

Title	移動通信のブロードバンド化ならびにオープン化に関する研究
Author(s)	岡ノ上, 和広
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/729">https://hdl.handle.net/11094/729</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

移動通信のブロードバンド化ならびに  
オープン化に関する研究

2010年7月  
岡ノ上和広



## 謝 辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授小牧省三博士の御指導のもと、筆者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻後期課程在学中ならびに日本電気株式会社在職中に行った研究成果をまとめたものである。本研究を進めるにあたり小牧教授から賜った御懇意なる教示、御鞭撻に対し、深甚なる感謝の意を表する次第である。

また、本論文をまとめるにあたり大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻教授三瓶政一博士、ならびに同専攻准教授塚本勝俊博士に有益な御教示、御助言を賜ったことに対し深く感謝する。

さらに、筆者の大学院後期課程在学中、講義等を通じて通信工学の各分野に関して、ならびに本論文に関して多大なご指導を賜った、大阪大学大学院工学研究科教授滝根哲哉博士、同教授北山研一博士、同馬場口登博士、同井上恭博士、同河崎善一郎博士、ならびに大阪大学産業科学研究所教授鷲尾隆博士、同教授溝口理一郎博士をはじめとする諸先生方に厚く感謝を申し上げる。

本論文の執筆と社会人博士課程への進学を快諾いただいた日本電気株式会社 企業ネットワーク開発本部 柳川洋輝本部長、加治徹グループマネージャ、倉島顕尚グループマネージャに感謝する。

さらに、本論文の第 2 章の基礎となる無線伝送技術に関し、有益な御教示、御助言をいただいた東海大学大学院組込み技術研究科教授 並木淳治博士、合同会社ウイトラ 古谷之綱氏、ハイムテクノロジー 富田秀穂氏、日本電気株式会社 モバイル RAN 事業部 永田善紀氏、ネットワークプラットフォーム事業本部 後川彰久博士に、深く感謝の意を申し上げます。第 3 章の軸となる IP を中心としたデータ伝送プロトコルの基本コンセプトや考え方について、熱心な御討論をいただいたアセロスコミュニケーションズ 大澤智喜博士、百名盛久氏、日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所 松永泰彦博士に深く感謝する。また、筆者が 1995 年～1996 年にかけて滞在した Swedish Institute of Computer Science において IP での移動、マルチキャストの考え方について御指導いただいた Stephen Pink 教授に深く感謝する。第 4 章の水平分業モデルにおけるネットワークサービスのあり方について、熱心な御討論と御厚意あふれるご支援いただいた日本電気株式会社 情報・メディアプロセッシング研究所 山崎俊太郎氏に深く感謝の意を申し上げます。また、ヘテロジニアスな無線回線バンドルに関し、方式検討・実装・評価を筆者と共に支えていただいた日本電気株式会社 サービスプラットフォーム研究所 丹生隆之氏、防衛ネットワークシステム事業部 中田恒夫博士に深く感謝する。

また、本研究の基礎となる考え方は、日本電気株式会社入社以来、研究開発のみならず、製品開発、マーケティング、カスタマ対応など幅広い領域に携わることで得られた経験に支えられている。多くの議論をいただいた日本電気株式会社中央研究所、企業ソリューション事業本部をはじめ

とする関係各位に深く感謝する。

大阪大学名誉教授・広島国際大学学長 森永規彦博士には、筆者が大阪大学工学部通信工学科，同大学院工学研究科通信工学専攻前期課程在学中に，無線通信技術のあり方，研究開発の進め方についてご教示いただき，無線通信分野を志す端緒を開いて頂いたことに対し深謝する次第である。

最後に，私の本研究遂行行動を深く理解し，絶え間なく支えていただいた家族，安代，大樹に心より感謝する。

## 内 容 梗 概

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻博士後期課程在学中ならびに日本電気株式会社在职中に行った移動通信システムのブロードバンド化ならびにオープン化に関する研究成果をまとめたものであり、以下の5章より構成される。

**第1章**では、本研究の背景となる技術動向、市場動向を概説し、本研究の位置づけと目的を明らかにする。

**第2章**では、TDMA (Time Division Multiple Access)移動通信システムのブロードバンド化を支える無線伝送技術として、低コストで実現できる適応等化方式に対し、方式構成面からの理論的検討を加え、最適受信方式として知られる最ゆう系列推定方式に着目し、その高い等化能力を低コストで引き出す制御方式を提案する。具体的には、1)サンプルタイミング制御不要な分数間隔サンプル型最ゆう系列推定方式の導出、2)実装を考慮した分数間隔サンプル型最ゆう系列推定方式の演算量削減方式、3)固定小数点演算で高速な通信路変動に追従するトラッキング方式、4)受信入力レベル制御を簡素化する極座標信号入力方式を提案する。計算機シミュレーション、プロトタイプ機による評価を行い、提案方式の有効性ならびに有用性を明らかにする。

**第3章**では、IPによる移動ホスト収容を支える基盤技術として、ユニキャスト通信、マルチキャスト通信の双方に対する制御方式を提案し、理論的検討を行った結果を述べる。さらに、IPの移動ホスト収容がネットワークオープン化にもたらす意義を明確化する。IPによる移動ホスト収容の大きな課題には、ホスト移動を考慮していない既存ホストとの後方互換性がある。ユニキャスト通信に関し、後方互換性を維持すると共に、移動ホストを収容するための制御トラフィック量の抑圧と移動ホストに関する冗長な通信路の削減を両立する方式を提案する。また、マルチキャスト通信に関し、まず、物理的なネットワークポロジに基づくメンバー参加ポリシーを想定するIP Multicast方式のコンセプトは、移動ホストの参加にはそぐわないことを示す。この課題に対し、ホストの移動に即して参加ポリシーのカテゴリを増やし、移動ホストの参加ポリシーに対応してデータグラム転送方法を適切に使い分けることで、参加ポリシー遵守と移動ホストへのマルチキャストトラフィックの抑圧ができることを明らかにする。

**第4章**では、移動通信システムの需要喚起に向けて、オープン化されたインタフェースを活用した新サービス創出のための技術ならびに方策のあり方に対する検討と提案を行う。サービス創出技術に関し、異種・複数の通信事業者が提供するサービスを束ねることで、単独通信事業者では実現困難な広域・広帯域アクセスリンクを創出する方式を示す。このリンクを列車内インターネットアクセスへ適用することを想定し、列車内での実験を通して有用性を示す。方策のあり方に関し、通信事業者が提供するサービスを、個別最適化が求められる法人企業向け内線電話に適用するためのルールのあるあり方を検討する。フェムトセル基地局の利用者設備化、無線リソース管理業務の部分委託、音声通話に関する帯域幅課金、みなしMVNO (Mobile Virtual Network Operator)の導

入により, 通信事業者サービスの法人企業向け内線電話への適用可能性が高まることを示す.

**第5章**は, 本論文の結論であり, 本研究で得られた結果の総括を行う.

# 目次

第 1 章 序論 .....	1
第 2 章 移動通信システムにおけるブロードバンド伝送技術 .....	11
2.1. 緒言 .....	11
2.2. 分数間隔サンプル型 MLSE 方式 .....	12
2.2.1. 通信路モデル .....	12
2.2.2. 分数間隔サンプル型 MLSE 受信器の構成 .....	14
2.2.3. 分数間隔サンプル型 MLSE 受信器のブランチメトリック演算 .....	14
2.3. 状態数を制限した分数間隔サンプル型 MLSE 受信器の構成 .....	17
2.3.1. 状態数制限による劣化要因 .....	17
2.3.2. 誤差信号に基づくブランチメトリックの重み付け合成 .....	19
2.4. 受信特性評価 .....	20
2.4.1. 計算機シミュレーション評価 .....	20
2.4.2. プロトタイプ機を用いた評価 .....	25
2.5. 結言 .....	27
第 3 章 IP による移動ホスト収容技術とオープン化 .....	29
3.1. 緒言 .....	29
3.2. ユニキャスト通信に対する移動ホスト収容方式 .....	30
3.2.1. IP の移動ホスト収容の課題 .....	30
3.2.2. $IP^2$ (IP Squared)方式 .....	33
3.2.3. $IP^2$ 方式の特徴と評価 .....	39
3.3. IP Multicast の移動拡張方式 .....	44
3.3.1. IP Multicast の移動ホスト対応の課題 .....	44
3.3.2. IP Multicast の拡張による mobile IP 対応方式 .....	49
3.3.3. IP Multicast の移動拡張による効果 .....	54
3.4. 結言 .....	54
第 4 章 移動通信サービス活用の技術と方策 .....	57
4.1. 緒言 .....	57
4.2. ヘテロジニアスな無線回線バンドリングサービス .....	57
4.2.1. 公共交通機関向け Internet アクセスサービス・BBRide <sup>®</sup> .....	58
4.2.2. BBRide <sup>®</sup> アーキテクチャ .....	61
4.2.3. モバイル逆多重(MIM: Mobile Inverse MUX)方式 .....	63
4.2.4. モバイル逆多重方式の性能評価 .....	66
4.3. 通信事業者サービス活用方策 .....	69



4.3.1. 法人企業内無線通信インフラの要件.....	70
4.3.2. 企業内無線内線電話の高度化に向けた提言.....	73
4.3.3. ライセンスバンドを活用した企業内無線内線電話の意義.....	77
4.4. 結言.....	78
第5章 結論.....	81
参考文献.....	83
付録A ガウス雑音に対するブランチメトリックの導出.....	89
付録B 分数間隔サンプルされたガウス雑音の正規化相関係数.....	91
付録C QT-LMS アルゴリズムを適用した型 MLSE 受信器の導出.....	93
付録D 受信信号レベルのダイナミック変動に対処するフロントエンド構成.....	99
付録E 略語集.....	103
本論文に関する原著論文.....	105

## 目次

図 1-1 国内の電気通信事業の売上高推移.....	1
図 1-2 国内の移動通信加入者動向.....	2
図 1-3 移動通信事業の売上高, 売上高比率推移.....	2
図 1-4 固定アクセス系の加入者の推移.....	3
図 1-5 PC の一般世帯普及率推移.....	5
図 1-6 光ファイバの伝送容量の推移.....	6
図 1-7 光通信機器とディスプレイ機器の売上高推移.....	6
図 1-8 移動通信産業のエコシステムモデルと本論文の位置づけ.....	8
図 2-1 アクセス方式別の移動通信加入者数と伝送速度の概要.....	11
図 2-2 通信路モデル.....	12
図 2-3 等価通信路モデル.....	13
図 2-4 分数間隔サンプルを用いた MLSE 受信器.....	14
図 2-5 ブランチメトリック演算回路.....	16
図 2-6 通信路インパルスレスポンスの例.....	17
図 2-7 状態数を制限した場合のブランチメトリック演算回路.....	18
図 2-8 MLSE 受信器のブロック図.....	21
図 2-9 Threshold による動作の違い.....	21
図 2-10 平均シンボル長による動作の違い.....	22
図 2-11 $T$ 遅れの遅延波がある場合の受信特性.....	23
図 2-12 $T/2$ 遅れの遅延波がある場合の受信特性.....	23
図 2-13 $T/4$ 遅れの遅延波がある場合の受信特性.....	24
図 2-14 フラットフェージング下の受信特性.....	24
図 2-15 ログアンプの振幅特性と skew 特性.....	26
図 2-16 ビット誤り率対入力信号レベル特性.....	26
図 2-17 ビット誤り率対サンプルタイミング特性.....	27
図 3-1 Hourglass(砂時計) model.....	29
図 3-2 IP による移動ホスト収容に向けた基本コンセプト.....	31
図 3-3 移動ホストの通信経路.....	32
図 3-4 VIP 方式のカプセル化方式.....	33
図 3-5 $IP^2$ の階層構造.....	33
図 3-6 $IP^2$ データグラム構成.....	34
図 3-7 データグラム識別フロー.....	35
図 3-8 $IP^2$ データグラムのヘッダ構造.....	36
図 3-9 データグラム識別誤り率.....	36
図 3-10 $IP^2$ 終端機能による既存 IPv4 ホスト(SH)収容.....	37

図 3-11 平均移動通知メッセージ数の比較.....	41
図 3-12 冗長経路比率の比較 .....	42
図 3-13 Host Group モデル.....	45
図 3-14 TTL に基づく IP Multicast の scope.....	45
図 3-15 SAP メッセージの報知.....	46
図 3-16 mobile IP の制御, 通信手順.....	47
図 3-17 トンネル法によるマルチキャストデータグラム送受信.....	47
図 3-18 直接法によるマルチキャストデータグラム送受信.....	47
図 3-19 トンネル法におけるマルチキャストデータグラムの重複転送.....	48
図 3-20 直接法におけるメンバー管理の課題.....	48
図 3-21 MH, HA 及び scope の関係.....	49
図 3-22 HA の動作フロー .....	52
図 3-23 HA によるトンネルの構成手順 .....	52
図 3-24 MH の動作フロー .....	53
図 3-25 MH 主体の制御シーケンス .....	53
図 4-1 無線 LAN スポットが欲しい場所.....	58
図 4-2 BBRide <sup>®</sup> による車両-地上間接続の概要 .....	59
図 4-3 BBRide <sup>®</sup> アーキテクチャ.....	61
図 4-4 ユーザプレーンのレイヤ構成 .....	62
図 4-5 MIM の基本機能とレイヤ構成.....	62
図 4-6 BBRide <sup>®</sup> の packets フォーマット.....	63
図 4-7 フロー制御方式概要.....	64
図 4-8 再送制御方式概要 .....	65
図 4-9 再送制御の動作概要 .....	66
図 4-10 シミュレーション結果.....	67
図 4-11 MIM の実フィールド評価結果 .....	67
図 4-12 国内の電話トラヒック動向.....	69
図 4-13 Internet アクセス人口のアクセス手段ごとの推移 .....	69
図 4-14 移動通信事業者サービス利用時のランニングコスト.....	75
図 4-15 データ接続約款を用いたコストの推定.....	76
図 4-16 通信事業者サービスの帯域幅料金とパケット通信約款の端末数依存料金の組み合わせ .....	77
図 B-1 受信フィルタ出力雑音の相関係数.....	91
図 C-1 1 次 QT-LMS アルゴリズムによる推定コンセプト.....	93
図 C-2 1 次 QT-LMS アルゴリズムを用いた MLSE 受信器 .....	95
図 C-3 0 次変動成分の推定例.....	96
図 C-4 1 次変動成分の推定例.....	96
図 C-5 通信路インパルスレスポンスの推定例 .....	96
図 D-1 極座標信号入力型 MLSE 受信機.....	99

図 D-2 ビット誤り率対量子化ビット数特性.....	100
図 D-3 ビット誤り率対 skew 特性.....	100
図 D-4 ビット誤り率対ログアンプゲインエラー特性.....	101



## 表目次

表 1-1 ADSL の料金体系 .....	7
表 2-1 シミュレーション主要諸元 .....	20
表 2-2 プロトタイプ機の主要諸元 .....	25
表 3-1 追加属性による参加メンバー制御ポリシー .....	50
表 3-2 MH の各グループ形態への参加方法 .....	51
表 4-1 車両-地上局間のアクセス手段の特徴 .....	60
表 4-2 事業者の内線サービスとパケット接続約款の概要 .....	75



# 第1章 序論

コミュニケーションは、人の生活をより豊かにするために不可欠な要素である。特に、情報通信システムは、時間と空間を越えて、人と人、人と情報やモノをつなぐ極めて有効な手段である。昨今、人と人をつなぐ基本機能である音声通話に加え、画像、ビデオやテキスト等、様々なメディアによるコミュニケーションが実現され、より豊かなつながりが新たな価値として提供されていることは周知の事実である。これは、情報通信を支えるデバイス技術からシステム化技術まで、幅広い要素技術の研究開発の賜物である。本来、このようなエンドユーザに提供する価値の向上と共に、情報通信「産業」も成長し、新たな価値の創出・提供を循環させる正のスパイラルをまわし続けることが健全な姿である。しかし、図 1-1 に示すように、国内の電気通信事業の売上高[1][2]は、2001年のITバブル崩壊を境にして、拡大成長局面から縮小均衡局面へと大きく変化した。この状態では、新たな価値の創出・提供の需給バランスがくずれ、健全な成長は見込めない。

