

Title	サービス品質特性を考慮した無線ATMエントランスネットワーク構成に関する研究
Author(s)	西, 正博
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155444
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

サービス品質特性を考慮した
無線ATMエントランスネットワーク構成
に関する研究

1999年1月

西 正 博

謝辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科教授小牧省三博士の御指導のもとに、筆者が大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻在学中に行った研究成果をまとめたものである。本研究の遂行にあたり、小牧省三教授から賜った御懇篤なる御教示、御鞭撻に対し、ここに深甚なる感謝の意を表する次第である。

本論文をまとめるにあたり、筆者は大阪大学産業科学研究所教授元田浩博士、大阪大学大学院工学研究科助教授山本幹博士に有益な御教示、御助言を賜った。ここに深く感謝する。

筆者の大学院在学中、講義等を通じて通信工学全般にわたり多くの御指導を賜った大阪大学工学部名誉教授倉藺貞夫博士、大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻教授森永規彦博士、同教授前田肇博士、同教授池田博昌博士、同教授児玉裕治博士、同教授塩澤俊之博士をはじめとする同通信工学専攻の諸先生方、ならびに高知工科大学教授長谷川晃博士に厚く感謝申し上げます。

また、筆者は本研究を遂行するにあたり、大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻助教授三瓶政一博士、同工学研究科電子情報エネルギー工学専攻助教授原晋介博士、同工学研究科情報システム工学専攻講師戸出英樹博士に御助言、御激励を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

さらに、本研究を遂行するにあたり、貴重な御助言、御協力を頂いた大内幹博氏(現在松下電器産業株式会社)をはじめとする大阪大学工学部通信工学科卒業生、ならびに日頃から熱心な御討論、御助言を頂いた朴相兆氏、莊司洋三氏、和田友孝氏をはじめとする大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻小牧研究室の諸兄に感謝申し上げます。

また、折にふれて熱心な御討論と有益な御助言、御協力を頂いた大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻助手岡田実博士に厚く御礼申し上げます。

最後に、常に熱心な御検討と懇切丁寧な御助言、御好意溢れる御支援を賜った大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻助教授塚本勝俊博士に厚く感謝の意を表する次第である。

内容梗概

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻在学中に行ったサービス品質特性を考慮した無線 ATM エントランスネットワーク構成に関する研究成果をまとめたものであり、以下の 6 章により構成されている。

第 1 章は序論であり、本論文における関連分野について述べ、本研究の背景と目的を明らかにする。

第 2 章では、まず無線 ATM 実現への要求条件を述べ、次に無線 ATM 伝送の実現方法を分類し、それぞれのプロトコルアーキテクチャについて詳述する。次に、無線伝送を用いた ATM エントランスネットワークの必要性について論じると共に、多値数を変化させることによって伝送路容量を変化できる多値数可変無線伝送方式が、ATM エントランスネットワークの高品質化に必要な無線通信技術であることを述べる。

第 3 章では、無線エントランスリンクを空間分割多重したスター型無線 ATM エントランスネットワークにおける最適なゾーン構成について論じる。まず、セル廃棄率やセル転送遅延といった多次元の品質特性によって規定されるサービス品質 (QoS: Quality of Service) を一元的に評価するため、QoS 指数と呼ぶ評価関数を新たに定義する。そして、QoS 指数に関する理論解析により、サービスが要求する QoS とゾーン構成の関係について検討し、要求 QoS を満足できるゾーン構成を明らかにすると共に、最もトラフィック量を収容することができる最適ゾーン構成について考察を行う。さらに、多値数可変無線伝送方式を適用した場合の収容トラフィック量の改善効果について理論的に明らかにする。

第 4 章では、無線 ATM エントランスリンク間の相互干渉を削減することを目的として、電力多値数可変無線 (PMLCR: Power and Modulation Level Controlled Radio) 伝送方式を提案する。まず、PMLCR 伝送方式の原理と送信電力制御及び伝送路容量制御方法について述べ、次に従来の電力制御をしない多値数可変無線伝送方式と比較して、提案方式が平均送信電力を削減でき、干渉電力影響下でセル廃棄率特性を改善することを理論解析により明らかにする。

第 5 章では、既存の低速有線伝送路とその容量不足を補うために無線伝送路を併用し、敷設に時間のかかる光ファイバを用いずに迅速にサービスの開始を可能とする有線無線併用

ATM エントランスネットワーク構成を提案する。本システムの各バーチャルパス容量をトラヒック量に応じて最適に配分するために、バーチャルパス容量可変無線 (AMLCR-VPC: Advanced Modulation Level Controlled Radio - Virtual Path Capacity Control) 伝送方式を適用したバーチャルパス容量制御方式を新たに適用する。呼損率とトラヒック予測誤差許容度について理論的に解析し、AMLCR-VPC 方式による改善効果を明らかにする。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果を総括する。

目次

第1章 序論	1
第2章 無線 ATM 方式実現への要求条件	7
2.1 序言	7
2.2 無線 ATM の要求条件	7
2.3 無線 ATM 実現方法の分類	11
2.4 無線 ATM エントランスネットワーク	13
2.4.1 無線 ATM エントランスネットワークの必要性	13
2.4.2 多値数可変無線伝送方式	15
2.5 結言	17
第3章 スター型無線 ATM エントランスネットワークの最適ゾーン構成	19
3.1 序言	19
3.2 スター型無線 ATM エントランスネットワークにおける QoS	20
3.2.1 ネットワーク構成	20
3.2.2 QoS 指数	21
3.2.3 多値数可変無線伝送方式の適用	23
3.3 理論解析	24
3.3.1 ネットワークモデル	24
3.3.2 セル転送遅延とセル廃棄率の理論解析	27
3.4 最適ゾーン構成の検討	30
3.5 結言	37
第4章 QoS と干渉電力を考慮した電力多値数可変無線伝送方式	39
4.1 序言	39
4.2 無線 ATM エントランスネットワークの構成	40
4.3 電力多値数可変無線伝送方式の原理	41

4.4	セル廃棄率の理論解析	44
4.5	干渉電力削減効果	48
4.6	結言	51
第5章	有線無線併用 ATM エントランスネットワーク	53
5.1	序言	53
5.2	有無併用 ATM エントランスネットワークの構成	54
5.3	有無併用網におけるバーチャルパス容量可変無線伝送方式	57
5.3.1	動作原理	57
5.3.2	バーチャルパス容量制御アルゴリズム	59
5.4	バーチャルパス容量可変無線伝送方式の改善効果	63
5.4.1	ネットワークモデル	63
5.4.2	収容バーチャルチャネルの最適比率	65
5.4.3	トラヒック予測誤差許容度の改善効果	68
5.5	結言	72
第6章	結論	73
	参考文献	75
	本論文に関する原著論文	81

目次

2.1	無線 ATM の要求条件	9
2.2	無線 ATM 伝送プロトコル	10
2.3	無線 ATM 実現方法のプロトコル構成	12
2.4	無線 ATM を実現するネットワーク	13
2.5	無線 ATM エントランスネットワーク	15
2.6	多値数可変無線伝送方式の概念図	16
3.1	無線 ATM エントランスリンクとプロトコルアーキテクチャ	20
3.2	QoS 指数変換関数	22
3.3	ユーザ端末の構成	23
3.4	ネットワークの解析モデル	25
3.5	開口方形アンテナ指向性特性	26
3.6	セル伝送遅延解析モデル	27
3.7	セル廃棄率解析モデル	28
3.8	基地局数に対するセル転送遅延とセル廃棄率特性	32
3.9	基地局数に対する QoS 指数の特性	33
3.10	基地局数に対する許容可能セル転送遅延特性	33
3.11	トラヒック量に対する QoS 指数	34
3.12	基地局数に対する収容可能トラヒック量の比較	35
3.13	要求 QoS が異なる場合の基地局数に対する収容可能トラヒック量	36
3.14	異なる QoS を要求するサービス混在時の基地局数に対する収容可能トラヒック量	37
4.1	無線 ATM エントランスネットワークの概念	40
4.2	電力多値数可変無線伝送方式 (PMLCR) の原理	42
4.3	PMLCR 方式の信号点配置	43
4.4	送信機のバッファモデル	44

4.5	エントランスリンク間の干渉モデル	46
4.6	正規化された ATM セル入力レートに対するセル廃棄率	49
4.7	正規化された ATM セル入力レートに対する受信電力	50
4.8	干渉電力比に対する平均搬送波対雑音干渉電力比	51
4.9	干渉電力比に対する平均セル廃棄率	52
5.1	有無併用 ATM エントランスネットワーク構成の一例	54
5.2	有無併用 AMLCR-VPC 方式の衛星通信網への適用	55
5.3	有無併用エントランスネットワークのプロトコル構成	56
5.4	有無併用エントランスネットワークにおける AMLCR-VPC 方式の動作原理	57
5.5	有線無線併用網における AMLCR-VPC 制御アルゴリズム	61
5.6	解析に用いたネットワークモデルとトラヒックモデル	63
5.7	収容 VC 比率に対する呼損率特性	65
5.8	トラヒック量の増加に対する呼損率特性	66
5.9	使用無線帯域幅に対する周波数利用効率	67
5.10	設計時からのトラヒック量の増加に対する呼損率特性	68
5.11	設計時からのユーザの移動に対する呼損率特性	69
5.12	収容可能トラヒック量と設計時予測トラヒック量の関係	70
5.13	設計時予測トラヒック量の許容度と無線伝送路比率の関係	71

表 目 次

2.1	マルチメディア通信サービスの要求 QoS	10
3.1	QoS 指数の理論解析に用いた諸定数	31
4.1	セル廃棄率の理論解析に用いた諸定数	48
5.1	呼損率の理論解析に用いた諸定数	64

第1章

序論

近年、音声、データ、画像通信等の様々な通信速度や品質を要求するマルチメディア通信を効率良く収容できる広帯域 ISDN (B-ISDN: Broadband - Integrated Services Digital Network) の実現に向けて、ATM (Asynchronous Transfer Mode) の研究開発が進められ、ITU-T (International Telecommunication Union -Telecommunication) や ATM Forum で標準化が行われている [1]-[3].

一方、次世代移動体公衆通信網では、IMT-2000 (International Mobile Telecommunication - 2000) の標準化が進められており [4]-[7], マルチメディア通信を実現できる最大 2Mbps の伝送速度が技術的に可能となる。更に、将来の移動体通信環境では、マルチメディア通信に対する需要の増加や多様化に伴って、一層の高速伝送の要求が高まる。そこで現在、移動端末を用いた ATM 高速マルチメディア通信の実現と有線 ATM ネットワークとの高い接続性を目的とした無線 ATM の標準化が ATM Forum 及び ITU-R (ITU-Radio) で進められており [8]-[12], 日本では電波産業会 (ARIB: Association of Radio Industries and Businesses) における MMAC (Multimedia Mobile Access Communication) [13], 米国では WATMnet (Wireless ATM network) [14][15], ヨーロッパでは Magic WAND [16], MEDIAN [17] 等に見られるように、世界各地で無線 ATM 伝送を用いた高速無線アクセス網構築のプロジェクトが始まっている。

現在の無線 ATM の研究は、伝送系と移動系の二つの研究分野に分類できる。伝送系では、有線伝送路に比べて伝送品質が劣り帯域の制限が厳しい無線伝送路において、誤り耐性と帯域有効利用を両立する ATM 伝送に関して、変復調、アクセス方式等の伝送方式及び伝送プロトコルの両面から検討が行われている [18]-[20]. 一方、移動系では、有線 ATM ネットワーク内でのバーチャルチャネル (VC: Virtual Channel) の切り替えによる端末の基地局間ハンドオフの実現方式に関する検討が行われている [21]-[24].

これらの検討は、基地局と基幹 ATM 網を接続するエントランスリンクを高速/高品質の光ファイバを用いて構築したネットワーク構成を前提としているものが殆どである。伝送系

では、基地局-端末間のアクセスリンクにおいて、無線 ATM 伝送品質の向上が主な目的となっており、高品質有線 ATM 伝送との整合性を高めるために、標準 ATM 伝送プロトコルの ATM レイヤの下に、DLC(Data Link Control), MAC(Medium Access Control), 無線物理レイヤで構成される無線 ATM 伝送プロトコルを新たに設けている [8]. DLC レイヤでは、エラーフリーの実現を目的として、誤り訂正符号技術 [25] 及び再送制御 [26] の検討が行われている。また MAC レイヤでは、高い周波数利用効率を実現するチャンネル割当制御、無線物理レイヤでは、マルチパス遅延分散を軽減する等価器技術 [27] や OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex) 変調方式 [28] 等のアクセス無線 ATM 伝送を実現する技術が中心に検討されている。また移動系では、VC 切替え時間短縮を目的としたハンドオフ制御の検討が行われており、端末の移動エリア内に予め複数の VC を用意しておく方式 [21], VC の途中から切替えて新たな VC を再設定する方式 [22] 及び端末の移動に合わせて VC を拡張して設定する方式 [23] が考えられているが、それらの殆んどは、伝送路誤り及び伝送路容量不足の生じない光ファイバを用いてエントランスリンクを構築した場合のみの検討に限定されている。

無線アクセスリンクとエントランスリンクで構成される、移動端末から基幹 ATM 網までのネットワークを、本論文ではエントランスネットワークと定義するが、エントランスリンク上を ATM セルが伝送する ATM エントランスネットワークを構築していく場合、以下の問題が生じてくることが考えられる。サービスエリア内で、数 Mbps から数十 Mbps の高速無線マルチメディア伝送を実現するため、

- 無線 ATM アクセスリンクでは、マイクロ波帯やミリ波帯といった高い周波数帯の使用が前提となってくるが [10], その高周波信号波は伝搬減衰が大きいので、一つの基地局がカバーするゾーンは小さくなる傾向にある。
- 逼迫してくる周波数を有効に利用するために、使用する周波数をゾーンに繰り返し割り当て、ゾーンを小さくして周波数利用効率を向上させる必要がある。
- 建物の密集している都市部では、高周波数帯無線電波の届かない不感地帯が多くなり、その不感地帯の解消を図るために、多くの基地局を設立していかなければならない。

すなわち、多数の基地局と基幹 ATM 網間のエントランスリンクを効率良く設計することが重要となる。しかしながら、従来検討されているようなエントランスリンクに光ファイバを用いた構成では、ネットワーク構築に膨大な時間とコストを要することが予想される。また基地局増加の要求に関わらず、掘削規制等で敷設の不可能または困難な場所が頻出し、光ファイバ敷設効率は一層低くなると考えられる。

一方、最大 156Mbps もの伝送速度を実現するアクセス系の無線通信網として、現在事業化が進められている WLL (Wireless Local Loop) システムでは、無線伝送路を用いて高速エントランスリンクを構築することが検討されており、

- 有線伝送路敷設に比べて低コストで設定できる。
- 迅速なネットワーク構築が可能となり、早期サービス開始が可能となる。
- ネットワークの変更、更新が容易となる。

といった利点が報告されている [29][30]。また、既存の同軸ケーブルやより対線を用いた xDSL(x Digital Subscriber Line) 方式では、通常の電話の使用周波数帯より高い周波数帯を用いることにより、加入者系の比較的短い伝送距離で、下り伝送速度で最大 52Mbps が実現可能であり [31]、光ファイバを用いずに高速 ATM 伝送が可能となる [32]。

そこで本論文では、エントランスリンクに光ファイバを用いずに、新たな掘削の不必要な無線伝送路もしくは xDSL を用いた既存の有線伝送路を併用して、迅速に効率良く ATM エントランスネットワークを構築することが可能な無線 ATM 伝送方式を考察し、新しいアーキテクチャを提案することを目的とする。エントランスリンクに無線伝送路を用いることにより、地理的な理由等で有線伝送路を敷設しにくい場所にも簡単に ATM エントランスネットワークを構築でき、また災害などに対する耐性を高めることが可能となる。

ところで、ATM 網では音声やデータといった様々なメディアを収容するため、各サービスが要求する多種多様な通信品質 (QoS: Quality of Service) が混在し、各サービスに対して、セル廃棄率、セル転送遅延、セル遅延変動等の ATM セルの品質が規定されている [10]。例えば、音声サービスは、セル廃棄率に寛容であるが、セル転送遅延やセル遅延変動に対して厳格であり、データ通信は、セル転送遅延には寛容であるが、セル廃棄には厳格である。つまり ATM 網では、ATM セルによってサービスの要求する QoS の制御が行われる。無線 ATM 伝送においても、QoS を考慮した効率の良い伝送が必要となり、無線 ATM 伝送プロトコルの DLC レイヤや MAC レイヤで ATM セルの QoS 制御が検討されている。例えば、DLC レイヤでは、要求される QoS を考慮して再送要求に優先度を設けた高機能 ARQ(Automatic Repeat reQuest) を用いた再送制御 [33][34] の検討やセル廃棄率要求に応じて誤り訂正能力を変化させる可変長誤り訂正符号化技術 [35] が検討されている。また MAC レイヤでは、異なる QoS を要求する複数サービス混在時に、接続要求に応じてチャンネルを割り当てることにより、各要求 QoS を満足させるアクセス方式の検討が行われている [36][37]。

本論文で着目する ATM エントランスネットワークにおいても、各サービスの要求 QoS を考慮し、ATM トラヒックを効率良く収容できるネットワークの構成法について検討する必

要がある。特に、無線伝送路を用いた ATM エントランスネットワークでは、超広帯域を有する光ファイバを用いた有線 ATM 網とは異なり、無線物理レイヤで規定される使用無線周波数帯域幅や送信電力といったリソースが有限である。そのため、有限なリソースを有効に利用し、少ないリソースで高品質なエントランスネットワークを実現することが望まれる。

現在のところ、無線物理レイヤにおいては、伝送路品質の改善が主な課題とされており、QoS を考慮した制御は殆んどされていないのが現状である。しかしながら、例えば高速伝送の要求が高く、誤り品質の要求が低いサービスを収容する場合、電力をあまり供給せず、帯域は確保するようにネットワークを構成し、無線物理レイヤで要求 QoS を最小限満足させるようにリソースを割り当てる QoS 制御を行えば、無線周波数の限られたリソースの有効利用が可能となる。また無線物理レイヤの QoS 制御により、上位レイヤの DLC 及び MAC レイヤでの QoS 制御の負担を軽減することもできる。このことより、効率良くエントランスネットワークを構築するためには、従来検討されている DLC, MAC レイヤでの QoS 制御同様、無線物理レイヤにおける QoS 制御、すなわち、各要求 QoS に対して、必要なリソースを過不足なく効率的に割り当てることのできるネットワーク構成、基地局のカバーするゾーンの数、及び変復調方式についての検討が必要である。

以上の背景に基づき、本論文では、基地局と基幹 ATM 網を無線伝送路を用いて接続した無線 ATM エントランスネットワークを提案し、サービスの要求 QoS を満足しつつ、限られたリソースを有効に利用するネットワーク構成について検討していく。

まず、第2章でネットワーク構成に必要なとなるプロトコルについて検討し、様々な無線通信環境に対して適するプロトコルを明確にする。そして、無線 ATM エントランスネットワークの必要性について論じると共に、変調多値数を変化させることによって伝送容量を変化できる多値数可変無線伝送方式 [38][39] が高品質な無線 ATM エントランスネットワーク構成に必要な無線伝送技術であることを論じる。

第3章では、構築の容易なスター型の無線 ATM エントランスネットワーク構成を提案し、サービスの要求する QoS を満足できる最適なゾーン構成を明確化する。まず、セル廃棄率やセル転送遅延といった多次元の品質特性によって規定される要求 QoS を一元的に評価するため、QoS 指数と呼ぶ評価関数を新たに定義する。そして、QoS 指数の許容値を満たすことのできるネットワークの収容トラヒック量について理論解析を行い、収容トラヒック量を最大にできる最適なゾーン数について検討する。また、多値数可変無線伝送方式を適用した場合の収容トラヒック量改善効果も併せて明らかにする。

第4章では、受信特性を大きく劣化させる要因となる無線 ATM エントランスリンク間の相互干渉を削減する変調方式を検討する。従来の多値数可変無線伝送方式の送信電力は、大

きな多値数使用時に要求 QoS を満足できるように大きな電力マージンを有しており [38][40], トラフィック量が少なく, 小さい多値数を用いて伝送を行っている時は, 余剰電力を用いて伝送していることになる. そこで本章では, 要求 QoS を満足する限り送信電力を小さくして, 他のエントランスリンクへの与干渉電力を削減することができる電力多値数可変無線伝送方式を提案する. 所要受信電力及びセル廃棄率についての理論解析の結果, 従来の電力制御をしない多値数可変無線伝送方式と比較して, 提案方式が平均送信電力を削減でき, 干渉電力影響下でセル廃棄率特性が改善されることを明らかにする.

第 5 章では, 既存の xDSL の光ファイバに比べて低速な有線伝送路とその容量不足を補うために無線伝送路を併用した有線無線併用 ATM エントランスネットワーク構成を提案し, 低速有線無線併用伝送路を用いて効率良くトラフィック変動を吸収できることを示す. まず, トラフィック量に応じて各バーチャルパス容量を最適に配分するバーチャルパス容量制御技術と, 多値数可変無線伝送方式を組み合わせたバーチャルパス容量可変無線 (AMLCR-VPC: Advanced Modulation Level Controlled Radio - Virtual Path Capacity Control) 伝送方式を有無併用網に適用し, バーチャルパス容量制御アルゴリズムを新たに検討する. そして, 呼損率の特性やトラフィック予測誤差許容度について理論的に解析し, 無線伝送路の比率を変化させた場合の AMLCR-VPC 方式適用時における改善効果を明らかにする.

第 6 章は結論であり, 本研究で得られた成果を総括する.

第2章

無線 ATM 方式実現への要求条件

2.1 序言

将来の移動無線通信環境では、数十 Mbps の高い伝送速度を要求するサービスや、音声通信だけでなく、静止画や動画を含めた画像通信、データ通信といったマルチメディア通信の需要が一層高まってくることが予想される。そこで、有線網でマルチメディア通信を効率良く伝送する方式である ATM と整合がとれ、ATM 通信を無線端末に供給することができる“無線 ATM”の研究が現在盛んに行われている。

本章ではまず、無線 ATM 伝送を実現するための要求条件について明確にする。はじめに、無線 ATM の実現目標の位置付けを示し、その技術的課題を詳細に述べる。次に要求 QoS の違いによってサービスを分類し、それぞれの要求を明確に示す。

無線 ATM の実現方法の分類について述べ、各プロトコルアーキテクチャについて明確に示すと共に、各実現方法が無線通信環境に応じて異なることを論じる。

最後に、無線伝送路を用いて基地局と基幹 ATM 網を接続する ATM エントランスネットワークの必要性を論じる。また、無線エントランスリンク ATM 伝送に適した変調方式の検討を行い、多値数を変化させることによって伝送路容量を変化できる多値数可変無線伝送方式に着目し、本方式を ATM エントランスネットワークに適用した場合の有効性について明確に示す。

2.2 無線 ATM の要求条件

各サービスシステムの取り扱う情報伝送速度及び可搬特性を図 2.1 に示す。現在のコードレスホンやセルラー携帯電話、PHS (Personal Handyphone System) の情報伝送速度は 100kbps 以下であり、各サービスの適用領域は構内及び公衆網となっている。図 2.1 から分かるように、セルラー携帯電話は、公衆網においてユーザの移動速度が比較的速い場合に有効であり、

PHS は、構内もしくは公衆網の両方で使用可能で比較的高い伝送速度を要求する場合に適用される。一方構内系では、LAN (Local Area Network) 構築の進展が目覚ましく、有線端末を使用する場合、100Mbps の伝送速度が実現されている。さらに構内系では、端末を無線化した無線 LAN が構築されつつあり、数十 Mbps の高い伝送速度の実現に向けて標準化が行われている。また公衆網では、第3世代デジタル移動通信方式として、IMT-2000(International Mobile Telecommunication -2000) の開発が2000年の商用化に向けて進められている。IMT-2000では、現在の携帯電話の移動性を保ちつつ、マルチメディア通信をサポートできる最大2Mbpsの伝送速度の実現に向けて標準化が進められている [4]。IMT-2000は、世界標準の伝送方式であるので、実現すれば、世界各地で同方式が使用可能となる。

一方、有線通信網では、伝送方式として ATM を採用し、光ファイバの使用を前提とした高速高品質マルチメディア通信が実現されつつある。そのため、公衆無線通信網においても、将来の高速マルチメディア通信を実現するために、より高い伝送速度を有し、有線 ATM 伝送に整合のとれた無線伝送を確立する必要がある。そこで、第4世代の無線伝送として、無線端末でも ATM トラフィックを扱うことができ、高速マルチメディア無線通信の実現を可能とする無線 ATM の研究開発、標準化が進められており、世界各国で無線 ATM 伝送を用いたプロジェクトも始まっている。無線 ATM では、構内、公衆網で使用可能で、伝送速度数十 Mbps の高速マルチメディア通信を実現することが要求されている。そのため無線 ATM システムは、図 2.1 に示すように、構内、公衆両方で使用可能な PHS の移動性を確保しながら、高速マルチメディア化したシステム、もしくは、高速無線 LAN システムにおいて、公衆網でも高速無線伝送を可能としたシステムとして構築される [10]。

以下に無線 ATM 伝送を実現するための要求条件および技術的課題についてまとめる。

- マルチメディア通信サービスを行うためには、数 Mbps ~ 数十 Mbps とした伝送速度を必要とするサービスについても伝送する必要がある。そのため、無線伝送路においてもこのようなサービスを収容するために、高速な無線伝送が実現されなければならない。
- ATM 網では、音声、画像等のリアルタイム性のあるサービスやデータ等のセル廃棄に厳しいサービス等、異なった要求を有するサービスを統合的に収容する必要がある。従って、基地局に収容されている複数の無線端末が無線伝送路を共有する場合、マルチメディアサービスの持つ様々な要求を実現する MAC(Medium Access Control) が必要になる。
- 有線伝送路に比べ信頼性の低い無線伝送路を用いるため、誤ったデータに対して再送

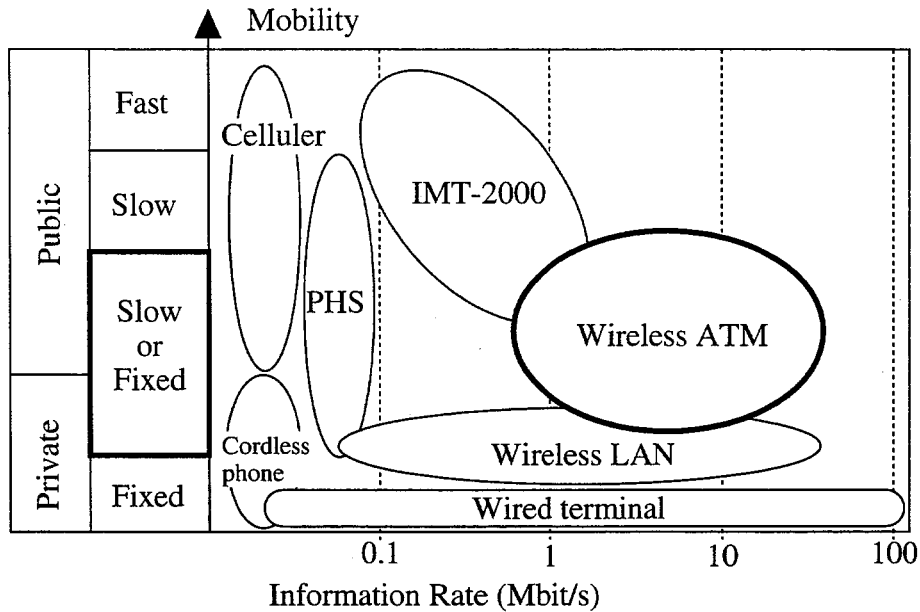


図 2.1: 無線 ATM の要求条件

制御等を規定する DLC(Data Link Control) プロトコルを必要とする。この場合、有線 ATM 網と無線 ATM 伝送リンクを接続するために、伝送フォーマットを可能な限り有線 ATM セルに整合のとれた形にする必要がある。

- 通信中無線端末が別の基地局の扱うエリアに移動することもあり、その場合、途切れのない通信を実現するために必要なハンドオーバー制御や伝送プロトコルを付加する必要がある。

現在では、以上の問題点を解決するためのプロトコルを中心に検討が行われており、大きく分けて伝送系 [18]-[20]、移動系 [21]-[24] の二つの分野で研究が進められている。

また ATM 網では、表 2.1 に示すように、各サービスによって要求される QoS 及びトラヒック特性は様々である。例えば、リアルタイム性の高い音声や画像サービスは、転送遅延には非常に厳しいが、情報廃棄に関しては比較的寛容である。一方、デジタルデータ、FTP (File Transfer Protocol) 等のデータサービスは、転送遅延には比較的寛容であるが、情報廃棄に関しては非常に厳しい要求を有する。また、各サービスは、固定ビットレートの CBR (Constant Bit Rate)、可変ビットレートの VBR (Variable Bit Rate)、状況によって得られる伝送帯域の異なる ABR (Available Bit Rate) と規定の必要のない UBR (Unspecified Bit Rate) サービスの 4 つのクラスに分類されている。リアルタイム性の高い音声や画像サービスは、伝送路状況に関わらず、一定の送出レートで伝送する CBR サービスに分類され、デー

