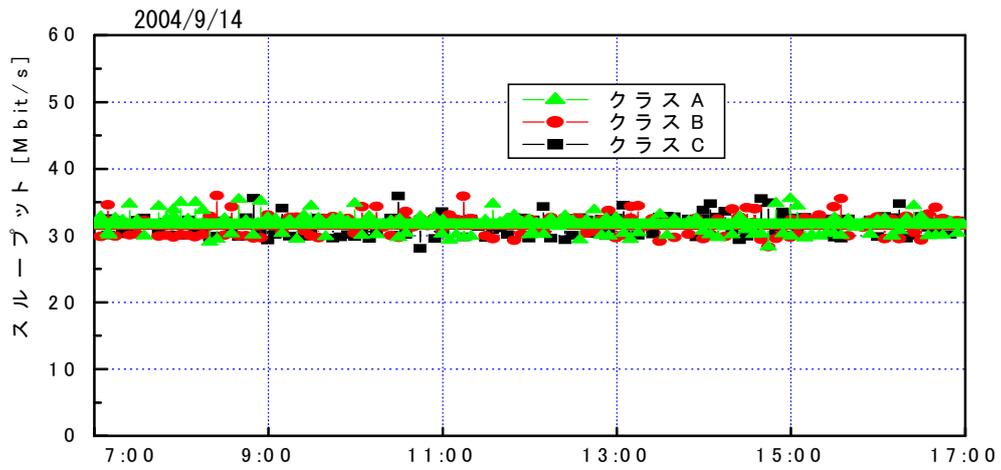
晴天時のスループット測定結果として、期間9/14(7:00)～9/14(17:00)の測定データを図4-5-8に示す。受信電力は安定しており、変調方式は64QAMのまま切替は発生していない。スループットは、各クラスとも、設定した伝送速度33Mbit/sのスループットとなっていることを確認した。

(2) 激しい降雨時の切替状況

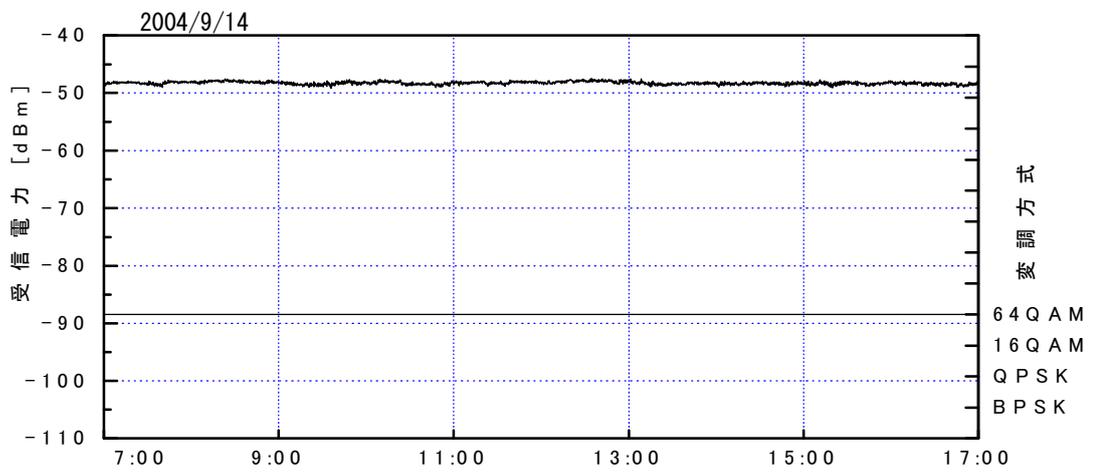
台風23号到来時の期間10/20(14:00)～10/21(0:00)において、QPSKまで切替った場合のスループット測定結果を図4-5-9に、期間10/20(17:30～19:00)のスループットと変調方式の時間拡大図を図4-5-10に示す。