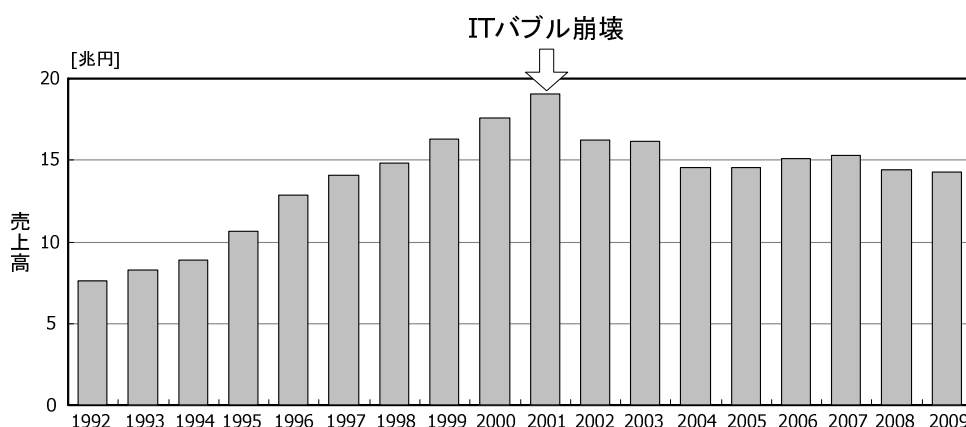


図 1-1 国内の電気通信事業の売上高推移

工学的研究活動においては、エンドユーザが享受する価値を高める要素技術の研究に加え、産業として健全な成長を支えるための研究も重要であると考えられる。この 2 つのアプローチによって得られる成果を両輪としてはじめて、価値を享受するエンドユーザ、価値を提供する産業の両者が win-win の関係を維持できる。本論文は、このような視点に基づき、グローバルに見て成長が著しい移動通信にフォーカスをあてた研究成果をまとめるものである。

国内の移動通信加入者数[3]は、図 1-2 に示すように、1990 年代中頃から急速に増加し、2006 年には 1 億加入を超え飽和状態にあるといえる。この間に、固定通信のオプションという位置づけから、ライフラインとみなされる[4]ほど、エンドユーザに対する提供価値は向上した。しかし、移動通信サービスとしては、現在のところ普及期を経て成熟期に移行している[5]。



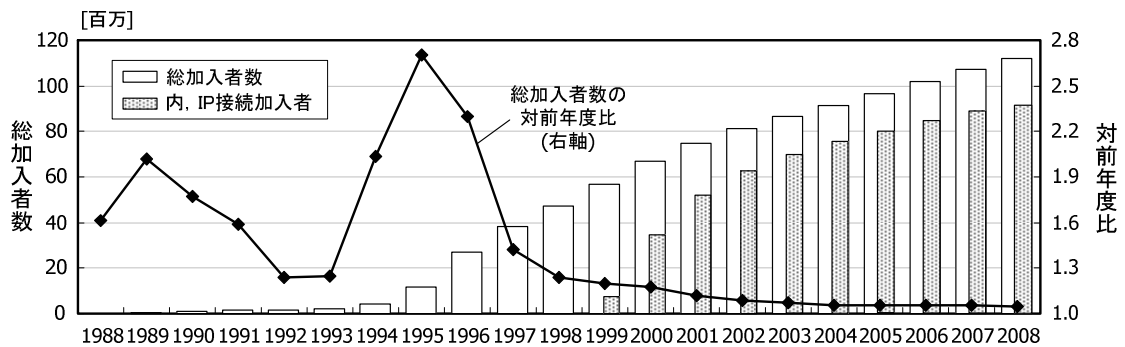


図 1-2 国内の移動通信加入者動向

このような状況の中、図 1-3 に示すように、電気通信事業売上高全体に対する移動通信事業の売上高比率は 2005 年をピークに減少傾向を示すと共に、移動通信事業の売上高も、2006 年をピークに減少傾向を示している[1].

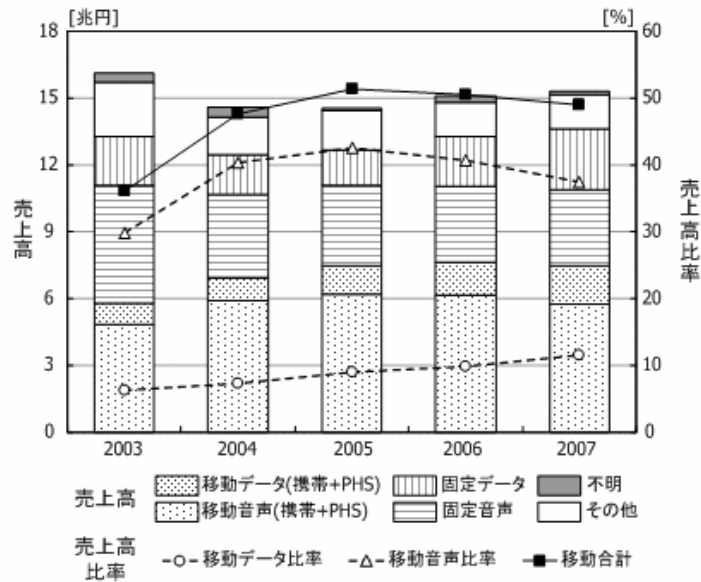


図 1-3 移動通信事業の売上高, 売上高比率推移

この状況を打破する移動通信市場全体の活性化が喫緊の課題であり、政府・総務省も様々な施策を打ち出している[5][6]. 同時に、活性化を加速できる効果的な研究開発も並行して進めていく必要があると考える。これに向け、過去の固定系通信の状況を振り返り、移動通信に関する研究開発のアプローチの方向性を整理することは、意義のあることと考える。

固定アクセス系の加入者数、対前年度比の推移[7]を図 1-4 に示す。1970 年代後半から、加入者電話契約者数の対前年度比が 5%程度の伸びに留まっている。これは、世帯数の増加率が 6~7%程度[8]であり、ほぼ、飽和状態に達したものと考えられる。このような状況の中、2001 年以降、ADSL (Asynchronous Digital Subscriber Line), FTTH (Fiber To The Home)を軸としたデータアクセ

加入者数が増大している。固定アクセス系は、加入者電話サービス事業からデータアクセスサービス事業へ軸足を移すことで、成長局面に移行している。これは、新たなデータという通信メディアの誕生という意味的变化がもたらしたものであるが、この成長局面に移行する経緯の整理の中から、移動通信における研究開発のアプローチを見出してみる。

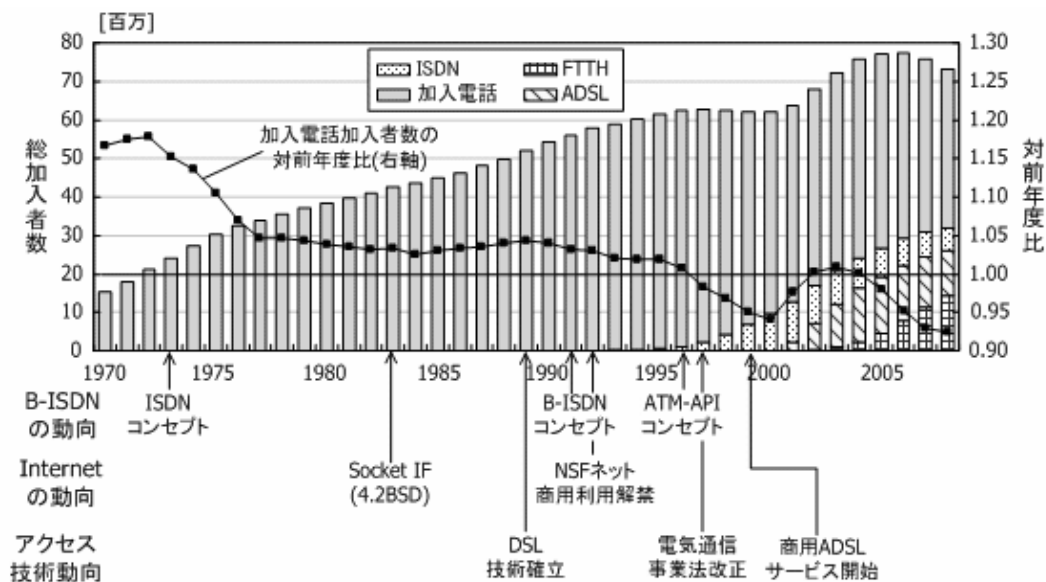


図 1-4 固定アクセス系の加入者の推移

データ通信を支えるネットワークの側面から捉えると、1980年代は、ATM (Asynchronous Transfer Mode)[9]を軸とした集中型の垂直統合モデルに立脚した B-ISDN (Broadband Integrated Service Digital Network)と IP (Internet Protocol)を軸としたオープンな水平分離モデルに立脚した Internet[10]の覇権争いの時代と考えられる。結果的には、IP が大きく発展し、データ通信を支えることとなったことは周知の事実である。この結果は、IP ネットワークのオープン性がキーとなっていると考える。この過程を検証するために、図 1-4 に主要な出来事も併せて示す。

- B-ISDN:**  
ISDN (Integrated Service Digital Network)の後継として、接続を集中管理し、音声、動画、データといった様々なメディアを高品質で提供するサービスを目指し、1991年にその概念が発表された[11]。1995年には B-ISDN を支える ATM の仕様が[12]、1996年には、ATM native な API (Application Interface)の概念が定められた[13]。
- Internet:**  
米・国防省の ARPA (Advanced Research Projects Agency)の研究プロジェクトに端を発する Internet は、NSF (National Science Foundation)が管理する NSFNET (National Science Foundation Network)をバックボーンとし、米国をはじめ各国の大学や研究機関を接続する学術ネットワークへ発展した。この過程で、1983年には、4.2 BSD (Berkeley Software Distribution) OS (Operating System)に Socket インタフェースが API として実装され広く公

開された[14]. さらに, 1991 年には, NSFNET の商用利用が解禁され, 利用者の裾野が大きく拡大していった[15].

- **アクセス技術:**

1989 年に xDSL 技術がベルコア社によって開発された. これは, 既存の音声通話用のメタル回線を用い, 音声通話が利用しない 4 kHz 以上のバンドを用いて Mbps クラスの広帯域伝送を行う技術である[16]. この技術は, 光ファイバ等の新たなアクセスラインを敷設する必要が無く, 極めて安価にブロードバンド環境を提供することができる. さらに, 1996 年の答申[17]に基づく電気通信事業法改正(1997 年)により, アクセス網が開放され xDSL 技術を自由かつ公正に商用利用できる環境が整った.

IP を機軸としてネットワークのオープン性を考えると, 有線, 無線など多様なリンク層以下のアクセス技術を集約して上位層に対して仮想化する下位層に対するオープン性と, 上位層が利用しやすい API を提供する上位層に対するオープン性の 2 つがあると考えられる. この視点から B-ISDN と Internet を比較すると,

- 上位層に対するオープン性  
1983 年に Socket インタフェースが実装・配布されることで広まった Internet では, この API を通じて, 様々なアプリケーションが開発された. 一方, B-ISDN は, 1996 年に API のコンセプトが定められたに過ぎず, アプリケーション開発に 10 年以上の時間差が生じている
- 下位層に対するオープン性  
広帯域の光ファイバを前提とした ATM に大きく依存する B-ISDN に対し, Internet は下位層への依存性はない. これは, QoS (Quality of Service) の視点で見ると, Internet は劣るものの, 低コストでブロードバンド環境を提供可能な ADSL の適用も可能である

とまとめられる. この違いが, B-ISDN と Internet の明暗を分け, 成長局面への変化に向けた一つの必要条件になったと考える. また, ネットワークアーキテクチャとは独立の要件として, 低コストなブロードバンド化に対するニーズは高い. 上述の xDSL のように, 優れた技術を迅速に導入できる環境を提供できるようにする適切な法制度の整備も固定アクセス系市場の活性化を加速するためには不可欠な条件であると考えられる.

また, データ通信による固定アクセス系市場の活性化は, ネットワークに加えて, 端末やアプリケーション・コンテンツとの関係も重要である. 固定アクセス系において, 新たなデータ通信を扱う主要な端末としては, PC が挙げられる. 図 1-5 に, 国内の一般世帯における PC の普及率推移を示す[18]. 1993 年以降, 徐々に普及率が立ち上がり始めたが, 大きなターニングポイントは, 1995 年に販売された Windows<sup>®</sup> 95 operating system<sup>1</sup>にある. この OS は, TCP/IP がバンドルされ, 図 1-4 に示されるように ISDN 加入者の増加とあいまって, PC の普及率を後押しした. この頃には,

---

<sup>1</sup> Windows は, 米国 Microsoft Corporation の米国, 日本およびその他の国における登録商標である.

Internet 上のアプリケーションとして、SMTP (Simple Mail Transfer Protocol)[19]、POP (Post Office Protocol)[20]といった電子メール関連プロトコル、World Wide Web の基盤となる http (hyper text tranfer protocol)[21]、現在のブラウザの元となる NCSA Mosaic[22]、動画や音楽のストリーミング再生に対応した Real AudioPlayer 等が Socket インタフェース上に開発されており、TCP/IP がバンドルされた PC で容易に利用できる環境となった。また、CD (Compact Disc)をはじめとする AV (Audio & Visual)コンテンツのデジタル化の進展、IEEE 1394[23]標準策定に伴う PC、AV 機器のデジタルインタフェース接続の普及により、テキストに加えて、AV コンテンツを活用したコミュニケーションも可能となり、普及率の上昇に拍車をかけた。併せて、デジタルコンテンツの取扱に関し、その著作権を保護する仕組みとして、1998 年には DTCP (Digital Transmission Content Protection) が標準化[24]され、さらには、IP ネットワークへ対応するために 2004 年には DTCP-IP[25]も規格化された<sup>2</sup>。

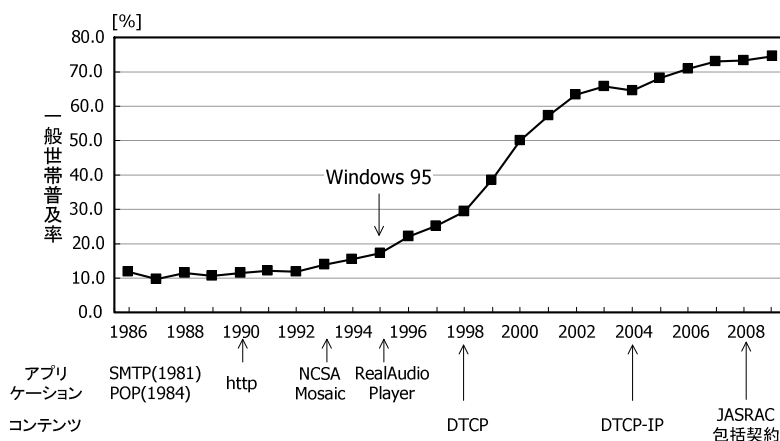


図 1-5 PC の一般世帯普及率推移

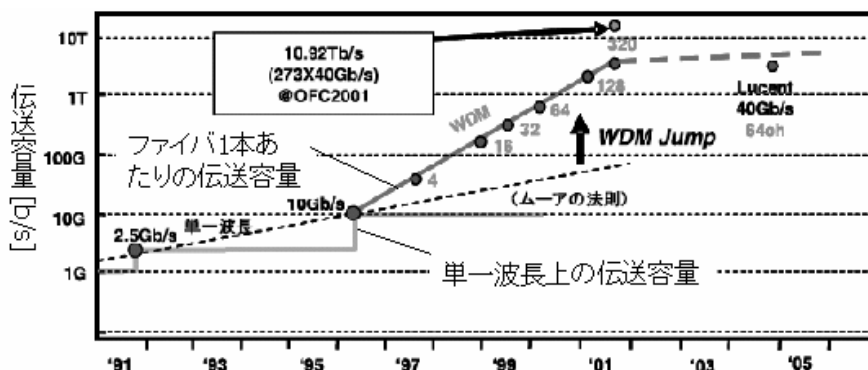
このように、IPによるネットワークの上位/下位層に対するオープン化、下位層におけるxDSLによる低コストなブロードバンド化、上位層におけるアプリケーション/コンテンツ、端末の進展があいまって、固定アクセス市場の活性化の基盤は整ったと考えられる。しかしながら、実際には、図 1-1 のように、2001 年の IT バブル崩壊以降、電気通信市場の売上高は縮小均衡化の様相を呈している。この原因は、1)ネットワークインフラ設備の過剰性能と投資、2)ネットワークに対するエンドユーザの価値観の変化にあると考える。

ネットワークインフラ設備の過剰性能と投資に関し、まず、図 1-6 にネットワークインフラを支える光ファイバの伝送容量の推移を示す。1996 年以降、WDM (Wavelength Division Multiplexing)技術[26]の進展により、ファイバ 1 本あたりの伝送路容量はムーアの法則<sup>3</sup>を上回る速さで増加してい

<sup>2</sup> 現実的には、DTCP-IP は限定的な利用に留まり、最近では、JASRAC (Japanese Society for Rights of Authors, Composers and Publishers, 一般社団法人日本音楽著作権協会)と動画配信サイトとの包括契約も結ばれている。

<sup>3</sup> 米 Intel 社の設立者ゴードン・ムーア (Gordon E. Moore)が 1965 年に提唱した、半導体技術の進歩に関する経験則。『半導体チップの集積度は、およそ 18 カ月で 2 倍になる』というもの。

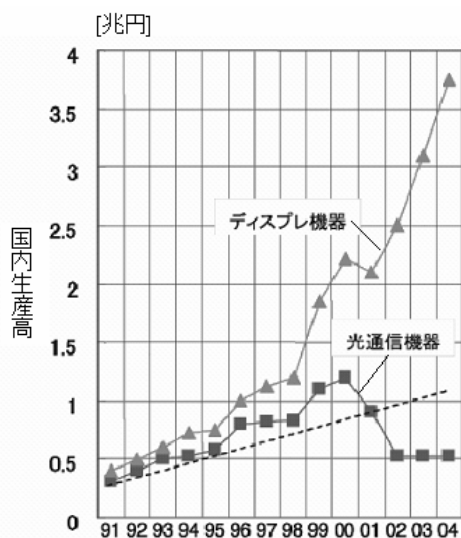
った。これは、1993 年の米国の「情報スーパーハイウェイ構想」の下、冷戦終結に伴う余剰軍事費投入による光通信関連の研究開発競争によるところが大きい[27].