表 2.1: マルチメディア通信サービスの要求 QoS

アプリケーション	クラス	セル転送遅延	セル廃棄率	伝送速度
音声/動画像	CBR	Bounded	Mmedium	8-128 kbps
デジタルデータ/FTP	ABR/UBR	Unbounded	Low-Medium	0.1-10 Mbps
デジタル HDTV	CBR	Bounded	Low-Medium	15-20 Mbps
圧縮動画像 (MPEG1/2)	CBR/VBR	Bounded	Low	1.5-6 Mbps

タ通信サービスは、伝送路状況の状況や使用帯域によって送出レートを可変にする ABR や UBR サービスに分類される。つまり、サービスが要求する様々な QoS に応じて各サービスクラスへ分類される。

無線 ATM 伝送においても、このような異なる QoS を要求するサービスを柔軟に無線伝送路に収容する必要がある。図 2.2 に一般的な無線 ATM 伝送プロトコル構成を示す。無線

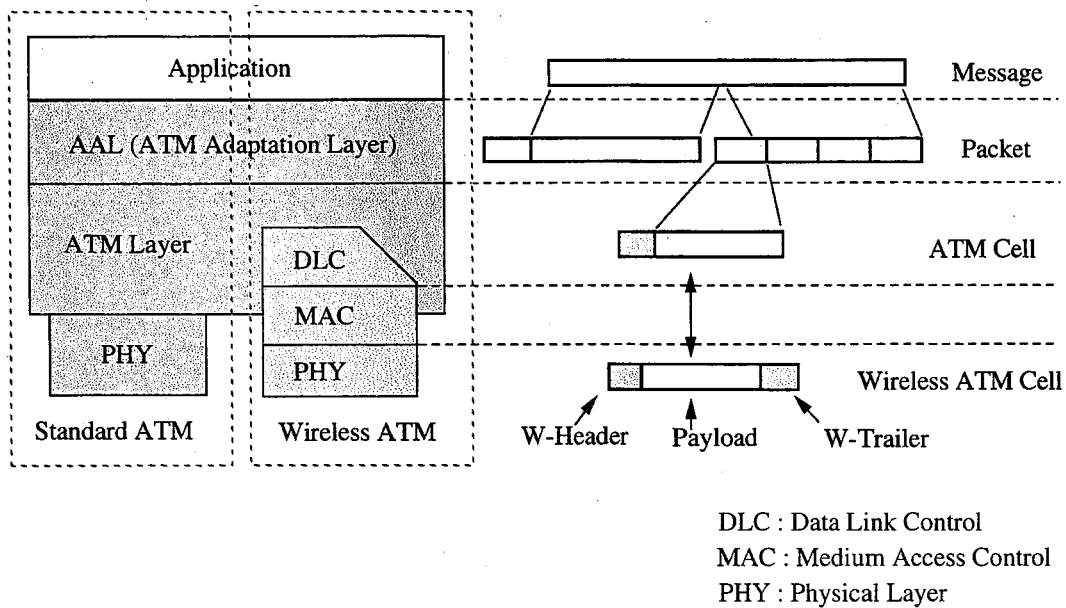


図 2.2: 無線 ATM 伝送プロトコル

ATM 伝送プロトコルでは、マルチメディアトラフィックを効率良く無線 ATM 伝送するために、標準の ATM 伝送プロトコルの下に DLC, MAC, 無線物理レイヤを新たに設けている。各レイヤでは、無線伝送路上を ATM セルが効率良く伝送するように以下のように規定されている。

- DLC レイヤ

再送および誤り訂正符号による誤り制御や、ハンドオフ等の移動端末の制御等が規定される。再送制御として ARQ (Automatic Repeat reQuest) が主に検討されている。

- MAC レイヤ

一つの無線伝送路を複数の端末で共有するための無線チャネル割り当てが規定される。多くのプロジェクトでは、TDMA(Time Division Multiple Access) 方式が採用されている。

- 無線物理レイヤ

高速無線通信の実現を目的とし、伝送方式、使用周波数帯や使用装置等の規定がされている。

以上より、無線 ATM エントランスネットワーク構成を検討する場合でも、サービスが要求する QoS を満足するネットワーク設計を考察していく必要がある。

2.3 無線 ATM 実現方法の分類

無線通信環境は、システム適用場所によって大きく異なってくる。例えば、室内と室外の無線通信環境を比較した場合でも、室内の場合では、端末の移動は殆んどなく、常に品質の良い伝送路が確保されているが、室外だと端末は移動し、周りの環境も時々刻々と変化しており、伝送路品質は室内に比べて悪化する。また、帯域が限られた場所やマルチメディアトラフィック状況の異なる場所でも無線通信環境は異なる。従って、それぞれの環境に適した無線 ATM 方式の実現方法が存在する [41]。以下にプロトコルの観点から三つに分類された無線 ATM 伝送および移動無線 ATM の実現方法について説明する。

- End-to-End 無線 ATM

有線伝送路並に品質が良く、かつ 1 対 1 通信の無線伝送路では、53byte の有線 ATM セルが伝送可能である。無線伝送路を誤りがなく高品質な伝送路にするために誤り訂正符号等の利用が考えられるが、実現するためには大きな無線帯域幅が必要となる。

- アクセス無線 ATM

複数の無線 ATM 端末が一つの基地局にアクセスする場合に用いられる方式で、劣悪な伝送路品質の改善や無線伝送路の共有を可能とするために、無線 ATM 伝送プロト

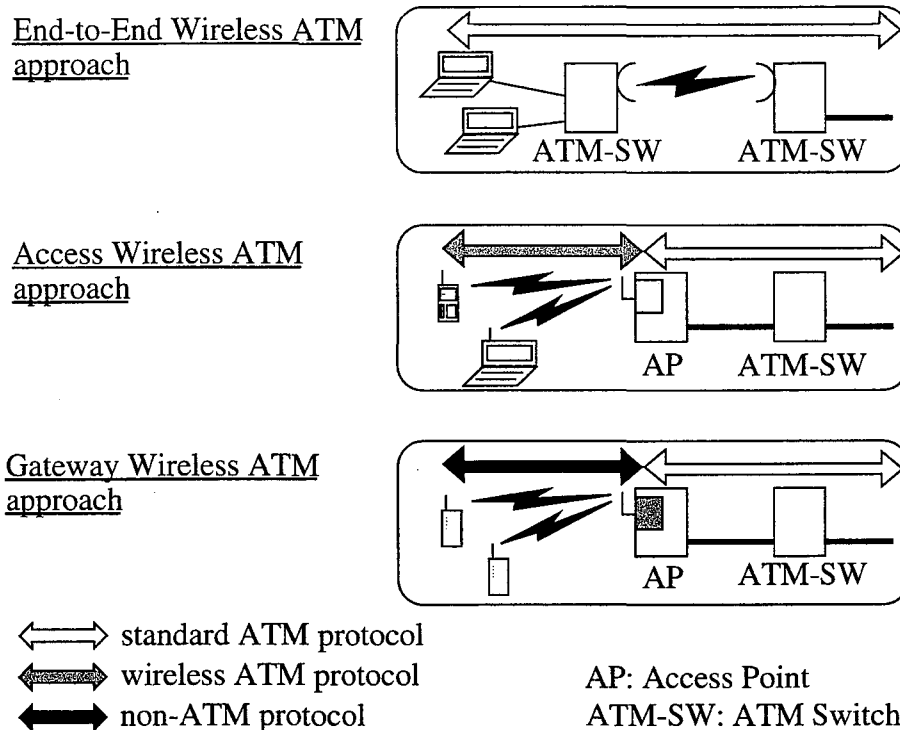


図 2.3: 無線 ATM 実現方法のプロトコル構成

コルが規定されている。無線 ATM 伝送プロトコルでは、無線周波数を効率良く使用するため、図 2.2 に示すように ATM セル構造を変化させている。

- ゲートウェイ無線 ATM

無線端末が ATM 端末ではない、既存の携帯電話や IMT-2000 端末を ATM ネットワークに接続する方式で、ゲートウェイ（基地局）でプロトコル変換が必要となる。劣悪な既存の無線インターフェースでは標準 ATM 伝送プロトコルの適用は困難であるので、既存のプロトコルを使用している。

- 移動無線 ATM

この実現方法は上記三つの伝送実現方法全てに適用可能である。ATM はコネクション型であるため、呼設定時には end-to-end に VC が設定される。基地局間の端末移動（ハンドオフ）を実現するためには、移動に応じて VC の途中から端末の移動先の基地局に VC を新たに張り替えるハンドオフ制御が必要である。現在、要求セル転送遅延を満足するように VC の切替え時間を短縮するハンドオフ制御の検討が行われている [24]。また VC を再設定するリンクを決定する際、転送遅延、情報の廃棄を考慮したコ

コスト関数と呼ぶ評価指数を用い、コスト関数の返す値の最も小さいリンクを選択する QoS を考慮した ATM 経路選択法 [42] の適用が可能である。

図 2.3 に各実現方法のプロトコル構成を示す。End-to-End 無線 ATM では、End-to-End で標準 ATM 伝送プロトコルが使用されているが、アクセス無線 ATM とゲートウェイ無線 ATM では、基地局で標準 ATM 伝送プロトコルと他の伝送プロトコルの変換が行われている。ATM セルと無線 ATM セルの変換が行われるアクセス無線 ATM では、図 2.2 に示すように、ATM レイヤより下位のレイヤで変換が実現される。ゲートウェイ無線 ATM では、ユーザ情報まで復調して ATM 伝送プロトコルと他のプロトコルの変換が行われるため、インターネットワーキング機能が必要となる。

無線 ATM を実現するネットワークを構成する場合、図 2.3 に示すプロトコル構成の中から、無線通信環境に応じて、適したプロトコル構成を考えていく必要がある。

2.4 無線 ATM エントランスネットワーク

2.4.1 無線 ATM エントランスネットワークの必要性

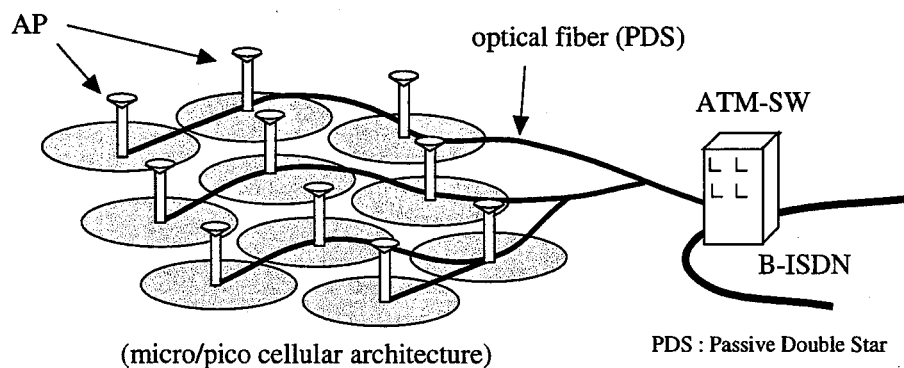


図 2.4: 無線 ATM を実現するネットワーク

図 2.4 に、現在考えられている無線 ATM 伝送を実現するネットワーク構成を示す。無線 ATM 端末から基地局は無線のアクセスリンクで接続されており、無線 ATM 伝送プロトコルを用いて伝送が行われている。図 2.4 に示すように、基地局と基幹 ATM 網はエントランスリンクと呼ぶ伝送路により接続されているが、リンクの使用効率を向上させるために ATM 伝送が考えられている [43][44]。この場合、アクセスリンクに無線 ATM 伝送プロトコル、エントランスリンクに標準 ATM 伝送プロトコルを適用した、図 2.3 に示すアクセス無線 ATM

実現方法が採用される。また、既存移動体通信網 (非 ATM 端末) についても ATM エントランスリンクの適用が検討されている [45]。この場合、アクセスリンクに非 ATM 伝送プロトコル、エントランスリンクに標準 ATM 伝送プロトコルを適用した、図 2.3 に示すゲートウェイ無線 ATM 実現方法が採用される。我々は、図 2.4 に示すネットワークを ATM エントランスネットワークと呼んでいる。現在の検討では、高速マルチメディア伝送の要求を基幹 ATM 網へ収容することを目的として、PDS (Passive Double Star)[50] 等の高速/高品質な光ファイバを用いてエントランスリンクを構築した場合の検討が殆どである。

しかしながら、将来の ATM エントランスネットワークでは以下のような問題が生じることが考えられる。無線 ATM 通信では、数 Mbps から数十 Mbps の高速伝送を実現するため、マイクロ帯やミリ波帯といった高い周波数帯を用いることが前提となっているが、その高周波信号波は伝搬減衰が大きいので、一つの基地局がカバーするゾーンは小さくなる傾向にある。また、逼迫してくる周波数を有効に利用するために、使用する周波数をゾーンに繰り返し割り当て、ゾーンを小さくして周波数利用効率を向上させる必要もある。さらに、建物の密集している都市部では、無線電波の届かない不感地帯が多く、その不感地帯の解消を図るために、多くの基地局を設立している。そのため、無線 ATM 端末を収容する将来の ATM エントランスネットワークでは非常に多くなることが容易に想像でき、多くの基地局と基幹 ATM 網を接続するエントランスリンクを効率良く設計することが非常に重要となる。光ファイバを用いて全てのエントランスリンクを構成しようとした場合、ネットワーク構築に膨大な時間とコストを要することが予想される。また基地局の増加に伴い、掘削規制等で敷設の不可能または困難な場所が増加し、光ファイバを用いたエントランスリンクの敷設効率は一層低くなると考えられる。

これに対して、エントランスリンクに光ファイバを用いずに、掘削の不必要な無線伝送路や xDSL(x Digital Subscriber Line) 方式を用いた既存の有線伝送路を併用して、迅速に効率良く ATM エントランスネットワークを構築することも可能である。例えば、上り下り回線伝送速度の非対称な ADSL(Asymmetric DSL) では、4~5km の伝送距離で下り伝送速度 1.5~8Mbps, 上り伝送速度 64k~1.4Mbps が可能であり、また VDSL(Very high speed DSL) では、約 1km の伝送距離で下り伝送速度 26~52Mbps, 上り伝送速度 2~6Mbps が実現可能である [31]。

図 2.5 に、エントランスリンクを全て無線伝送路で構築した場合の構成例を示す。我々は、これを無線 ATM エントランスネットワークと呼んでいる。図中、斜線部分は掘削規制等での有線伝送路が敷設できない場所を示す。無線 ATM エントランスネットワークでは、エントランスリンクに無線伝送路を用いることにより、図中斜線部分のような地理的な理由等での有

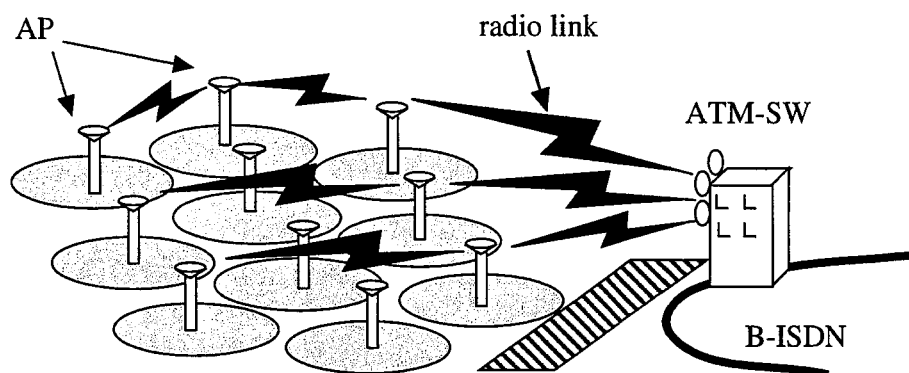


図 2.5: 無線 ATM エントランスネットワーク

線伝送路を敷設しにくい場所にも簡単にネットワークを構築できる。また、有線伝送路と比較して災害などに対しても強く、故障後の復旧に迅速な対応が可能となる。そして、ネットワークの更新、変更にも柔軟に対応できるので、将来、需要予測の困難なサービスに対して迅速に対応することができ、無線伝送路の広帯域化に伴う基地局の急激な増加を妨げることがない。

2.4.2 多値数可変無線伝送方式

無線 ATM 伝送では、伝送すべき情報をセルと呼ばれる固定長のパケットに分割し、情報量に応じてセルを送出するため、セルトラヒック量が大きく変動している。また、CBR サービスだけでなく、VBR や ABR サービス等のマルチメディア通信を収容するため、セルのトラヒック変動はますます激しくなり、変動を予測することが非常に困難となる。無線 ATM 伝送路に変調方式を適用する場合、伝送路品質を向上させるために、トラヒック変動を予測して予め大きな伝送路容量を用意することは、トラヒック量が小さい時にはリソースの余剰な割り当てとなり、効率は低い。

そこで本論文では、トラヒック量や伝送路品質に応じて変調多値数を適応的に変化させることができる多値数可変無線 (MLCR: Modulation Level Controlled Radio) 伝送方式を無線 ATM エントランスネットワークに適用することを考える。MLCR 方式の概念図を図 2.6 に示す。本方式では 2^{2^n} QAM 変調方式を用いることにより、トラヒック量に応じて変調多値数を変化させて伝送できるので、ATM セルのトラヒック変動を柔軟に収容することが可能となる。また本方式では、使用無線帯域幅を変化させることなく、無線伝送路容量を変化させることができ、多値数固定伝送方式と比較して、周波数利用効率を大きく向上させることがで

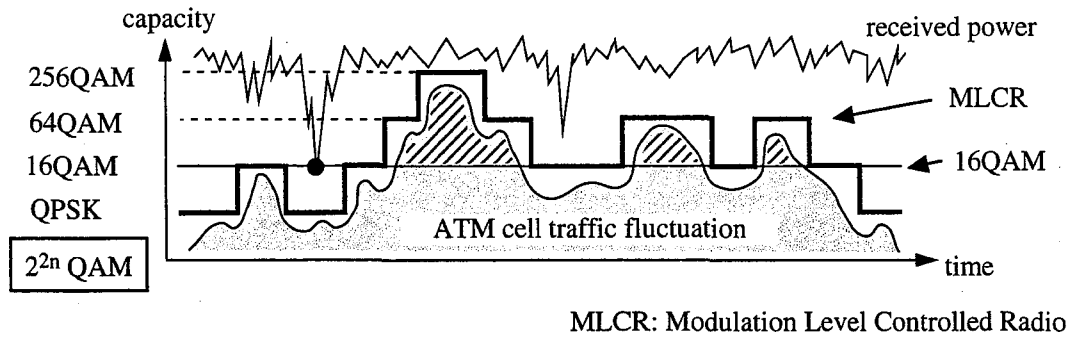


図 2.6: 多値数可変無線伝送方式の概念図

きる [38][46]-[49].

図 2.6 に 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式と MLCR 方式の伝送路容量を示す。16QAM 方式では、多値数を固定して伝送を行うため伝送路容量が固定され、伝送路容量を越えることによる情報の廃棄 (図中斜線部) が問題となっていたが、MLCR 方式では、大きな多値数を使用することによって伝送路容量を増加させトラフィック量を収容できる。トラフィック量が少ない場合は、MLCR 方式では、小さい多値数を使用することによってフェージング等の無線伝送路特有の異常伝搬の影響を軽減することができ、深いフェージングによる伝送路瞬断 (図中黒丸部) が起きている 16QAM 方式と比較して伝送路品質を向上させることができる。

一方、フェージング過程とトラフィック変動の過程は互いに独立な過程であるので、深いフェージングの発生と同時にトラフィック量がピークになる確率は非常に小さいと考えられる。従って、トラフィック変動のみに応じて変調多値数を変化させる制御だけで十分高い伝送路品質を得ることが可能となる [38]。さらに本方式では、複数の QoS を要求するサービスが混在した場合、サービスの要求 QoS によって多値数を変えることも可能で、各サービス毎の QoS 制御が容易になる。

以上より、ATM セルのトラフィック変動が大きく、かつ様々な QoS を要求する ATM 伝送に対して、MLCR 方式が非常に有効な方式であることが分かる。

2.5 結言

本章ではまず、無線 ATM 伝送を実現するための要求条件について論じ、無線 ATM の技術的課題について詳細に述べた。

次に要求 QoS の違いによってサービスを分類し、それぞれの要求を明確に示した。

そして、無線 ATM 実現方法の分類について述べ、各プロトコルアーキテクチャを明確に示した。

最後に、無線伝送路を用いて基地局と基幹 ATM 網を接続する ATM エントランスネットワーク上の必要性を論じ、無線エントランスリンク ATM 伝送に適した変調方式として、多値数を変化させることによって伝送路容量を変化できる多値数可変無線伝送方式に着目し、ATM エントランスネットワークの無線伝送路に適用した場合の有効性について明確に示した。

第3章

スター型無線 ATM エントランスネットワークの最適ゾーン構成

3.1 序言

本章では、迅速でかつ効率的に ATM エントランスネットワークを構築することを目的として、基地局と ATM 基幹網を接続するエントランスリンクに無線伝送路を用いたスター型無線 ATM エントランスネットワーク構成を提案し、本ネットワークのゾーン構成法について検討する。提案するスター型無線 ATM エントランスネットワークでは、ネットワーク内のリンクは指向性アンテナにより空間的に分割、多重され、point-to-point の見通しパスとして構築される場合が多い。さらに、このような構成にすると基地局を非再生中継器として設計でき、高信頼、低コストのエントランスネットワークが実現できる。

また、ATM 伝送を実現するには、サービスによって要求される様々な QoS を満足する必要がある。そこで本章ではまず、要求される QoS と無線 ATM エントランスネットワークのゾーン構成との関係について検討し、ゾーン構成によって満足できる QoS が異なることを明らかにし、次に、次元の異なる複数の通信品質を統合的に評価する指標として“QoS 指数”を新たに定義する。QoS 指数では、サービスの要求する QoS と実際ネットワークで実現できる QoS の相対的な関係から、サービスの要求に対する満足度を定量的な値によって示すことが可能となる。

そして本章では、セル転送遅延とセル廃棄率の2つのサービスの要求通信品質に着目し、様々なゾーン構成に対する QoS 指数について理論解析し、サービスの要求 QoS を満たすことのできるゾーン構成が存在することを示し、その中で、最もトラフィック量を多く収容できる最適ゾーン構成を明らかにする。さらに、多値数可変無線伝送方式を適用した場合の収容トラフィック量の改善効果についての検討も加える。

3.2 スター型無線 ATM エントランスネットワークにおける QoS

3.2.1 ネットワーク構成

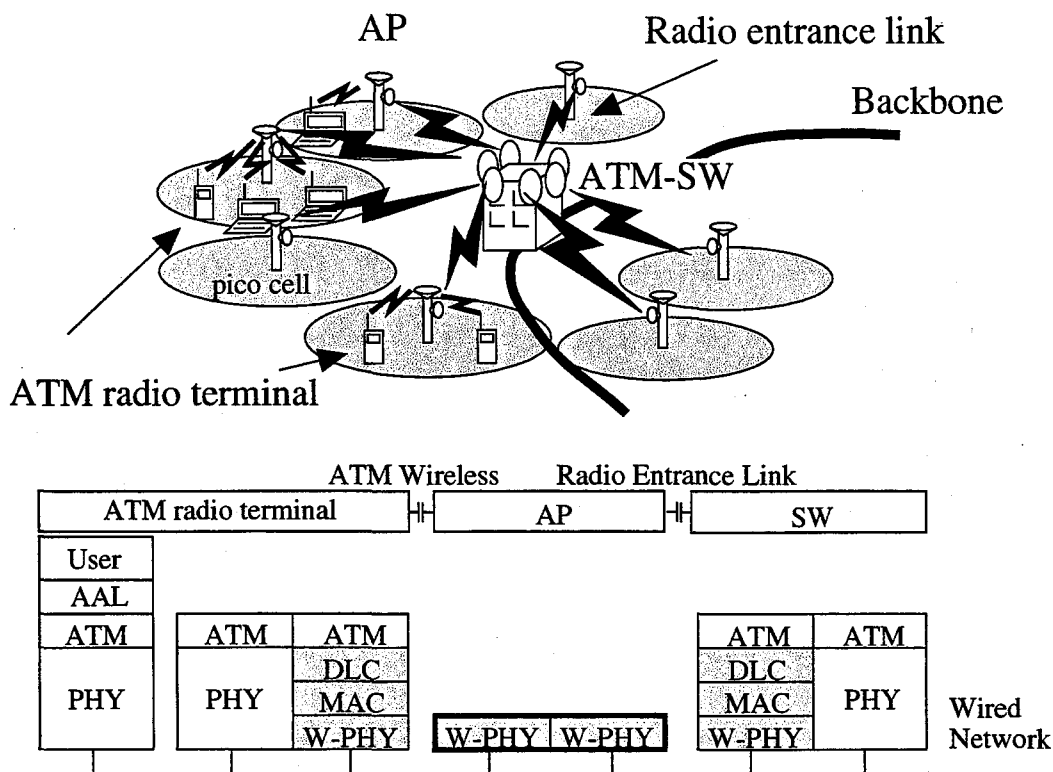


図 3.1: 無線 ATM エントランスリンクとプロトコルアーキテクチャ

図 3.1 にスター型無線 ATM エントランスネットワーク構成とプロトコルアーキテクチャを示す。無線サービスエリア内には、基幹 ATM 網と接続されている一つの ATM スイッチノード (ATM-SW) と各ゾーンをカバーする複数の基地局 (AP: Access Point) が存在する。ATM-SW と各基地局は同一周波数を用いた無線エントランスリンクで接続され、指向性をもった開口方形アンテナにより他のエントランスリンクと空間的に分割されている。図 3.1 のプロトコルアーキテクチャに示すように、本無線 ATM エントランスネットワークでは、アクセスリンク、エントランスリンク共に無線伝送路で構築しているため、両リンクに図 2.3 に示したアクセス無線 ATM 伝送プロトコルを用いている。基地局は信頼性を高めるために構成の簡単な非再生中継器として設計されており、アクセス側とエントランス側の使用周波数帯を変換する機能と電力制御機能のみを持ち、無線端末から ATM-SW まで無線 ATM セ

ルがそのままの形態を保ちながら伝送される。従って、端末が基幹 ATM 網へ接続を要求した場合、ATM-SW で無線 ATM 伝送プロトコルから標準 ATM 伝送プロトコルに変換されて基幹 ATM 網へ接続される。また同一サービスエリア内との通信を要求した場合、送信された無線 ATM セルは ATM-SW でセルレベルでの交換が行われて、同一エリアのエントランスリンクに接続される。

無線 ATM エントランスネットワークを構築する場合、サービスの要求する様々な QoS を満足させるようにゾーンを分割していく必要がある。本章では、サービスの要求 QoS を決定する要因のうち特に重要と考えられるセル転送遅延とセル廃棄率の二つに着目する。スター型無線 ATM エントランスネットワークにおける、セル転送遅延およびセル廃棄率を以下のように定義する。

- セル転送遅延 : 情報源から発生したセルが伝送されるまで送信端末のバッファに待ち合わせる時間
- セル廃棄率 : 無線伝送路での情報誤りに起因したセルヘッダ誤りによる廃棄

ATM セルの伝送遅延時間を小さくするためには、各ユーザに割り当てられる伝送容量を大きくすればよい。この場合、サービスエリア内のゾーン数を増加させて、各ゾーン内のユーザ数を減らしたり、周波数を繰り返して使用することによって、各ユーザの伝送容量を増加させ、セル転送遅延時間を短縮できる。しかしながら、アンテナの指向性を用いた空間分割スター型ネットワークでは、ゾーン数を増やすと、各エントランスリンク間の干渉が増大し、十分な CNIR(Carrier to Noise plus Interference power Ratio) が得られなくなり、エントランスリンクでのセル廃棄率が増大してしまう。従って、アクセスリンク、エントランスリンク両方のセル転送遅延時間、セル廃棄率を考慮した場合、様々な QoS の要求を最適化するようにゾーンを構成し、ネットワーク設計を行う必要がある。

3.2.2 QoS 指数

セル廃棄率やセル転送遅延の次元の異なる二つの品質特性によって規定される QoS を一元的に評価するために、本節では新たに QoS 指数と呼ぶ評価関数を定義する。式 (3.1) に QoS 指数を示す。

$$S(\rho, \delta) = \min\{q(\rho, \rho_0), q(\delta, \delta_0)\} \quad (3.1)$$

ここで、 ρ , ρ_0 はそれぞれエントランスネットワークで得られるセル廃棄率とサービスの要求するセル廃棄率であり、 δ , δ_0 はそれぞれ得られるセル転送遅延とサービスの要求する転