16QAM時のスループットは、16QAMの伝送速度に対応した各クラスの保証帯域、クラスA：6Mbit/s、クラスB：12Mbit/s、クラスC：30Mbit/sの値になっている。QPSK時は、クラスA：6Mbit/s、クラスB：8Mbit/s、クラスC：10Mbit/sの値になっている。ただし、パケット伝送を行うために制御情報を挿入しており、スループットは保証帯域よりも若干低い測定結果となっている。

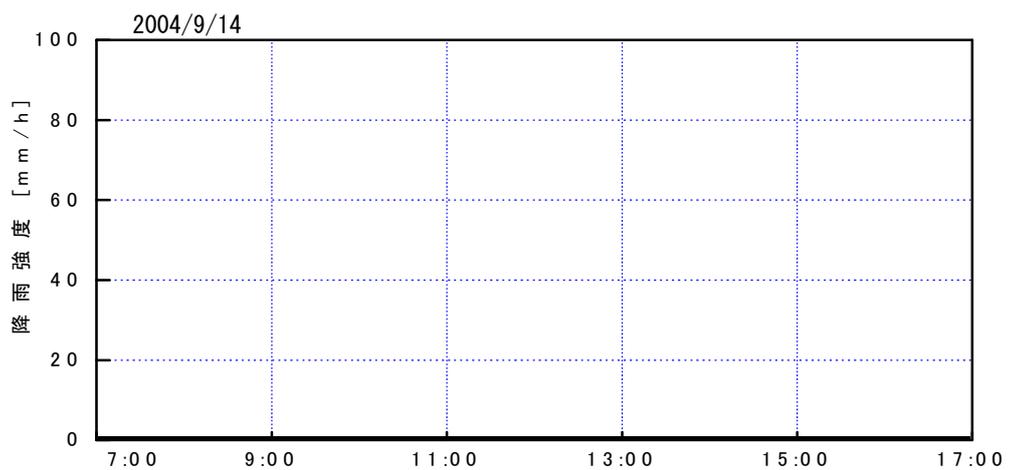
BPSKのスループットは測定できなかったが、室内評価の評価結果では、全ての変調切替に対応した保証帯域切替が正しく制御できている。