出展: 文部科学省科学技術政策研究所「科学技術動向2004年12月号」

図 1-6 光ファイバの伝送容量の推移

このような状況の中、2001 年の IT バブル崩壊が、通信事業者やネットワーク機器ベンダー、IT 機器ベンダー等、様々な産業に大きなインパクトを与えた。一例として、図 1-7 に、光通信機器とディスプレイ機器の国内生産高の推移を示す。ディスプレイ機器は、IT バブル崩壊により一時的に売上高は減少に転じたものの、2002 年以降は再び成長局面に転換している。一方、光通信機器の売上高は、数年に渡って低迷したままである。これは、需要の冷静な分析なしに行われた競争的投資がオーバーヒートし、10 年かけて育てるべき光通信インフラ市場を高々数年で飽和させてしまった結果と分析されている[27].



出展: 文部科学省科学技術政策研究所  
「科学技術動向2004年12月号」

図 1-7 光通信機器とディスプレイ機器の売上高推移

この状況を回避するには、1)需要に見合った競争的投資のコントロール、2)競争的投資を回収できるような新たな需要創出、の2つのアプローチが考えられる。市場の健全な成長を考えると、成長

の鈍化を助長しかねない 1)のアプローチよりも、2)のアプローチを模索することが重要である。

また、ネットワークに対するエンドユーザの価値観の変化を示す例として、現状のエンドユーザ向けの ADSL 料金体系[28]を表 1-1 に示す。

**表 1-1 ADSL の料金体系**

ADSL 料金	高速(NTT:47 Mbps/ソフトバンク:50 Mbps)	中速(12 Mbps)
NTT 東日本	3650 円/月	3550 円/月
ソフトバンク	2780 円/月	2480 円/月

この表より、中速と高速には、約 4 倍の通信路容量の差があることが分かる。これは、ネットワークインフラから見ると、アクセス系に加えて、基幹系へのインパクトも大きい。しかしながら、エンドユーザからみると、その付加価値は、高々、100 円～300 円/月程度であり、通信路容量増加が提供する価値は相対的に低下していると言える。一方で、ADSL の導入は、1.5 Mbps 程度の通信路容量にもかかわらず、従来の従量制から定額・常時接続へと質的变化をもたらし、加入者数の増大を引き起こした。これは、エンドユーザから見ると、通信路容量増加が提供する量的な価値よりも、質的变化に対する価値を重視しているものと考えられる。これまで、多くの通信システムでは、右肩上がりの伝送速度向上など、エンドユーザに対して量的変化を中心に訴求してきた。しかし、量的にある程度の満足感が得られている市場では、更なる量的変化を提供するよりも、質的变化の提供を図ることがより効果的であると考えられる。

以上、固定通信系の動向を振り返ると、市場全体を活性化させ、健全な成長を促すための必要条件として、次の 5 点が挙げられると考える。

- 必要条件1) 低コストで提供できるブロードバンド化
- 必要条件2) ネットワークのオープン化によるコンテンツやアプリケーションの創出と多様な下位層の仮想化
- 必要条件3) 様々な技術を自由かつ公正に利用できる環境を提供する法制度
- 必要条件4) 投資回収をより確実にするために、エンドユーザに対して質的变化をもたらす価値の提供
- 必要条件5) ネットワークインフラ、端末、コンテンツ/アプリケーションを連動させたトータルシステムとしての付加価値向上

マクロ的視野で眺めると、これらの条件は、情報通信を支えるネットワーク全体に対する必要条件と考えて差し支えない。但し、固定/移動通信の違い、具体的には、固定通信の場合、通信サービスの提供は、基本的にはケーブル敷設/通信ノードを基本とする設備競争が支配的要因となるが、移動通信の場合は、固定通信と同様の設備競争に加えて、無線周波数、すなわち、電波という有限な国民の共有資源の利用権に対する利権競争の側面を考慮する必要がある。

以上に述べた点を総合的に考慮すると、移動通信の活性化ならびに健全な市場の成長は、図 1-8 に示すエコシステム<sup>4</sup>モデルをまわし続けることに帰着すると考える。このモデルでは、コンテンツ/アプリケーション、周波数および端末をエンドユーザに提供する価値(サービス)の源泉となるリソースと捉える。コンテンツ/アプリケーション、周波数のリソースは、それぞれ、著作権保護やストリーミング等の配信技術、ブロードバンド化を支える伝送技術(必要条件 1))によって、アプリケーションサービス、伝送サービスへ加工され、オープンシステムによって集約(必要条件 2))される。オープンシステムは、アプリケーションサービス、伝送サービスを活用して、既存サービスおよびその延長線上にあるサービスを提供すると同時に、既存サービスにさらなる加工を施す活用技術や法制度整備による新たな質的变化をもたらすサービス(必要条件 3), 4))としてエンドユーザに提供する。端末の進展とともに、既存サービスおよびその延長線上にあるサービスならびに新たな質的变化をもたらすサービスをエンドユーザに提供し続けられるビジネスモデルを確立、維持することが、移動通信産業の持つ価値を高め、健全な産業の成長を支える(必要条件 5))。

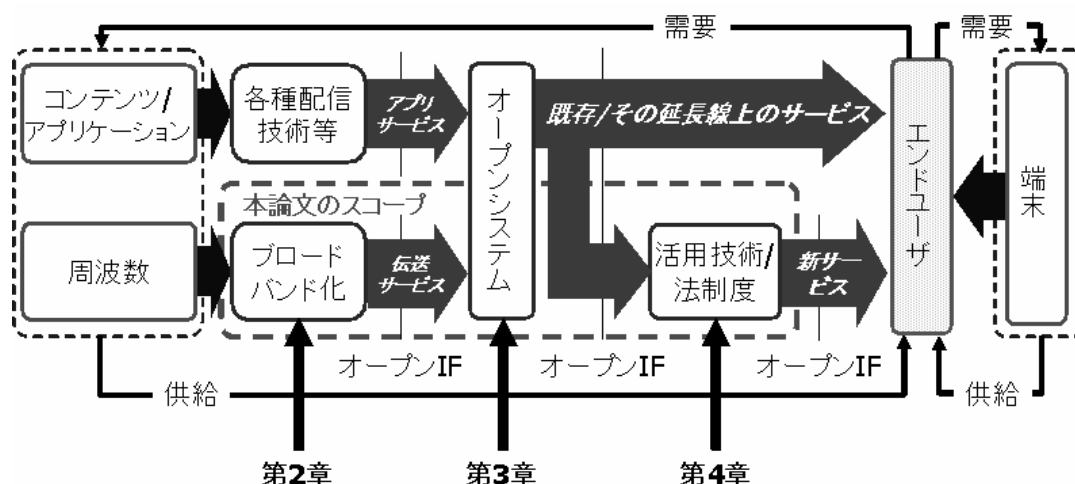


図 1-8 移動通信産業のエコシステムモデルと本論文の位置づけ

本研究の目的は、図 1-8 に示すエコシステムモデルに基づく移動通信産業全体の健全な成長を実現することにある。これに向け、図 1-8 中の「ブロードバンド化」、「オープンシステム」、「活用技術/法制度」にフォーカスを当てた研究成果をまとめるものである。

第2章では、移動通信システムのブロードバンド化を支える無線伝送技術として、最適受信方式として知られる最ゆう系列推定(MLSE: Maximum Likelihood Sequence Estimation)方式に着目し、その高い等化能力を低コストで引き出す制御方式を提案する。具体的には、

<sup>4</sup> 生物学における生態系を意味する単語だが、近年ではビジネスにおける特定の業界全体の収益構造を意味する単語として用いられることが増えてきた。1つの企業の収益構造は一般的に「ビジネスモデル」と呼ばれるが、ある業界にかかわる複数の企業が協調的に活動して業界全体で収益構造を維持し、発展させていこうという考え方。

- サンプルタイミング制御不要な分数間隔サンプル型 MLSE 方式の導出[29]
- 実装を考慮した分数間隔サンプル型 MLSE 方式の演算量削減方式[29]
- 固定小数点演算で高速な通信路変動に追従するトラッキング方式[30][31]
- 受信入力レベル制御を簡素化する極座標信号入力方式[30][31]

を提案し、計算機シミュレーションと実験による評価を行い、低コストでのブロードバンド化が可能であることを示す。

第3章では、IPによる移動ホスト収容技術を提案し、移動ホスト収容がIPのもつオープン性を高めるものであることを示す。有線、無線等の多様なリンク層以下のアクセス技術を集約して上位層に対して仮想化すると共に、上位層に対して共通のAPIを提供するIPは、オープンシステムとしてのInternetの軸となるプロトコルである。しかし、固定ホストを前提としたプロトコルであり、ホストの移動に対して通信を継続させることは困難である。そこで、ユニキャスト通信、マルチキャスト通信を視野に入れ、

- ユニキャスト通信に対して、移動制御トラフィックの抑圧と通信経路の効率化を両立するIP<sup>2</sup>方式[32][33]
- IP Multicast 方式によるマルチキャスト通信に対して、移動ホストに対応するマルチキャストグループ構成ポリシーのあり方、効率的な移動ホストへのマルチキャストパケット送信方式[34][33]

を提案する。

第4章では、移動通信を活用した新たな質的变化をもたらす新サービス創出の検討を行う。多種多様なサービスが存在しうる中、「質的变化をもたらすサービス」の必要条件として、「既存の通信事業者では実現困難なサービス”であるという視点に基づき、オープン化されたインタフェースを活用した新サービス創出のための技術ならびに方策のあり方を示す。

新サービス創出技術に関し、異種・複数の通信事業者が提供するサービスを束ねることで、単独通信事業者では実現困難な広域・広帯域アクセスリンクを創出する方を提案する。このリンクを列車内インターネットアクセスへ適用することを想定し、列車内での実験を通して有用性を示す[35][36]。

新サービス創出の方策のあり方に関し、個別最適化が求められる法人企業向け内線電話に、通信事業者が提供する移動通信サービスを適用するために必要な運用ならびに接続ルールのあり方を検討する。フェムトセル基地局の利用者設備化、無線リソース管理業務の部分委託、音声通話に関する帯域幅課金、みなしMVNO (Mobile Virtual Network Operator)の導入により、通信事業者サービスの法人向け内線電話適用の可能性が高まることを示す[37]。

第5章は、本論文の結論であり、本研究により得られた成果の総括を行う。





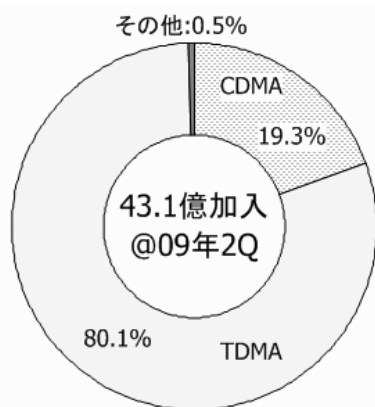
## 第2章 移動通信システムにおけるブロードバンド 伝送技術

### 2.1. 緒言

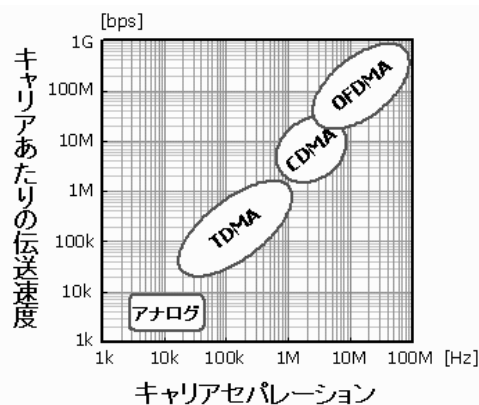
陸上移動通信における無線伝搬路は、高速な時間変動を伴う符号間干渉が生じる通信路にモデル化される。移動通信のブロードバンド化に向け、このような通信路を介して、いかに低コストで広帯域なデータ伝送を行うかが技術課題の一つである。この課題解決のために適用すべき技術は、アクセス方式によって異なる。第3世代移動通信(IMT-2000: International Mobile Telecommunications-2000)システム以降のアクセス方式として、TDMA、CDMA (Code Division Multiple Access)、OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)が規定されており[38]、各アクセス方式に対する適用技術は、

- TDMA: 適応等化
- CDMA: RAKE 受信
- OFDMA: ガードインターバルの付加

を基本とし、研究開発が進められている。TDMA は、図 2-1 に示すように、2009 年の第 2 四半期現在、全世界の移動通信加入者の 80 %を占め、1~2 Mbps 程度のブロードバンド環境を提供している。今後、CDMA、OFDMA が増加し、高速化が進展する方向ではあるが、TDMA 方式は初期の移動通信のブロードバンド化を牽引し、世界的にみて現在の主力方式である。



a) アクセス方式別加入者数の割合



b) アクセス方式別伝送速度

加入者数出典: [http://www.gsmworld.com/newsroom/market-data/market\\_data\\_summary.htm](http://www.gsmworld.com/newsroom/market-data/market_data_summary.htm)

図 2-1 アクセス方式別の移動通信加入者数と伝送速度の概要

本章では、TDMAを想定した適応等化方式を検討する。移動通信用の等化方式として、等化能力の高さから判定帰還形等化器や MLSE 受信器の非線形等化方式が注目されている[39]。本章では、最適受信方式として知られる MLSE に着目し、その高い等化能力を低コストで引き出す制御方式を提案する。具体的には、

- サンプルタイミング制御不要な分数間隔サンプル型 MLSE 方式の導出[29]
- 実装を考慮した分数間隔サンプル型 MLSE 方式の演算量削減方式[29]
- 固定小数点演算で高速な通信路変動に追従するトラッキング方式[30][31]
- 受信入力レベル制御を簡素化する極座標信号入力方式[30][31]

を提案し、計算機シミュレーションと実験による評価を行い、低コストでのブロードバンド化が可能であることを示す。

## 2.2. 分数間隔サンプル型 MLSE 方式

本節では、まず、分数間隔サンプルを行う場合の通信路をモデル化し、このモデルに基づいて分数間隔サンプル型 MLSE 受信器を理論的に導出する。

### 2.2.1. 通信路モデル

図 2-2 に、シンボル速度の  $N$  倍の速度でオーバーサンプルする場合の一般的な通信路モデルを示す。時間  $T$  間隔の変調されたインパルス列  $s(k)$ , ( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) が送信シンボル系列として入力される。時刻  $t = kT$  における送信シンボル  $s(k)$  は、送信フィルタ(TX Filter)で波形整形され、時間変動を有する周波数選択性フェージングチャネルを介して受信機に送信され、受信フィルタ(RX Filter)により帯域制限される。以下では、TX Filter から RX Filter までを一つの通信路と考える。このとき、通信路のインパルスレスポンス長を  $mT$  ( $T$ :シンボル長)とすると、図 2-2 に示す  $m \times N$  タップのトランスペアラル型フィルタでモデル化できる。