送遅延である。また $q(x, x_0)$ は、セル廃棄率またはセル転送遅延等の品質を定量的な値に変換する QoS 変換関数であり、次式で定義する。

$$q(x, x_0) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \log_{10} \left(\frac{x}{x_0} \right) & (10^{-3} \leq x/x_0 \leq 10^3) \\ 1 & (x/x_0 < 10^{-3}) \\ 0 & (x/x_0 > 10^3) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 x, x_0 はそれぞれネットワークで得られる品質とサービスが要求する品質を表している。

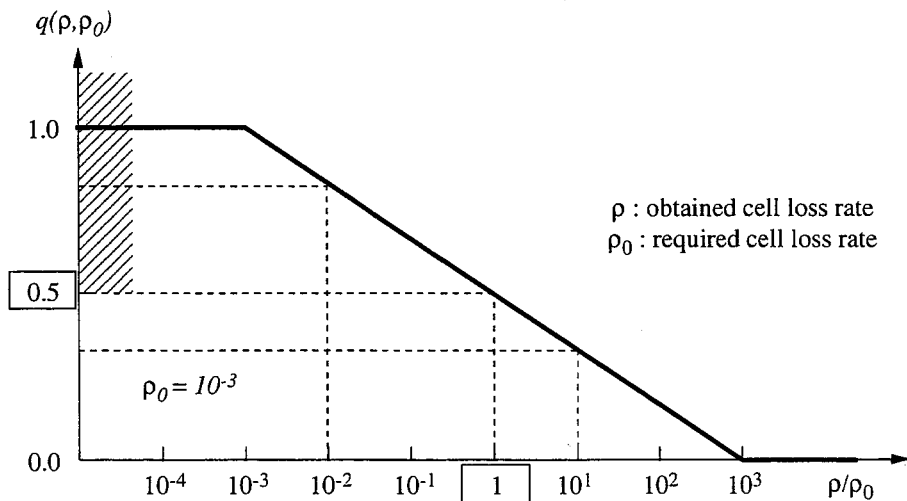


図 3.2: QoS 指数変換関数

図 3.2 に、例としてセル廃棄率の QoS 変換関数を示す。図 3.2 の横軸は、得られるセル廃棄率を要求セル廃棄率で割ったもので、縦軸が変換値を表している。変換関数の返す値は、0~1 の範囲に限定する。 $\rho/\rho_0 = 1.0$ ，すなわち要求セル廃棄率と実際のセル廃棄率が等しい場合、変換関数は 0.5 の値を返すように定義している。よって、変換値が 0.5 以上であれば、要求セル廃棄率が満足できていると考えることができる。

エントランスネットワークがサービスの要求 QoS を満足しているか否かを判断するためには、まず式 (3.2) を用いて、セル廃棄率、セル転送遅延についてそれぞれに変換値を算出する。式 (3.1) に示すように、各算出値を比較し、小さい値を QoS 指数として採用する。そして、QoS 指数が 0.5 以上の値であれば、エントランスネットワークがサービスの要求する QoS を満足していると判断できる。

このように、QoS 指数を用いることによって、サービスの要求 QoS が実際のエントランスネットワークにおいて満足できているか否かを定量的な値で評価することができる。また

サービスの要求 QoS が異なれば、エントランスネットワークで同じ QoS が得られた場合でも、その要求に応じて QoS 指標の値は異なる。つまり、様々な要求 QoS に対して一元的な指標で比較評価することが可能となる。

3.2.3 多値数可変無線伝送方式の適用

ATM 伝送を行う場合、トラフィック源およびサービスの特徴によって ATM セルのトラフィックは大きく変動する。そこで、ATM トラフィック変動を吸収する方式として、多値数可変無線 (MLCR) 伝送方式を本提案エントランスネットワークの無線伝送路に適用する。

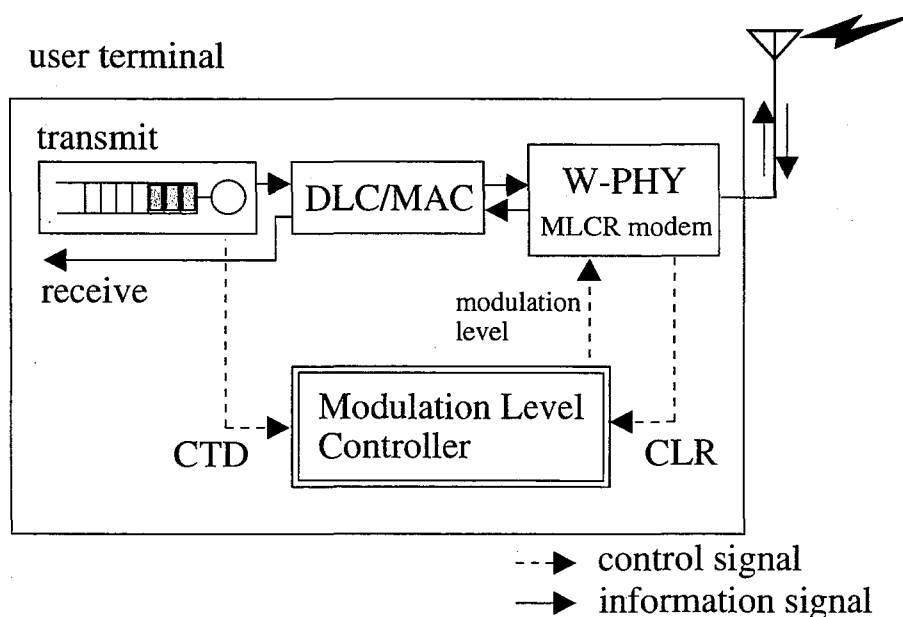


図 3.3: ユーザ端末の構成

図 3.3 に多値数可変無線伝送方式を適用した場合のユーザー端末の構成を示す。ユーザー端末は、ATM セルを蓄積するバッファと DLC, MAC レイヤ用制御装置, MLCR 変復調器と多値数可変制御装置で構成される。MLCR 方式の変復調器は、文献 [54] にて報告されているように既に開発されている。MLCR 変復調器では、信号判別に用いる相関器を最大多値数使用信号を復調できるように用意しておき、使用多値数が小さい信号を受信した場合には、必要な相関器のみを使用して信号を判別している。

図 3.3 に示すように送信側では、トラフィック源から生成された ATM セルがバッファに溜り、無線 ATM 伝送プロトコルで規定されている DLC, MAC 制御を順に施された後、MLCR 変調器によって無線信号に変換される。また受信側では、まずアンテナで受けた無線信号を

MLCR 復調器で復調する。無線伝送路には制御チャネルを設けており、受信波の使用している多値数の情報は制御チャネルを用いて、受信機に伝えられ、受信機はその情報に応じて復調する。復調後、無線信号をベースバンド信号に変換し、MAC, DLC レイヤを通過して、ATM セルを再生する。

次に変調多値数可変制御法について記す。図 2.6 に示すように、従来の多値数可変無線伝送方式はトラフィック量に応じて使用多値数を変化させ、トラフィック変動を吸収している。しかしながら、平均送信電力が一定であれば、大きな多値数を使用した場合、小さな多値数を使用した場合に比べ、伝送路品質が悪化し、伝送路誤りによるセル廃棄率が增大する。つまり、使用する多値数を大きくすると、伝送路容量増大によってセル転送遅延は改善されるが、伝送路誤り増大によってセル廃棄率が悪化してしまう。そのため、セル転送遅延とセル廃棄率を考慮すると、QoS を最も満足させる最適な変調多値数があり、その最適多値数を用いて伝送することが望ましい。そこで、本エントランスネットワークに適用する多値数可変無線伝送方式では、式 (3.1) で定義される QoS 指数を最大にするように多値数を選択して使用するものとする。多値数可変制御装置は、送信機バッファ内に待ち合わせている ATM セルの待ち合わせ時間と受信信号電力を監視しており、制御周期ごとにバッファ内セル転送遅延と伝送路上のセル廃棄率の情報を得る。そして、使用可能多値数それぞれを使用した場合に得られるセル転送遅延とセル廃棄率から QoS 指数を算出して、最も QoS 指数を高める多値数を選択して信号を変調する。また、本制御で使用可能な多値数 m_l は、 $m_l = 4(256\text{QAM})$, $m_l = 3(64\text{QAM})$, $m_l = 2(16\text{QAM})$, $m_l = 1(\text{QPSK})$ の四つとする。

3.3 理論解析

3.3.1 ネットワークモデル

図 3.4 にスター型無線 ATM エントランスネットワークの解析モデルを示す。図 3.4 に示すように、無線サービスエリアを正方形とし、正方形のゾーンによってエリアを分割している。

ユーザトラフィックはエリア全体に一樣に分布し、トラフィック量は一樣に増減すると仮定する。各ゾーン内に存在するユーザはそのゾーン内の最も近い基地局に全てアクセスする。また、図 3.4 に示すように、ATM-SW に設置されているアンテナによって、エリアを四つのセクターに分割しており、他のセクターに存在するエントランスリンクからの干渉はないものとする。

ここで、 p , q をそれぞれ、アクセスリンクの周波数繰り返し数、エントランスリンクの周

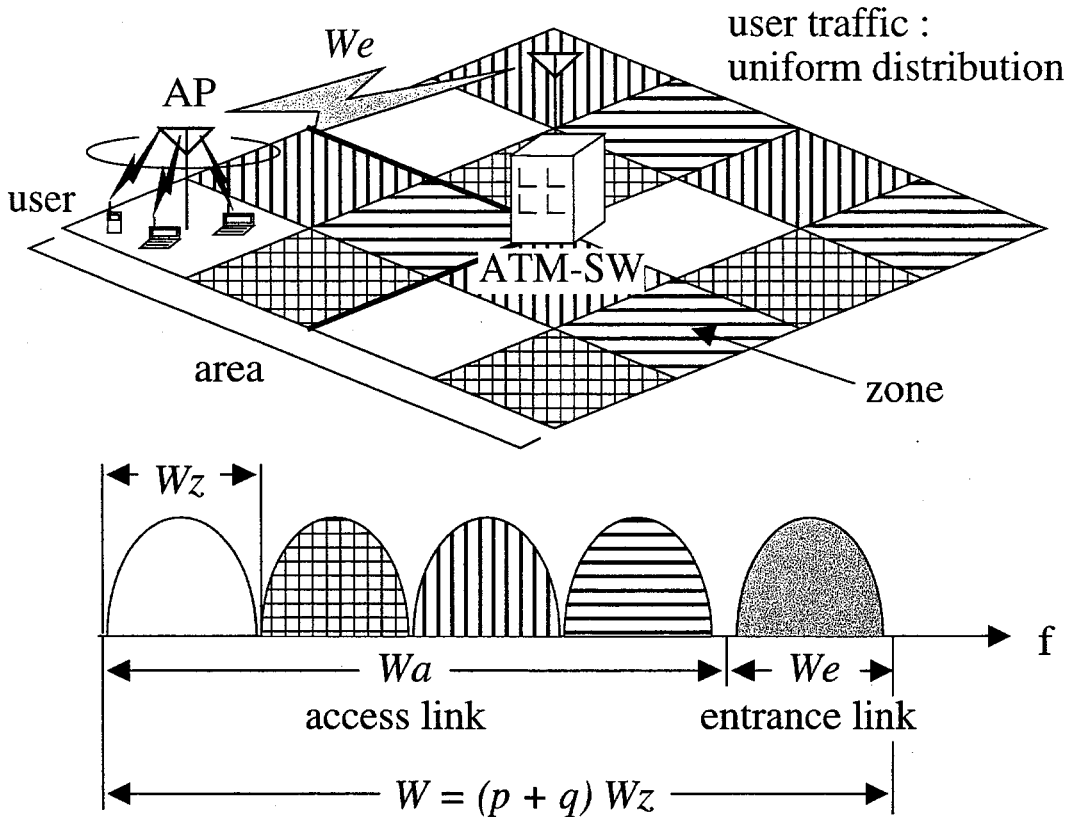


図 3.4: ネットワークの解析モデル

波数繰り返し数と定義する．全体で使用可能な伝送帯域幅を W [Hz] とし，一つのアクセスリンク（ゾーン）に割り当てられる伝送帯域幅とエントランスリンクに割り当てられる伝送帯域幅を等しいと仮定すると，各ゾーンに割り当てられる帯域幅 W_z は，

$$W_z = W_a/p = W_e/q \tag{3.3}$$

となる．ここで W_a ， W_e はそれぞれ，アクセスリンク，エントランスリンク全体に割り当てられる周波数帯域幅である．また， $W = W_a + W_e$ の関係よりゾーンに割り当てられる帯域幅は，

$$W_z = \frac{W}{p+q} \tag{3.4}$$

で書き表せる．アクセスリンクでは，基地局と無線端末は無指向性アンテナで接続されているので，実際には同一周波数を使用している他のセルからの干渉が影響してくるが，本ネットワークでは，アクセスリンクの周波数繰り返し数 p は 4 とし，他のアクセスリンクからの干渉は十分無視できるように設計されていると仮定する．また，全体でより多くの伝送帯域を確保するために，エントランスリンク周波数繰り返し数 q は 1 とし，全エントランスリン

クが同一周波数を使用すると仮定する．図 3.4 に， $p = 4, q = 1$ のときのアクセスリンクとエントランスリンクの周波数配置を示す．エントランスリンクでは，アンテナの指向性を高めるために，マイクロ帯の周数波帯を用いることを仮定する．

本ネットワークでは，図 3.4 に示すように，ATM-SW 上のアンテナを基地局のアンテナより高い位置に設置し，全ての基地局と見通しパスが形成できるようにエントランスリンクを設計する．基地局と ATM-SW を接続する複数の無線エントランスリンクは同一周波数を利用するため，指向性の高いアンテナを用いて，各リンクを空間的に分割多重する必要がある．本ネットワークでは，指向性アンテナとして開口方形アンテナを用いる．開口方形アンテナのアンテナ指向性特性は次式で表わされる [51]．

$$G(\theta) = \frac{4\pi l_a^2}{(C/f_{RF})^2} \text{sinc}^2 \left(\frac{\pi l_a \sin \theta}{C/f_{RF}} \right) \quad (3.5)$$

ここで， θ はエントランスリンク間のなす角， l_a は開口方形アンテナの一辺の長さ， C は光速， f_{RF} は使用する周波数帯である．また C/f_{RF} は信号の波長を表している．

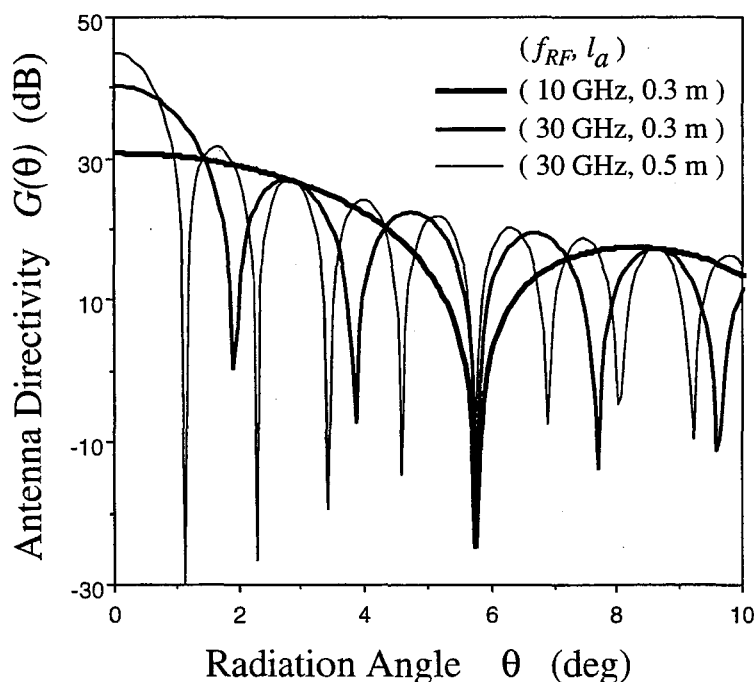


図 3.5: 開口方形アンテナ指向性特性

図 3.5 に開口方形アンテナの指向性特性を示す．図より，使用周波数帯が高く，アンテナサイズが大きい程，指向性を高くすることが分かる．本解析では，セル廃棄率を計算する場合，式 (3.5) に表されるアンテナ指向性特性の包絡線の値を用いて計算している．

また、収容されるトラヒックには、上り下りの伝送帯域の等しい対称トラヒックと伝送帯域の異なる非対称トラヒックが存在する。対称トラヒックをエントランスリンク間の上り下りの同期をとらずに収容する場合、もしくは非対称トラヒックを収容する場合、所望エントランスリンク上と干渉エントランスリンク上で上りと下りの異なるチャンネルを使用して伝送を行う状況が発生する。その場合、干渉エントランスリンクの送信側から送信された電波が回り込んで所望エントランスリンクの受信側に干渉として洩れ込むため、アンテナの数が増えると干渉電力増大の問題となるが、本解析では、対称トラヒックを収容し、全エントランスリンク間で上り下りの同期をとっているものと仮定し、回り込みによる干渉電力は無視し、所望、干渉エントランスリンク間の上りチャンネル干渉電力のみを考慮している。

3.3.2 セル転送遅延とセル廃棄率の理論解析

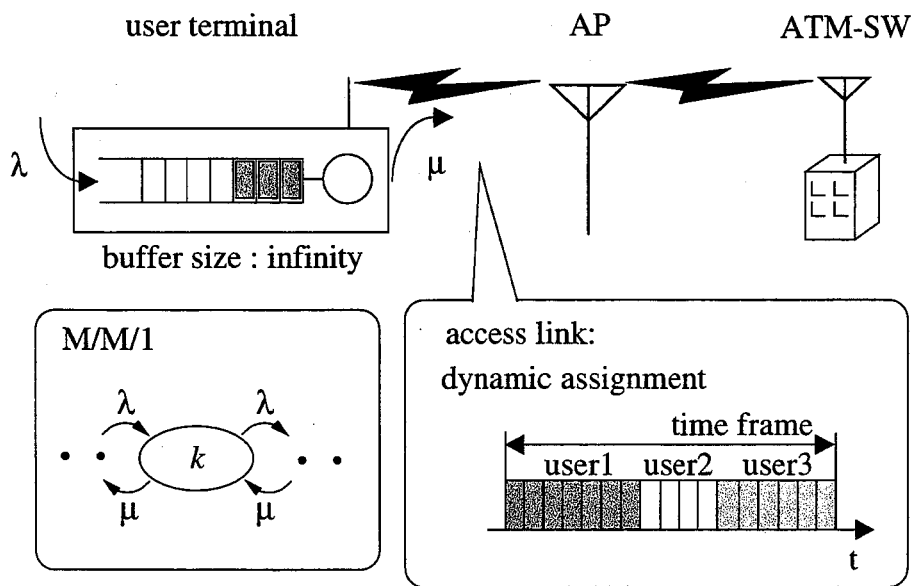


図 3.6: セル伝送遅延解析モデル

[セル転送遅延モデル]

図 3.6 にセル転送遅延時間の解析モデルを示す。ATM セルはユーザ端末から AP へ送出されるが、送出されるまで、容量を無限大と仮定するバッファ内に溜められる。

図 3.6 に示すようにアクセスリンクでは、ダイナミック TDMA チャンネル割当方式が適用されており、ゾーン内の各ユーザに対して、送出する情報量に応じてタイムスロットが割り当てられる。MLCR 方式を適用した場合、使用多値数を m_i とおくと、各アクセスリンクおよび各エントランスリンクの総伝送容量は、帯域幅 W_z を用いて $2m_i W_z$ [bit/s] となる。よっ

て、総伝送容量は多値数 m_l に応じて変化することが分かる。いま、全体のユーザ数を a [人]、ゾーンの数 n とすると、ゾーン内のユーザ数は a/n 人となり、各ユーザの平均セル伝送容量 μ は、以下の式で与えられる。

$$\mu(m_l) = \frac{2m_l W_z}{N_c} \cdot \frac{a}{n} \quad [\text{cell/s}] \quad (3.6)$$

ここで N_c は無線 ATM セルのビット長である。

処理率を式 (3.6) で表される平均セル伝送容量 $\mu(m_l)$ 、発生率を各ユーザからの平均セル発生率を λ とし、本システムの待ちセル数解析モデルとして待時式 M/M/1 を仮定した場合のバッファ内セル平均待ち時間 δ は次式で表される [52]。

$$\delta = \frac{\lambda}{\mu(m_l)(\mu(m_l) - \lambda)} \quad (\lambda < \mu(m_l)) \quad (3.7)$$

[セル廃棄モデル]

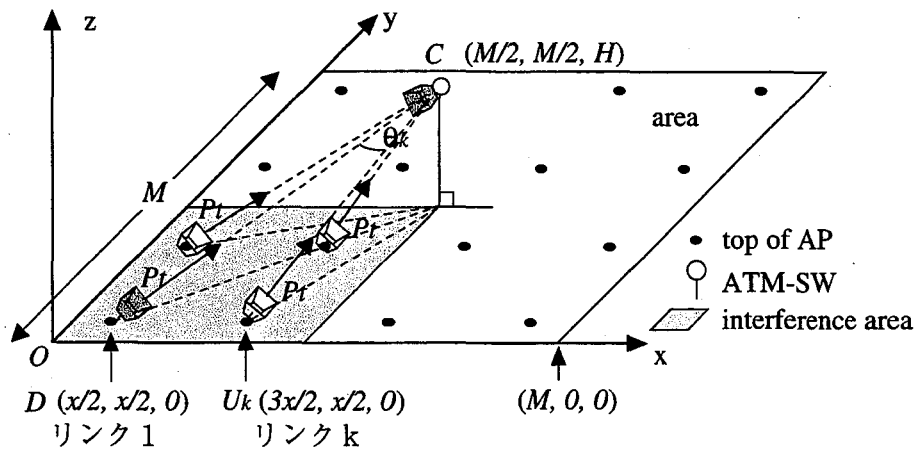


図 3.7: セル廃棄率解析モデル

図 3.7 に本提案エントランスネットワークにおけるセル廃棄率の解析モデルを示す。各基地局からは全て同じ送信電力 P_t を用いて無線 ATM エントランス伝送を行っているとは仮定する。その場合、最も遠い基地局からの受信電力が最も低くなるので、図 3.7 に示す最も遠い基地局を接続するリンク 1 上でのセル廃棄率について解析を行う。

まず、リンク 1 上の搬送波電力対雑音干渉電力比 CNIR (Carrier to Noise plus Interference power Ratio) を考える。リンク 1 と k 番目の他のエントランスリンク k のなす角を θ_k とし、 d_1 と d_k をそれぞれ、リンク 1 とリンク k の長さとして定義する。式 (3.5) で表される開口方形

アンテナの指向性特性を考えると、リンク1の受信信号 C は次式で与えられる。

$$C_1 = P_t \{G(0)\}^2 \frac{(c/f_{RF})^2}{(4\pi)^2 d_1^2} \quad (3.8)$$

またリンク k からの干渉電力 I_k は次式で与えられる。

$$I_k = P_t G(0) G(\theta_k) \frac{(c/f_{RF})^2}{(4\pi)^2 d_k^2} \quad (3.9)$$

干渉電力を考慮すると、リンク1の CNIR Γ は次式で表せる。

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{C_1}{N+I} = \left(\left(\frac{C_1}{N} \right)^{-1} + \left(\frac{C_1}{I} \right)^{-1} \right)^{-1} \\ &= \left(\frac{KTW_z F d_1^2 (4\pi)^2}{\{G(0)\}^2 (c/f_{RF})^2 P_t} + \sum_k \left(\frac{G(\theta_k)}{G(0)} \left(\frac{d_1}{d_k} \right)^2 \right) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

ここで、 K はボルツマン定数、 T は温度、 F は受信回路の雑音指数、 Ω は干渉電力が影響するセクター内に存在する所望エントランスリンクに干渉を及ぼすエントランスリンクの数を表している。ゾーンの数が増加すると、 Ω は増加する。

図3.7に示すように、エリアの中で ATM-SW から最も離れた基地局は座標 $D(x/2, x/2, 0)$ 上に存在し、最も隣接する基地局は $U_k(3x/2, x/2, 0)$ に存在している。ここで x は基地局間の距離を表している。ATM-SW はネットワークサービスエリアの中心に位置し、座標は $(M/2, M/2, H)$ と仮定する。ここで、 M はサービスエリアの一辺の長さを表し、 H は ATM-SW 上のアンテナと AP のアンテナの高さの差を表している。また、基地局間の距離 x は、 M を用いて次式で与えられる。

$$x = \frac{M}{\sqrt{n}} \quad (3.11)$$

ここで、 n はサービスエリア内の基地局の数であり、 $[y]$ は y 以上の最小の整数を表す記号である。所望エントランスリンクの ATM-SW から基地局までのリンクベクトル $\overrightarrow{CD} = ((x-M)/2, (x-M)/2, H)$ と k 番目のエントランスリンクのリンクベクトル $\overrightarrow{CU_k}$ を用いるとベクトルの内積よりエントランスリンクのなす角 θ_k は次式で与えられる。

$$\theta_k = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{CD} \cdot \overrightarrow{CU_k}}{|\overrightarrow{CD}| |\overrightarrow{CU_k}|} \right) \quad (3.12)$$

ここで、 $|\overrightarrow{CD}|$ と $|\overrightarrow{CU_k}|$ はそれぞれ、エントランスリンクの距離 d_1 と d_k である。エリア内の基地局数 n が増加すると、 θ_k が小さくなり、その結果角度 θ_k のアンテナ利得 $G(\theta_k)$ は大きくなり、干渉量が大きくなる。

伝送方式として MLCR 方式を用いた場合, AWGN(Additive White Gaussian Noise) チャネルにおけるビット誤り率 P_{be} は, 式 (3.10) を用いて,

$$P_{be}(m_l) = \left(1 - \frac{1}{2^{m_l}}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2(2^{2m_l} - 1)}} \cdot \Gamma \right) \quad (3.13)$$

となる [53]. ここで, $\operatorname{erfc}(x)$ は誤差補関数と呼ばれる関数であり, 次式で与えられる.

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (3.14)$$

また無線 ATM セルのヘッダに t ビット誤り訂正符号を用いた場合, セル廃棄率はヘッダにおいて t ビット以上誤る場合の確率と定義でき, セル廃棄率 ρ は

$$\rho(m_l) = \sum_{i=t+1}^{n_h} n_h C_i (1 - P_{be}(m_l))^{n_h-i} \cdot P_{be}(m_l)^i \quad (3.15)$$

と表すことができる. ここで n_h は無線 ATM セルヘッダのビット長である.

3.4 最適ゾーン構成の検討

表 3.1 にセル廃棄率及びセル転送遅延の理論解析に用いた諸定数を示す. 無線 ATM セルは, 無線帯域幅を有効に利用するために 4 バイトに圧縮されたヘッダと 48 バイトのペイロードと 30 ビットの冗長ビットで構成されており, 無線 ATM セル長は $N_c = 446$ ビットとなる. 冗長ビットは 5 ビット誤り訂正可能な FEC コードであり, この場合, BCH(62,32) コードを用いて実現している.

図 3.8 にエリア内のユーザ数が $a = 100$ の場合の QPSK 方式適用時における基地局数に対するセル転送遅延とセル廃棄率特性を示す. 基地局数を増加させると, ユーザ一人当たり割り当てられる帯域幅が大きくなり, 伝送速度が増大し, セル転送遅延は減少している. セル転送遅延の要求が $\delta_0 = 10^{-3}$ 秒の時, 基地局は最低 36 基以上必要であることが分かる. また, 基地局数を増加させると, エントランスリンク間の干渉が増大し, セル廃棄率は悪化している. セル廃棄率の要求が $\rho_0 = 10^{-10}$ の時, 基地局は 120 基以下である必要がある.