(a) スループット

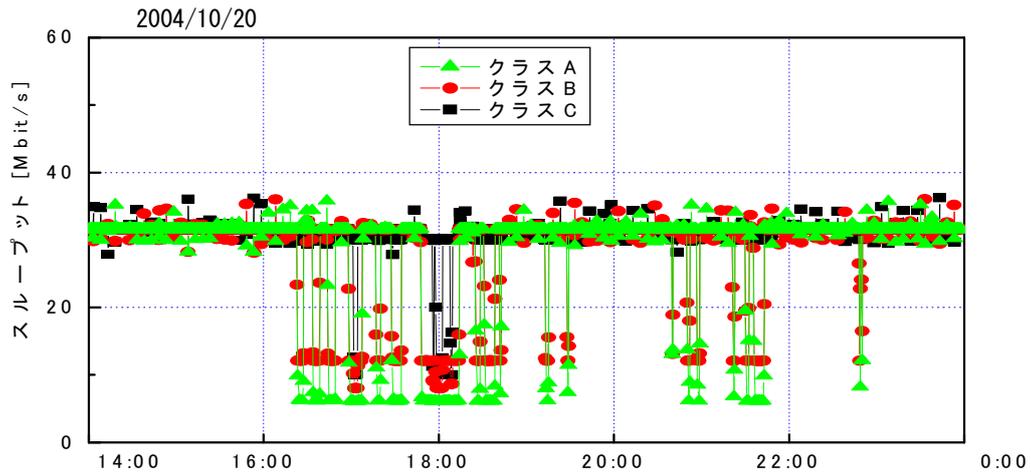


(b) 受信電力、変調方式

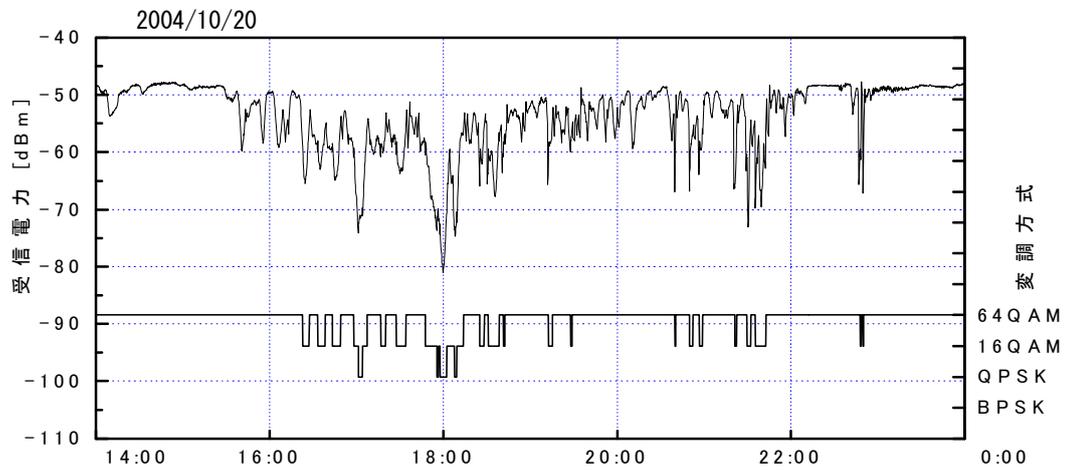


(c) 降雨強度

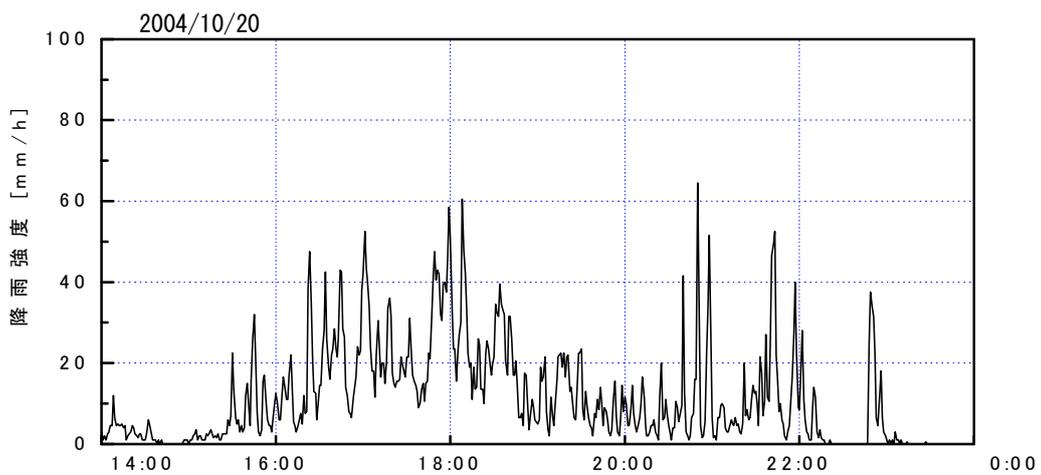
図 4-5-8 晴天時のスループット測定結果(基地局)



(a) スループット



(b) 受信電力、変調方式



(c) 降雨強度

図4-5-9 激しい降雨時のスループット測定結果(基地局)