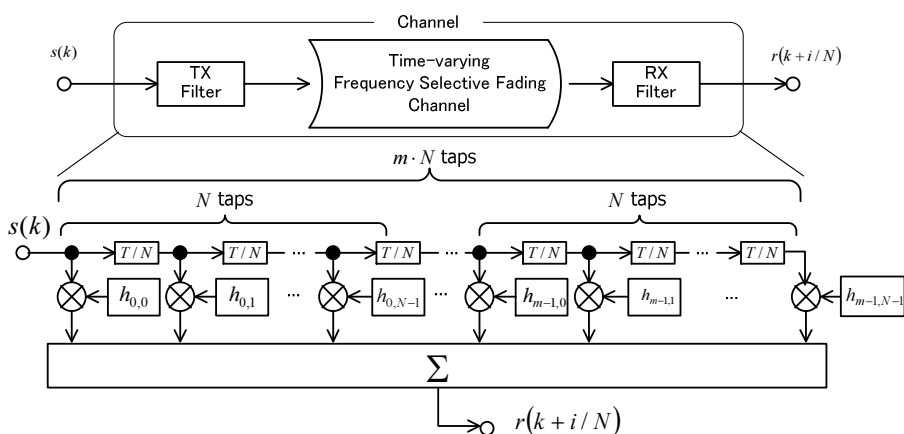


図 2-2 通信路モデル

送信シンボル系列は  $T$  間隔でしか値を持たず、 $r(k+i/N)$  に寄与する送信シンボルは、 $s(k), s(k-1), \dots, s(k-(m-1))$  の  $m$  個のシンボルに限定されるため、時刻  $t = (k+i/N)T$ 、 $(i=0,1,\dots,N-1)$  における通信路出力である  $r(k+i/N)$  は、

$$r(k+i/N) = \sum_{j=0}^{m-1} s(k-j) \cdot h_{j,i} \quad (2-1)$$

と表される。すなわち、ある特定の時刻の通信路出力に關与するインパルスレスポンスの要素は、 $m \cdot N$  個のうち  $m$  個であり、しかもそれらは、 $s(k)$  の生起間隔と等しい  $T$  間隔でのみ値をもつという性質を有する。

この結果より、図 2-2 等価モデルとして、図 2-3 に示す  $T$  間隔の  $m$  タップで構成される  $N$  個のトランスバーサルフィルタを用いたモデルを考えることができる。

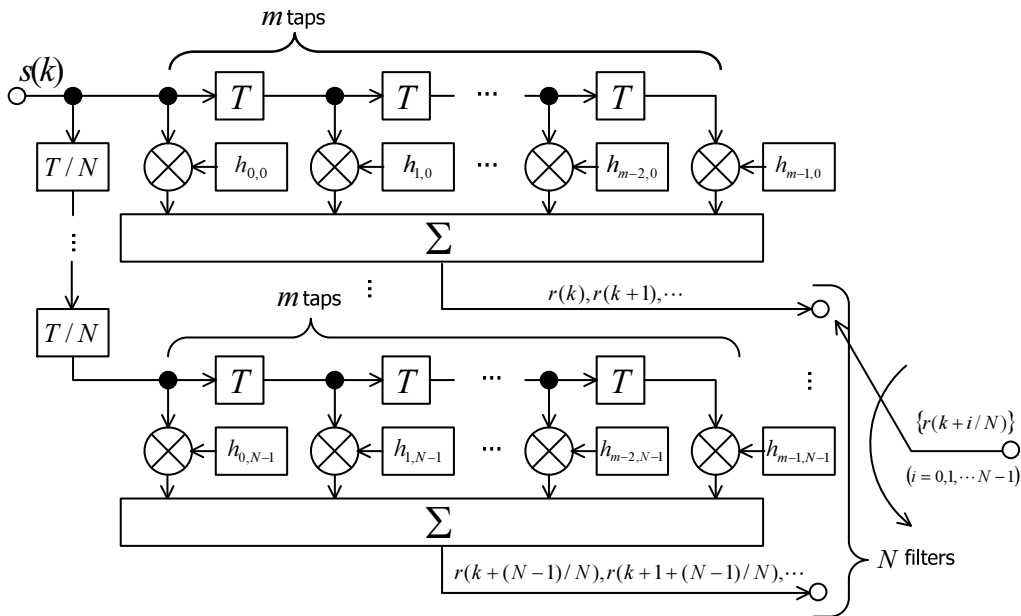


図 2-3 等価通信路モデル

図 2-3 において、 $i$  番目のトランスバーサルフィルタのタップ係数は  $iT/N$  だけオフセットさせた  $T$  間隔の通信路インパルスレスポンスであり、時刻  $kT \sim$  時刻  $(k+(N-1)/N)T$  における通信路出力は、それぞれのトランスバーサルフィルタの出力として  $T/N$  ごとに得られる。ここで、各トランスバーサルフィルタのタップ係数で構成されるベクトル、

$$\vec{h}_i = (h_{0,i}, h_{1,i}, \dots, h_{m-1,i}), \quad (i=0,1,2,\dots,N-1) \quad (2-2)$$

を  $T$  間隔の通信路インパルスレスポンスベクトルと呼ぶ。それぞれのトランスバーサルフィルタを  $T$  間隔でサンプルされた異なる通信路ととらえると、それぞれのフィルタ出力は、同一の送信シンボルが異なる  $N$  個の通信路を介して受信された受信信号とみなすことができる。

## 2.2.2. 分数間隔サンプル型 MLSE 受信器の構成

図 2-3 に示したように、シンボル速度の  $N$  倍の速度でサンプルされた受信信号系列は、シンボル速度でサンプルされた  $N$  個の系列ととらえることができる。そこで、シンボル速度の  $N$  倍の速度でサンプルされた受信信号系列に対する最ゆう系列推定方式として、シンボル速度でサンプルされた  $N$  個の系列に対するブランチメトリックを求め、そのブランチメトリックに基づいて最ゆう系列推定を行う方式が考えられる。この方式に基づく最ゆう系列推定受信器を、分数間隔サンプル型 MLSE 受信器として提案する。

図 2-4 は、提案する MLSE 受信器の構成である。この受信器は、 $T/N$  周期の通信路出力を  $T$  間隔で直列/並列変換してブランチメトリックを求める。この結果、時刻  $kT \sim$  時刻  $(k + (N - 1)/N)T$  間に受信される  $N$  個の受信信号  $r(k), r(k + 1/N), \dots, r(k + (N - 1)/N)$  が、ブランチメトリック演算回路に並列に入力される。この入力信号は、式(2-1)に示すように、同一の送信シンボル群、 $s(k), s(k - 1), \dots, s(k - (m - 1))$  のみの成分を含んでいる。ブランチメトリック演算回路は、 $N$  個の受信信号とそれぞれの系列に対する  $T$  間隔の通信路インパルスレスポンスベクトル  $\vec{h}_0 \sim \vec{h}_{N-1}$  を用いて、ブランチメトリックを求める。さらに、求められたブランチメトリック値は、ACS (Add, Compare and Select) 回路およびパスメモリからなるビタビプロセッサに入力され、ビタビアルゴリズムによる最ゆう系列推定を行い、送信シンボル推定値  $\hat{s}(k)$  を出力する。

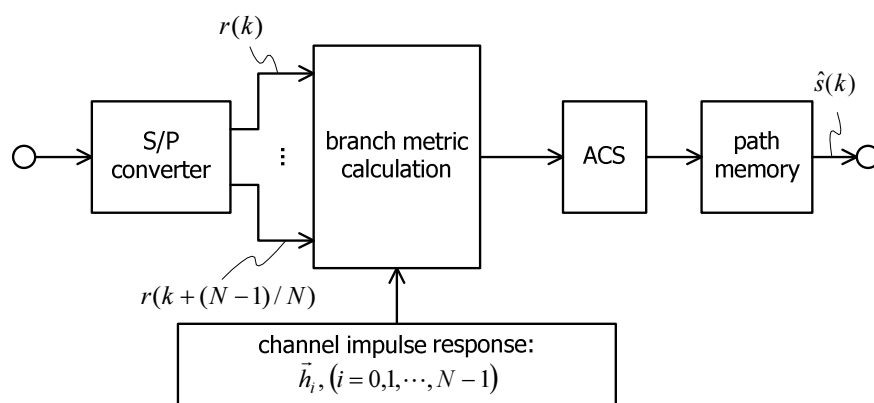


図 2-4 分数間隔サンプルを用いた MLSE 受信器

## 2.2.3. 分数間隔サンプル型 MLSE 受信器のブランチメトリック演算

シンボル間隔でサンプルされた信号を入力とする MLSE (シングルサンプル MLSE) 受信器では、サンプルごとに符号間干渉を与える送信系列パターンが変化するため、受信信号が入力されるごとに状態遷移が生じブランチメトリックが求められる[44]。これに対し、 $T/N$  周期でサンプルされた受信信号を入力とする分数間隔サンプル型 MLSE 受信器では、図 2-3 に示したように、時刻  $kT \sim$  時刻  $(k + (N - 1)/N)T$  間に得られる  $N$  個の受信信号  $r(k), r(k + 1/N), \dots, r(k + (N - 1)/N)$  は、同一の送信系列から得られるため、 $N$  個の受信信号が入力されるごとにブランチメトリックを求め、

状態遷移を行う。ブランチメトリックは、 $N$  個のサンプル値からなる受信信号ベクトル  $\vec{r}_T(k) = (r(k), r(k+1/N), \dots, r(k+(N-1)/N))$  に対する  $m$  個の送信シンボル候補で構成される送信シンボル候補ベクトル  $\vec{s} = (\tilde{s}(k), \tilde{s}(k-1), \dots, \tilde{s}(k-(m-1)))$  のゆう度として求められ、 $\vec{r}_T(k)$  に対するブランチメトリック  $\Lambda(\vec{s})$  は、

$$\Lambda(\vec{s}) = p(\vec{r}_T(k) | \vec{s}) \quad (2-3)$$

で与えられる。ここで、 $p(\vec{r}_T(k) | \vec{s})$  は、 $\vec{s}$  で条件付けされた  $\vec{r}_T(k)$  の結合確率密度関数である。

例として、雑音として平均がゼロ、分散が  $\sigma^2$  のガウス雑音、サンプル周期を  $T/N$  とした場合の  $\Lambda(\vec{s})$  は、次式で与えられる(詳細は付録 A 参照)。

$$\begin{aligned} \Lambda(\vec{s}) &= p(\vec{r}_T(k) | \vec{s}) = \frac{p(\vec{r}_T(k), \vec{s})}{p(\vec{s})} \\ &= \frac{1}{p(\vec{s}) \cdot (2\pi)^{N/2} (\det \boldsymbol{\mu})} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \lambda_{ij} \varepsilon(k+i/N) \varepsilon^*(k+j/N) \right] \end{aligned} \quad (2-4)$$

式(2-4)において、 $p(\vec{s})$  は送信系列候補ベクトル  $\vec{s}$  の確率密度関数、 $\varepsilon(k+i/N)$ 、 $(i=0,1,\dots,N-1)$  は、雑音が加算された受信信号ベクトル  $\vec{r}_T(k)$  と雑音が存在しない場合の理想的な受信信号ベクトル  $\vec{\hat{r}}_T(k) = (\hat{r}(k), \hat{r}(k+1/N), \dots, \hat{r}(k+(N-1)/N))$ <sup>5</sup>との差ベクトル、

$$\begin{aligned} \vec{\varepsilon}_r(k) &= \vec{r}_T(k) - \vec{\hat{r}}_T(k) \\ &= (r(k) - \hat{r}(k), r(k+1/N) - \hat{r}(k+1/N), \dots, r(k+(N-1)/N) - \hat{r}(k+(N-1)/N)) \\ &= (\varepsilon(k), \varepsilon(k+1/N), \dots, \varepsilon(k+(N-1)/N)) \end{aligned} \quad (2-5)$$

の各要素である。また、 $\boldsymbol{\mu}$  は  $\vec{\varepsilon}_r(k)$  の共分散行列、 $\lambda_{ij}$  は共分散行列  $\boldsymbol{\mu}$  の逆行列の第  $i, j$  成分であり、 $*$  は複素共役を示す。更に、ブランチメトリックは、受信信号ベクトル  $\vec{r}_T(k)$  と送信系列候補ベクトル  $\vec{s}$  に依存する値のみ意味をもつ。ここで、送信シンボルの  $s(k)$  の生起が一樣であれば、その送信系列候補ベクトル  $\vec{s}$  の生起も一樣と考えられ、 $p(\vec{s})$  は  $\vec{s}$  によらず一定となるので、ブランチメトリックを求めるには、式(2-4)のうち  $\exp$  にかかる部分の実数成分、すなわち、

$$\Lambda(\vec{s}) = \Re \left[ \sum_{i,j=0}^{N-1} \lambda_{ij} \varepsilon(k+i/N) \varepsilon^*(k+j/N) \right] \quad (2-6)$$

を求めることで十分である。

以上のように、雑音としてガウス雑音を仮定すると、ブランチメトリックは実際の受信信号ベクトル  $\vec{r}_T(k)$  と受信信号レプリカベクトル  $\vec{\hat{r}}_T(k)$  の差信号ベクトル  $\vec{\varepsilon}_r(k)$  と前置フィルタ帯域とサンプル周

---

<sup>5</sup>受信側でこの信号を得ることは不可能である。このため、例えば、判定結果と通信路インパルスレスポンス推定ベクトルを用いて再変調することによって求められる値を用いる。

期によって定まる雑音の正規化相関係数から求めることができる。前置フィルタ帯域幅、サンプル周期および雑音の正規化相関係数の定量的な関係について付録 B に示す。

具体例として、サンプル周期を  $T/2$ 、各サンプルに対する雑音の 2 乗平均値をそれぞれ等しく  $\sigma^2$ 、雑音の正規化相関係数を  $\rho_{0,1}$  とした場合について示す。このとき、

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \sigma^2 & \rho_{0,1}\sigma^2 \\ \rho_{0,1}\sigma^2 & \sigma^2 \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

$$\lambda_{0,0} = \lambda_{1,1} = \frac{1}{\sigma^2(1-\rho_{0,1}^2)} \quad (2-8)$$

$$\lambda_{0,1} = \lambda_{0,1} = \frac{-\rho_{0,1}}{\sigma^2(1-\rho_{0,1}^2)} \quad (2-9)$$

となる。これらの式を式(2-6)に代入することにより、 $\Lambda(\vec{s})$  は、

$$\Lambda(\vec{s}) = \Re \left[ \frac{1}{\sigma^2(1-\rho_{0,1}^2)} \cdot \left[ \varepsilon(k)^2 + |\varepsilon(k+1/2)|^2 - 2\rho_{0,1}\varepsilon(k)\varepsilon^*(k+1/2) \right] \right] \quad (2-10)$$

で与えられる。さらに、 $1/(\sigma^2(1-\rho_{0,1}^2))$  は  $\vec{s}$  に依存しないため、ブランチメトリックとして求める必要はなく、最終的にブランチメトリックは、

$$\Lambda(\vec{s}) = |\varepsilon(k)|^2 + |\varepsilon(k+1/2)|^2 - \Re(2\rho_{0,1}\varepsilon(k)\varepsilon^*(k+1/2)) \quad (2-11)$$

に基づいて求めることができる。式(2-11)に基づくブランチメトリック演算回路を図 2-5 に示す。

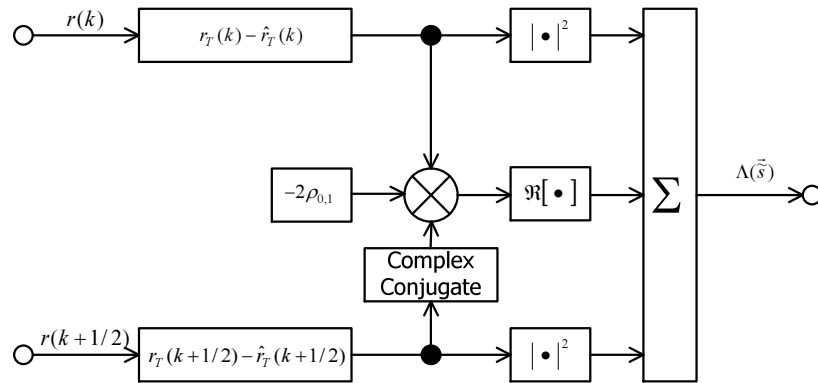


図 2-5 ブランチメトリック演算回路

## 2.3. 状態数を制限した分数間隔サンプル型 MLSE 受信器の構成

帯域制限された通信路を用いる場合、送信信号はローloffフィルタ等により、波形整形される。このため、受信信号には、伝送路の遅延波に起因する符号間干渉ひずみと波形整形ローloff波形が畳み込まれたひずみが生じる。このひずみはサンプルタイミングの違いによって大きく異なる上に、時間的に広がったものとなる。MLSE 受信器がこのようなひずみに対処するためには、時間的に広がったひずみを生じさせるすべての送信シンボルを考慮しなければならず、サンプルタイミングによっては、MLSE 受信器の状態を構成するために必要な送信シンボル数が大幅に増大してしまう。本節では、現実的な構成として、状態数を制限した場合の分数間隔サンプル型 MLSE 受信器について検討し、ブランチメトリック合成法を提案する。