図 3.9 にエリア内のユーザ数が $a = 100$, 収容されるサービスがセル転送遅延を $\delta_0 = 10^{-3}$ 秒, セル廃棄率を $\rho_0 = 10^{-10}$ を要求する場合の基地局数に対する QoS 指数の特性を示す. QPSK 方式適用時には, 基地局数が 100 以下であれば, 基地局数が大きくなる程ユーザに割り当てられる帯域幅が大きくなり, 伝送容量が増大することによってセル転送遅延が減少し, QoS 指数が増大している. しかしながら, さらに基地局数が増えて, 100 以上になると, エントランスリンク間の干渉電力が増大し, セル廃棄率が増大することによって QoS 指数

表 3.1: QoS 指数の理論解析に用いた諸定数

使用無線周波数帯	f_{RF}	30 GHz
無線周波数帯域幅	W	10 MHz
平均送信電力	P_t	1 dBm
開口方形アンテナの大きさ	l_a	0.3 m
無線 ATM セル長	N_c	446 bits
無線 ATM セルヘッダ長	n_h	32 bits
FEC 誤り訂正可能ビット	t	5 bits
サービス平均送出レート	λ	1 Mbps
サービスエリアの一辺の大きさ	M	200 m
ATM-SW のアンテナの高さ	H	50 m
ボルツマン定数	K	1.38×10^{23}
温度	T	300 K
受信回路雑音指数	F	10 dB
ゾーン周波数繰り返し数	p	4

が減少している。よって、セル転送遅延とセル廃棄率の二つの要求品質を考慮した場合、最も QoS 指数を大きくする基地局数が存在することになる。この図から、QPSK 方式を適用した場合、最も QoS 指数を大きくできる基地局数は 100 であることが分かる。

また、図 3.9 より、MLCR 方式を適用した場合、基地局数が小さいところで、QoS 指数を改善していることが分かる。これは、基地局数が小さい時はエントランスリンク間の干渉電力が非常に低いため、MLCR 方式が大きな変調多値数を使用した場合でも、要求セル廃棄率を満たしつつ、伝送路容量増大によってセル転送遅延を改善できるからである。この図より、QPSK 方式適用時では高い QoS 指数を得るためにはより多くの基地局数が必要であったが、MLCR 方式適用時には小さい基地局数でも同等の QoS 指数が得られ、効率的なネットワーク構成が可能となる。また、要求 QoS を満たすことのできる基地局数は、QPSK 方式適用時では 36 から 100 となる。一方、MLCR 方式適用時では、9 から 100 となり QPSK 方式と比較して、少ない基地局でエントランスネットワークが構成できることが分かる。

図 3.10 に、QPSK 方式と MLCR 方式適用時の基地局数に対する、サービスの要求するセル廃棄率 10^{-10} を満たしながら許容できるセル転送遅延を示す。基地局数が 121 以上になる

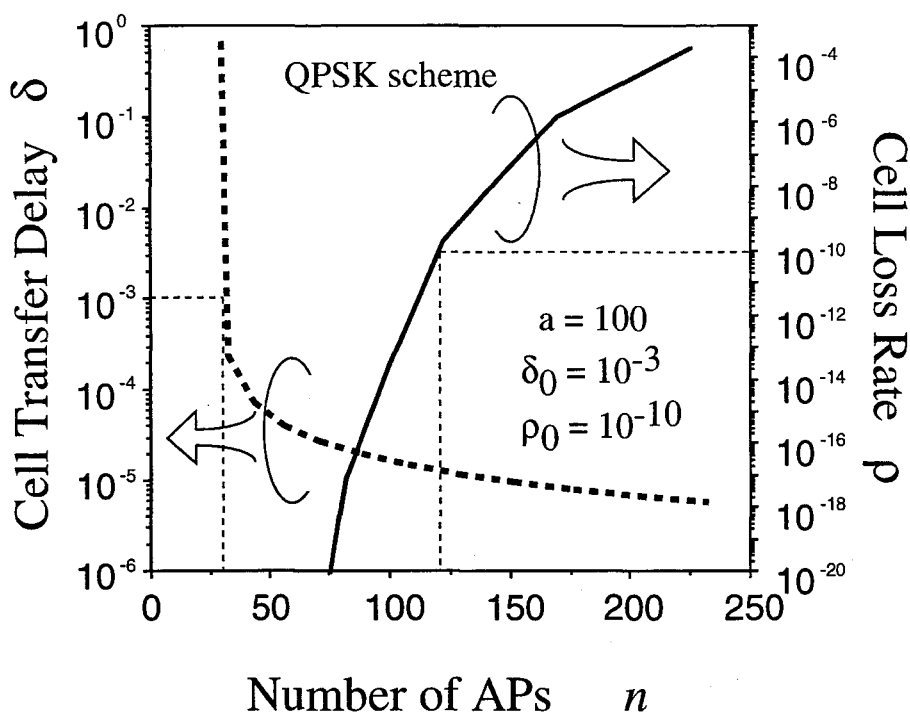


図 3.8: 基地局数に対するセル転送遅延とセル廃棄率特性

と、両方式とも要求セル廃棄率を満足できていないので、このグラフは基地局数が100以下の特性のみを示している。QPSK方式適用時に許容できるセル転送遅延を削減するには基地局数を大きくする必要がある。しかしながら、MLCR方式を適用した場合、基地局数を増大させずに、許容セル転送遅延を小さくすることができる。基地局数が36の場合、QPSK方式適用時の許容セル転送遅延は 2×10^{-4} 秒であるが、MLCR方式適用時の許容セル転送遅延は 2×10^{-5} 秒と約10倍改善されている。また、サービスがセル転送遅延 $\delta_0 = 10^{-3}$ 秒を要求した場合、ユーザ数を100人収容させるためには、QPSK方式適用時では少なくとも36基の基地局が必要となるが、MLCR方式適用時では9基の基地局のみで収容することができる。

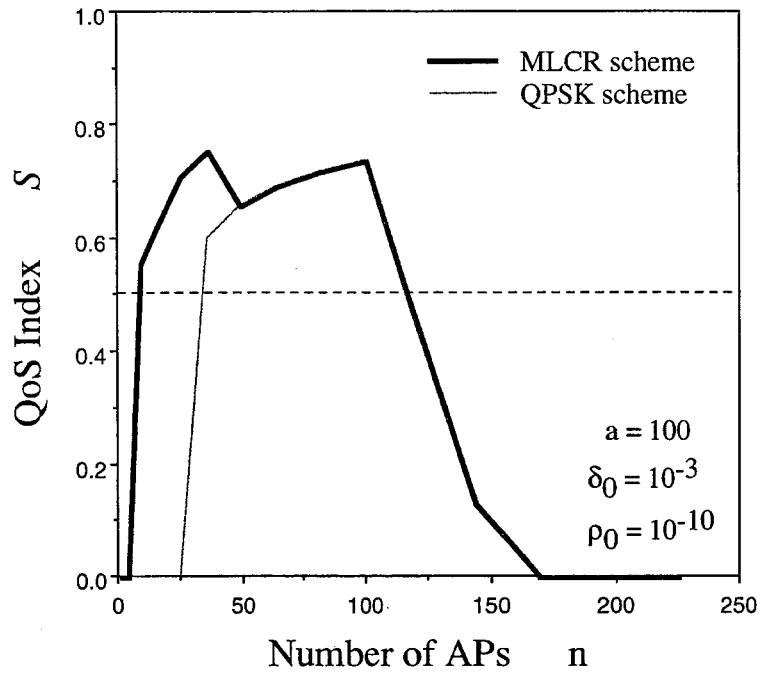


図 3.9: 基地局数に対する QoS 指数の特性

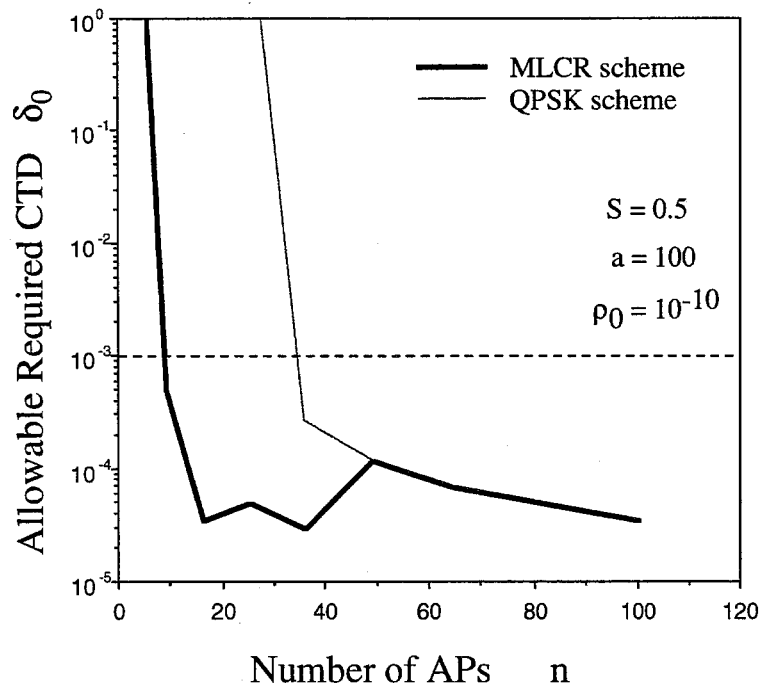


図 3.10: 基地局数に対する許容可能セル転送遅延特性

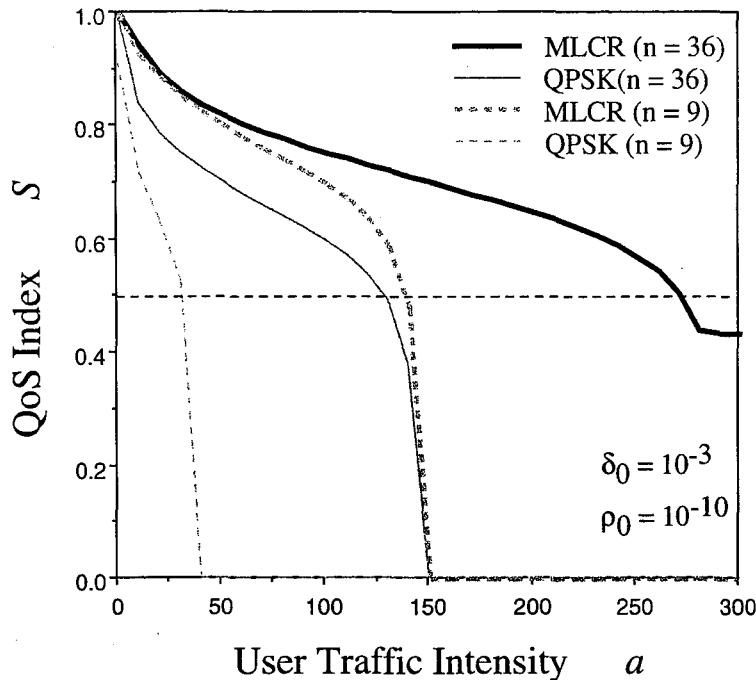


図 3.11: トラヒック量に対する QoS 指数

図 3.11 に基地局数を変化させた場合の、サービス要求が $\delta_0 = 10^{-3}$ 秒、 $\rho_0 = 10^{-10}$ におけるトラヒック量に対する QoS 指数の特性を示す。図 3.11 より、各基地局数において、トラヒック量が増加するとセル転送遅延が劣化して、QoS 指数が減少しているのが分かる。MLCR 方式適用時では、トラヒック量が増加すると、使用する多値数を大きくしてセル転送遅延を改善するため、QPSK 方式に比べて QoS 指数を改善することができる。そのため、MLCR 適用時に要求 QoS を満足しながら収容できるトラヒック量も QPSK 方式に比べて改善でき、基地局数が 9 のネットワークに MLCR 方式を適用した場合、QPSK 方式が適用されている基地局数が 36 のネットワークと同等のトラヒック量を収容することができる。

図 3.12 に、サービスがセル転送遅延を $\delta_0 = 10^{-3}$ 秒、セル廃棄率を $\rho_0 = 10^{-10}$ を要求する場合の、基地局数に対する要求品質を満たしながら収容することのできるトラヒック量の特性を示す。QPSK 方式適用時には、基地局数が 100 までは、基地局を増加させることによって伝送容量が増加するので、収容可能なトラヒック量が増加するが、基地局数が 121 以上になると、サービスの要求セル廃棄率が満足できないため、収容トラヒック量は 0 となる。よって、QPSK 方式適用時では、サービスの要求 QoS を満足させながら収容することのできるトラヒック量が最大となる最適ゾーン数は、100 となる。また、基地局数が 49 以下の時に MLCR 方式が QPSK 方式に比べて多くのトラヒック量を収容することが分かる。基地局

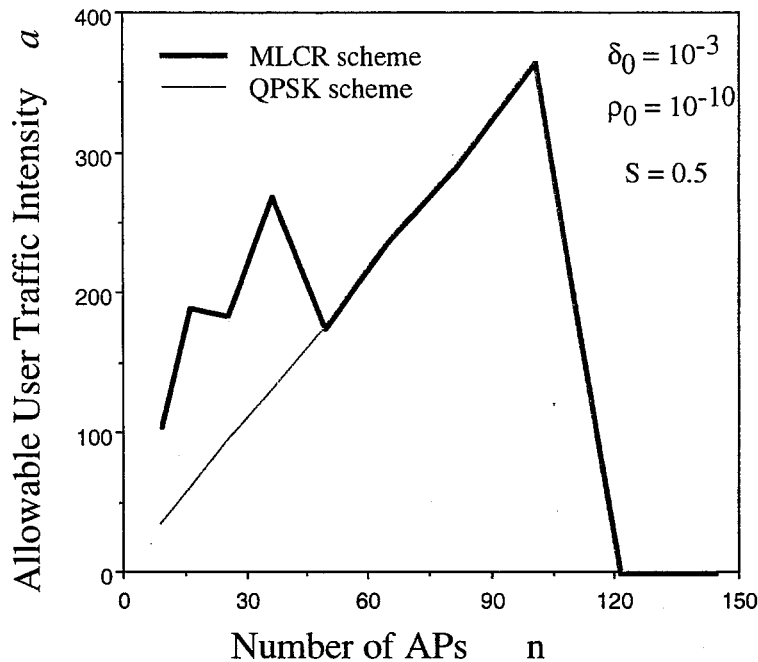


図 3.12: 基地局数に対する収容可能トラフィック量の比較

数が 36 の時、QPSK 方式は約 140 人のユーザを収容できるが、MLCR 方式はその 2 倍の約 280 人のユーザを収容することができる。また、MLCR 適用時の収容トラフィック量の特性が不規則であるのは、基地局数が少ないほど、干渉電力が小さく、高い多値数を使用するのに十分な電力マージンを有しているため、基地局数が小さいほど MLCR 方式が高い多値数を使用できるためである。MLCR 方式では、基地局数が 49 以上で QPSK 方式を用い、25 以上では 16QAM、9 以上では 64QAM 方式を用いることが可能となるため、各基地局での収容可能トラフィック量は異なる。

図 3.13 に、サービスが異なる QoS を要求する場合、基地局数に対する MLCR 方式適用時に各要求品質を満たしながら収容することのできるトラフィック量の特性を示す。サービスの要求セル転送遅延が大きいほど、各ユーザに割り当てられるリソースを削減できるので、収容トラフィック量は増加しているのが分かる。また、MLCR 方式では、要求セル廃棄が満足できる範囲で多値数を大きくできるため、サービスの要求セル廃棄率が大きいほど伝送容量を増大でき、収容トラフィック量を増大できる。例えば、サービス要求 (セル転送遅延, セル廃棄率) が $(\delta_0, \rho_0) = (10^{-3}, 10^{-3})$, $(10^{-1}, 10^{-10})$, $(10^{-3}, 10^{-10})$ の場合、MLCR 適用時の基地局数 49 のエンタランスネットワークには、それぞれ 380 人, 195 人, 180 人のユーザを収容することができる。

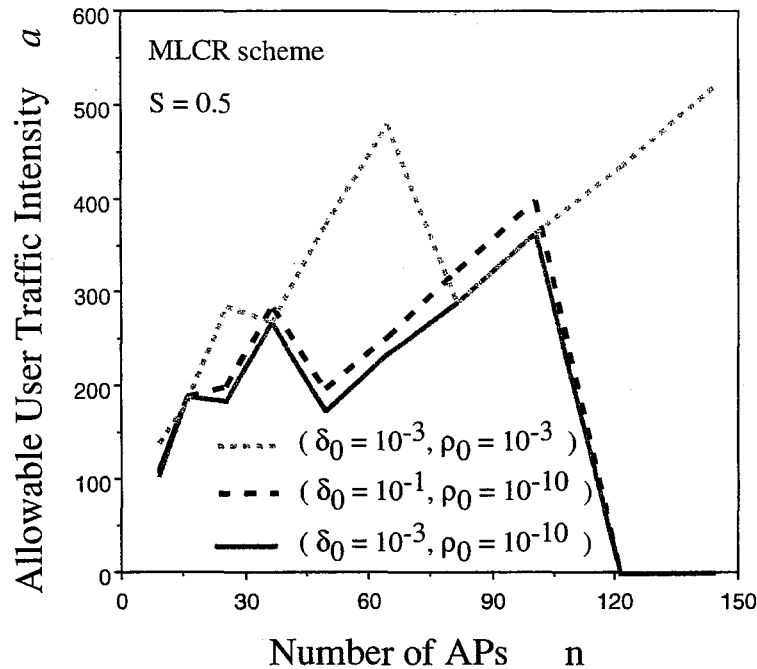


図 3.13: 要求 QoS が異なる場合の基地局数に対する収容可能トラヒック量

図 3.14 に、異なる QoS を要求するサービスが混在する場合の、基地局数に対する各要求品質を満たしながら収容することのできるトラヒック量の特徴を示す。A, B, C の 3 種類のサービスの混在している時の特性を示しているが、A, B, C 各サービスの要求は、 $(\delta_0, \rho_0) = (10^{-3}, 10^{-3}), (10^{-1}, 10^{-10}), (10^{-3}, 10^{-10})$ であり、サービス A は低セル転送遅延、中セル廃棄率、サービス B は中セル転送遅延、低セル廃棄率、サービス C は低セル転送遅延、低セル廃棄率を要求している。そして図には、それぞれのサービスの混在比率 A:B:C が、1:1:1, 3:3:1, 5:2:1 の時の MLCR 適用時の特性と 5:2:1 の時の QPSK 適用時の特性を示す。基地局数が 81 以上のとき、どのサービスに対しても MLCR 方式は変調多値数を小さくして QPSK 方式として動作するため、特性は QPSK 方式と同じになる。また、基地局数が 64 以下のとき、サービスの要求 QoS に応じて MLCR 方式は変調多値数を大きくし、伝送路容量を増大できるので、QPSK 方式に比べて収容トラヒック量を改善している。さらに、低セル廃棄率を要求しないサービスの存在比率が高いほど、MLCR 方式ではより大きな多値数が使用可能となるため、収容トラヒック量を改善することができることが分かる。基地局数が 64 の時には、サービス A, B, C の比率が 1:1:1 の時には約 320 人、3:3:1 の時には約 350 人、5:2:1 の時には約 390 人のユーザを収容することが可能となる。

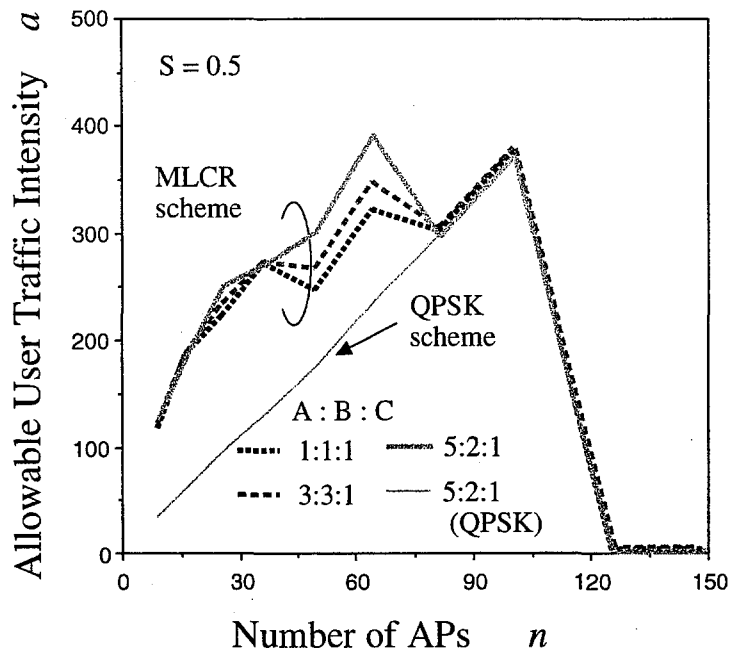


図 3.14: 異なる QoS を要求するサービス混在時の基地局数に対する収容可能トラフィック量

3.5 結言

本章では、迅速でかつ効率的に ATM エントランスネットワークを構築することを目的として、基地局と ATM 基幹網を接続するエントランスリンクに無線伝送路を用いたスター型無線 ATM エントランスネットワーク構成を提案した。

まず、要求される QoS と無線 ATM エントランスネットワークのゾーン構成との関係について検討し、ゾーン構成によって満足できる QoS が異なることを明らかにし、次に次元の異なる複数の通信品質を統合的に評価するために QoS 指数と呼ぶ指標を新たに定義した。

セル転送遅延とセル廃棄率の二つのサービスの要求通信品質に着目し、様々なゾーン構成に対する QoS 指数について理論解析を行い、無線 ATM エントランスネットワークのゾーン構成について検討した。以下に検討結果を総括する。

- 基地局数を増加させ、ゾーンを小さくすると、伝送容量が増加しセル転送遅延を小さくできるが、エントランスリンク間の干渉電力が増加し、セル廃棄率が増加することを理論解析によって明らかにした。
- 理論解析により得られた QoS 指数特性から、QPSK 方式と MLCR 方式適用時の要求

QoS を満足する基地局数が判明し、MLCR 方式は QPSK 方式に比べて 25 基少ない基地局で要求 QoS を満足させるネットワークを構築できることを明らかにした。

- 要求 QoS を満たしながら最も収容トラフィック量を大きくできる最適ゾーン構成が判明し、例として、セル転送遅延 10^{-3} 秒、セル廃棄率 10^{-10} を要求するサービスを収容する場合、QPSK 方式適用時に、一辺 200 [m] の正方形サービスエリア内の最適ゾーン数は 100 となった。
- 複数の異なる QoS を要求するサービス混在時では、中程度のセル廃棄率 (10^{-3}) を要求するサービスの存在比率が高い程、MLCR 方式適用時の収容トラフィック量改善効果が高くなり、存在比率が $5/8$ の時、存在比率 $1/3$ と比較して、約 100 人多くユーザを収容できることを明らかにした。

第4章

QoS と干渉電力を考慮した電力多値数可変無線伝送方式

4.1 序言

本章では、基地局と ATM 基幹網を接続するエントランスリンクを無線伝送路で構築した場合の変調方式について検討を行う。

エントランスリンクを無線伝送路で構築する無線エントランスネットワークでは、基地局の数が増大すると、それらを接続する無線エントランスリンクの数も増加する。エントランスリンクに使用できる周波数帯域幅が限られているので、広帯域伝送を保証するためには、他のエントランスリンクと空間的に分割したり、エントランスリンクに周波数帯を繰り返し利用して割り当てる必要がある。その場合、同じ周波数帯を用いたエントランスリンクが増え、エントランスリンク間の同一チャンネル間干渉が増大し、問題となってくる。

一方、無線エントランスリンク上を ATM セルが伝送される場合、セルトラヒック変動が大きくなる。適応的に伝送路容量を変化できる多値数可変無線伝送方式がセルのトラヒック変動を柔軟に吸収できる効果があるが、平均送信電力が多値数によらず一定であるため [54]、トラヒック量の少ないときは、余分な電力を用いて伝送を行っており、干渉電力を増大する要因となる。

そこで本章では、干渉電力を削減できる変調方式として、電力多値数可変無線 (PMLCR: Power and Modulation Level Controlled Radio) 伝送方式を新たに提案する。本方式は、トラヒック量に応じて変調多値数を変化させるだけでなく、使用する変調多値数に応じて、サービスの要求する品質を満たす範囲で送信電力を小さくして伝送を行う方式である。よってトラヒック量の少ないときには、小さい多値数を使用するため、送信電力を小さくでき、干渉電力を低減することが可能となる。

干渉電力を考慮したセル廃棄率の理論解析により、送信電力を制御しない従来の多値数可

変無線伝送方式と比較して、本提案伝送方式が干渉電力低減効果を有し、干渉電力に強い無線 ATM エントランスネットワークを構築できることを明確にする。

4.2 無線 ATM エントランスネットワークの構成

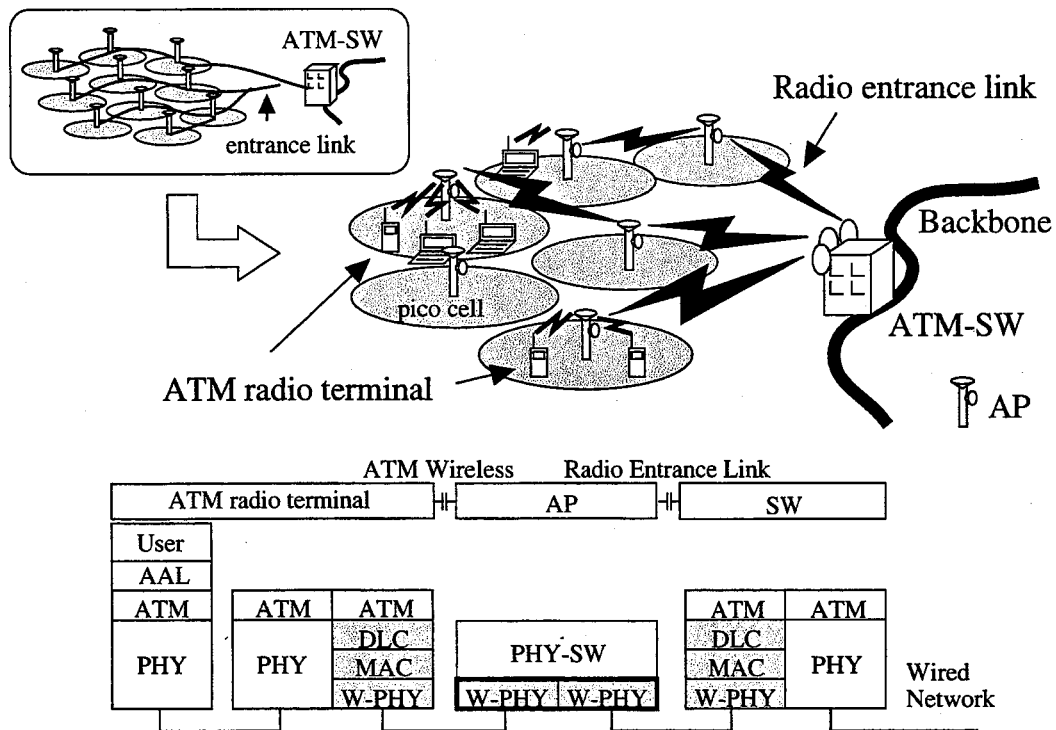


図 4.1: 無線 ATM エントランスネットワークの概念

図 4.1に基地局 (AP: Access Point) と ATM 交換機 (ATM-SW) を接続するエントランスリンクを全て無線伝送路で接続した無線 ATM エントランスネットワークとそのプロトコル構成を示す。図 4.1の左上に示している従来の ATM アクセスネットワークでは、光ファイバ等の有線伝送路で構築されたエントランスリンクに標準 ATM 伝送プロトコルが用いられている。そして基地局において、図 2.3に示す、DLC, MAC レイヤを含む無線 ATM 伝送プロトコルへ変換し、無線 ATM 端末と基地局間の通信を行っている。一方、全てのエントランスリンクが無線伝送路で構築されている無線 ATM エントランスネットワークでは、端末から ATM-SW までが無線伝送路で接続されているので、標準 ATM プロトコルからアクセス無線 ATM プロトコルの変換は ATM-SW で行われるようにプロトコルを構成している。その場合、アクセスリンクのチャンネル割り当ても ATM-SW で行うことになり、アクセスリンクで使用された MAC フレームが、そのままエントランスリンクに伝送される。このプロトコ

ル構成によって、アクセスリンクだけでなく、エントランスリンクでの伝送路誤り等にも柔軟に対応することが可能となる。また、無線 ATM エントランスネットワークを用いてより多くの伝送路容量を得るためには、さらに多くの基地局を接続させる必要があるが、そのためには一つの基地局のコストを低くし、基地局の信頼性を高めることが重要となる。そこで、基地局は、周波数変換や送信電力制御機能のみを持った非再生中継機として構築することを考える。その場合、上りリンクではまず無線信号はアクセスリンク上を無線 ATM 端末から基地局へ伝送される。そして、基地局ではアクセスリンクの使用周波数帯からエントランスリンクの使用周波数帯への周波数変換とエントランスリンクへの送信する時の電力制御が行われる。エントランスリンク上を伝送してきた無線信号は、ATM-SW で復調される。この場合、アクセスリンクとエントランスリンクでは同じ変調方式が用いられる。無線伝送路を用いてエントランスリンクを構築し、簡易構成の基地局を用いることによって、より広いエリアをカバーするために基地局を簡単に増加でき、無線 ATM エントランスネットワークを効率的に構成することができる。

さらに本無線 ATM エントランスネットワークでは、MAC レイヤを用いることによって、使用チャネルおよび使用エントランスリンクの割り当てを変化させることができ、一つのエントランスリンクへのトラフィック集中を避けることが可能となる。

しかしながら、図 4.1 に示す無線 ATM エントランスネットワークでは、無線エントランスリンク間の相互干渉が存在し、基地局数が多くなるに従い、干渉電力によって所望信号の受信品質が大幅に劣化することが考えられる。そこで、無線 ATM エントランスネットワークを実現させるためには、干渉電力を削減できる新しい通信方式の開発が必要となる。