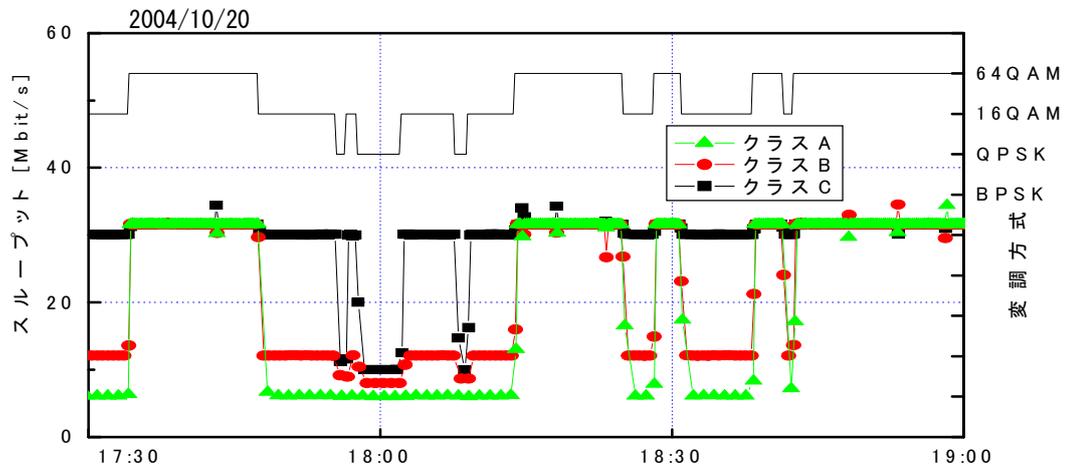


図 4-5-10 激しい降雨時のスループット及び変調方式(時間拡大図)
(基地局)