### 2.3.1. 状態数制限による劣化要因

帯域制限された通信路において符号間干渉が生じる例として、送受信フィルタ総合の特性としてローloff率 0.35 のナイキストフィルタ、伝送路として主波と、主波と同レベルで  $T$  だけ遅延した遅延波が存在する 2 波モデルを用いた場合の通信路インパルスレスポンスを図 2-6 に示す。図 2-6 において、細実線は主波の通信路インパルスレスポンス、破線は遅延波の通信路インパルスレスポンス、太実線は総合の通信路インパルスレスポンスである。

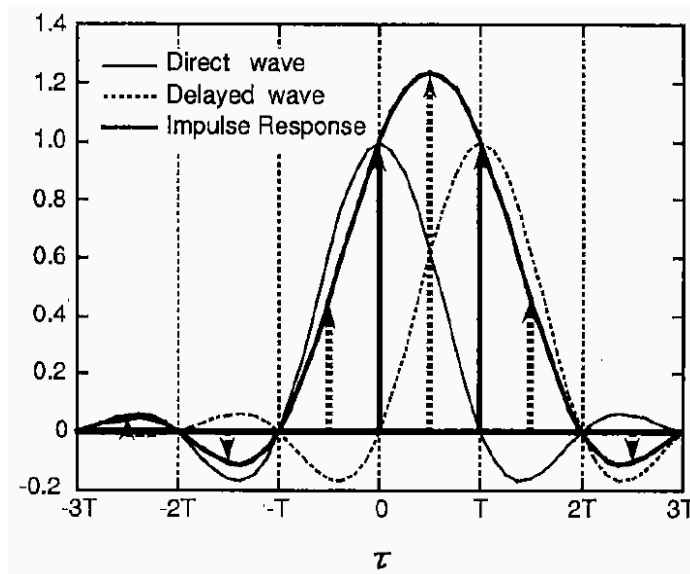


図 2-6 通信路インパルスレスポンスの例

サンプル周期を  $T/2$ 、サンプルタイミングは、主波がピークとなるタイミングに同期したタイミング ( $\tau=0$ )、このタイミングから  $T/2$  だけオフセットしたタイミング ( $\tau=T/2$ ) とする。この場合、この通信路に対する等価モデルは、実線矢印で示される  $T$  間隔の通信路インパルスレスポンス列をタップ係数とするトランスバーサルフィルタ (TR0) と破線矢印で示される  $T$  間隔の通信路インパルスレスポンス列をタップ係数とするトランスバーサルフィルタ (TR1) から構成することができる。TR0 のインパ



ルスレスポンスは  $\tau = 0, T$  の 2 点のみで非零の値をとるが, TR1 のインパルスレスポンスは  $\tau = \pm 1/2T, \pm 3/2T, \dots$  の点で非零の値をとり得ることがわかる. これは, TR0 の出力は 1 つの送信シンボルからのみの符号間干渉が生じるが, TR1 の出力は無数の送信シンボルからの符号間干渉が生じてしまうことを意味する. このように, サンプルタイミングの違いにより, それぞれのトランスバーサルフィルタ出力は, 異なる数のシンボルからの符号間干渉が生じる. MLSE 受信器の状態を構成する送信シンボルの数としては, 最長の符号間干渉を与える送信シンボル数だけ必要になり, 実用的ではない. 一方, 状態数を制限した場合, 状態数によって定められる等化可能なシンボルより多くの送信シンボルからの符号間干渉が生じているトランスバーサルフィルタ出力に対するレプリカを十分な精度で求められないため, 残留ひずみにより差信号ベクトルの信頼度は大きく劣化してしまう.

そこで, 受信信号サンプル  $r(k+i/N)$  とそのレプリカ  $\hat{r}(k+i/N)$  の差信号を各トランスバーサルフィルタに対する通信路インパルスレスポンス推定値の信頼度で重み付けし, 重み付けされた差信号ベクトルを用いてブランチメトリックを求める方法を提案する. 状態数を制限した場合, 雑音の相関に起因する特性劣化よりも, レプリカに生じる残留ひずみに起因する特性劣化が支配的な要因になると考えられる. そこで, ブランチメトリック演算回路としては, 図 2-5 から雑音の相関を考慮する部分を削除したものをベースに検討を行う. 本節で検討するブランチメトリック演算回路を図 2-7 に示す. 図 2-7 の加算器入力を  $\hat{r}(k+i/N)$  に対する信頼度情報  $\omega(i)$  で重み付けすることによって, 状態数を制限することに起因する特性劣化を抑圧する. このとき, MLSE 受信器に入力されるブランチメトリックは,

$$\Lambda(\vec{s}) = \sum_{i=0}^{N-1} \omega(i) \cdot |r(k+i/N) - \hat{r}(k+i/N)|^2 \quad (2-12)$$

と表せる. ここでは, この重み係数制御方法として, MLSE 受信器の判定結果を用いて逐次的に通信路の時間変動に追従する構成の適応型 MLSE[40]-[44]に対し, 等価通信路モデルにおけるそれぞれのトランスバーサルフィルタに対する通信路インパルスレスポンス推定回路における誤差信号に基づいて定める方法を提案する.

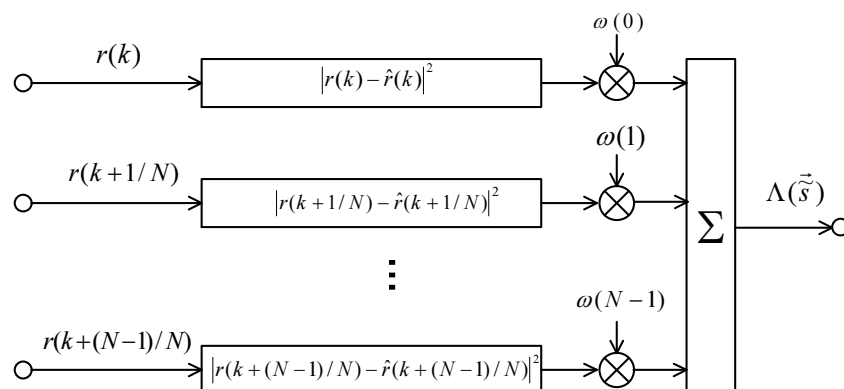


図 2-7 状態数を制限した場合のブランチメトリック演算回路

### 2.3.2. 誤差信号に基づくブランチメトリックの重み付け合成

通信路インパルスレスポンス推定回路における誤差信号には、次のような特徴がある。

- 判定結果が正しくかつ符号間干渉が生じるシンボル数が MLSE 受信器の状態を構成するシンボルの数より小さい場合、通信路インパルスレスポンス推定回路ではレプリカを高精度に復元できるため誤差信号はほとんどゼロとなる。
- 符号間干渉が生じるシンボル数が MLSE 受信器の状態を構成するシンボルの数より大きい場合には、たとえ判定結果が正しくても残留符号間干渉によるひずみのためにレプリカの精度が下がり、誤差信号が大きくなる。

このため、誤差信号の大小に基づいて重み係数の制御を行うことが可能となる。具体的には、 $\omega(i)$  の最も簡単な制御方式として次のアルゴリズムが考えられる。

〈重み係数制御アルゴリズム〉

通信路インパルスレスポンス推定回路において、それぞれの誤差信号電力を  $MT$  時間にわたって平均し、その値をスレッシュホールドレベル  $T_h$  と比較して、 $T_h$  よりも大きい場合には  $\omega(i) = 0$ 、 $T_h$  を超えない場合には  $\omega(i) = 1$  とする。

このアルゴリズムは、MLSE 受信器の動作を以下のように制御することができる。

- それぞれの誤差信号の平均電力がスレッシュホールドを超えない場合、それぞれの系列における通信路インパルスレスポンスは MLSE 受信器の等化能力内であると判断し、差信号ベクトルの各要素の 2 乗和を等利得合成する合成型 ( $\omega(i) = 1$ ) で動作する。
- スレッシュホールドを超えた系列があれば、その系列における通信路インパルスレスポンス長が MLSE 受信器の等化能力外であると判断し、その系列に対する差信号ベクトルの要素の 2 乗和を無視する選択型で動作する。但し、すべての  $\omega(i)$  がゼロになると復調できなくなるので、少なくとも一つの系列に対する  $\omega(i)$  は 1 にする。

以上のように、提案する状態数を制限した分数間隔サンプル型 MLSE 受信器では、異なるタイミングでサンプルされた系列に対してそれぞれブランチメトリックを求め、ブランチメトリックの品質に応じて適応的に選択/合成を行った結果に基づいて最ゆう系列を推定するものである。提案したアルゴリズムでは、重み係数  $\omega(i)$  は 0 または 1 の 2 値しかとらないが、誤差信号に応じて多値、あるいは実数値をとることもできる。このような構成の MLSE 受信器により、以下の効果が期待できる。

本 MLSE 受信器では、サンプルタイミングが異なる  $T$  間隔の系列に対してブランチメトリックを求め、等化できない残留符号間干渉成分が少ない系列から得られるブランチメトリックを適応的に用いる。このため、MLSE 受信器の前段でサンプルタイミング制御を行わなくとも、MLSE

受信器内部で適応的にサンプルタイミング制御が行われ、十分な受信特性が期待できる。

## 2.4. 受信特性評価

状態数を制限した分数間隔サンプル型 MLSE 受信機の受信特性に関し、 $T/2$  間隔でサンプルされた受信信号を入力とした MLSE 受信器を例にとり、計算機シミュレーションとプロトタイプングしたハードウェア装置(プロトタイプ機)を用いて評価する。計算機シミュレーション評価においては、分数間隔サンプル型 MLSE 受信機の動作を詳細に評価する。また、プロトタイプ機を用いた評価では、遠近問題に起因する受信信号のダイナミックレンジ変動に対処できるように、フロントエンドにログアンプを用いた構成で評価する。この評価により、ビット誤り率に加えて、受信信号のダイナミックレンジ変動への耐性も評価する。

### 2.4.1. 計算機シミュレーション評価

シミュレーション諸元を表 2-1 に示す。この場合の等価通信路モデルとしては、 $T$  間隔の二つのトランスバーサルフィルタで構成される。シミュレーションでは、MLSE 受信器の復調結果を用いて、1 次 QT-LMS (Quick Tracking-Least Mean Square) アルゴリズム[45][46]により通信路の時間変動に追従する適応型 MLSE 受信器を用いる。1 次 QT-LMS アルゴリズムを用いた適応型 MLSE 受信器の構成は、付録 C に示す。

表 2-1 シミュレーション主要諸元

変復調部	
変復調方式	$\pi/4$ シフト QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) / 準同期検波
伝送速度	23.4k baud
バースト構成	162 symbol (preamble: 先頭 14 symbol)
送受信フィルタ	35 % ルートナイキストフィルタ
MLSE 受信器部	
状態数	4
パスメモリ長	2
適応アルゴリズム	1 次 QT-LMS ( $\Delta_0 = 0.05, \Delta_1 = 0.005$ )
ブランチメトリック合成方式	インパルスレスポンス推定器誤差信号による合成

図 2-8 はシミュレーションに用いる MLSE 受信器のブロック図である。図において、受信信号は、 $T/2$  だけタイミングが異なる  $T$  間隔のサンプルパルスでサンプルされ、 $T$  間隔でサンプルされた二つの受信信号系列  $r(k,0)$ ,  $r(k,1)$  を得る。この受信信号系列は、等価通信路モデルのそれぞれのトランスバーサルフィルタ出力である。本シミュレーションでは雑音の正規化相互相関係数をゼロと仮定し、この二つの系列の通信路インパルスレスポンスベクトル  $\vec{h}_0 = (h_{0,0}, h_{0,1})$ ,  $\vec{h}_1 = (h_{1,0}, h_{1,1})$  を用いて、それぞれの系列から差信号ベクトルを求めて、各要素の 2 乗和を重み付け合成すること

によって、状態遷移に対するブランチメトリックを得る。重み係数  $\omega(0)$ ,  $\omega(1)$  は、それぞれの系列に対する適応型通信路インパルスレスポンス推定器(図中, Adaptive Channel Estimator)から供給される。重み係数  $\omega(0)$ ,  $\omega(1)$  は、2.3.2 に示したアルゴリズムに基づいて制御される。 $\omega(0)$ ,  $\omega(1)$  で重み付け合成されて得られた状態遷移に対するブランチメトリックは、ACS 回路、パスメモリからなるビタビプロセッサに入力され、最ゆう系列を推定する。また、それぞれの通信路インパルスレスポンス推定器は、等価通信路モデルのそれぞれのトランスバーサルフィルタのタップ数を 2 とし、 $\vec{h}_0$  と  $\vec{h}_1$  を独立に推定する。

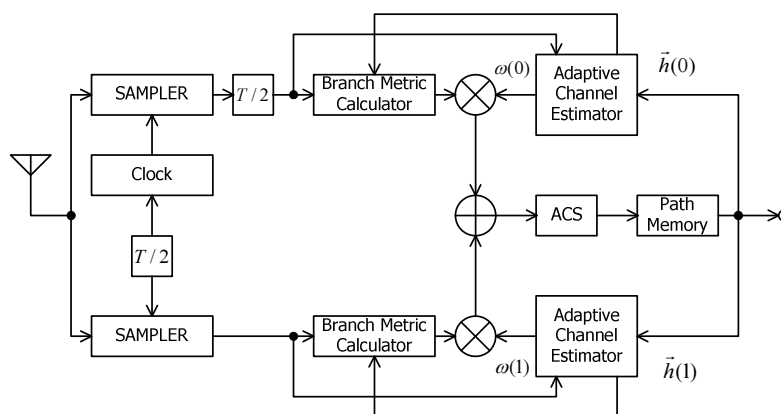


図 2-8 MLSE 受信器のブロック図

#### 2.4.1.1. ブランチメトリック合成方式の評価

2.3.2 に示した重み係数制御アルゴリズムの動作特性を確認するために、スレッショルドレベル  $T_h$  をパラメータにした特性をシミュレーションにより求めた。この結果を図 2-9 に示す。

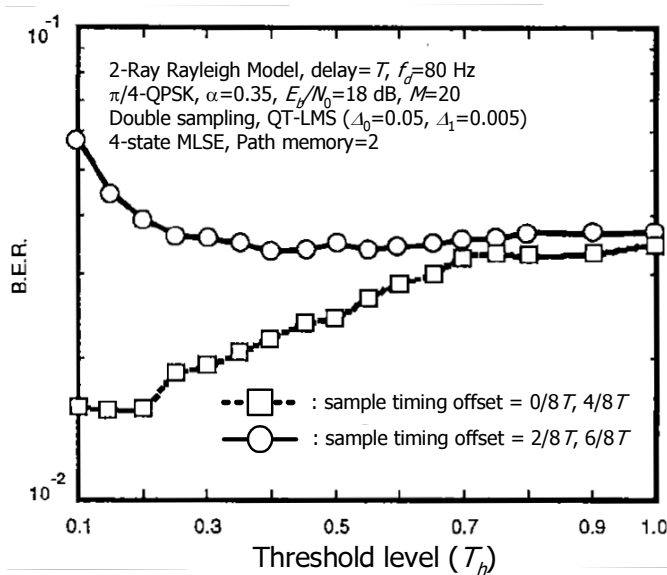


図 2-9 Threshold による動作の違い

図では、 $T$ だけ遅延した遅延波が存在する2波モデルにおける特性であり、サンプルタイミングが $(0/8T, 4/8T)$ の場合と $(2/8T, 6/8T)$ の場合を示したものである。ここで、サンプルタイミングが $0/8T$ は、先行波にサンプルタイミングを合わせた場合を示す。サンプルタイミングが $(0/8T, 4/8T)$ の場合は、それぞれの系列に対する特性差が大きいいため、 $0/8T$ でサンプルされた系列をとるよう選択型で動作すべきケースである。また、サンプルタイミングが $(2/8T, 6/8T)$ の場合は、両系列とも単独では受信特性の劣化が大きく、合成型で動作すべきケースである。 $T_h$ が小さい場合には、ブランチメトリック選択型として動作する場合が増加するため、サンプルタイミングが $(0/8T, 4/8T)$ の場合の特性が向上し、 $T_h$ が大きい場合には、ブランチメトリック合成型として動作する場合が増加するため、サンプルタイミングが $(2/8T, 6/8T)$ の場合の特性が向上することがわかる。