4.3 電力多値数可変無線伝送方式の原理

図 4.2 に示すように多値数可変無線 (MLCR: Modulation Level Controlled Radio) 伝送方式は、変調方式に 2^{2n} -QAM 方式 ($n=1,2,3,4$) を用いている。そして、ATM セルトラフィック変動に応じて動的に多値数を変化させ、伝送路容量を増減させることができる。しかしながら、図 4.2 に示すように、従来の MLCR 方式では変調多値数が最大の時にサービスの要求するセル廃棄率を満足できるように、大きなマージンをもった送信電力を用いて伝送を行っている [38][54]。そのため、収容トラフィック量が少なく、使用多値数が小さい時では、余剰電力を用いた伝送になっている。同一周波数を用いる無線 ATM エントランスリンク間では相互干渉が問題となるが、MLCR 方式では不必要な送信電力によって与干渉電力を増大させている。

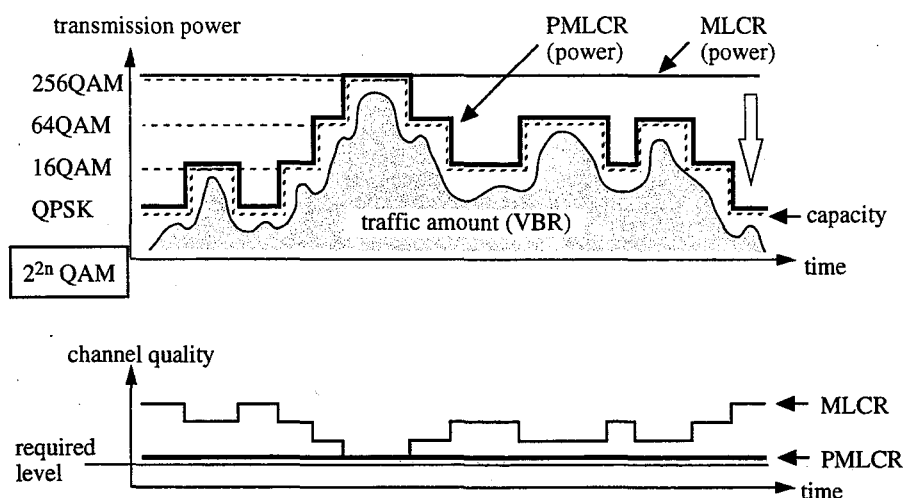


図 4.2: 電力多値数可変無線伝送方式 (PMLCR) の原理

この問題を解決するために、本章では新たに電力多値数可変無線 (PMLCR: Power and Modulation Level Controlled Radio) 伝送方式を提案する。図 4.2 に示すように、本方式はトラヒック変動に応じて変調多値数を変化させるだけではなく、多値数が小さいときには、サービスの要求するセル廃棄率を満足できる範囲内で送信電力を小さくする方式である。本方式により、ATM トラヒック変動を吸収しセル廃棄率を満足しつつ、かつエントランスリンク間の与干渉電力を削減することが可能となる。

本章では、無線伝送路上で以下の二つのセル廃棄が起こると仮定する。

- **トラヒックセル廃棄** : トラヒック量が送信機のバッファ容量を越えることによって起こる廃棄
- **無線セル廃棄** : 無線伝送路上のビット誤りに起因した ATM セルヘッダの誤りによって起こる廃棄

トラヒックセル廃棄と無線セル廃棄の起こる確率過程は互いに独立過程と考えられるので、無線伝送路上のセル廃棄率 (CLR: Cell Loss Rate) P_c は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 P_c &= 1 - (1 - P_t)(1 - P_r) \\
 &= P_t + P_r - P_t \cdot P_r
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ここで、 P_t はトラヒックセル廃棄率、 P_r は無線セル廃棄率を表している。サービスの要求するセル廃棄率が P_d であった場合、要求 QoS を満足させるためには $P_c < P_d$ を満たす必要がある。従来の MLCR 方式では、多値数を大きくするとトラヒックセル廃棄率 P_t は小さくなるが、無線セル廃棄率 P_r は大きくなるため、セル廃棄率 P_c を最小にする最適な多値数

を用いて伝送を行っている。その場合、 P_t と P_r はほぼ同じオーダーの値となっている [38]。従って PMLCR 方式でもトラヒックセル廃棄率と無線セル廃棄率はそれぞれ同じオーダーの値と考えられ、 $P_c < P_d$ を満たすため、 $P_t < 0.5 \cdot P_d$ と $P_r < 0.5 \cdot P_d$ となるように多値数及び電力を制御するものとする。

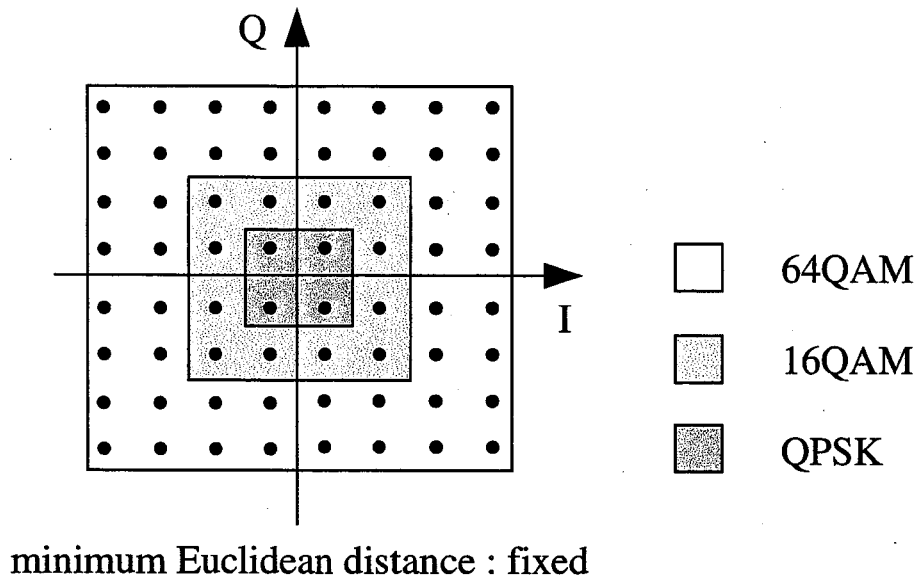


図 4.3: PMLCR 方式の信号点配置

次に PMLCR 方式の多値数制御方法について説明する。本方式では、送信機において、使用する変調多値数はトラヒック量に応じて決定される。送信機では、バッファに到着する ATM セルを観測しており、制御周期で到着セルレートの情報を得ることができる。その観測された到着セルレートに従い、式 (4.2) に示すように、要求セル廃棄率の 0.5 倍より小さいトラヒックセル廃棄率を得ることのできる最小の多値数、つまり要求トラヒックセル廃棄率を満足させることのできる最小の多値数 n_0 を導出する。

$$n_0 = \min_i \{i; P_t(i) < 0.5 \cdot P_d, (i = 1, 2, 3, 4)\} \quad (4.2)$$

この時導出された多値数 n_0 を使用して伝送を行った場合、他の大きな多値数を用いて伝送を行った場合と比較して、最も伝送路誤りに強い伝送が実現できる。PMLCR 方式では、導出された多値数 n_0 を用いて伝送を行う。

次に PMLCR 方式の送信電力制御について説明する。平均送信電力を常時一定にして伝送を行っていた MLCR 方式とは異なり、図 4.3 に示すように、提案する PMLCR 方式は、各多値数を使用した時に、最小ユークリッド距離を一定にするように送信電力制御を行う。つ

まり PMLCR 方式では、各変調多値数において以下の式を満たすように送信電力が制御される [53].

$$\gamma_{req}(n_0) = \frac{2^{2n_0} - 1}{255} \gamma_{256} \quad (4.3)$$

ここで、 γ_{req} は所要受信搬送波対雑音電力 (CNR: Carrier to Noise power Ratio) を表し、 γ_{256} は 256QAM 変調方式を用いた場合の所望品質を満たすことのできる所要受信 CNR である。以上のような電力制御を行うことによって、PMLCR 方式がどの多値数を用いた場合でも受信品質はサービスの要求 QoS を満足させることが可能となる。

4.4 セル廃棄率の理論解析

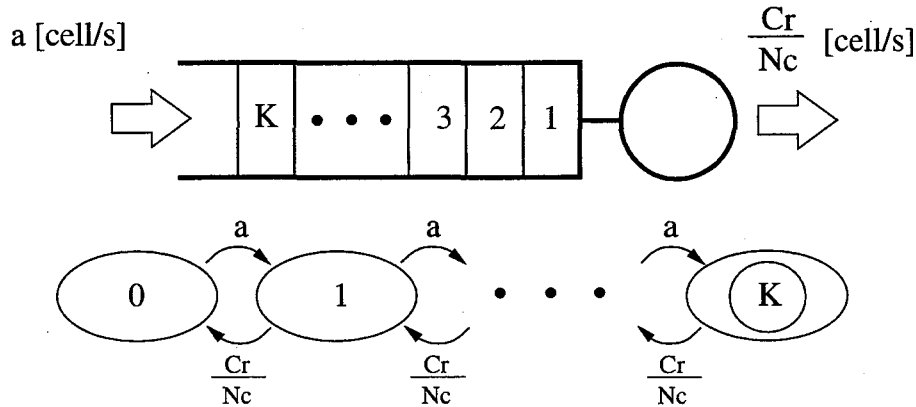


図 4.4: 送信機のバッファモデル

図 4.4 に示すようにユーザ端末にはサイズ K セル個のバッファを用意すると仮定する。このバッファモデルを用いた場合、多値数 n を用いた時のトラヒックセル廃棄率 $P_t(n)$ は、待ち合わせる ATM セルの数がバッファサイズ K になる確率として与えられ、入力レート a 、出力レート $C_r(n)/N_c$ の M/M/1/K の待ち行列モデルを仮定すると、以下の式で表される。

$$P_t(n) = \frac{\left(\frac{a \cdot N_c}{C_r(n)}\right)^{K+1} \left(1 - \frac{a \cdot N_c}{C_r(n)}\right)}{1 - \left(\frac{a \cdot N_c}{C_r(n)}\right)^{K+1}} \quad \left(\frac{a \cdot N_c}{C_r} < 1\right) \quad (4.4)$$

ここで、 a は到着する ATM セルのレート [cell/s] を表し、 N_c は一つの ATM セルに含まれるビット数を表している。また $C_r(n)$ は多値数 n を用いた場合の無線伝送路の伝送路容量であり、以下の式で与えられる。

$$C_r(n) = \frac{2n}{T} = \frac{2nW}{1 + \alpha} \quad [\text{bps}] \quad (4.5)$$

ここで、 T はシンボル時間、 W は無線帯域幅、 α はロールオフ率である。

ATM-SW で得られる各無線信号はアクセスリンクで受けたフェージングによって受信電力は変動し、受信品質は劣化していると仮定する。ここで、フェージングモデルを移動体通信環境で良く用いられているレイリーフェージングモデルを仮定する。その場合、無線セルサイズは小さく設計されており、アクセスリンクでの遅延スプレッドは非常に小さいと考えられ、さらに ATM-SW の復調器に用意される等価器等の遅延波抑圧技術によって、周波数選択性のフェージングは発生しないと考えられる。よって、本解析では、アクセスリンクのフェージングチャンネルモデルを周波数非選択性のレイリーフェージングチャンネルとしてモデル化する。一方、エントランスリンクでは見通しパスが形成されており、指向性の高いアンテナを用いていることにより、フェージングは発生しないと考えられ、エントランスリンクを AWGN チャンネルとしてモデル化する。その結果、アクセスリンクでフェージングを受けた信号がそのままエントランスリンク上を伝送するので、ATM-SW の復調側ではその信号は周波数非選択性フェージングチャンネルを伝送してきたとみなすことができる。よって以下の誤り率の解析では、周波数非選択性フェージング下における受信信号電力変動を考慮した解析を行う。

無線伝送路上でのビット誤りに対して強化するため、無線 ATM セルヘッダに誤り訂正符号である FEC(Forward Error Control) コードを適用することを考える。この技術により、無線伝送路上のビット誤りに起因する無線セル廃棄率 P_r を改善することが可能となる。FEC コードが t ビット訂正可能である場合を考えると、無線セル廃棄率は無線 ATM セルヘッダ中のビットのうち、 t ビットより多くのビットが誤る確率と定義できる。その場合、多値数 n を用いた多値数可変無線伝送方式適用時の無線セル廃棄率 $P_r(n)$ は次式で表される。

$$P_r(n) = \sum_{i=t+1}^{n_h} n_h C_i (1 - \beta(n))^{n_h-i} \cdot \beta(n)^i \quad (4.6)$$

ここで、 n_h は無線 ATM セルヘッダ長 [bit] を表している。また、 $\beta(n)$ は多値数 n を用いたときのレイリーフェージング下におけるビット誤り率であり、次式で表される。

$$\beta(n) = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2(2^{2n} - 1)}} \cdot \gamma \right) p(\gamma) d\gamma \quad (4.7)$$

ここで、 $p(\gamma)$ は受信 CNR の確率密度関数であり、以下のレイリー分布で与えられる。

$$p(\gamma) = \frac{1}{\gamma_{req}} \exp \left(-\frac{\gamma}{\gamma_{req}} \right) \quad (4.8)$$

また、 $\operatorname{erfc}(x)$ は誤差補関数を表している。式 (4.7) と (4.8) から、フェージングチャンネルでの

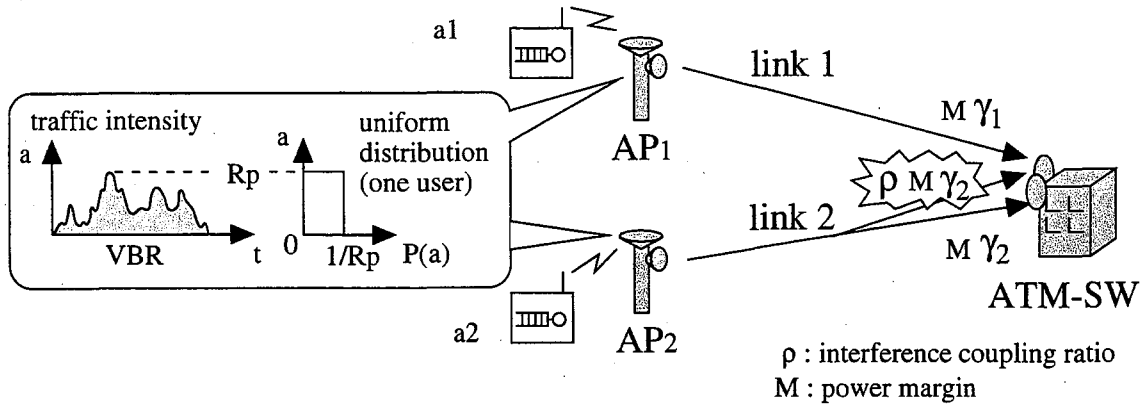


図 4.5: エントランスリンク間の干渉モデル

ビット誤り率は次式のように書き換えられる。

$$\beta(n) = \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) \left(1 - \left(1 + \frac{2(2^{2n} - 1)}{3\gamma_{req}}\right)^{-\frac{1}{2}}\right) \quad (4.9)$$

図 4.5 に解析に用いたエントランスリンク間の干渉モデルを示す。図 4.5 に示すように、link 1 と link 2 の二つのエントランスリンクが存在していると仮定し、非所望エントランスリンクの受信電力に干渉電力比 ρ を乗じた電力が干渉電力として所望エントランスリンクに洩れ込むと仮定する。 ρ の大きさは、アンテナの指向性や基地局の位置等によって決ってくるが、アンテナの指向性が高かったり、隣接基地局間の距離が大きく、エントランスリンク間の角度が広いと ρ の値は小さくなる。例えば、一辺の大きさが 50cm の開口方形アンテナを用いた場合、 ρ は式 (3.5) を用いて $\rho = G(\theta)/G(0)$ と表され、使用周波数帯が 30GHz の時、約 10 度の角度で $\rho = -40$ dB、約 20 度の角度で $\rho = -50$ dB となる。

今、link 1 上で使用する無線帯域幅は link 2 上で使用する無線帯域幅と同じ広さと仮定する。その場合、ATM-SW で受信する CNIR Γ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Gamma(n_1, n_2) &= \frac{C}{N+I} = \frac{C/N}{1+I/N} \\ &= \frac{M\gamma_1(n_1)}{1+M\rho\gamma_2(n_2)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

ここで、 M は送信電力マージンであり、 n_1 と n_2 はそれぞれ link 1 と link 2 で使用する変調多値数である。また、 $\gamma_1(n_1)$ と $\gamma_2(n_2)$ はそれぞれ link 1 と link 2 における ATM-SW での受信 CNR を表している。 $\gamma_1(n_1)$ と $\gamma_2(n_2)$ は式 (4.3) によって与えられる。

PMLCR 方式適用時には、式 (4.3) から分かるように送信電力は使用する変調多値数によって変化している。また、使用する変調多値数は式 (4.2) と式 (4.4) から分かるように ATM セル

の到着レートによって決定される。その結果、ATMセルの到着レートが変動すれば、それに従って送信電力も変化することになる。その場合、変調多値数 n_1 を用いたときの ATM-SW における所望エンタランスリンク link 1 の平均受信 CNIR は以下の式で表される。

$$\Gamma_{ave}(n_1) = \int_0^{R_p} \Gamma(n_1, n_2) p(a_2) da_2 \quad (4.11)$$

ここで、 R_p はサービスの送出する ATMセルのピークレートを表しており、 a_2 は link 2 の干渉エンタランスリンク上の ATMセル送出レート、 $p(a_2)$ は a_2 の確率密度関数を表している。

所望エンタランスリンク link 1 の干渉電力影響下でのビット誤り率 $\beta'(n_1, n_2)$ は次式で表される。

$$\beta'(n_1, n_2) = \int_0^\infty \left(1 - \frac{1}{2^{n_1}}\right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3}{2(2^{2n_1} - 1)}} \cdot \gamma \right) p(\gamma) d\gamma \quad (4.12)$$

ここで、 $p(\gamma)$ は受信 CNR の確率密度関数である。受信信号がレイリーフェージングを受けているとした場合、その受信電力の確率密度関数 $p(\gamma)$ は指数分布に従い、以下の式で与えられる。

$$p(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(n_1, n_2)} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma(n_1, n_2)}\right) \quad (4.13)$$

ここで、 n_1, n_2 はそれぞれ link 1 と link 2 の使用多値数である。

本解析では、無線 ATMセルヘッダを伝送路誤りに強くし、無線セル廃棄率 P_r を改善させるために、FECコードを無線 ATMセルヘッダに適用する。適用する FECコードが t ビットの誤りを訂正できる能力を持つと仮定すると、無線セル廃棄率は無線 ATMセルヘッダ中のビットのうち t ビットより多く誤る確率と考えられる。よって、エンタランスリンク間の干渉電力影響下での無線セル廃棄率 $P_r(n_1, n_2)$ は、

$$P_r(n_1, n_2) = \sum_{i=t+1}^{n_h} n_h C_i \cdot \beta'(n_1, n_2)^i \cdot (1 - \beta'(n_1, n_2))^{n_h - i} \quad (4.14)$$

となる。

所望エンタランスリンク link 1 と干渉エンタランスリンク link 2 での ATMセルのトラフィック変動を考慮に入れ、 a_1, a_2 をそれぞれ link 1 と link 2 の ATMセル送出レートとし、それぞれの確率密度関数を $p(a_1), p(a_2)$ とすると、干渉電力影響下における link 1 での平均セル廃棄率 $P_{c,ave}$ は

$$P_{c,ave} = \int_0^{R_p} \int_0^{R_p} P_c(n_1, n_2) p(a_1) p(a_2) da_1 da_2 \quad (4.15)$$

で与えられる。ここで、 $P_c(n_1, n_2)$ は link 1 のセル廃棄率であり、

$$P_c(n_1, n_2) = 1 - (1 - P_i(n_1)) \cdot (1 - P_r(n_1, n_2)) \quad (4.16)$$

で与えられる。本解析では、図 4.5 に示すように $p(a_1)$ と $p(a_2)$ の確率密度関数は両方とも一様分布に従うと仮定し、ATMのVBRサービスのトラフィック変動をモデル化する。

4.5 干渉電力削減効果

表 4.1 に干渉電力影響下でのセル廃棄率特性の理論解析に用いた諸定数を示す。無線 ATM セルは、無線帯域幅を有効に利用するために 4 バイトに圧縮されたヘッダと 48 バイトのペイロードと 30 ビットの冗長ビットで構成されており、無線 ATM セル長は $N_c = 446$ ビットとなる。冗長ビットは 5 ビット誤り訂正可能な FEC コードであり、この場合、BCH(62,32) コードを用いて実現している。

表 4.1: セル廃棄率の理論解析に用いた諸定数

無線帯域幅	W	10 MHz
サービスピークレート	R_p	10 Mbps
バッファサイズ	K	5 cells
無線 ATM セル長	N_c	446 bits
圧縮された無線 ATM セルヘッダ長	n_h	32 bits
FEC 訂正可能ビット	t	5 bits
ロールオフ率	α	0.0

まず初めに、干渉電力が存在しない場合の PMLCR 方式のセル廃棄率および受信 CNR の特性を示す。図 4.6 にサービスの要求セル廃棄率 P_d が 10^{-5} の時の正規化された ATM セル到着レートに対する受信セル廃棄率を示す。この図には、従来の QPSK 方式と MLCR 方式と提案する PMLCR 方式の特性を示している。図 4.6 より、ATM セルのトラヒック量が多くなった場合、QPSK 方式では、伝送路容量が小さいため、トラヒックセル廃棄率が增大し、要求セル廃棄率を満足できないのが分かる。しかしながら、変調多値数を可変できる MLCR 方式と PMLCR 方式では、トラヒック量が增大しても、使用する変調多値数を大きくし、伝送路容量を増大できるので、セル廃棄率は要求セル廃棄率以下にすることが可能となる。同じ条件下で多値数を変化させているので、PMLCR 方式と MLCR 方式のトラヒックセル廃棄率は同じであるが、トラヒック量が小さいときに、PMLCR 方式が MLCR 方式に比べてセル廃棄率が悪化している。これは、小さい多値数を使用した場合、PMLCR 方式が MLCR 方式に比べ小さい送信電力を用いて送信を行っているため、PMLCR 方式の無線セル廃棄率が MLCR 方式の無線セル廃棄率と比較して悪化しているためである。そのため、無線セル廃棄率が統合セル廃棄率に対して支配的である時に、PMLCR 方式は MLCR 方式に比べてセル廃棄率は悪化している。また、図 4.6 より、セル廃棄率は最大変調多値数を用いていると

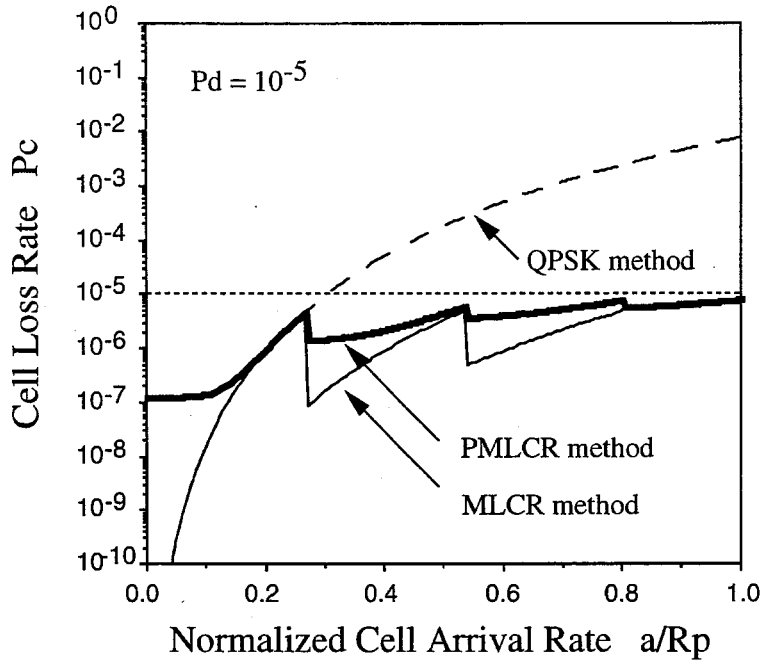


図 4.6: 正規化された ATM セル入力レートに対するセル廃棄率

きに最も悪化することが分かる。これは、変調多値数が大きい程、フェージングの影響を大きく受け誤りが発生しやすく、無線セル廃棄率が悪化するためである。しかしながら、様々なトラヒック量が発生している場合でも、PMLCR 方式ではサービスの要求するセル廃棄率である 10^{-5} を満足しており、高品質な伝送が実現できていることが分かる。

図 4.7 に、サービスの要求するセル廃棄率 P_d が 10^{-5} の時の、正規化された ATM セル入力レートに対する所要受信 $\text{CNR}_{\gamma_{req}}$ dB の特性を示す。従来の MLCR 方式適用時では、各変調多値数を用いた場合でも送信電力を一定にして送信しているため、所要受信 $\text{CNR}_{\gamma_{req}}$ はどのトラヒック量 a に対しても同じになっている。一方、提案する PMLCR 方式適用時では、使用変調多値数によって送信電力を変化できるので、所要受信 $\text{CNR}_{\gamma_{req}}$ はトラヒック量 a が小さくなるにつれて、減少する。PMLCR 方式では、正規化トラヒック量 a/R_p が 2.8 以下であれば、QPSK 方式として動作し、2.8 以上 5.0 以下であれば 16QAM 方式として、5.0 以上 8.0 以下では 64QAM 方式として、8.0 以上であれば 256QAM として動作し、多値数が小さいときに所要電力を削減できることが分かる。例えば、QPSK 方式動作時では、約 20 dB 所要受信電力削減することが可能となる。また、図 4.6 と図 4.7 から、提案する PMLCR 方式は、ATM セルトラヒック量が小さいときに要求セル廃棄率を満たしながら送信電力を削減できていることが分かる。

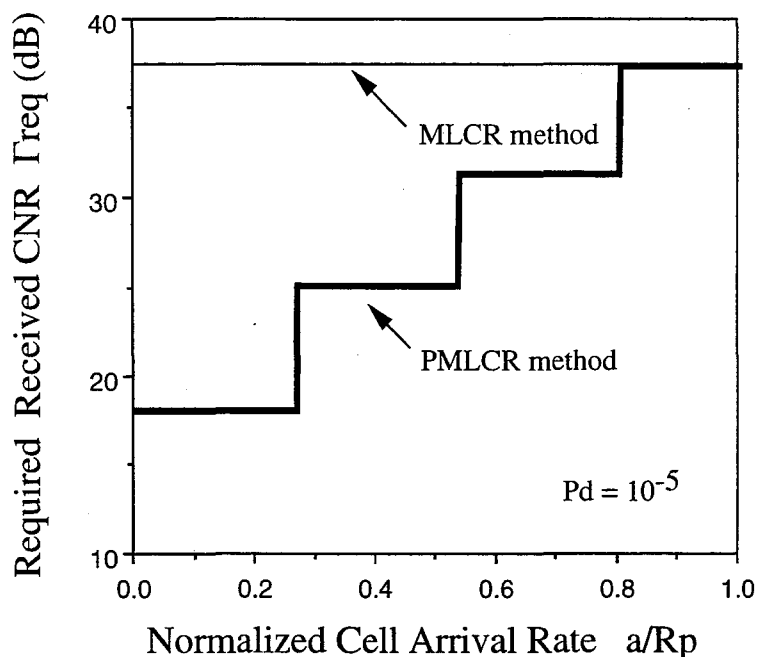


図 4.7: 正規化された ATM セル入力レートに対する受信電力

図 4.8 に、干渉エントランスリンク存在下での、様々なサービスの要求セル廃棄率における、干渉電力比 ρ に対する干渉エントランスリンクのトラヒック量で平均化した平均受信 CNIR Γ_{ave} の特性を示す。この図の場合、所望エントランスリンクで使用している変調多値数 n_1 は最大多値数とし、電力マージンは $M = 0$ としている。図より、干渉電力比 ρ が -100 dB の干渉電力が非常に小さい場合では、PMLCR 方式適用時の平均受信 CNIR と MLCR 方式適用時のそれは共に等しくなることが分かる。一方、 ρ の値が大きく干渉電力が大きい場合は、PMLCR 方式は MLCR 方式と比べて平均 CNIR を改善することができる。これは、PMLCR 方式適用時の非所望エントランスリンクの干渉電力が、使用多値数 n_2 に従って変化しており、小さい変調多値数を使用している時に干渉電力が MLCR 方式適用時の干渉電力に比べて小さいためである。

図 4.9 に、平均送信電力を一定にした場合の各送信電力マージン M における、干渉電力比 ρ に対する平均セル廃棄率 $P_{c,ave}$ を表している。また、要求セル廃棄率を 10^{-5} とし、MLCR 方式が最大多値数で要求を満足できるように平均送信電力を 38 dB としている。両方式とも干渉電力比が大きくなると干渉電力が大きくなるので、平均セル廃棄率は悪化しているのが分かる。また、PMLCR 方式が MLCR 方式に比べて、各送信電力マージンにおいて、干渉電力影響下で平均セル廃棄率を改善していることが分かる。またこの図より、要求セル廃棄