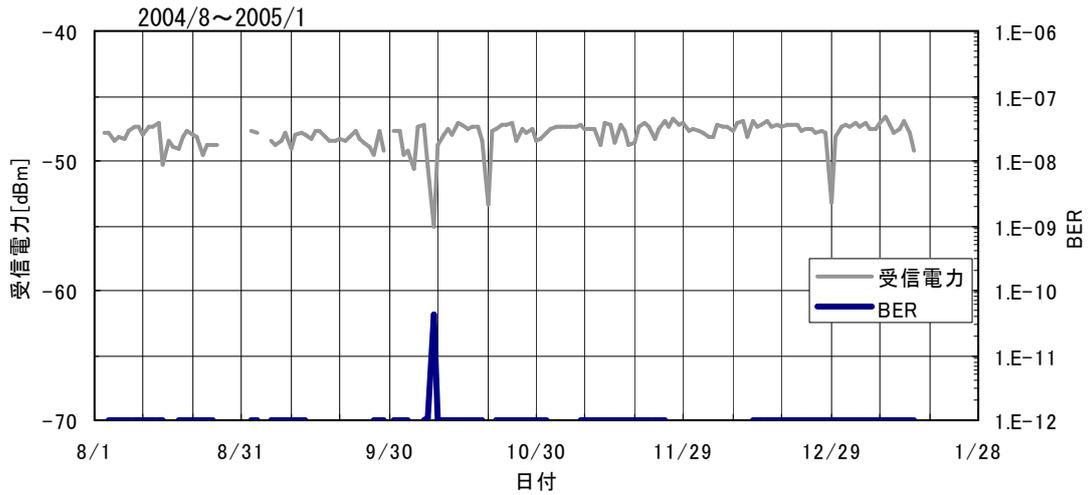
4-5-2-3 評価期間の測定状況

(1) 評価期間全期間の測定データ

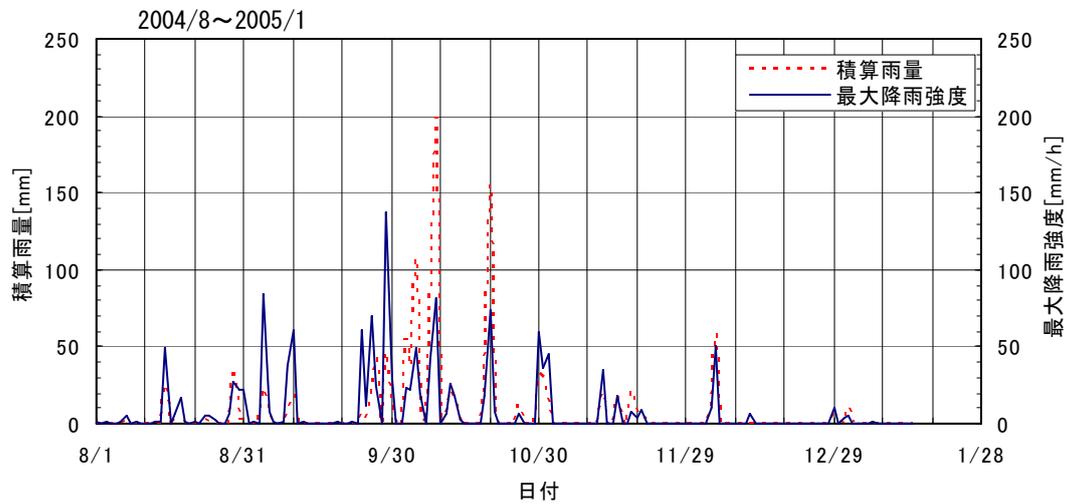
評価期間全期間の測定データを図 4-5-11 に示す。受信電力とビット誤り率は測定したデータの1日の平均値、降雨データは1日の積算雨量と最大降雨強度である。気温と風力は気象庁(府中)のデータによる1日の平均値である。ビット誤り率とスループット測定を交互に行ったため、ビット誤り率測定値の無い期間がある。

晴天時には、受信電力は $-47 \pm 1 \text{ dBm}$ で安定しており、ビット誤り率は $\text{BER} = 1 \times 10^{-12}$ 以下であった。10月9日のビット誤り率上昇は台風22号の降雨によるものである。12月29日に受信電力が低下しているが、この日は朝から降雪があり、アンテナへの着雪の影響により発生したものと考えられる。

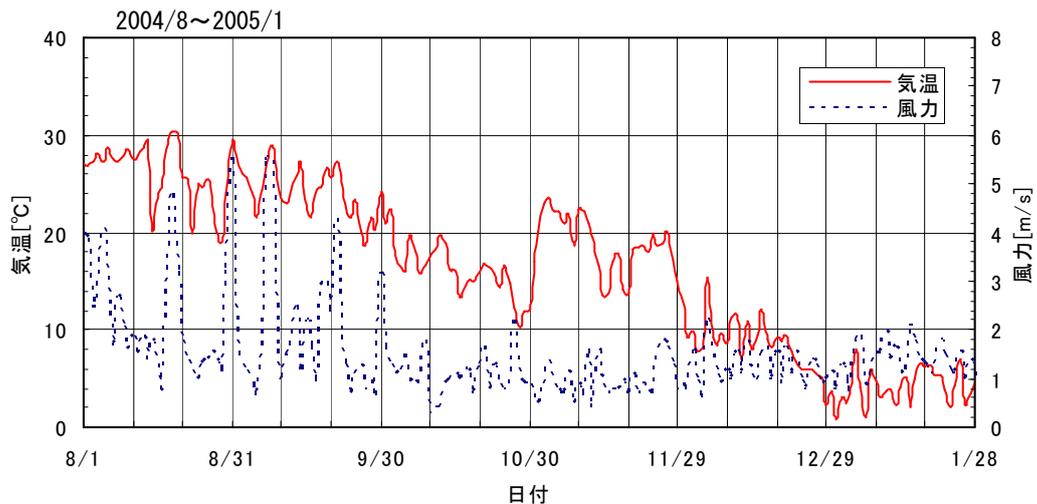
8月から1月に向かい徐々に気温が低下しているがその影響も無く、風力の変動による変化も観測されていない。約6ヶ月の屋外評価期間において、送受信性能の環境変化による変化は無く安定していることを確認した。



(a) 受信電力とビット誤り率(1日の平均値)



(b) 積算雨量・最大降雨強度(1日毎)



(c) 気温・風力(1日の平均値:気象庁データ(府中))

図4-5-1 1 屋外評価試験全期間の測定データ(基地局)