また、誤差信号平均時間  $M$  をパラメータとした特性を図 2-10 に示す。 $M$  を大きくとることによって、誤差信号の SN (Signal to Noise) 比が向上するためサンプルタイミングが $(2/8T, 6/8T)$ の場合の特性が改善されることがわかる。一方、サンプルタイミングが $(0/8T, 4/8T)$ の場合には、平均操作により選択動作に遅延が生じる効果が誤差信号の SN 比向上効果より大きくなるため、若干の特性劣化が生じてくると考えられる。

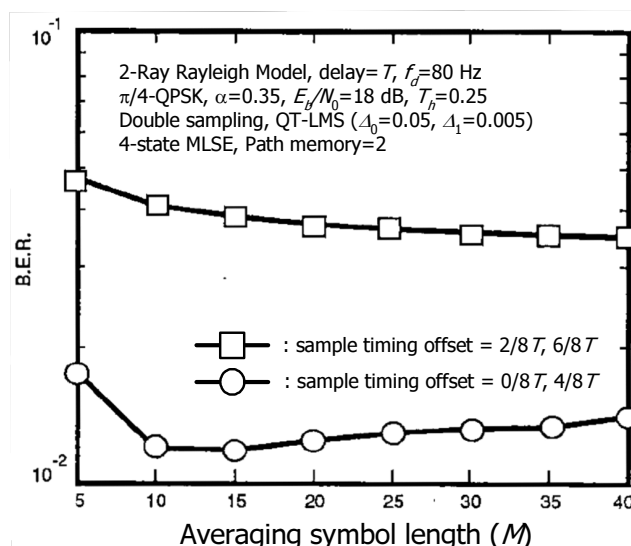


図 2-10 平均シンボル長による動作の違い

これらの結果より、本アルゴリズムは、異なるサンプルタイミングでサンプルされた信号系列に対する通信路インパルスレスポンス推定値の信頼度に応じて、適応的にブランチメトリックの選択/合成を行っていることがわかる。

#### 2.4.1.2. ビット誤り率特性

図 2-8 の受信機のビット誤り率特性のシミュレーション結果を図 2-11～図 2-14 に示す。重み係数制御に関し、スレッショルド( $T_h$ )を 0.25, 平均時間  $M$  を 11 としている。それぞれの図では、最大ドップラ周波数( $f_d$ )を 80Hz(正規化ドップラ周波数,  $f_d \cdot T = 0.0034$ ),  $E_b / N_0$  を 18 dB, 遅延波の

遅延時間が $T$ 、 $T/2$ および $T/4$ の2波レイリーモデルの場合とフラットフェージング下における受信特性であり、横幅はサンプルタイミングオフセットである。 $0/8T$ は先行波にサンプルタイミングを同期させた場合を示す。比較のために、シングルサンプルMLSE受信器の場合の受信特性も示している。

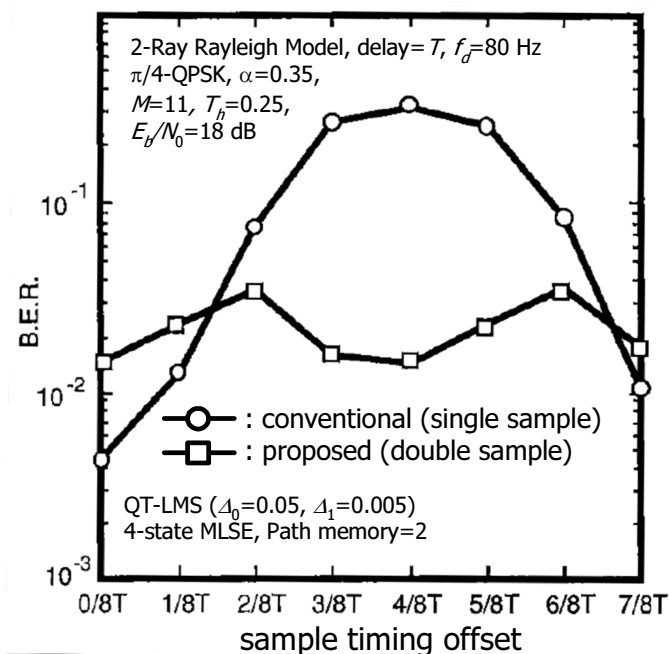


図 2-11  $T$  遅れの遅延波がある場合の受信特性

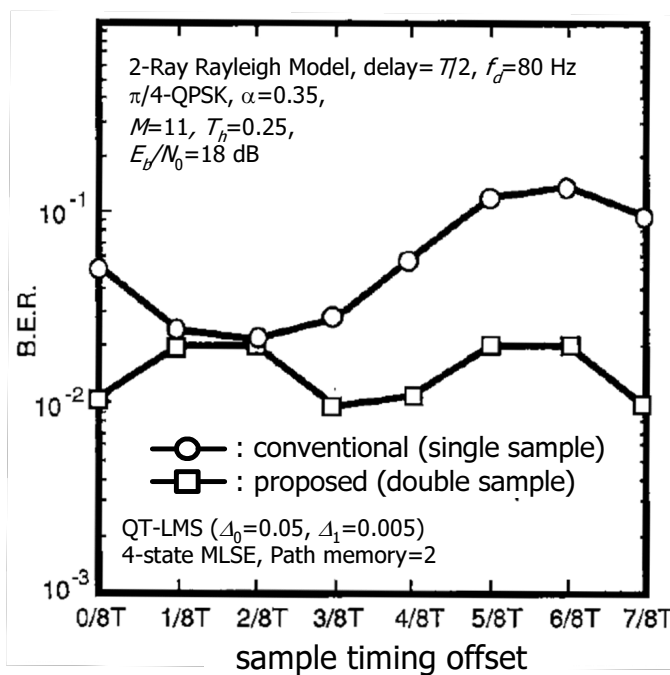


図 2-12  $T/2$  遅れの遅延波がある場合の受信特性

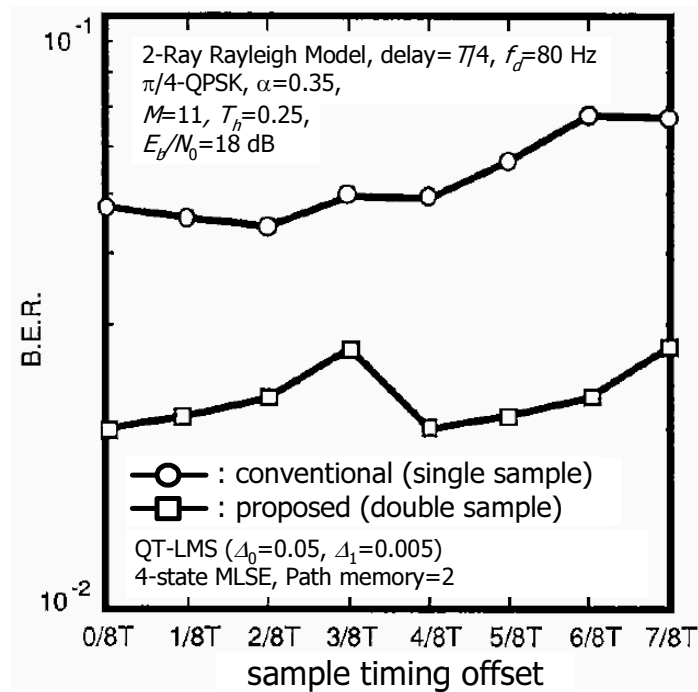


図 2-13  $T/4$  遅れの遅延波がある場合の受信特性

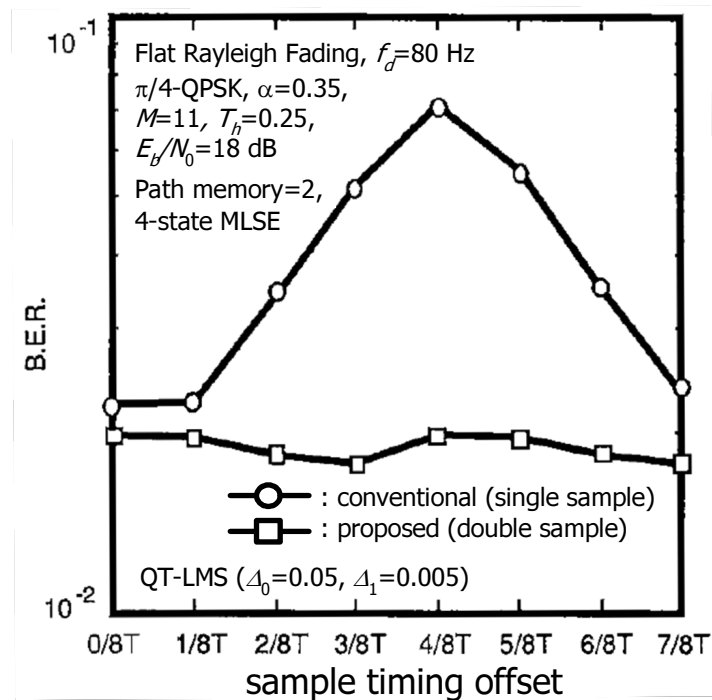


図 2-14 フラットフェージング下の受信特性

以上のシミュレーションにより、分数間隔サンプル型 MLSE 受信器の受信特性は、次のようにまとめることができる。

図 2-11 の  $T$  遅れの遅延波がある場合や図 2-14 のフラットフェージング下では、従来のシングルサンプル型 MLSE 受信器では、サンプルタイミングによる特性差が大きい。これに対し、提案する MLSE 受信器では、サンプルタイミングの違いによる特性差が小さくなる。図 2-11 では、最適サンプルタイミングに対する受信特性に劣化が見られるが、図 2-14 では全サンプルタイミングに対して受信特性が向上している。 $T/2$  遅れの遅延波がある場合(図 2-12)、 $T/4$  遅れの遅延波がある場合(図 2-13)についても、サンプルタイミングによる受信特性の違いは、従来の MLSE 受信器よりも減少していることがわかる。

#### 2.4.2. プロトタイプ機を用いた評価

プロトタイプ機による評価では、遠近問題に起因する受信信号レベルのダイナミックレンジ変動に対処するために、フロントエンドにログアンプを用いた構成の装置を用いる。付録 D に、詳細な装置構成、MLSE 受信器に適用する際の要件を示す。表 2-2 にプロトタイプ機の主要諸元を示す。

**表 2-2 プロトタイプ機の主要諸元**

RF 周波数	900 MHz 帯
変調方式	$\pi/4$ シフト QPSK
シンボル速度	24.3 kbaud
バースト長	162 シンボル
RSSI 分解能	10 bit
位相分解能	6 bit
トラッキング演算	16 bit 固定小数点

また、図 2-15 は、本プロトタイプ機に実装したログアンプの特性であり、典型的なログアンプの特性である。このログアンプは、log リニアに増幅された信号と振幅をリミットした信号(リミッタ出力)の 2 つの信号を出力する。ログアンプ特性の log リニアリティはほぼ 60 dB に渡り維持されており、十分実用に耐え得ると考えられる。skew は、log リニアな増幅出力とリミッタ出力の出力時間差であり、主に受信レベルが低い場合に発生する。これは、ログアンプ内で後段の増幅器出力より振幅が検出され、中間に位置する雑音抑制のフィルタを通過することによって生じる。図 2-15 より、0dBm ~ -60 dBm の範囲では  $\pm 0.05T$  ( $T$  はシンボル時間)以内の変動に収まっている。



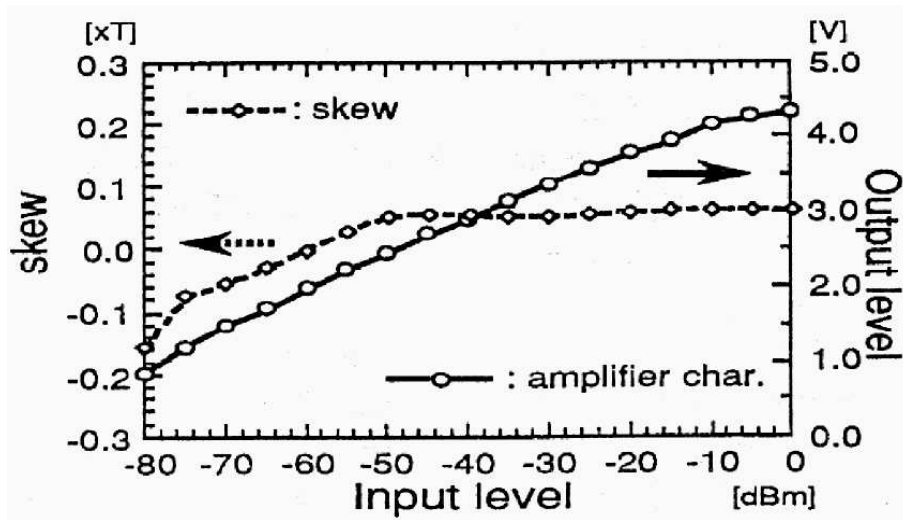


図 2-15 ログアンプの振幅特性と skew 特性

図 2-16 は、 $E_b / N_0 = 20 \text{ dB}$ 、時速 8 km/h ( $f_d \approx 6.4 \text{ Hz}$ )、100 km/h ( $f_d \approx 100 \text{ Hz}$ )での移動を想定した  $T$  遅れの遅延波が存在する 2 波レイリーモデルで、横軸を入力信号レベルとした場合の特性である。図より、受信特性がほぼ一定となるダイナミックレンジは、40 dB 程度であることがわかる。これは、フェージングにより生じる受信信号レベルの変動成分がログアンプによってクリップされることに起因する。しかし、受信レベルが十分に高い場合には、大きな遅延時間を有する遅延波が生じる確率は低く、MLSE 受信器を用いる必要はない[50]と考えられるので、40 dB 程度のダイナミックレンジをカバーできれば十分である。

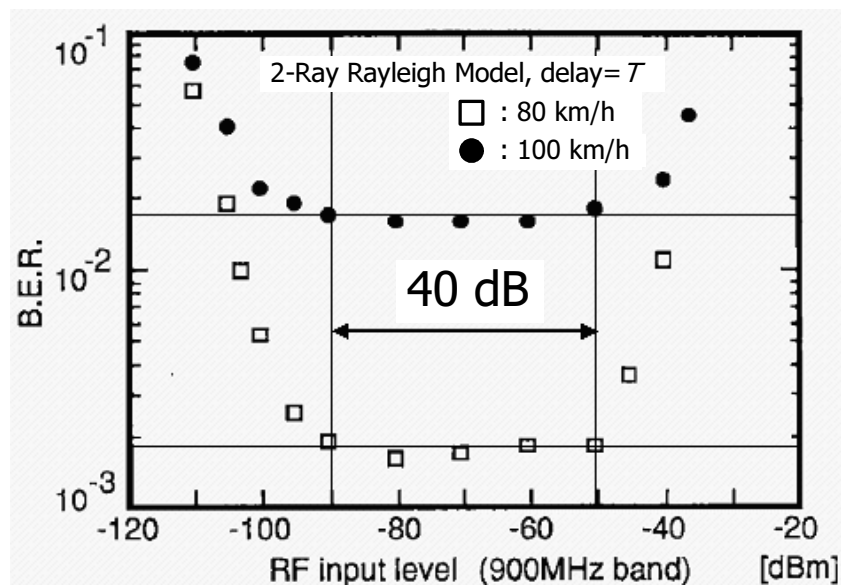


図 2-16 ビット誤り率対入力信号レベル特性

図 2-17 は、図 2-16 と同様の通信路モデルを用いて、サンプルタイミングを  $1/32T$  毎に変化させ

た場合の特性である。入力レベルは-80 dBm とし、 $0/32T$  のサンプルタイミングは図 2-16 の特性を与えるサンプルタイミングである、この図より、本受信機の受信特性は、サンプルタイミングに依存せず、良好な特性が得られていることがわかる。

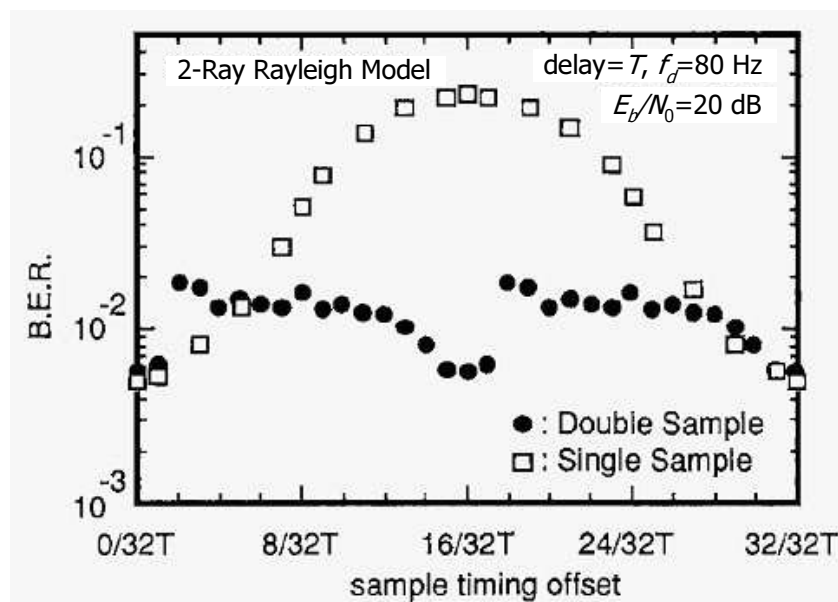


図 2-17 ビット誤り率対サンプルタイミング特性

## 2.5. 結言

本章では、TDMA 移動通信システムのブロードバンド化の課題である、時間変動する符号間干渉を抑圧できる低コストな等化方式を提案した。提案方式は、最適受信方式として知られる MLSE 方式の等化能力を低コストで引き出すものであり、