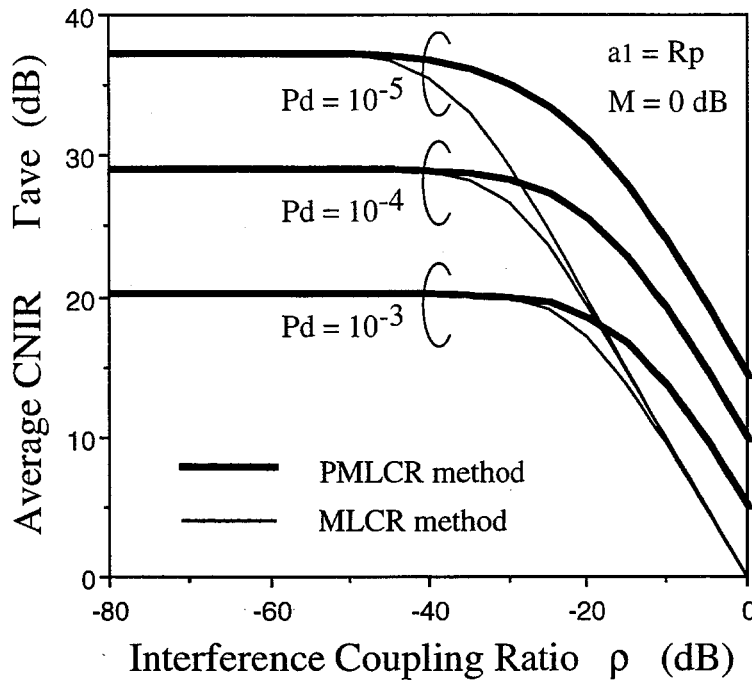


図 4.8: 干渉電力比に対する平均搬送波対雑音干渉電力比

率 10^{-5} を満足できる許容干渉電力比も提案 PMLCR 方式が MLCR 方式と比較して改善していることが分かる。例えば、送信電力マージンが M が 0 dB の時、PMLCR 方式は MLCR 方式に比べて約 10 dB 許容干渉電力比を大きくすることができ、また M が 5 dB の時は約 5 dB 大きくすることができ、PMLCR 方式が干渉に非常に強い方式であることが分かる。許容干渉電力比を改善できるということは、指向性の低いアンテナを使用することができることを表しており、PMLCR 方式適用時にはより小さいアンテナを使用することが可能となる。また基地局数が多くなると干渉電力が大きくなるが、PMLCR 方式適用時には許容干渉電力比が改善されるため、MLCR 方式に比べて、多くの基地局をサービスエリア内に設置することが可能となる。

4.6 結言

本章では、基地局と ATM 基幹網を接続するエントランスリンクを無線伝送路で構築した場合に問題となるエントランスリンク間の相互干渉電力を削減することを目的として、新たな変調方式の検討を行った。

まず、変調多値数をトラヒック量に応じて変化させ、ATM セルのトラヒック変動を柔軟

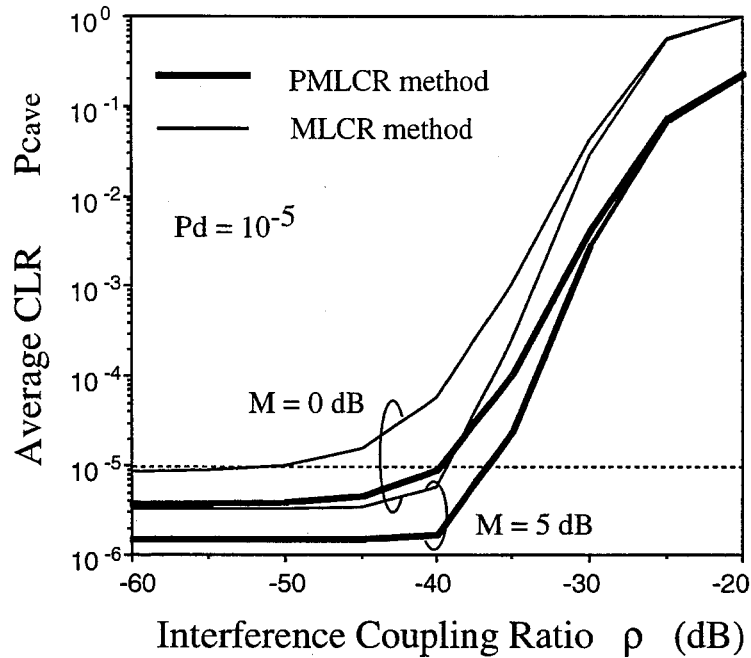


図 4.9: 干渉電力比に対する平均セル廃棄率

に吸収する MLCR 方式を改良し、変調多値数を変化させるだけでなく、その多値数に応じて、サービスの要求 QoS を満たす範囲内で送信電力を変化させる PMLCR 方式を提案した。さらに、本方式の干渉電力削減効果を明らかにするため、干渉電力影響下におけるセル廃棄率特性について理論解析を行った。得られた結果を以下に総括する。

- PMLCR 方式は MLCR 方式と比べて、要求セル廃棄率を満足させながら送信電力を削減することが可能であることを示唆した。例として、トラフィック量が少なく、多値数の小さい QPSK 方式を採用している場合、PMLCR 方式は MLCR 方式と比べて約 20 dB 送信電力を削減可能であることを明らかにした。
- PMLCR 方式は送信電力を削減することによって、エントランスリンク間の与干渉電力を削減することが可能となるので、干渉電力影響下では MLCR 方式と比較して、受信 CNIR が大きく改善されることを明らかにした。
- PMLCR 方式は干渉電力影響下では、MLCR 方式と比較してセル廃棄率を約 1/5 に改善し、また要求セル廃棄率 10^{-5} を満足することのできる許容干渉電力比も MLCR 方式と比較して約 10 dB 改善できることを示し、PMLCR 方式が干渉電力に対して強い方式であることを示唆した。

第5章

有線無線併用 ATM エントランスネットワーク

5.1 序言

高速無線 ATM 伝送を実現するために、今後一層基地局の数が増大することが考えられる。その場合、全ての基地局を光ファイバを用いて接続すると、敷設に莫大な時間とコストを要し、効率的なエントランスネットワークの構築が難しくなる。

そこで本章では、光ファイバを用いずに、xDSL(x Digital Subscriber Line) が用いられた既存の低伝送速度有線伝送路とその不足容量を補うために無線伝送路を併用して、基地局と基幹 ATM 網を接続する有線無線併用 ATM エントランスネットワーク構成を提案する。本提案エントランスネットワークでは、新たに有線伝送路を敷設する必要がなく、迅速でかつ安価な ATM ネットワークの構築が実現できる。

一方 ATM 網では、取り扱うサービスが著しく増え、各種サービスの需要予測が一層困難となる。従って、トラヒック量の予測誤差を考慮したマージンをもたせた従来の網設計の考え方は適用しにくい。よって設計時の需要予測からの誤差やトラヒック変動を網全体で吸収する機能をエントランスネットワークにも持たせることが必要である。

そこで本章では、有線無線併用 ATM エントランスネットワークでトラヒック変動を吸収するために、バーチャルパス可変容量無線 (AMLCR-VPC: Advanced Modulation Level Controlled Radio - Virtual Path Capacity Control) 伝送方式を適用する。本方式は、有線 ATM 網で提案されている、各バーチャルパス容量をトラヒック量に応じて最適に配分するバーチャルパス (VP: Virtual Path) 容量制御技術と、一定の周波数帯域幅で物理リンクの容量を増大することができる多値数可変無線伝送方式を組み合わせた方式である [58]。本章では、SVC(Switched Virtual Channel) を用いて、有線伝送路と無線伝送路に収容するバーチャルチャネル (VC: Virtual Channel) 数の比率を変化し、有無併用網におけるバーチャル

パス容量制御を新たに検討する。まず本章では、有線と無線伝送路への収容バーチャルチャネル数の最適比率を明らかにする。そして、有線と無線伝送路の様々な比率に対する呼損率やトラフィック予測誤差許容度について理論解析を行い、多値数可変無線伝送方式を適用しないネットワークと比較して、無線伝送路の比率が高いほど、AMLCR-VPC方式の改善効果が大きいことを明らかにする。

5.2 有無併用 ATM エントランスネットワークの構成

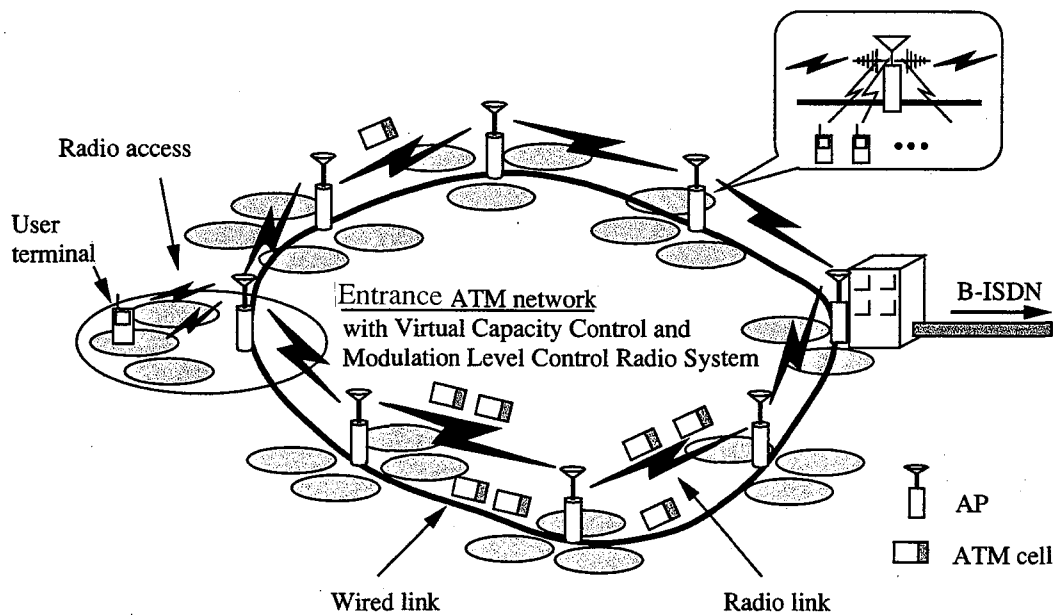


図 5.1: 有無併用 ATM エントランスネットワーク構成の一例

図 5.1に提案する有無併用無線 ATM エントランスネットワーク構成の一例を示す。複数の非 ATM 無線端末を収容する各基地局は、有線伝送路と無線伝送路を併用して ATM 基幹網と接続されている。有線伝送路には既に敷設されている xDSL が用いられている既存の同軸ケーブルもしくはより対線で構築されている。そして、有線伝送路の不足容量を補うために無線伝送路が併用されており、無線伝送路は point-to-point の高品質デジタル伝送路として構築されている。そのため、本エントランスネットワークでは、新たに光ファイバを敷設する必要がなく、迅速にかつ効率的にエントランスネットワークを拡張でき、マイクロセル化に伴う急激な基地局の増加に柔軟に対応することが可能となる。

また、エントランスリンク上での ATM トラフィック変動を低速併用伝送路で効率良く吸収する必要があるので、本検討では、AMLCR-VPC方式を併用 ATM エントランスネットワー

クに適用する。AMLCR-VPC 方式は、有線 ATM 網で提案されている各バーチャルパス容量をトラフィック量に応じて最適に配分するバーチャルパス容量制御技術 [55]-[57] と、一定の周波数帯域幅で物理リンクの容量を増大することができる多値数可変無線伝送方式 [38] を組み合わせた方式である。AMLCR-VPC 方式を適用することによって、予測の難しい ATM トラフィック変動に対して適応的に伝送路容量を制御することができ、柔軟にトラフィック量を収容することが可能になる。

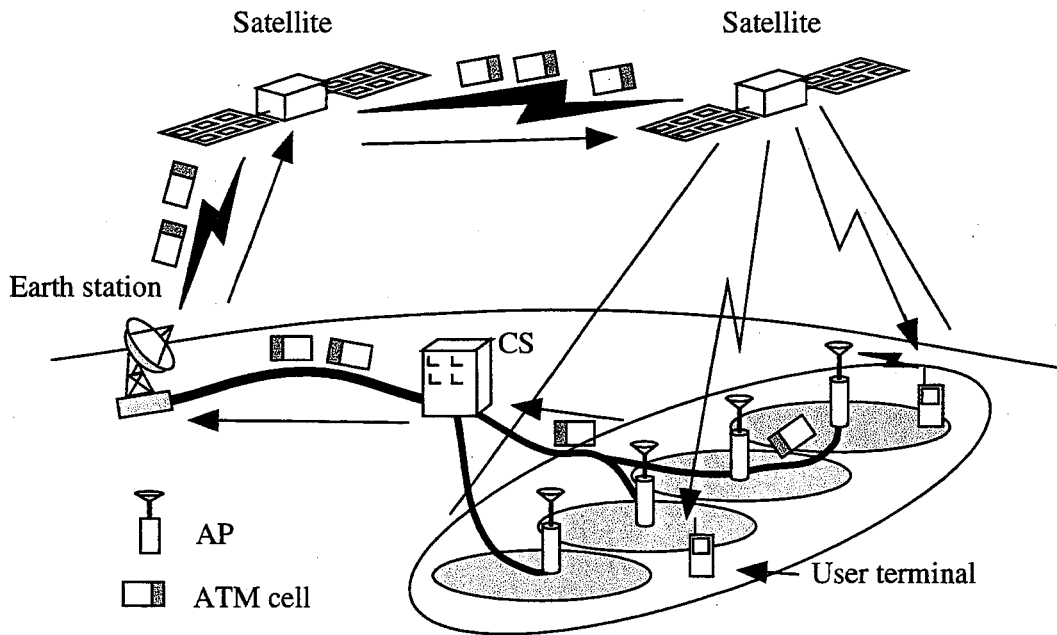


図 5.2: 有無併用 AMLCR-VPC 方式の衛星通信網への適用

また有無併用 AMLCR-VPC 方式は図 5.2 に示す衛星通信網への適用も可能である。図 5.2 の衛星を用いた ATM 網では、移動端末から制御局 (CS: Control Station) までの上りリンクに有線伝送路が用いられ、下りリンクでは通信衛星から無線端末の存在するエリアに向けて同報通信が行われる。基地局から制御局、制御局から地球局 (Earth Station) を接続する有線伝送路上、および地球局から衛星、衛星から衛星を接続する無線伝送路上を ATM セルが伝送し、バーチャルパス容量制御が各伝送路に適用される。例として VOD (Video On Demand) のサービスを提供する場合、上りリンクを用いて低伝送速度の要求情報をサーバへ送信し、その情報に従ってサーバから人工衛星を介した下りリンクを用いて大容量ビデオ情報を配信する。その場合、広範囲に存在する複数の端末への同時配信が可能となると共に、無線伝送路の容量をトラフィック量に応じて増減可能となり、効率的なサービス提供が可能となる。

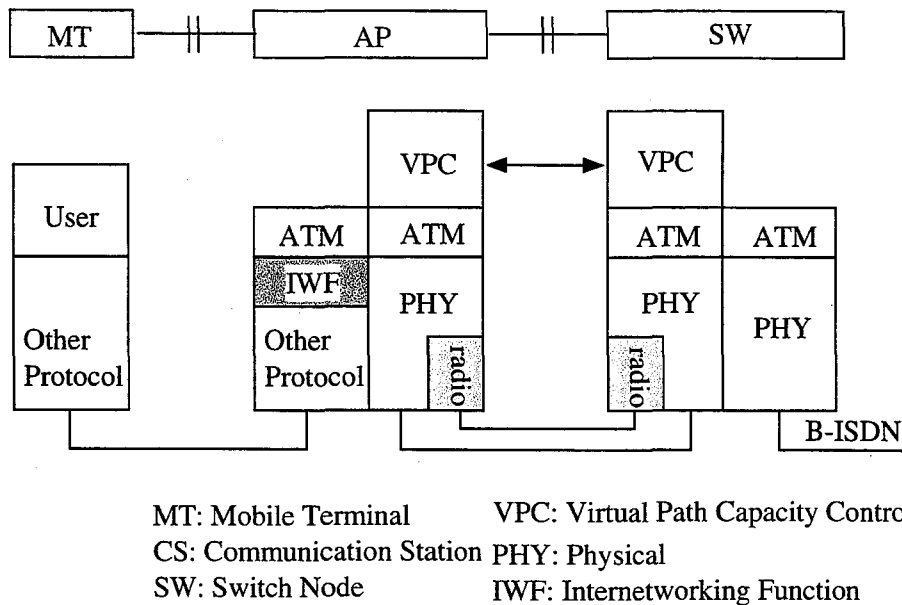


図 5.3: 有無併用エントランスネットワークの protocol 構成

図 5.3に、図 5.1に示す有無併用 ATM エントランスネットワークの protocol 構成の一例を示す。無線エントランスリンクは point-to-point の通信を行っているため、干渉電力もなく、非常に誤りの少ない伝送路として構築できるので、エントランスリンクの無線 ATM 伝送 protocol として、図 2.3に示す End-to-End 無線 ATM の protocol の採用が可能となる。一方、アクセスリンクの protocol 構成は、収容端末を無線 ATM 端末に限定せず、IMT-2000 端末やモバイル IP 端末等の非 ATM 端末を収容可能としており、図 2.3に示すゲートウェイ無線 ATM の protocol を採用している。そのため、エントランスリンク上では、標準の 53 バイトの ATM セルが伝送され、各基地局は ATM 交換機能を有し、エントランスネットワーク内の有線無線各伝送路での VC の設定、解放を行うことができる。無線端末に情報を伝送するためには、基地局のインターネットワーキング機能を用いて、標準 ATM protocol から他の非 ATM サービス protocol への変換が行われることになる [41]。逆に、無線端末から送信されてきた情報は、基地局のインターネットワーキング機能で標準 ATM protocol に変換され、標準 ATM セルがエントランスリンク上に送信される。

また、図 5.3に示すように、エントランスリンクに適用する AMLCR-VPC 方式では、無線伝送路容量を増大させるために、物理レイヤにおいて、無線伝送路で使用する変調多値数の制御が行われる。さらに AMLCR-VPC 方式では、時々刻々変化する無線伝送路の物理的な伝送路容量に基づいて、ATM レイヤにおいて、有線伝送路と無線伝送路の両伝送路容量

を考慮したバーチャルパス容量制御が行われる。

本エントランスネットワークでは、各基地局間に有線伝送路と無線伝送路を併用して敷設しているため、基地局を接続する各伝送路を用いて一つのVPが設定される。つまり、予測トラフィック量に従って設計される初期の各VPの容量を、エントランスネットワークに敷設されている有線伝送路と無線伝送路の比率に応じて分割して、一つのVPが設定される。今、 C_{t_0} を有線無線両伝送路を含めたネットワーク全体に設定される各VP容量の総和とし、 R をネットワーク全体の伝送路に対する無線伝送路の比率と定義する。その場合、初期の無線VP容量の総和 C_{r_0} と初期の有線VP容量の総和 C_{w_0} はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$C_{r_0} = R \cdot C_{t_0} \tag{5.1}$$

$$C_{w_0} = (1 - R) \cdot C_{t_0} \tag{5.2}$$

本検討では、様々な有無併用ATMエントランスネットワークの構成法について検討を行うため、無線伝送路比率 R をパラメータとして取り扱う。 R が1の時はエントランスリンクが全て無線伝送路で構築されている場合を示しており、 R が0の時はエントランスリンクが全て有線伝送路で構築されている場合を示している。

5.3. 有無併用網におけるバーチャルパス容量可変無線伝送方式

5.3.1 動作原理

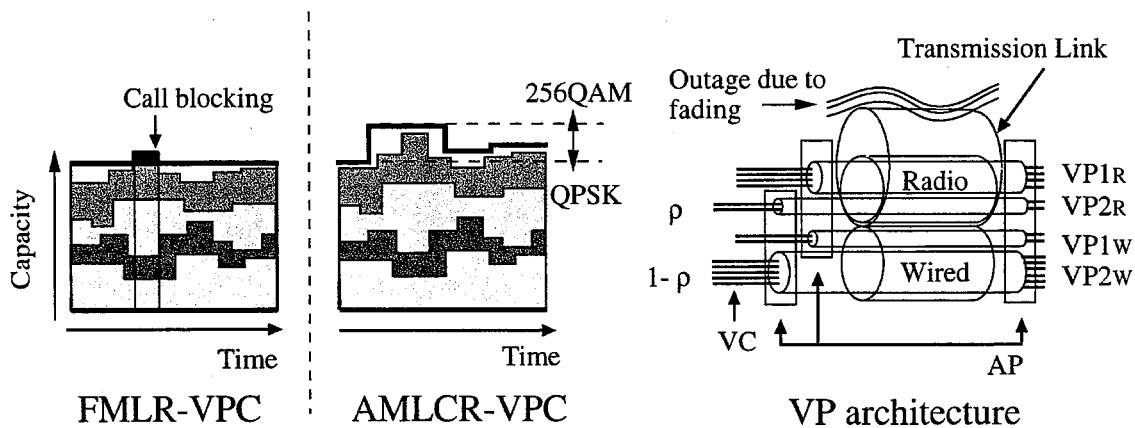


図 5.4: 有無併用エントランスネットワークにおける AMLCR-VPC 方式の動作原理

図 5.4に有無併用ATMエントランスネットワークに適用する AMLCR-VPC 方式の動作概念を示す。従来の固定多値数VP容量制御 (FMLR-VPC: Fixed Modulation Level Radio

- Virtual Path Capacity control) では、收容されるトラヒック量に応じて、全ての VP の中で最悪な呼損率を最小にするように各 VP 容量を動的に制御し、ネットワーク全体でトラヒック変動を吸収している [55]-[57]. しかしながら、図 5.4 に示すようにネットワーク全体のトラヒック量が設計時の予測を越え全体の VP 容量を上回った場合、総伝送容量が固定されている FMLR-VPC 方式では、トラヒック量を收容しきれず呼損が生じてしまう. 一方、AMLCR-VPC 方式では、従来の FMLR-VPC 方式と同様に各 VP の容量を動的に変化させるだけでなく、変調多値数を変化させ無線伝送路の物理的な容量を変化させて、使用無線帯域幅を一定のまま、無線伝送路に設定された VP 容量も変化させることができる [49][58]. AMLCR-VPC 方式を有線併用 ATM エントランスネットワークに適用した場合、有線伝送路に設定された VP 容量は変化しないが、無線伝送路に設定された VP 容量は増加させることができ、その結果全体の VP 容量を増大することが可能となる. そのため、ネットワークに收容される全体のトラヒック量が増加した場合でも、無線伝送路で大きな変調多値数を使用することによって、全体の VP 容量を初期の全体の VP 容量 C_{t0} から増大でき、図 5.4 に示すように呼損を生じることなく、高品質の伝送が可能となる. また、もしピークトラヒック量より小さなトラヒック量を予測して VP 容量を設計した場合でも、AMCLR-VPC 方式では、無線 VP 容量を増大させることによりピークトラヒック量を收容することができる. 容量制御を容易にするため本検討では、エントランスネットワークに構築している全ての無線伝送路で同じ変調多値数を用いるように、一つの ATM-SW で集中制御を行うと仮定する.

有線併用 ATM エントランスネットワークで起こる呼損を以下のように定義する. 無線伝送路では、情報が送り先に届かない原因として、以下のトラヒック呼損と伝送路瞬断が考えられる.

- **トラヒック呼損** : 発生トラヒックが伝送路容量を越えてしまうことによって生じる呼損.
- **伝送路瞬断** : 無線伝送路で発生するフェージングの影響で受信電力が所要電力より低くなることによって発生する瞬断.

一方、有線伝送路では伝送路誤りが無いものと仮定し、トラヒック呼損のみが発生すると定義する. その結果、全体のエントランスネットワークにおける呼損率 B_t は次式で与えられる.

$$B_t = \rho \{ 1 - (1 - P_0)(1 - B_r) \} + (1 - \rho)B_w \quad (5.3)$$

ここで、 P_0 は無線伝送路での実際の伝送路瞬断率、 B_r は無線伝送路でのトラヒック呼損率、 B_w は有線伝送路でのトラヒック呼損率を表しており、 ρ は一つの VP 中に收容される全体の VC 数に対する無線 VP の中に收容される VC 数の比率を表す. また、式 (5.3) の第一項は

無線伝送路呼損率を表し、無線伝送路において、少なくともトラヒック呼損もしくは呼接続中における伝送路瞬断のいずれかが発生する確率と定義する。式(5.3)に示すように、無線VPでの呼損率と有線VPでの呼損率は異なるため、呼損率 B_t は各VP容量に設定されるVCの数に大きく依存している。そこで、有無併用エントランスネットワークにおける呼損率を得るために、本検討では無線VPに収容されるVC数の比率 ρ を用いて、式(5.3)に示すように各呼損率を収容されるVC数の比率で平均化することによって、ネットワーク全体の平均呼損率を導出している。実際のVCの収容数の制御は、シグナリングによってVCの設定、解放を可能とするSVC[59]を用いて実現するものとする。

また無線伝送路では、地上による反射波、大気屈折層による屈折波等によるマルチパスレイリーフェージングが発生すると仮定し、受信電力は比較的大きな周期で変動すると仮定する。

5.3.2 バーチャルパス容量制御アルゴリズム

(a) VPの初期設計

VPの初期設計時には、定常状態時のユーザの分布からVP設定される各基地局間のトラヒック量を概算し、概算したトラヒック量からサービスの要求呼損率 P_d を満足するのに必要な各VP容量を決定し、ネットワークリソースを割り当てる。各VPの初期容量から全体のVP容量の総和 C_{t0} を算出し、この値をFMLR-VPC方式の全体のVP容量と決定する。設定したVPの無線伝送路に割り当てられる容量の比率を無線伝送路比率と同じ R とすると、無線伝送路に設定されるVP容量 C_{r0} は、式(5.1)より、 $R \cdot C_{t0}$ と表すことができる。多値数可変方式に 2^{2n} QAM方式を用いた場合、必要な無線帯域幅 W は次式で与えられる[38]。

$$W = \frac{R \cdot C_{t0} \cdot (1 + \alpha)}{\log_2 \left(1 + 3 \frac{P'_0}{P_r} \cdot \frac{C/N_0}{C/N_{QPSK}} \right)} \quad (5.4)$$

ここで、 P'_0 は無線伝送路の設計瞬断率であり、 α はロールオフ率、 P_r はレイリーフェージング発生確率、 C/N_0 は無線伝送路における定常状態時に得られる搬送波電力対雑音電力比(CNR: Carrier to Noise power Ratio)を表している。QPSK方式のような小さい変調多値数を用いた時に設計瞬断率 P'_0 の値が非常に小さくなるように、定常状態時のCNR C/N_0 は大きな値として設定される。

(b) VPの容量制御

初期のVP容量設計で各VP容量を決定し、全体のVP容量の総和を決定した後、実際に収

容されるトラヒック量に応じて、全体に用意されている VP 容量の中で、各 VP を動的に変化させる VP 容量制御が行われる。式 (5.3) 中の実際の瞬断率 P_0 は使用する変調多値数に大きく依存している。例えば、使用する変調多値数が大きくなると P_0 の値は大きくなる。そのため、AMLCR-VPC 方式を適用した場合、 P_0 の値は設計瞬断率 P'_0 の値と異なる。一方、FMLR-VPC 方式適用時には多値数は変化しないため、実際の瞬断率 P_0 は設計瞬断率 P'_0 と等しいままである。

無線伝送路に AMLCR-VPC 方式を適用した場合、大きな変調多値数を用いると伝送路容量が増加し、トラヒック呼損率は減少するが、所要受信電力が増加し、瞬断率が增大してしまう。そのため、式 (5.3) の第一項で表される、無線伝送路上の瞬断率とトラヒック呼損率で定義された無線伝送路呼損率を最小とするような最適な変調多値数が存在することになる。

図 5.5 に有線無線併用 ATM エントランスネットワークにおける AMLCR-VPC 制御アルゴリズムを示す。全体の無線 VP 容量は、変調多値数を変化させることによって、使用無線帯域幅 W を一定のままで、初期の無線 VP 容量 $R \cdot C_{t_0}$ から変化する。

今、ネットワークに基地局が M 基存在すると仮定する。また、 $C_{vp_{ij}}(P_0)$ を、瞬断率が P_0 となる変調多値数を使用している場合の、 i 番目の基地局から j 番目の基地局へ設定された VP の容量とする。その時 $C_{vp_{ij}}(P_0)$ は次式で与えられる。

$$C_{vp_{ij}}(P_0) = C_{r_{ij}}(P_0) + C_{w_{ij}} \quad (i, j = 1 \sim M, i \neq j) \quad (5.5)$$