(2) 不稼働率の評価

屋外評価試験の全期間における、不稼働時間、各変調方式の選択された時間を表4-5-3に示す。不稼働時間は、受信電力の規定回線品質(-83dBm以上)を満足しない時間とした。

評価試験全期間における不稼働率は、0.004%となった。

表4-5-3 回線不稼働時間及び変調方式の選択時間
測定時間：11917210秒（137日22時間20分10秒）

	不稼働時間	選択時間			
		BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
時間 (秒)	470	1020	14050	197860	11704280
発生率 (%)	0.004	0.009	0.118	1.660	98.213

*不稼働時間はBPSK選択時間に含まれる。

評価試験全期間の積算雨量を算出すると1215mm(6ヶ月)となる。この値から文献[3]の最小自乗法実験式により、1分雨量(累積分布0.0075%値)を求めると3.04mm/minとなる。回線設計は、東京23区10ヶ所の1分雨量平均値である1.31mm/minを基準としており、今回の評価試験は2倍以上の降雨条件で行ったことになる。

以上より、伝送距離10kmにおいても、不稼働率0.01%以下の回線品質であると推定する。

4-5-2-4 画像伝送試験

実際のアプリケーションの伝送確認のため、画像伝送を行った。

(1) 機器構成

画像伝送試験は、図4-5-12に示す構成で実施した。

カメラで動画像を撮影し、エンコーダで画像圧縮を行い、基地局(スカイタワー)より伝送する。端末局(電気通信大学)では受信したデータを、大学内構内LAN(プライベートネットワーク)を介して伝送し、研究室のパソコン上で動画像を再生する。