- サンプルタイミング制御を不要とする分数間隔サンプル型 MLSE 方式
- 固定小数点演算で高速な時間変動に追従可能な QT-LMS アルゴリズム
- フロントエンドにログアンプを導入した極座標信号入力型 MLSE 受信器による簡素化した受信信号レベル制御

から構成されるものである。

分数間隔サンプル型 MLSE 方式の原理は、サンプルタイミングが異なるシンボル間隔でサンプルされた複数の系列のそれぞれからブランチメトリックの導出・合成を行うことで、サンプルタイミングへの依存性を抑圧することである。しかし、帯域制限フィルタにより、サンプルタイミングの違いによって生じる符号間干渉の長さが異なるため、実装を考えると状態数が膨大になる課題がある。この課題に対処するために、各ブランチメトリックを重み付け合成することで、状態数を削減したより実用的な構成(状態数を制限した分数間隔サンプル型 MLSE 受信器)を提案した。この構成に対し、

計算機シミュレーション、プロトタイプ機による評価を行い、サンプルタイミング依存性を抑圧できることを示した。

状態数を制限した分数間隔サンプル型 MLSE 受信器に対し、移動にともなう通信路時間変動に追従するアルゴリズムとして、QT-LMS アルゴリズムを適用し、その受信特性を計算機シミュレーションにより評価した。その結果、本受信機は、正規化ドップラ周波数が 0.003 を超える高速な時間変動が生じて、サンプルタイミングが異なる系列に対する通信路インパルスレスポンス推定値の品質に基づいて適応的にブランチメトリックの合成/選択を行うことにより、サンプルタイミング制御を行わずに良好な受信特性を得ることができることを明らかにした。また、16 bit の固定小数点演算 DSP (Digital Signal Processor) に QT-LMS アルゴリズムを実装し、プロトタイプ機による評価を行った。その結果、シミュレーションと同様、正規化ドップラ周波数が 0.003 を超える高速時間変動にも追従できることを明らかにした。

基地局での受信の際には、端末の遠近問題により、TDMA スロット毎に受信信号レベルが瞬時に数十 dB 程度変動する可能性がある。このダイナミック変動に対処するために、フロントエンドにログアンプを用いた極座標信号入力型の MLSE 受信器を提案した。プロトタイプ機を用いた評価の結果、40 dB 程度のダイナミックレンジ変動に対しても、受信特性の劣化が生じないことを明らかにした。

## 第3章 IP による移動ホスト收容技術とオープン化

### 3.1. 緒言

オープンシステムの要件として、第 1 章に示したように、有線、無線等、多様なリンク層以下のアクセス技術を集約して上位層に対して仮想化する「下位層に対するオープン性」と、上位層が利用しやすい API を提供する「上位層に対するオープン性」の 2 つがある。通信経路制御を司る IP は、図 3-1 に示す hourglass(砂時計) model[10]のウエスト部におかれ、上位/下位層に対してオープンなインタフェースを提供し、Internet のオープン性を支える核となるプロトコルである。現在、主流となっている IPv4 (Internet Protocol version 4)[51]は、ネットワーク層でのホスト移動を想定しておらず、移動に対して通信を継続させることは困難である。一方、携帯電話のような無線通信機能を有するデバイスの一般化に伴い、場所に依存せずにネットワークに接続したいという要望が高まっている。レイヤーアーキテクチャを考えると、様々なデータリンク層のデバイス、アプリケーションに対してユーザの移動をトランスペアレントに提供できる IP による移動ホスト收容の実現が望ましい。

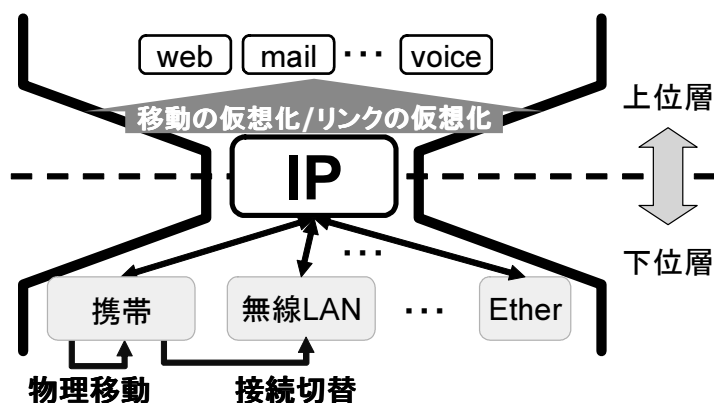


図 3-1 Hourglass(砂時計) model

IP からみたホストの移動は、「ネットワーク層への接続点の変化」と捉えられる。「接続点の変化」とは、

- (1) 物理的な移動に伴う同一ネットワーク内の移動(物理移動)
- (2) 物理的な移動の有無にかかわらず異なるネットワークへの接続(接続切替)

の 2 種類のもので存在する(図 3-1 参照)。(1)は、携帯電話のように、物理的に移動しても同一の通信品質を維持することが重要である。また、(2)は、例えば、携帯電話と無線 LAN (Local Area

Network)のように、異なる通信システムへの再接続を行うような場合である。この接続切替は、アプリケーションには影響を与えずに実行されるものであり、上位層に対して下位層の仮想化を実現するものである。また、ユーザが求めるサービスに対して適切な下位層のシステムを活用するという意味で、コグニティブ無線[52]を実現する手段と捉えることも可能であり、周波数有効利用にもつながるものである。このように、IP のオープン化と移動ホスト収容は、密接に関連するものである。本章では、IPv4 にフォーカスをあて、移動ホストを収容するための基礎技術となる、

- ユニキャスト通信に対して、移動制御トラフィックの抑圧と通信経路の効率化を両立する  $IP^2$  方式[32][33]
- IP Multicast によるマルチキャスト通信に対して、移動ホストに対応するマルチキャストグループ構成ポリシーのあり方、効率的な移動ホストへのマルチキャストパケット送信方式[34][33]

を提案する。

## 3.2. ユニキャスト通信に対する移動ホスト収容方式

IP による移動ホスト収容機能に向けて、今後の進展が期待される IPv6 (Internet Protocol version 6)[53]に対する方式[54][55]、現在、広く利活用されている IPv4 に対する方式[56][57][58]について、様々な研究開発が進められている。IPv6 では、ネイティブ機能として移動ホスト収容機能を具備することとなっているとともに、適用先がグリーンフィールドであることもあり、洗練度が高い方式の適用が期待される。一方、IPv4 では、ホスト移動が考慮されないまま広く活用されており、現時点で移動ホスト収容に向けて IPv4 を大きく変更することは現実的ではなく、現状のホスト移動を考慮しない既存 IPv4 機器と共存させて移動ホストの収容を実現することが大きな課題である。

移動ホスト収容機能は、できる限り付加的なオーバーヘッドを削減することが重要である。これは、1) 効率的なホストの移動管理手法、2) 移動ホストへの効率的な経路による通信、の 2 点にある。参考文献[56][57][58]は、これらの課題に対する手法を提案しているが、2 つの技術課題を同時に満たしているとはいえない。

そこで、本節では、移動ホスト宛のデータグラムに対し、ホスト移動を考慮したルータも効率的な経路で転送できる能力を与え、効率的な通信経路を構成できるカプセル化手法を提案する。この手法でカプセル化されたデータグラムは、通常の IPv4 データグラムと同様に扱えるため、ホスト移動を考慮していない既存のルータに対する改修等の影響が生じない。さらに、移動ホスト自身の移動管理と移動ホストからの指示による移動管理を組み合わせることで、効率的な移動管理を実現できることを示す。これらにより、効率的な移動管理と通信経路を両立することができる。

### 3.2.1. IP の移動ホスト収容の課題

図 3-2 に、移動ホスト (MH: Mobile Host)を収容するネットワーク層の基本コンセプトを示す。

MH は、ホストそのものの示す IP アドレス、網との物理的な接続ポイントを示す IP アドレスの 2 つの IP アドレスを持つ。これらの IP アドレスを、L-ID (logical identifier), G-ID (geographical identifier)と呼ぶ。L-ID は、ネットワークとの接続ポイントに依存せず、継続的に端末を識別するためのアドレスである。一方、G-ID は、ネットワークとの接続ポイントに依存した一時的なアドレスである。MH の L-ID と G-ID の対応付けは、モビリティバインディング (mobility binding)[56]と呼ばれる。モビリティバインディングは、MH が異なるネットワークに移動し、ネットワークとの物理的な接続ポイントが変更されるたびに更新される。ネットワーク層よりも上位層の通信では、L-ID をソース、デスティネーションアドレスとして利用する。この通信は、図 3-2 に示すように、MH の物理的な接続ポイント(位置)とは無依存な L-ID 平面 (logical identifier plane)上で行われる。MH を収容するネットワーク層は、L-ID 平面上のデスティネーションアドレスを、MH の移動に伴う物理的なネットワークとの接続点を反映した G-ID 平面 (geographical identifier plane)上のデスティネーションアドレスに変換し、物理的な接続を提供する。この技術は、MH 収容の鍵となる技術であり、一般的にカプセル化技術と呼ばれる。具体的には、L-ID をベースとしたヘッダを有するデータグラムに対し、G-ID をベースとしたヘッダを付加(カプセル化: en-capsulation)して転送する。このとき、各 MH の L-ID と G-ID を正しく対応付けられるように、モビリティバインディングを維持することが重要である。以上により、上位層の通信では、MH の移動に伴うネットワークへの接続点変化を意識せず、トランスペアレントな通信を実現することが可能になる。このような特徴を IPv4 に導入する際、現状の IPv4 ホスト、ノードおよび IPv4 自身との互換性をいかに維持するかが課題となる。

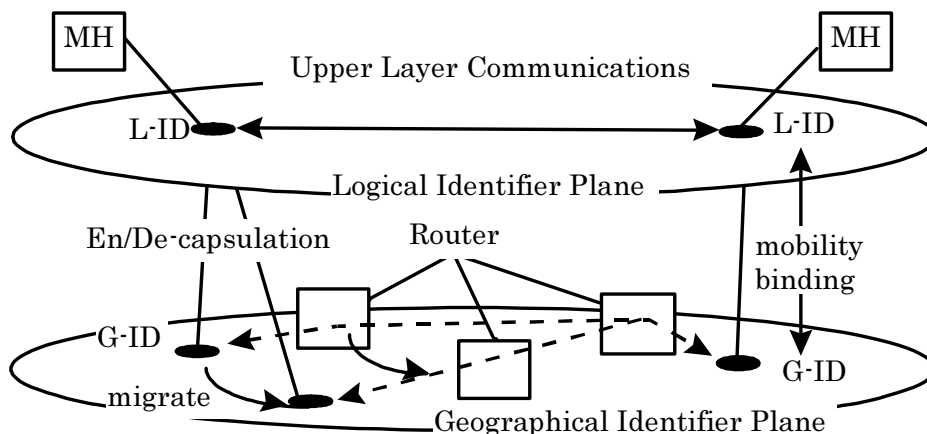


図 3-2 IP による移動ホスト収容に向けた基本コンセプト

mobile IP 方式[56]では、デフォルトのカプセル化技術として、IP-in-IP ヘッダ[59]を活用し、L-ID、G-ID を、ホームアドレス、ケアオブアドレス (CoA: Care-of Address)と呼ぶ。また、この方式では、MH と通信する全てのホストは、カプセル化を行わず、MH の L-ID をデスティネーションアドレスとした IP データグラムを送信する。このデータグラムは、デスティネーションアドレスである L-ID が示す物理ネットワークに転送された後、あて先の MH の G-ID である CoA に基づくヘッダでカプセル化され、CoA が示す MH のネットワーク接続点に向けて転送される。カプセル化されたデータグラ

ムは、MH のネットワーク接続点において、脱カプセル化されて MH に到達する。MH には、L-ID が一つだけ設定されるため、MH のネットワーク接続位置に依らず、L-ID によって定められる唯一の物理ネットワーク(MHのホームネットワーク)において常にカプセル化される。このときの IP データグラムの転送経路は、図 3-3-a)に示すように、必ず L-ID で定められる物理ネットワークを経由するため、冗長な経路を通ることになる。図において、カプセル化されない IP データグラム、カプセル化された IP データグラムは、実線、破線で示しており、MH 宛の全 IP データグラムは、MH の L-ID、G-ID である CoA で定められるネットワークでカプセル化、脱カプセル化(de-capsulation)が行われることがわかる。この方式は、通信経路の冗長化という課題は有するが、MH が移動した際にその L-ID が定める脱カプセル化ポイントのみ、モビリティバインディングを更新すればよいので、モビリティバインディングの管理トラフィックの増加は抑圧できるというメリットを持つ。さらに、MH の L-ID、G-ID で定められるネットワーク内のみカプセル化/脱カプセル化機能を導入するだけで実現可能であるため、既存のホストやノードに対して付加的な機能を導入する必要はない。

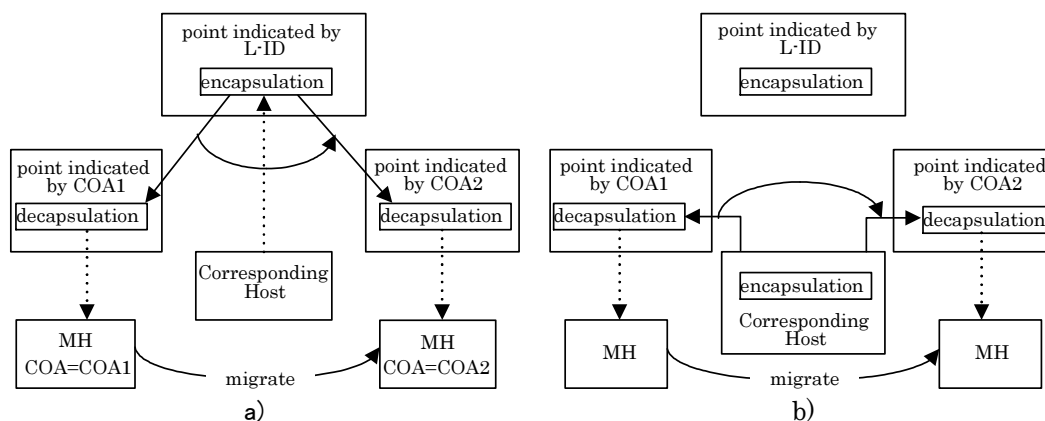
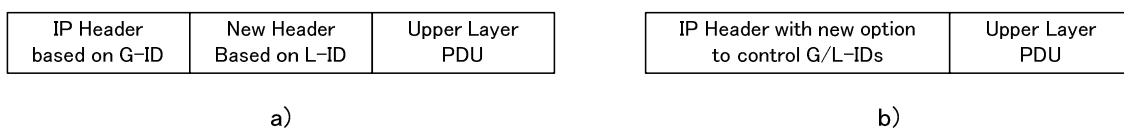


図 3-3 移動ホストの通信経路

冗長経路を改善するために、mobile IP 方式のオプションとして、経路最適化プロトコル[60]が提案されている。このプロトコルでは、通信相手のモビリティバインディングに基づき、IP データグラムの送信ホスト自身がカプセル化機能を持つことが導入される。これにより、送信ホスト自身が、通信相手の G-ID に基づくヘッダでカプセル化された IP データグラムを送信できる。しかし、このような機能は、既存の IPv4 ホストには搭載されないため、経路最適化の効果は限定的なものになる。