ここで、 $C_{r_{ij}}(P_0)$ と $C_{w_{ij}}$ はそれぞれ VP 容量 $C_{vp_{ij}}$ のうちの無線 VP 容量と有線 VP 容量を表している。そして、 $C_{r_{ij}}(P_0)$ と $C_{w_{ij}}$ はそれぞれ次式を満足する必要がある。

$$C_r(P_0) \geq \sum_i^M \sum_{j(j \neq i)}^M C_{r_{ij}}(P_0) \quad (5.6)$$

$$C_{w_0} \geq \sum_i^M \sum_{j(j \neq i)}^M C_{w_{ij}} \quad (5.7)$$

ここで $C_r(P_0)$ は瞬断率 P_0 の変調多値数を使用している場合の無線 VP 全体の使用可能な容量を表しており、次式で与えられる。

$$C_r(P_0) = \frac{W}{1 + \alpha} \log_2 \left(1 + 3 \frac{P_0}{P_r} \cdot \frac{C/N_0}{C/N_{QPSK}} \right) \quad (5.8)$$

また、 C_{w_0} は有線 VP 全体の使用可能な容量であり、

$$C_{w_0} = (1 - R) \cdot C_{t_0} \quad (5.9)$$

で与えられる。

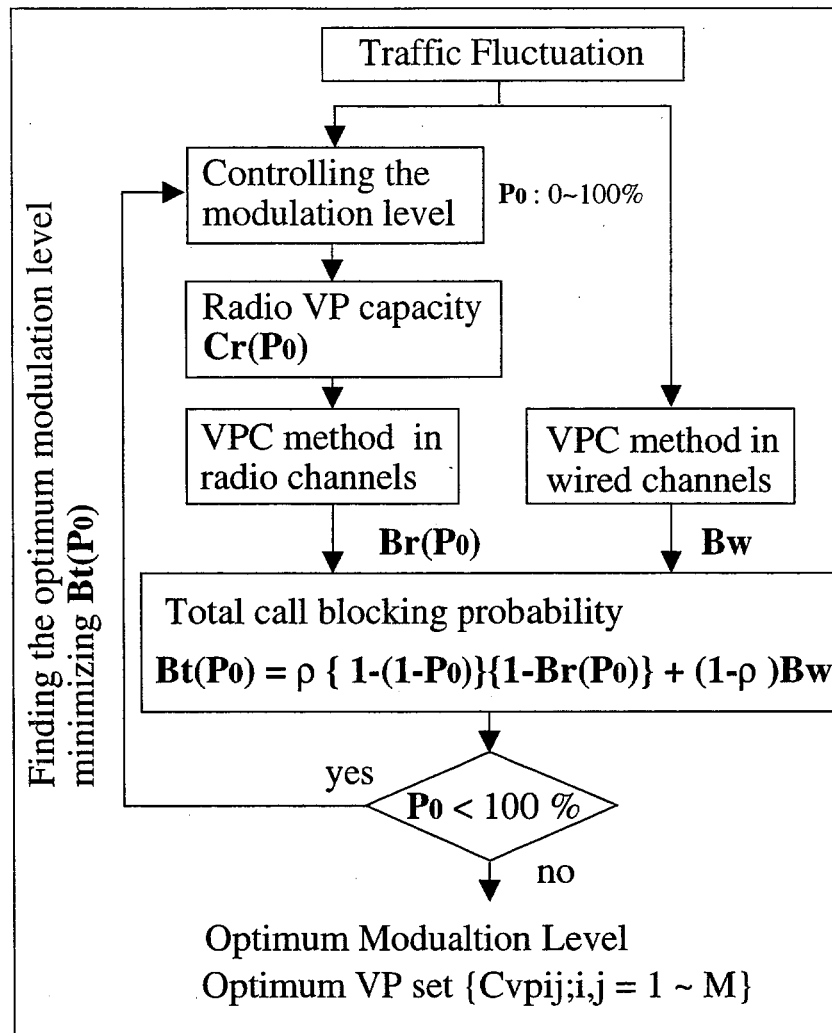


図 5.5: 有線無線併用網における AMLCR-VPC 制御アルゴリズム

基地局 i から基地局 j へのトラフィック量，すなわち設定される VC の数を a_{ij} とおくと，無線 VP および有線 VP に収容される VC の数はそれぞれ $\rho \cdot a_{ij}$ と $(1 - \rho) \cdot a_{ij}$ で与えられる。呼受け付け制御として，仮想回線法 [60] を用いると，基地局 i から基地局 j へ設定された無線 VP および有線 VP 上でのトラフィック呼損率， $P_{r_{ij}}$ および $P_{w_{ij}}$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$P_{r_{ij}}(P_0) = E(\rho \cdot a_{ij}, N_{r_{ij}}) \quad (5.10)$$

$$P_{w_{ij}} = E((1 - \rho) \cdot a_{ij}, N_{w_{ij}}) \quad (5.11)$$

ここで， $N_{r_{ij}}$ と $N_{w_{ij}}$ はそれぞれ，無線 VP 容量 $C_{r_{ij}}$ および有線 VP 容量 $C_{w_{ij}}$ に収容するこ

とのできる VC の数の最大値である。 $N_{r_{ij}}$ と $N_{w_{ij}}$ はそれぞれ、

$$N_{r_{ij}} = \left\lfloor \frac{C_{r_{ij}}}{r_p} \right\rfloor \quad \text{and} \quad N_{w_{ij}} = \left\lfloor \frac{C_{w_{ij}}}{r_p} \right\rfloor \quad (5.12)$$

と表される。ここで r_p は収容するサービスのピークレートを表しており、 $\lfloor x \rfloor$ は x 以下の最大の整数を表す記号である。また、 $E(a, N)$ はアールン B 式を表しており、

$$E(a, N) = \frac{a^N / N!}{\sum_{k=1}^N a^k / k!} \quad (5.13)$$

で与えられる。

また、VP 容量制御は無線伝送路と有線伝送路それぞれに対して行う。無線伝送路での VP 容量制御では、式 (5.14) で表される各無線 VP のトラヒック呼損率の最悪値を最小にする各 VP 容量 $\{C_{r_{ij}}; i, j = 1 \sim M, i \neq j\}$ を決定する。

$$B_r(P_0) = \max_{ij} [P_{r_{ij}}(P_0)] \quad (5.14)$$

また同様に、有線伝送路での VP 容量制御でも、式 (5.15) で表される各有線 VP のトラヒック呼損率の最悪値を最小にする各 VP 容量 $\{C_{w_{ij}}; i, j = 1 \sim M, i \neq j\}$ を決定する。

$$B_w = \max_{ij} [P_{w_{ij}}] \quad (5.15)$$

その結果、式 (5.5) を用いることにより、各有線無線併用 VP 容量 $\{C_{vp_{ij}}; i, j = 1 \sim M, i \neq j\}$ が決定される。この場合、トラヒック呼損率と無線伝送路瞬断率を含めたネットワーク全体での呼損率は B_t は次式で表される。

$$B_t(P_0) = \rho [1 - \{1 - P_0\} \{1 - B_r(P_0)\}] + (1 - \rho) B_w \quad (5.16)$$

理論的検討の観点から、本検討では多値数を 0 から無限大まで変化させて、つまり P_0 を 0 から 1 まで変化させて、以上の VP 容量制御を行うこととする。最終的に、本アルゴリズムでは、式 (5.16) で表される B_t を最小にする最適な瞬断率 $P_{0_{opt}}$ と最適な各 VP 容量 $\{C_{vp_{ij}}; i, j = 1 \sim M\}_{opt}$ を導き出し、最適瞬断率から最適変調多値数を決定する。

本アルゴリズム終了後に得られる、ネットワーク呼損率 B_t の最小値 B_{min} は次式で表される。

$$B_{min} = \min_{P_0} [B_t(P_0)] \quad (5.17)$$

本検討では、最小のネットワーク呼損率 B_{min} の値をシステムの評価に用いることとする。

5.4 バーチャルパス容量可変無線伝送方式の改善効果

5.4.1 ネットワークモデル

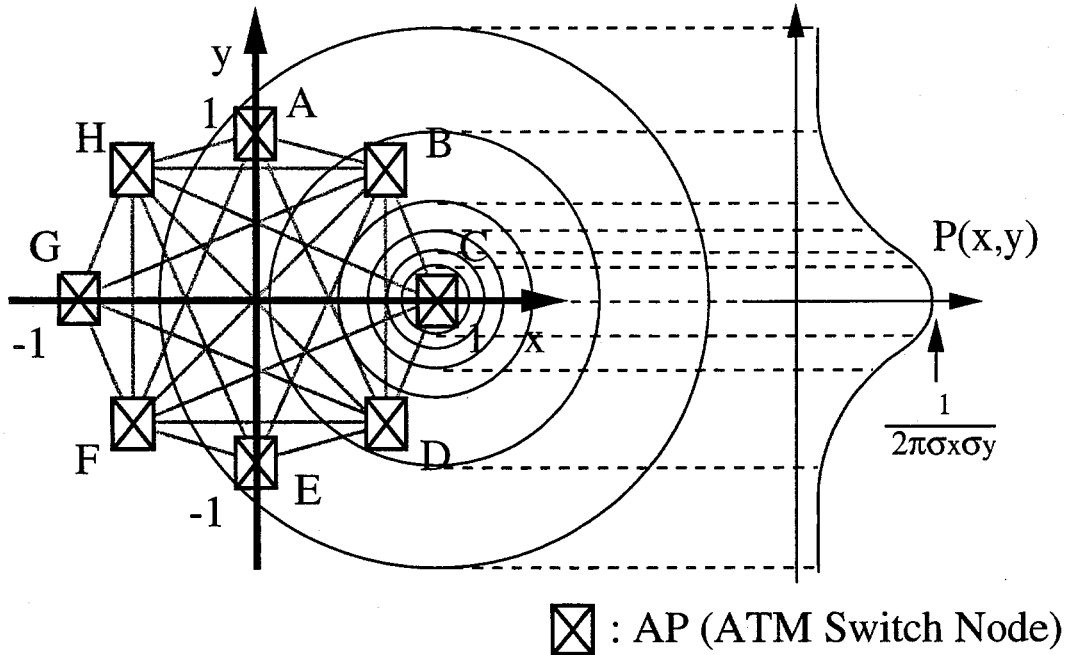


図 5.6: 解析に用いたネットワークモデルとトラフィックモデル

図 5.6に解析に用いた基地局間を接続する VP ネットワークモデルとユーザトラフィック分布モデルを示す。ネットワーク内の ATM-SW を有する基地局は正八角形上に位置し、VP は基地局間をメッシュ上に設定されていると仮定する。各 VP は有線伝送路と無線伝送路に分割されて設定されている。

また、ネットワークに収容するサービスクラスは 2 クラスを考え、それぞれ 64kbit/s と 1.5Mbit/s のピークレートを要求する VC が設定される。その場合、各基地局間にはサービス毎に、各 VC を束ねた一つの VP が設定される。

また、ユーザの密度の空間的分布モデルは次式で表される 2 次元ガウス分布の確率密度 $p(x,y)$ に従うと仮定する。

$$p(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (5.18)$$

ここで、 m_x と m_y はそれぞれ x 軸方向と y 軸方向のユーザ分布の中心の位置を表し、 σ_x^2 と σ_y^2 はそれぞれ、x 軸方向と y 軸方向のユーザ分布の広がりを表している。本解析では、ユー

ガ分布の定常状態を図 5.6 に示すように、基地局 C に中心がある状態、すなわち ($m_x = 1, m_y = 0$) の状態と仮定する。そして、定常状態時のトラフィック量から初期の VP 容量を設計呼損率 P_d と式 (5.13) のアーラン B 式を用いて算出し、設定する。

また、 i 番目の基地局から j 番目の基地局へのトラフィック量すなわち VC の数、 $a_{ij}; (i, j = 1, 2, \dots, 8, i \neq j)$ は、以下の式に表されるように、各基地局の周りにいるユーザの存在確率密度 $p(x_i, y_i)$ と $p(x_j, y_j)$ の積で表される [49]。

$$\begin{aligned} a_{ij} &= K p(x_i, y_i) p(x_j, y_j) \\ &= \frac{K}{(2\pi\sigma_x\sigma_y)^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x_i - m_x)^2 + (x_j - m_x)^2}{\sigma_x^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{(y_i - m_y)^2 + (y_j - m_y)^2}{\sigma_y^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (5.19)$$

ここで、 K は基地局のカバーするエリアの面積とネットワーク全体のユーザ数を考慮した定数である。このトラフィック分布モデルを使用することによって、 m_x と m_y の変化によってユーザ分布の移動を表すことができ、また K の値を増減させることによって、ネットワークに收容されるトラフィック量の増減を表すことが容易になる。本解析では、 $m_y = 0, \sigma_x = \sigma_y = \sigma$ であると仮定し、トラフィック変動は m_x と K の変化のみによって表すことにする。

表 5.1 に以下の解析で用いた諸定数を示す。

表 5.1: 呼損率の理論解析に用いた諸定数

ガウス分布パラメータ	m_y	0
トラフィック量の比率	64Kbps : 1.5Mbps	20:1
レイリーフェージング発生確率	P_r	1%
設計トラフィック呼損率	P_d	1%
設計瞬断率	P'_0	0.001%
ロールオフ率	α	0.0
定常状態時の搬送波対雑音電力比	C/N_0	60dB
QPSK における所要搬送波対雑音電力比	C/N_{QPSK}	13.8dB

5.4.2 収容バーチャルチャネルの最適比率

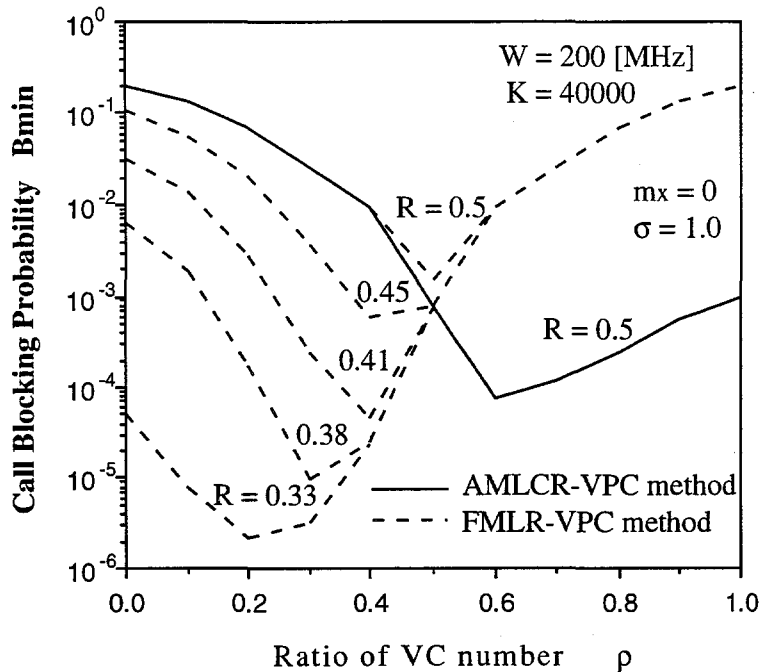


図 5.7: 収容 VC 比率に対する呼損率特性

本章では、有無併用 ATM エントランスネットワークにおける、有線 VP と無線 VP に収容する VC の数の比率について検討を行う。図 5.7 に無線帯域幅 $W = 200$ [MHz]、無線伝送路比率 $R = 0.5$ の時の無線伝送路に収容される VC の比率 ρ に対するネットワーク呼損率 B_{min} の特性を示す。FMLR-VPC 方式に対しては、様々な無線伝送路比率 R の時の特性を示し、AMLCR-VPC 方式に対しては、 $R = 0.5$ の時の特性を示す。FMLR-VPC 方式では、ネットワーク呼損率 B_{min} を最小にする最適な VC 数の比率 ρ が存在し、その値は無線伝送路比率 R と等しいことが分かる。これは、 ρ の値が小さい時は、有線伝送路側により多くの VC が収容され、有線 VP 内の呼損率が増大し、また ρ の値が大きい時は、無線伝送路側により多くの VC が収容され、無線 VP 内の呼損率が増大するためである。すなわち、FMLR-VPC 方式を適用する場合、 $\rho = R$ と無線 VP へ収容する VC 数を無線伝送路比率と等しくするように制御しなければならない。一方 AMLCR-VPC 方式でも、無線 VP へ収容する VC 数の比率 ρ に最適値が存在することが分かる。AMLCR-VPC 方式では、無線 VP 容量を増大することが可能となるので、ネットワーク呼損率を最小にする最適な無線伝送路に収容される VC 数の比率は無線伝送路の比率 $R = 0.5$ より大きくなる。そして、そのときのネットワーク呼損率 B_{min} は FMLR-VPC 方式と比較して改善される。また、その時に得られる最小の

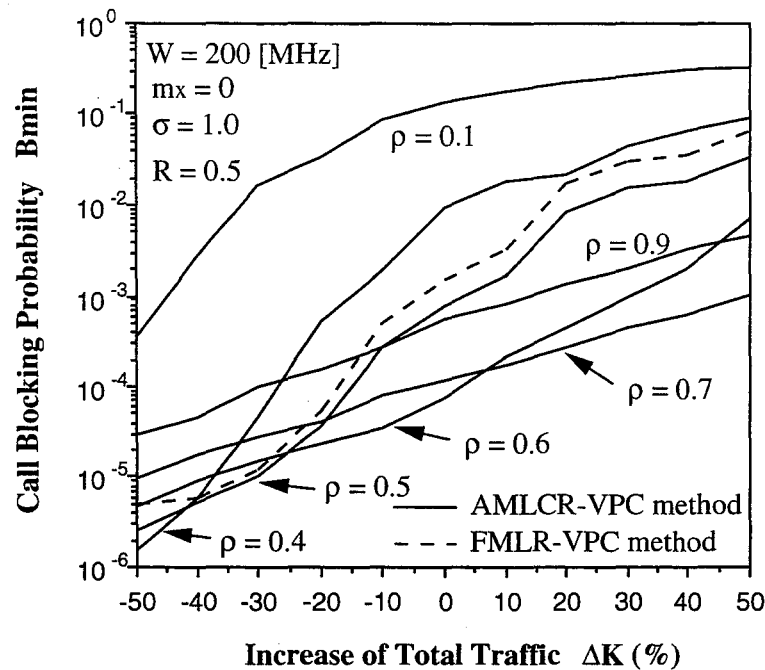


図 5.8: トラヒック量の増加に対する呼損率特性

呼損率の値は、 8×10^{-5} となり、FMLCR-VPC 方式適用時の無線伝送路比率が $R = 0.41$ の場合の特性とはほぼ等しくなる。このことは、同じ無線帯域幅を用いた場合、FMLR-VPC 方式が AMLCR-VPC 方式に比べて約 1.4 倍 $((1.0 - 0.41)/0.41)$ 有線伝送路が必要になることを意味している。言い換えれば、AMLCR-VPC 方式では FMLR-VPC 方式で用いる有線伝送路の約 7 割の有線伝送路を用いることにより同じ呼損率特性を得られることができ、より低速な伝送路を用いて ATM エントランスネットワークを構築することができる。

図 5.8 に、無線帯域幅 $W = 200$ [MHz] 無線伝送路比率 $R = 0.5$ の場合の、トラヒックの増減 ΔK に対するネットワーク呼損率の特性を示す。トラヒック量は $\Delta K = 0\%$ の時 $K = 40000$ であり、 $\Delta K = -50\%$ の時 $K = 20000$ となる。また、FMLR-VPC 方式については、無線伝送路に収容される VC 数の比率は $\rho = 0.5$ の時の特性を表し、AMLCR-VPC 方式については様々な ρ の値の時の特性を表している。両方式ともトラヒック量が増加するとネットワーク呼損率が悪化しているのが分かる。また、AMLCR-VPC 適用時では、 ρ の値が変化すると呼損率も変化しているのが分かる。例として $\rho = 0.1$ の ρ の値が小さい場合、有線 VP での呼損率が悪化しネットワーク呼損率の特性は悪化している。また、 $\rho = 0.9$ の ρ の値が大きい場合でも、無線 VP での呼損率が悪化してネットワーク呼損率の特性は悪化しているのが分かり、ネットワーク呼損率を最小にする最適な ρ の値が存在することが分かる。さ

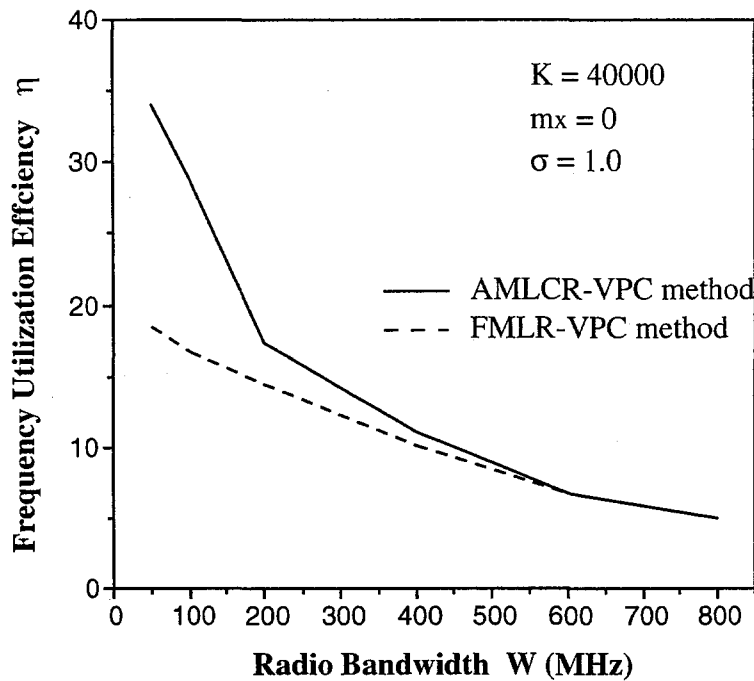


図 5.9: 使用無線帯域幅に対する周波数利用効率

らに、トラフィック量の増加に伴い、その最適な ρ の値が変化しているのが分かる。これは、トラフィック量が増加すると、無線 VP 容量を増加するので、有線と無線の伝送路比率は一定でも有線と無線の VP 容量の比率は変化してくるためである。トラフィック量が $\Delta K = 0\%$ の場合、最適な ρ の値は約 0.6、また $\Delta K = 50\%$ の場合、最適な ρ の値は約 0.7 となる。また、最適な ρ の値を用いた場合、AMLCR-VPC 方式のネットワーク呼損率は FMLR-VPC 方式に比べて改善している。

以上の結果から、AMLCR-VPC 適用時には、トラフィック量が小さいときは、 ρ の値を小さくし、より多くの VC を有線 VP に収容させ、また、トラフィック量の多いときには、 ρ の値を大きくしてより多くの VC を無線 VP に収容させる制御を VP 容量制御に付加する必要がある。

次に、FMLR-VPC 方式と比較した場合の AMLCR-VPC 方式の周波数利用効率の改善効果について示す。本検討では、次式で示すように、周波数利用効率 η を 1 [MHz] あたりに併用 ATM エントランスネットワークで収容することのできるトラフィック量として定義する。

$$\eta = \{\rho_{opt} \cdot a_t \cdot (1 - B_{min})\} / W \quad [\text{erlang/MHz}] \quad (5.20)$$

ここで a_t はネットワーク全体に発生するトラフィック量を表しており、 ρ_{opt} は呼損率を最小にする無線 VP に収容される VC の数の最適な比率を表している。図 5.9 に $K = 40000$ の場合

の無線周波数帯域幅 W に対する周波数利用効率 η の特性を表す。有線伝送路の総 VP 容量は、どの W の値に対しても一定で、式 (5.8) で導出される帯域幅 200 [MHz] の時の無線伝送路の総 VP 容量と同じ容量を有する。 W が大きく 550 [MHz] 以上の時には、AMLCR-VPC 方式適用時の η と FMLR-VPC 方式適用時の η はほぼ等しくなることが分かる。一方、 W が小さいときには、AMLCR-VPC 方式適用時の η は FMLR-VPC 方式適用時の η と比較して大きく改善していることが分かる。これは、 W が大きいと両方式ともほぼ同じトラフィック量を収容するが、 W が小さいと AMLCR-VPC 方式が同じ無線帯域幅で無線 VP 容量を増大でき、FMLR-VPC 方式より多くのトラフィック量を収容することができるためである。例として、併用 ATM エントランスネットワークに $W = 100$ [MHz] の無線帯域幅が与えられた時、AMLCR-VPC 方式は FMLR-VPC 方式に比べて約 1.8 倍に周波数利用効率を改善することができる。

5.4.3 トラフィック予測誤差許容度の改善効果

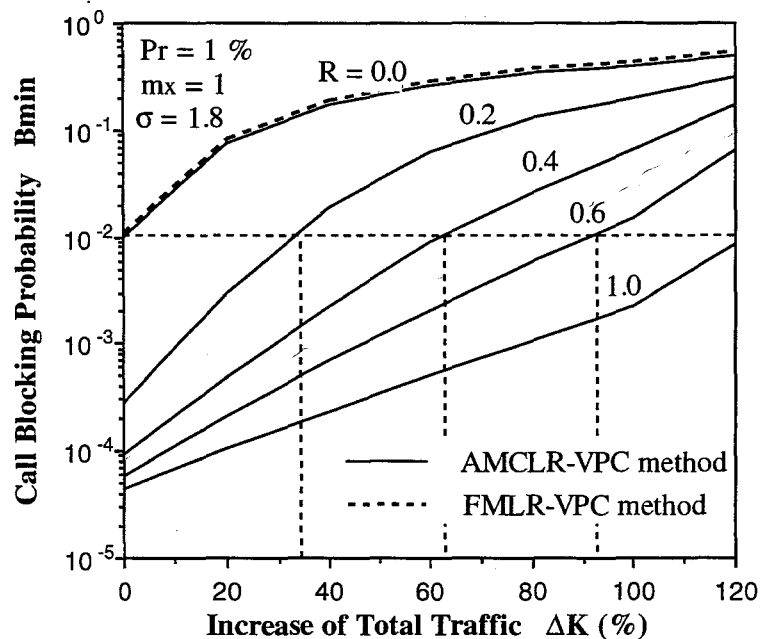


図 5.10: 設計時からのトラフィック量の増加に対する呼損率特性

本節では、設計時からのトラフィック量の変動に対する AMLCR-VPC 方式のトラフィック変動吸収効果ならびに設計時トラフィック予測誤差許容度の特性について検討を行う。

図 5.10 に設計時 $\Delta K = 0\%$ からトラフィック量が増加した時の、様々な無線伝送路比率 R における AMLCR-VPC 方式のネットワーク呼損率 B_{min} の特性を表している。また、全ての

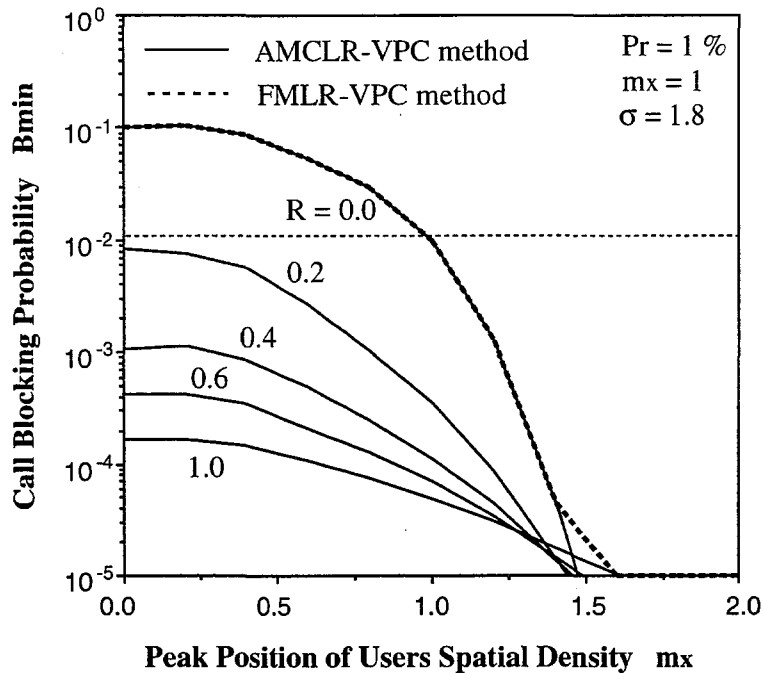


図 5.11: 設計時からのユーザの移動に対する呼損率特性

伝送路が無線伝送路 ($R = 1.0$) の時の FMLR-VPC 方式の B_{min} の特性を併せて示している。この図の場合、ガウスパラメータは $m_x = 1.0$ と $\sigma = 1.8$ としている。また、 $\Delta K = 0\%$ の時 $K = 40000$ 、 $\Delta K = 100\%$ の時 $K = 80000$ である。図 5.10 より、FMLR-VPC 方式適用時では、トラヒック量が設計時よりも増加すると要求呼損率 1% を満たせなくなるのが分かる。一方、AMLCR-VPC 方式適用時では、無線伝送路の比率 R が大きくなるほどネットワーク呼損率を改善することができる。また、AMLCR-VPC 方式は FMLR-VPC 方式に比べて、要求呼損率を満足させることのできる許容トラヒック量を改善でき、その改善効果は無線伝送路比率 R が大きいほど増加することが分かる。無線伝送路比率が 0.4 の時、AMLCR-VPC 方式は要求呼損率を満足させながら、設計時の予測トラヒック量の約 1.6 倍のトラヒック量を収容することが可能となる。