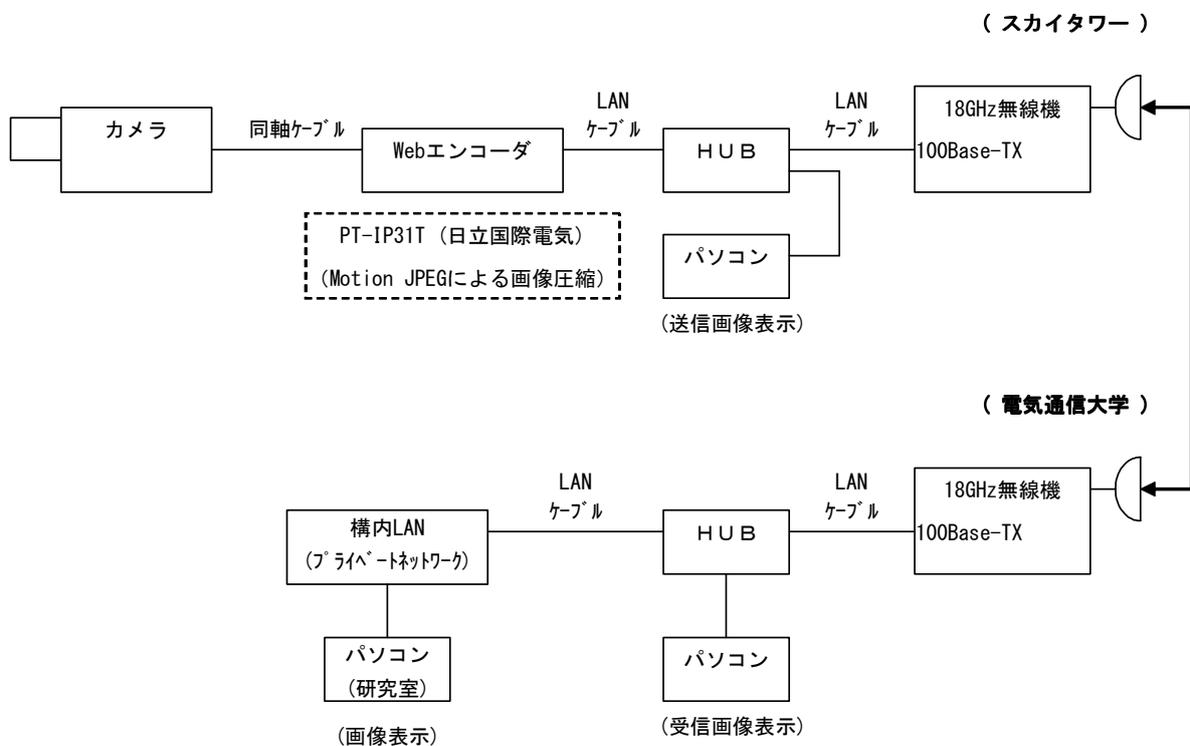


図4-5-12 画像伝送試験の機器構成

(2) 機器の設置状況

基地局側(スカイタワー)及び、端末局側(電気通信大学)における、機器の設置状況、受信画像のパソコン表示を、図4-5-13、図4-5-14に示す。



(a) 送信画像パソコン表示・エンコーダ



(b) 屋外設置カメラ

図4-5-13 送信局側(スカイタワー)の機器設置状況



(a) 受信画像パソコン表示
(無線機に接続したパソコン)



(b) 受信画像パソコン表示
(構内LANに接続したパソコン)

図4-5-14 端末局側(電気通信大学)の機器設置状況

(3) 伝送状況

1週間連続で画像の伝送を行い、構内LANに接続したパソコンにおいて、受信画像に異常無いことを確認した。

取得した受信画像サンプルを、図4-5-15に示す。



(a)受信画像例 (05.01.21)

(b)受信画像例 (05.01.20)

図4-5-15 端末局側(電気通信大学)受信画像例

4-5-3 屋外評価試験に関する総括

試験装置の屋外評価試験により各機能動作の検証を行い、適応変調動作及びQoS制御動作について、目標とした性能が得られていることを確認した。

4-6 総括

準ミリ波18GHz帯において、100Mbit/sの高速伝送を10kmの長距離で可能とする広帯域無線アクセス装置を開発した。室内評価試験及び屋外評価試験により、適応変調方式を採用した変復調部、無線区間の高速伝送に対応したQoS制御を行う無線制御部、低歪み高出力の高周波部について、各部の動作検証、特性評価を行い、所望の性能を確認した。

5. 参考資料、参考文献

5-1 参考文献

- [1] 情報通信審議会答申：“準ミリ波帯公共業務用無線アクセスシステムの技術的條件”、諮問2010号、2003.3
- [2] (社)電波産業会：“加入者系無線アクセスシステム研究開発報告書”(ARIB STD-T58、ARIB STD-T59)、平成11年6月
- [3] 森田、桶口：“準ミリ波帯隣接区間の降雨減衰差の推定”、通研実報、25、No.1、1976
- [4] 大槻、三瓶他：“変調多値数可変適応変調方式の伝送特性”、信学論、Vol. J78-B-II、No.6、1996.6
- [5] 三瓶、森永他：“パンクチャド符号を用いた符号化率可変適応変調方式”、信学技報、RCS95-110、1995.11
- [6] 戸田：“詳解ネットワークQoS技術”、オーム社、2002.5
- [7] 若井他：“無線アクセスシステムにおけるQoS制御方式に関する検討”、信学会ソサイエティ大会予稿集、B-5-153、2003.9
- [8] 財団法人テレコムエンジニアリングセンター：“18GHz帯公共業務用無線アクセスシステムの無線設備の特性試験方法”、2004.1.26

5-2 研究発表、講演等一覧

(1) 学会発表

学会： 1件（査読無し）

電子情報通信学会 2004年ソサイエティ大会

B-5-154 「18GHzFWA 試作機における適応変調制御方式の評価」

講演会： 1件

(財)テレコム先端技術支援センター、平成16年度交流懇談会

「次世代固定無線アクセスシステム」

(2) 論文発表

技術機関誌： 1件（査読無し）

日立国際電気技報

「準ミリ波帯広帯域固定系無線アクセスシステムの開発」