図 5.11 に、様々な無線伝送路比率 R における、AMLCR-VPC 方式と FMLR-VPC 方式の、 m_x の変化すなわちユーザの移動に対するネットワーク呼損率の特性を示す。この場合、ガウス分布の分散値を $\sigma = 1.8$ としている。ユーザ分布の中心が $m_x = 1.0$ の初期状態から、ユーザが移動して分布の中心がエントランスネットワークの中心 $m_x = 0$ になった時に、ネットワークに収容されるトラヒック量が最も大きくなるので、両方式ともネットワーク呼損率は最も悪化している。FMLR-VPC 方式を適用した場合、ユーザの中心がエントランスネット

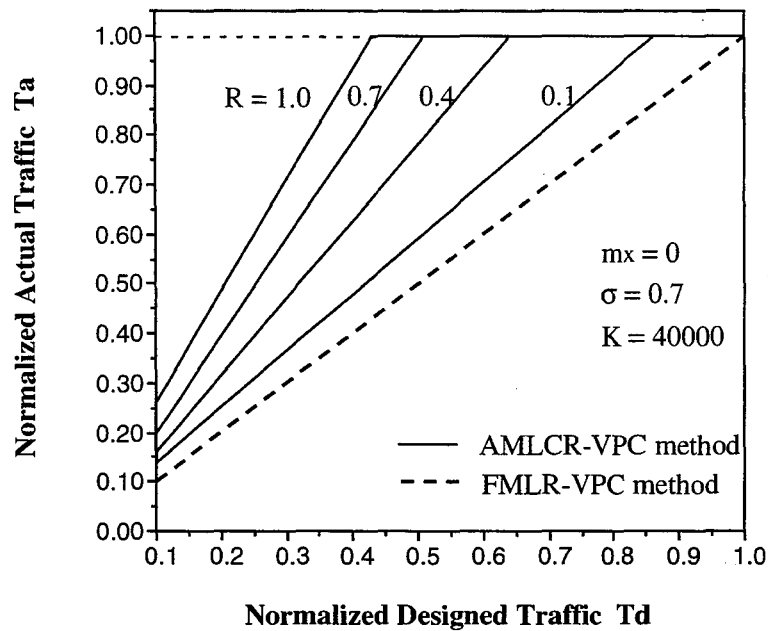


図 5.12: 収容可能トラヒック量と設計時予測トラヒック量の関係

ワークの中央に少しでも移動すると要求呼損率を上回ってしまい、その結果 $m_x \geq 1.0$ の場合のみしか要求呼損率を満足できない。しかしながら、AMLCR-VPC 方式を適用した場合、無線伝送路の比率を大きくするほど呼損率は改善され、 $R \geq 0.2$ であれば、ユーザ分布の中心がネットワーク中央へ移動した場合でも要求呼損率を満たすことができる。

次に、AMLCR-VPC 方式を適用した有線無線併用 ATM エントランスネットワークのトラヒック予測誤差許容度についての検討を行う。

今、 T_p をピークトラヒック量と定義する。そしてピークトラヒック量で正規化した実際に収容するトラヒック量を T_a 、ピークトラヒック量で正規化した設計時の予測トラヒック量を T_d をそれぞれ、以下のように定義する。

$$T_a = \frac{(\text{actual traffic intensity})}{T_p} \quad (5.21)$$

$$T_d = \frac{(\text{designed traffic intensity})}{T_p} \quad (5.22)$$

ネットワーク全体のトラヒック量は、ユーザの分布が $m_x = 0$ 、 $\sigma = 0.7$ のパラメータを持つガウス分布に従う時に最大となり、 $K = 40000$ の場合、 T_p は 32234 [Erlang] となる。

図 5.12 に、様々な R の時の正規化収容トラヒック量と T_a と正規化設計トラヒック量 T_d の関係を示す。この図はあるトラヒック量 T_d でエントランスネットワークの VP を設計した時に、要求呼損率 $P_d = 1\%$ を満足させながら、そのネットワークで収容することのできるトラ

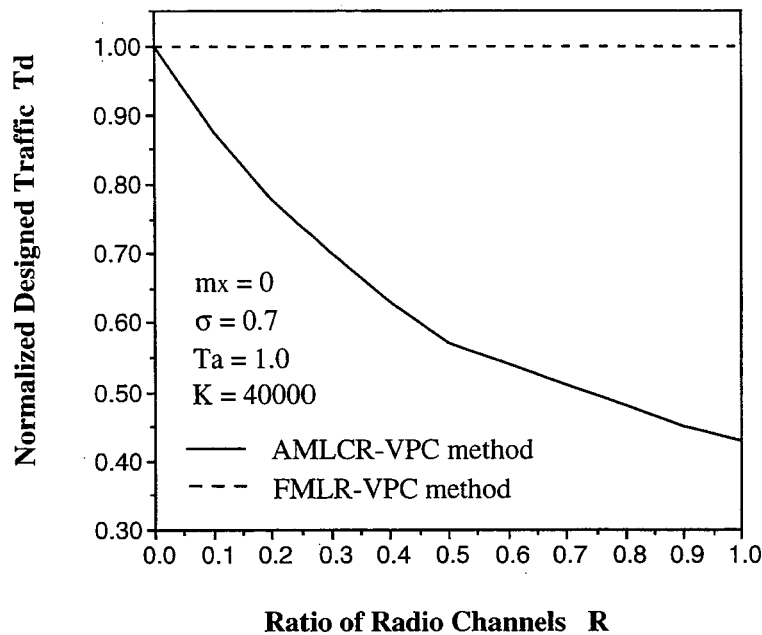


図 5.13: 設計時予測トラフィック量の許容度と無線伝送路比率の関係

ピーク量 T_a の特性を表している。FMLR-VPC 方式では、どの無線伝送路比率 R の場合でも、設計時に予測したトラフィック量と同じトラフィック量しか収容することができないことが分かる。一方、AMLCR-VPC 方式では、設計時予測トラフィック量より多いトラフィック量を収容することが可能となり、そのトラフィック量吸収効果は無線伝送路比率 R が大きくなるほど高くなる。例として $R = 0.4$ の場合、ピークトラフィック量の 0.65 倍 ($T_a = 0.65$) で設計したとしても、AMLCR-VPC 方式を適用したネットワークはピークトラフィック量 ($T_a = 1.0$) を収容することが可能となる。その場合、FMLR-VPC 方式と比較して、収容トラフィック量は約 1.7 倍の改善効果を有する。

図 5.13 は、無線伝送路比率 R に対する、実際発生するトラフィック量がピークになったときにそのトラフィック量を呼損率 1% を満たしながら収容するのに必要な設計時予測トラフィック量を示している。図より、FMLR-VPC 方式では、どの R においてもピークトラフィック量を収容するためには、ピークトラフィック量を予測して VP を設計する必要があるが、AMLCR-VPC 方式では、 R を大きくすると、予測トラフィック量を大きく削減することができる。例として $R = 0.6$ の場合、AMLCR-VPC 方式適用時はピークトラフィック量の約 0.55 倍のトラフィック量を予測してネットワークを設計した場合でも、ピークトラフィック量を収容することができる。つまり、併用 ATM エントランスネットワークに AMLCR-VPC 適用することによって、ネットワークが非常に大きなトラフィック予測誤差を許容する能力を得ることが可能となる。

5.5 結言

本章では、迅速にかつ効率的に無線 ATM エントランスネットワークを構成することを目的として、敷設コストの大きい光ファイバを用いずに、xDSL 等が用いられた低速有線伝送路とその不足容量を補うために無線伝送路を併用した有線併用無線 ATM エントランスネットワーク構成を提案した。本提案ネットワークで問題となる、ユーザの移動や増減に起因する予測の難しい ATM トラフィック変動を柔軟に吸収するために、各バーチャルパス容量をトラフィック量に応じて動的に割り当てることのできるバーチャルパス容量制御と無線変調多値数を変化させることによって伝送路容量を可変できる多値数可変無線伝送方式を組み合わせた AMLCR-VPC 方式を併用 ATM エントランスネットワークに適用した。AMLCR-VPC 方式を併用 ATM エントランスネットワークへ適用した時のバーチャルパス容量および変調多値数可変制御アルゴリズムを新たに検討し、様々な無線伝送路の比率に対する本ネットワークの呼損率ならびにトラフィック予測誤差許容度について理論解析した。以下に理論解析によって得られた結果を総括する。

- AMLCR-VPC 方式を適用した場合、無線伝送路容量がトラフィック量に応じて増減するので、呼損率を小さくするためには、全体のバーチャルチャンネルに対する無線伝送路に収容されるバーチャルチャンネルの比率をトラフィック量に応じて変化させる必要があることを示した。
- AMLCR-VPC 方式は FMLR-VPC 方式と比較して、ユーザの移動や増減に起因したトラフィック変動をより柔軟に吸収し、呼損率を大きく改善することを明らかにした。例として、無線伝送路の比率が 0.2 以上であれば、ユーザの移動によるトラフィック変動を呼損率 1% 以下で吸収できることを示した。
- AMLCR-VPC 方式を適用時には、予測トラフィック量を上回るトラフィック量が発生してもそれらを十分に収容できることを示し、FMLR-VPC 方式適用時と比較して、トラフィック予測誤差許容度が改善されることを明らかにした。例として無線伝送路比率が 0.4 の場合、本無線伝送方式適用時は、ピークトラフィック量の約 0.65 倍のトラフィック量を予測してネットワークを設計した場合でもピークトラフィック量を収容することができ、本無線伝送方式を適用しないネットワークに比べて約 1.7 倍のトラフィック量を収容できることを明らかにした。

第 6 章

結論

本論文では、マルチメディアトラフィックを収容する ATM エントランスネットワークを迅速にかつ効率良く構築することを目的として、基地局と基幹 ATM 網を接続するエントランスリンクを無線伝送路ならびに既存低速有線伝送路を用いたネットワーク構成を提案し、様々なサービスが要求する QoS を効率良く満足できるネットワーク構成の検討を行った。

以下に本研究で得られた成果を総括して述べる。

第 3 章では、全てのエントランスリンクを無線伝送路で構築し、スター型に接続した無線 ATM エントランスネットワーク構成を提案した。QoS を考慮した最適ゾーン構成について検討した結果を以下に示す。

- 無線 ATM エントランスネットワークに混在する様々なサービス要求 QoS を規定するセル転送遅延とセル廃棄率の二つの要求品質を一元的に評価するため、QoS 指数と呼ぶ評価関数を新たに定義した。
- エントランスネットワークのゾーン構成を変化させた場合のセル転送遅延とセル廃棄率について理論解析し、QoS 指数を用いてサービスの要求する QoS を満足できるゾーン構成について検討し、最も多くトラフィック量を収容できる最適ゾーン構成を明らかにした。例として、セル転送遅延 10^{-3} 秒、セル廃棄率 10^{-10} を要求するサービスを収容する場合、QPSK 方式適用時に、一辺 200 [m] の正方形サービスエリア内の最適ゾーン数は 100 であることを明らかにした。
- スター型無線 ATM エントランスネットワークに多値数可変伝送方式を適用した場合、伝送路容量を増大させセル転送遅延が改善でき、多値数固定の QPSK 方式に比べて少ないゾーン数で要求 QoS を満足させるネットワークを構築できることを明らかにし、また低セル廃棄率を要求しないサービスの収容トラフィック量を大幅に改善できることを明らかにした。例として、セル廃棄率 10^{-3} を要求するサービスをゾーン数が 49 のネッ

トワークで収容した場合、QPSK方式と比較して約2倍のトラフィック量を収容することができることが判明した。

第4章では、エントランスリンクを無線伝送路で構築した場合に問題となるエントランスリンク間の相互干渉を削減するため、トラフィック量に応じて変調多値数を変化するだけでなく、送信電力をサービスの要求するQoSを満足できる範囲内で小さくして送信を行う電力多値数可変無線伝送方式を提案した。干渉電力影響下におけるセル廃棄率について理論解析を行った結果を以下に示す。

- 提案方式が従来の多値数可変無線伝送方式と比較して、要求セル廃棄率を満足させながら送信電力を削減することができ、エントランスリンク間の与干渉電力を削減可能であり、セル廃棄率を約1/5に改善することが判明した。
- 提案方式は、要求セル廃棄率 10^{-3} を満たすのに必要なアンテナ指向性減衰率を、従来方式に比べて約10 dB削減可能であることを示し、干渉電力に対して強い方式であることを明確にした。

第5章では、既存の低速有線伝送路を用い、その容量不足を無線伝送路を併用して補う有線無線併用ATMエントランスネットワーク構成を提案した。本ネットワークで問題となるユーザの移動や増減に起因する予測の難しいATMトラフィック変動を柔軟に吸収することを目的として、有無併用網におけるトラフィック制御について検討した結果を以下に示す。

- 各バーチャルパス容量をトラフィック量に応じて動的に割り当てることができるバーチャルパス容量可変無線伝送方式を有無併用ATMエントランスネットワークに適用し、バーチャルパス容量制御と変調多値数可変制御のためのアルゴリズムを新たに考察した。
- 様々な無線伝送路の比率に対し、呼損率ならびにトラフィック予測誤差許容度について理論解析を行った結果、バーチャルパス容量可変無線伝送方式は、無線伝送路の比率が大きいほど、ユーザの移動や増減に起因したトラフィック変動をより柔軟に吸収し、呼損率を大きく改善できることを明らかにし、有無比率の最適点が存在しないことを示した。
- 本無線伝送方式を用いた場合、予測トラフィック量を上回るトラフィック量が発生してもそれらを十分に収容できることを示した。無線伝送路比率が0.4の場合、本無線伝送方式適用時は、ピークトラフィック量の約0.65倍のトラフィック量でネットワークを設計した場合でもピークトラフィック量を収容することができ、本無線伝送方式を適用しないネットワークに比べて約1.7倍のトラフィック量を収容できることを明らかにした。

参考文献

- [1] 富永英義, 浅谷耕一, 岡田忠信, 河原崎雅敏, 前田洋一, 山崎克之, “B-ISDN 入門”, オーム社 (1992)
- [2] D. Wright, 岡田 博美訳, “マルチメディア通信と広帯域ネットワーク”, 日刊工業新聞社 (1994)
- [3] 青木 利春, 青山 友紀, 濃沼 健夫, “広帯域 ISDN と ATM 技術”, 電子情報通信学会 (1995)
- [4] K. Bunchanan, R. Fudge, D. McFarlane, T. Phillips, A. Sasaki, H.Xia, “IMT-2000: Service Providers Perspective”, *IEEE Personal Communications*, pp.8-13 (Aug. 1997)
- [5] F. Leite, R. Engelman, S. Kodama, H. Mennenga, S. Towaij, “Regulatory Considerations Relating to IMT-2000”, *IEEE Personal Communications*, pp.14-19 (Aug. 1997)
- [6] R. Pandya, D. Grillo, E. Lycksell, “IMT-2000 Standards: Network Aspects”, *IEEE Personal Communications*, pp.20-29 (Aug. 1997)
- [7] R. D. Carsello, R. Meidan, S. Allpress, “IMT-2000 Standards: Radio Aspects”, *IEEE Personal Communications*, pp.30-40 (Aug. 1997)
- [8] D. Raychaudhuri, N. D. Wilson, “ATM-Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communication Networks”, *IEEE J-SAC*, vol.12, No.8, pp.1401-1414 (Oct. 1994)
- [9] M. Umehira, A. Hashimoto, H. Matsue, “An ATM Wireless Access System for Tetherless Multimedia Services”, *Fourth IEEE ICUPC*, pp.858-862 (Nov. 1995)
- [10] M. Umehira, M. Nakura, H. Sato, A. Hashimoto, “ATM Wireless Access for Mobile Multimedia: Concept and Architecture”, *IEEE Personal Communications*, pp.39-48 (Oct. 1996)

- [11] K.Ogawa,A.Hashimoto and K.Kohiyama, "Advanced Wireless Access System", *Kluwer Wireless Personal Communications*, Vol.4, No.3, pp.325-338 (May 1997)
- [12] K. Pahlavan, A. Zahedi, P. Krishnamurthy, "Wideband Local Access: Wireless LAN and Wireless ATM", *IEEE Communications Magazine*, pp.34-40 (Nov. 1997)
- [13] MMAC homepage: <http://www.arib.or.jp/mmac/> (1999年1月現在)
- [14] D. Raychaudhuri, L. J. French, R. J. Siracusa, S. K. Biswas, R. Yuan, P. Narasimhan, C. A. Johnston, "WATMnet: a prototype wireless ATM system for multimedia personal communication", *IEEE J-SAC*, vol.15, no.1, pp.83-95 (Jan. 1997)
- [15] D. Raychaudhuri, L. J. French, R. J. Siracusa, S. K. Biswas, R. Yuan, P. Narasimhan, C. A. Johnston, "WATMnet: a prototype wireless ATM system for multimedia personal communication", *IEEE ICC'96*, vol.1, No. 3, pp.469-477 (1996)
- [16] Magic Wand homepage: <http://www.tik.ee.ethz.ch/wand> (1999年1月現在)
- [17] MEDIAN homepage: <http://www.uk.infowin.org/ACTS/RUS/PROJECTS/ac006.htm> or <http://www.imst.de/mobile/median/frindex.html> (1999年1月現在)
- [18] M.J.Karol, Z.Liu, and K.Y.Eng, "Disributed-Queuing Request Pupdate Multiple Access (DQRPMA) for Wireless Packet (ATM) Netowrks", *Proc. ICC'95*, pp.1224-31 (Nov. 1995)
- [19] D.Petras, "Medium Access Control Protocol for Wireless, Transparent ATMAccess", *Proc. IEEE Wireless, Commun. Sys. Symp.*, pp.79-84 (Nov. 1995) Available at <http://www.comnets.rwthachen.de/petras>.
- [20] B. Walke, D. Petras, D. Plassman, "Wireless ATM: Air Interface and Network Protocols of the Mobile Broadband System", *IEEE Personal Communications*, pp.50-56 (Aug. 1996)
- [21] A. Acampora and M. Naghshineh, "An Architecture and Methodology for Mobile-Executed Handoff in Cellular ATM Netowrks", *IEEE J-SAC*, vol. 12, No. 8, pp.1365-75 (Oct. 1994)

- [22] A. Acharya, J. Li, B. Rajagopalan, D. Raychauduri, "Mobility Management in Wireless ATM Networks", *IEEE Communication Magazine*, vol.35, no.11, pp.100-109 (Nov. 1997)
- [23] P. Agrawal, E. Hyden, P. Krzyzanowski, P. Mishra, M. B. Srivastava, J. A. Trotter, "SWAN - A mobile multimedia wireless network", *IEEE Personal Communications*, pp.18-33 (Apr. 1996)
- [24] M. A. Marsan, C. Chiasserini, R. L. Cigno, M. Munafo, "Local and Global Handovers for Mobility Management in Wireless ATM Networks", *IEEE Personal Communications*, pp.16-24 (Oct. 1997)
- [25] Y. Nakayama, S. Aikawa, "Cell Discard and TDMA Synchronization Using FEC in Wireless ATM Systems", *IEEE J-SAC*, vol.15, no.1, pp.29-34 (Jan. 1997)
- [26] D. S. Eon, M. Sugano, M. Murata, H. Miyahara, "A combination scheme of ARQ and FEC for multimedia wireless ATM networks", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E81-B, no.5, pp.1016-24 (May 1998)
- [27] S. Ariyavisitakul, L. J. Greenstein, "Reduced-Complexity Equalization Techniques for Broadband Wireless Channels", *IEEE J-SAC*, vol.15, no.1, pp.5-15 (Jan. 1997)
- [28] H. Harada, R. Prasad, "Performance analysis of an OFDM based wireless ATM communication system", *Proc. PIMRC'97*, vol.3, pp.1095-1099 (Sep. 1997)
- [29] W. C. Y. Lee, "Spectrum and Technology of a Wireless Local Loop System", *IEEE Personal Communications*, pp.49-54 (Feb. 1998)
- [30] A. R. Noerpel, Y. Lin, "Wireless Local Loop. Architecture, Technologies and Services", *IEEE Personal Communications*, pp.74-80 (June 1998)
- [31] Hawley, G.T., "Systems considerations for the use of xDSL technology for data access", *IEEE Communication Magazine*, vol.35, no.3, pp.56-60 (Mar. 1997)
- [32] M. Gagnaire, "An overview of broad-band access technologies", *Proc. IEEE*, vol.85, no.12, pp.1958-72 (Dec. 1997)

- [33] M. Barton, "Unequal error protection for wireless ATM applications", *Proc. GLOBE-COM'96*, vol.3, pp.1911-1915 (1996)
- [34] F. Cheng, J. M. Holtzman, "Wireless intelligent ATM network and protocol design for future personal communication systems", *IEEE J-SAC*, vol.15, no.7, pp.1289-307 (Sep. 1997)
- [35] S. Akikawa, H. Sato, T. Yoshida, "Performance Analysis of Variable-Rate FEC for Multimedia Radio Communication", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E77, No.9, pp.1104-1113 (Sep. 1994)
- [36] J. Sanchez, R. Martinez, M. W. Marcellin, "A survey of MAC protocols proposed for wireless ATM", *IEEE Netw.*, vol.11, no.6, pp.52-62 (Nov.-Dec. 1997)
- [37] O. Kubbar, H. T. Mouftah, "Multiple access control protocols for wireless ATM: problems definition and design objectives", *IEEE Communication Magazine*, vol.35, no.11, pp.93-99 (Nov. 1997)
- [38] 小牧 省三, "可変容量マイクロ波方式に関する検討", 信学論 (B-II) vol.J73-B-II, No.10, pp.498-503 (Oct. 1990)
- [39] S. Sampei, S. Komaki, N. Morinaga, "Adaptive Modulation/TDMA Scheme for Large Capacity Personal Multi-Media Communication Systems", *IEICE TRANS. COMMUN.*, vol.E77-B, No.9, pp.1096-1103 (Sep. 1994)
- [40] 岡田 隆, 相河 聡, "無線中継伝送における全デジタル型多値変調器の設計とその可変容量伝送方式への応用", 信学論 (B-II), vol.J75-B-II, No.6, pp.325-336 (June 1992)
- [41] Jim. J. C. Su, "WIRELESS ATM APPROACHES", *Proc. MoMuC'97*, pp.43-46 (Oct. 1997)
- [42] 西 正博, "要求通信特性を考慮した ATM 経路選択法に関する研究", 大阪大学工学部通信工学科卒業論文 (1995)
- [43] 中村 寛, 貝山 明, 中島 明久, "次世代移動通信網における Mobile ATM の導入シナリオ", 電子情報通信学会 1996 年総合大会講演論文集, vol.1, p.332 (Mar. 1996)

- [44] H. Nakamura, H. Tsuboya, M. Nakano and A. Nakajima, "Applying ATM to Mobile Infrastructure Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol.36, No.1, pp.66-73 (Jan. 1998)
- [45] M. Cheng, S. Rajagopalan, L. F. Chang, G. P. Polline, M. Barton, "PCS Mobility Support over Fixed ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol.35, No.11, pp.82-92 (Nov. 1998)
- [46] 李 嬉珍, 小牧 省三, 森永 規彦, "ダイバーシチ受信を用いた可変容量デジタル無線伝送方式の特性", 信学論 (B-II), vol.J75-B-II, No.5, pp.268-275 (May 1992)
- [47] H. J. Lee, S. Komaki, N. Morinaga, "Theoretical Analysis of the Capacity Controlled Digital Mobile System in the Presence of Interference and Thermal Noise", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E75-B, No.6, pp.487-493 (June 1992)
- [48] H. J. Lee, S. Komaki, N. Morinaga, "Performance Analysis of the Capacity Controlled System with Adaptive Equalizer", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, No.2, pp.148-154 (Feb. 1993)
- [49] 大内 幹博, 李 嬉珍, 小牧 省三, 森永 規彦, "ATM 網に対する無線可変容量伝送方式適用の検討", 信学論 (B-II), vol.J76-B-II, No.8, pp.661-668 (Aug. 1993)
- [50] N. Miki, K. Kumozaki, "Time division multiple access protocol for a fiber-optic passive double star transport system" *IEICE Trans. Commun.*, vol.E78-B, no.7, pp.995-1001 (July 1995)
- [51] 後藤 尚久, "図説 アンテナ", 社団法人 電子情報通信学会 (1995)
- [52] 秋山 春夫, 池田 博昌, "現代 交換システム工学", オーム社 (1989)
- [53] John G. Proakis, "DIGITAL COMMUNICATIONS", *McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS*, third edition (1995)
- [54] T. Okada, T. Takao, T. Shirato, "Feasibility Study of Variable Multi-Level QAM Modem for Wireless ATM Networks", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E79-B, No.3, pp.316-327 (March 1996)

- [55] 塩田 茂雄, 魚瀬 尚朗, “ATM 網におけるバーチャルパス容量制御方式 (一括変更方式)”, 信学論 (B-I), vol.J75-B-I, No.5, pp.333-342 (May 1990)
- [56] S. Shioda, H. Uose, “Virtual Path Bandwidth Control Method for ATM Networks: Successive Modification Method”, *IEICE Trans. Commun.*, vol.E74, No.12, pp.4061-4068 (Dec. 1991)
- [57] M. Logothetis, S.Shioda, “Medium-Term Centralized Virtual-Path Bandwidth Control Based on Traffic Measurements”, *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 43, No. 10, pp.2630-2640 (Oct. 1995)
- [58] 西 正博, “無線ならびに有線伝送路を併用した非同期転送モードの品質改善効果に関する研究”, 大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程修士論文 (1997)
- [59] 清水 洋, 鈴木 洋, “ATM-LAN”, ソフト・リサーチ・センター (SRC) (1995)
- [60] 間瀬 憲一, 塩田 茂雄, “ATM 網のリアルタイムネットワークマネージメント”, 信学技法, IN89-111 (1990)

本論文に関する原著論文

学会論文

1. M. Nishi, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Proposal of Power and Modulation Level Controlled Radio Entrance Network for Wireless ATM Access", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E81-B, No.12, pp.2296-2302 (Dec. 1998)

国際会議

1. M. Nishi, K. Tsukamoto, M. Okada and S. Komaki, "Proposal of Radio Modulation Level Controlled VPC in ATM networks and its call blocking improvement", *Proc. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'96)*, vol.2, pp.598-602, Taipei Taiwan (Oct. 1996)
2. M. Nishi, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Power and Modulation Level Controlled Radio Method for Wireless ATM Access Networks", *Proc. Multimedia Mobile Communications (MoMuC'97)*, pp.530-533, Seoul Korea (Oct. 1997)
3. M. Nishi, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Proposal of power and modulation level controlled radio entrance network for Wireless ATM access", *Proc. Taiwan-Japan Joint Workshop on The Latest Development of Telecommunication Research (TJCOM98)*, pp.25-30, Hsinchu Taiwan (Jan.1998)
4. M. Nishi, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Consideration on Effective Networks Design for Wireless ATM Entrance Networks using Power and Modulation Level Controlled Radio Method", *PERSONAL WIRELESS COMMUNICATIONS (PWC'98)*, pp.145-152, Tokyo Japan (Apr. 1998)
5. M. Nishi, K. Tsukamoto and S. Komaki, "Combined Evaluation Criterion for Quality of Service in Radio ATM Entrance Networks", *Proc. Multimedia Mobile Communications (MoMuC'98)*, pp.51-56, Berlin Germany (Oct. 1998)

研究会

1. 西正博, 塚本勝俊, 岡田実, 小牧省三, “ATM 網への無線可変容量伝送方式の適用効果について”, 信学技法, RCS95-11, pp.81-86 (Nov. 1995)
2. 西正博, 塚本勝俊, 岡田実, 小牧省三, “無線可変容量伝送による ATM セル廃棄率改善効果について”, 信学技法, CS96-15, RCS96-8, pp.1-6 (May 1996)
3. 西正博, 塚本勝俊, 小牧省三, ”無線 ATM エントランスネットワークにおける QoS を考慮したゾーン分割”, モバイルマルチメディア通信ワークショップ (MoMuC-J), pp.1-6 (Mar. 1998)

全国大会

1. 前田慎, 西正博, 岡田実, 塚本勝俊, 小牧省三, “ミリ波車々間通信における信号伝搬特性の解析”, 電子情報通信学会総合大会, B-5-294, p.681 (1997)