一方、VIP (Virtual IP)方式[57]では、経路最適化に向けた異なるアプローチが示されている。このアプローチでは、L-ID、G-ID を、それぞれ、仮想ネットワーク (VN: Virtual Network)、物理ネットワーク (PN: Physical Network)アドレスと呼ぶ。MH と中継ノードの両方がモビリティバインディング管理機能を持ち、カプセル化/脱カプセル化を行うことで、柔軟な経路制御を実現するものである。既存ルータなど、この機能を持たない中継ノードがモビリティバインディング管理機能を有する中継ノードに置き換わっていけば、効率的な経路の割合も増加する。図 3-3-b に、MH とモビリティバインディング管理機能を有する通信相手との通信経路を示す。この場合、MH 宛のデータグラムは、

通信相手自身によってカプセル化され、最短経路でMHまで転送される。このために、VIP方式は、2つのカプセル化手法を提案している。1つは、IPヘッダと上位PDU (Protocol Data Unit)の間に新たなヘッダを導入するものであり、もう1つは、IPに新たなオプションを導入するものである。これらの方式でカプセル化されたデータグラム構造を図3-4-a), b)に示す。このデータグラムをハンドリングするには、新たなIPモジュールの開発が必須であり、後方互換性の維持は難しい。さらに、MHのモビリティバインディング更新にブロードキャストのメカニズムを導入しており、移動管理トラフィックの増大につながる。



**図 3-4 VIP方式のカプセル化方式**

IPによるMH収容のポイントは、後方互換性を維持しつつ、mobile IP方式に示される効率的な移動管理とVIP方式に示される冗長性が少ない効率的な通信経路を両立させることにありと考える。効率的な通信経路は、中継経路上のルータにおいてもカプセル化/脱カプセル化を柔軟に行うことで、また、効率的な移動管理は、モビリティバインディングを適切なノードのみに効率的に通知することで実現できる。本節では、従来のプロトコルフィールドやあて先アドレスフィールド等の内容に基づく決定論的なデータグラム処理ではなく、確率論的なデータグラム処理方式を用いるカプセル化方式を適用し、効率的な通信経路と移動管理を両立させられる方式を提案する。この方式を $IP^2$  (IP-squared)と呼ぶ。

### 3.2.2. $IP^2$ (IP Squared)方式

図3-5に、 $IP^2$ 方式の階層構造を示す。この階層構造を持つノードは、上位副層 (Logical IP)で構成されるIPデータグラムと同じ構造を持つデータに下位副層 (Geographical IP)において、さらにIPヘッダをG-IPヘッダとして付加する。

<i>Application Layer</i>	http, SMTP,...
<i>Transport Layer</i>	TCP/UDP
<i>Network Layer</i>	Logical IP
	Geographical IP
<i>Datalink Layer</i>	Ethernet, Wireless LAN,...
<i>Physical Layer</i>	

**図 3-5  $IP^2$ の階層構造**



このデータグラムを  $IP^2$  データグラムと呼び、図 3-6 にその構成を示す。図に示すように、 $IP^2$  データグラムは、IP データグラムを IP ヘッダでカプセル化したものとなる。 $IP^2$  データグラムの構造は、従来の IP データグラムと等しく、従来のルータ等の中継ノードは従来通りに処理できる。

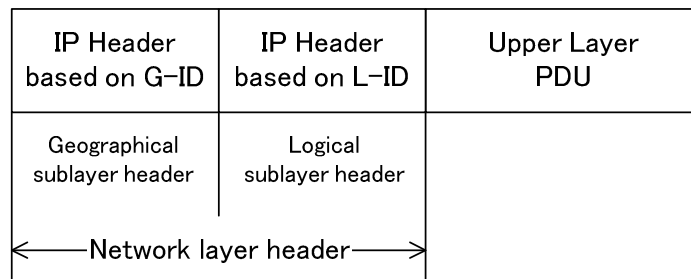


図 3-6  $IP^2$  データグラム構成

G-IP ヘッダとして、protocol number 4 が割り当てられている[61]IP-in-IP ヘッダを適用するという考え方もある。しかし、IP-in-IP ヘッダでカプセル化されたデータグラムを受信した中継ノードは、IP-in-IP ヘッダの宛先 IP アドレスに向けて転送する機能しか定義されていない[59]。このため、中継ノードでは G-IP ヘッダしか扱えず、L-ID と G-ID の対応であるモビリティバインディングを管理することはできない。

$IP^2$  では、L-IP ヘッダの protocol number を、G-IP ヘッダの protocol number と同じ値とする。したがって、 $IP^2$  データグラムは、IP-in-IP ヘッダによるカプセル化とは異なり、IP データグラムに通常の IP ヘッダを付加する形と捉えることができる。このため、ホスト移動を考慮しない既存の IPv4 ルータは、 $IP^2$  データグラムを IP データグラムとして扱うことができる。一方、 $IP^2$  データグラムをハンドリングできるノードでは、 $IP^2$  データグラムと IP データグラムを識別できれば、 $IP^2$  データグラムの G-IP/L-IP ヘッダに基づいて他ノードのモビリティバインディングを管理し、最適な通信経路構成を加速することもできる。このメリットを実現するために、 $IP^2$  アーキテクチャに、1) データグラム識別機能、2) 柔軟な通信経路構成を実現する  $IP^2$  終端機能、3) 移動管理トラヒックを抑圧するモビリティバインディング管理機能の 3 機能を導入する。

### 3.2.2.1. データグラム識別機能

MH と従来の固定ホスト (SH: Stationary Host) が混在する環境では、 $IP^2$  データグラムと IP データグラムが混在するため、これらを識別しなければならない。このために、次の識別アルゴリズムを用いる。

Step 1: データグラムを受信した際、IP ヘッダで構成されるネットワーク層の第 1 ヘッダをチェックする。ヘッダチェックサムを求め、エラーが生じる場合は、そのデータグラムを廃棄する

Step 2: ネットワーク層の第 2 ヘッダが IP ヘッダであるか否かを確認する。この際、第 2 ヘッダ

に対するヘッダチェックサム演算に加え、第 1 ヘッダと第 2 ヘッダで同等の値が設定されているか否かの照合も行う。第 2 ヘッダが IP ヘッダであると判断されれば  $IP^2$  データグラム、さもなければ IP データグラムと識別する

図 3-7 に、データグラム識別フローを示す。 $IP^2$  データグラムのヘッダは、図 3-6 に示すように、IP ヘッダを連結したものであり、先頭の IP ヘッダの次に、もう一つの IP ヘッダが配される。 $IP^2$  データグラムと IP データグラムの識別は、IP ヘッダが 2 つ連結されているか否かを判定することになる。IPv4 機器は、データグラムを受信すると、まず、IP ヘッダのチェックサムを用いて、データグラムの先頭に配置される IP ヘッダの正当性を確認する。 $IP^2$  対応機器は、正当性が確認された後、受信したデータグラムは  $IP^2$  データグラムであるという仮説を立て、先頭の IP ヘッダの直後の部分が IP ヘッダであるか否かを確認し、仮説が「真」であれば  $IP^2$  データグラム、「偽」であれば IP データグラムと判断する。

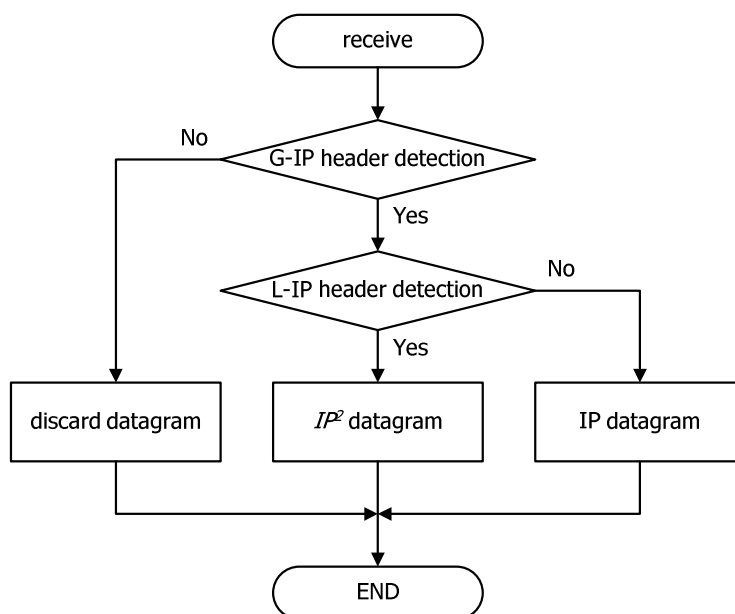


図 3-7 データグラム識別フロー

この際、 $IP^2$  データグラムは、図 3-8 に示すように、Geographical sublayer の IP ヘッダ(第 1 ヘッダ)と Logical sublayer の IP ヘッダ(第 2 ヘッダ)のヘッダフィールドに対してできる限り、同一の値を設定するため、まず、同一の値が配されるフィールドと仮定される部分の照合を行う。さらに、照合が確認された後、Logical sublayer の IP ヘッダのチェックサム部分と仮定される値を用いて、チェックサムの正当性の確認を行う。フィールド値の照合とチェックサムの正当性が確認されれば、仮説が「真」であり、受信したデータグラムは  $IP^2$  データグラムと判断する。

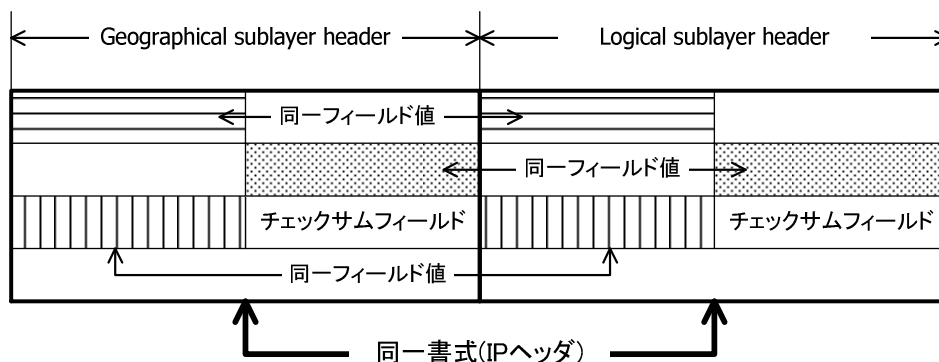


図 3-8  $IP^2$  データグラムのヘッダ構造

図 3-9 に、 $IP^2$  データグラムと IP データグラムの識別誤り率を示す。図 3-9 の横軸は、第 1 ヘッダと第 2 ヘッダの照合に用いる bit 数、縦軸は識別誤り率である。識別誤り率は、チェックサムフィールドとオプションフィールドを除く IP ヘッダ長(18 バイト)の長さの系列に対し、照合に用いるフィールドの bit 列が同一かつ、チェックサムの演算結果が同一となる確率である。図 3-9 より、照合 bit として 16 bit 使えれば、識別誤り率は  $10^{-10}$  程度になることがわかる。照合 bit 列を与えるヘッダのフィールドとして、version フィールド(4 bit)、protocol フィールド(8 bit)、identification フィールド(16 bit)を利用できる。

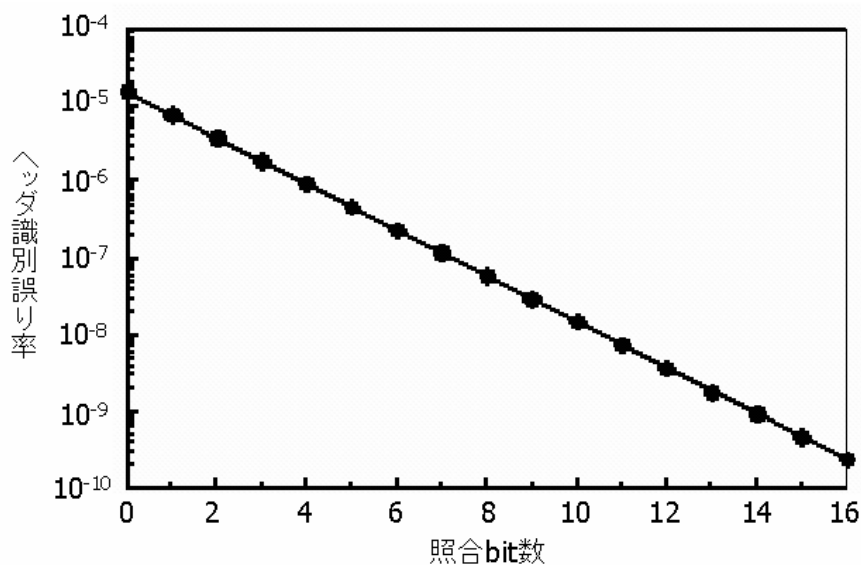


図 3-9 データグラム識別誤り率

このように、 $IP^2$  は、確率論的なデータグラム識別手法を導入することで、既存の IPv4 の後方互換性を維持して、新たな構造のデータグラムの導入を実現する。これにより、中継ノード等においても、 $IP^2$  データグラムを適用すれば、データグラム受信時の IP ヘッダ処理の中でモビリティバインディングを把握し、柔軟に通信経路の最適化を行う能力を有することができる。

### 3.2.2.2. $IP^2$ 終端機能

$IP^2$ では、 $IP$ データグラムと後方互換性を維持するために、図 3-6の  $IP^2$ データグラムを導入する。この導入効果を得るためには、 $IP$ データグラムと  $IP^2$ データグラムの双方をハンドリングする機能が必要である。この機能では、 $IP^2$ 終端機能と呼び、カプセル化/脱カプセル化を適切に行うことが求められる。この機能は、最短な通信経路構成時、MH へのデータグラム転送時など、データグラム転送の様々な局面で利用される。特に MH と既存の  $IPv4$  機器の間通信においては、図 3-10 に示すように、 $IP^2$ 終端機能によってカプセル化 (SH→MH 宛のデータグラム)、脱カプセル化 (MH →SH 宛のデータグラム)を行わないと通信できない。

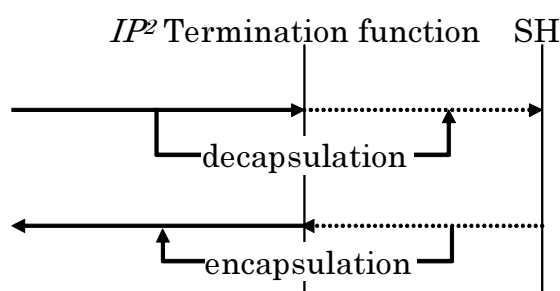


図 3-10  $IP^2$  終端機能による既存  $IPv4$  ホスト(SH)収容

また、カプセル化/脱カプセル化を行い、モビリティバインディングを管理する点を終端点と呼び、3.2.1 に示したデータグラム識別機能は実装されていなければならない。終端点は、MH に関する通信制御において、1) MH 向けのデータグラム到達の保証、2) MH への通信経路の効率化 を実現する役割を担うものである。 $IP^2$ では、ホーム(Home)、フォーリン(Foreign)、一時の 3 つの終端点を定義する。これらの終端点の基本的な役割を以下に示す。

- ホーム終端点:  
MH へのデータグラム到達を保証するには、MH の移動に対応して、そのモビリティバインディングを更新し、データグラムをカプセル化する必要がある。しかし、全てのノードにおいてモビリティバインディングを管理することは現実的ではなく、定常的に MH のモビリティバインディングを管理するポイントを定めることが求められる。この役割を担う終端点として、ホーム終端点を導入する。MH の L-ID は、MH の接続点に依存しない識別子であるため、ホーム終端点は L-ID で到達可能な物理ネットワークに配される必要がある。
- フォーリン終端点:  
MH の G-ID で定められるネットワークインタフェースでは、常に、 $IP^2$ データグラムが受信時される。このとき、上位層の通信を成立させるためには、脱カプセル化が必須である。フォーリン終端点は、この脱カプセル化の役割を担う。
- 一時終端点:  
一時終端点は、効率的な通信経路を構成し、冗長な通信経路を削減する役割を担う。この終端点は、ホスト間の通信が継続する期間のみカプセル化/脱カプセル化を行うことで、

通信経路の効率化を図る。このために、送信/受信ホストのネットワーク接続点に近いネットワークに配されるほど、より効率化に寄与することができる。

このように、 $IP^2$  において、MH の通信を実現するためには、冗長な通信経路を厭わなければ、最低限、ホーム/フォーリン終端点の導入で十分である。通信経路の効率化も実現するために、一時終端点を導入していけばよい。これらの終端点に基づいて、モビリティバインディングを管理する機能を、それぞれ、ホーム/フォーリン/一時モビリティバインディング管理機能と呼ぶこととする。

### 3.2.2.3. モビリティバインディング管理機能

MH との通信を行うためには、MH の L-ID/G-ID 対応の管理、変更を行う機能が必要となる。この管理更新の頻度はネットワークのトラフィックに影響を及ぼす。更新頻度の観点から、

- 1) 移動の度に L-ID/G-ID の登録/更新を行う高頻度型管理
- 2) MH への通信要求に応じて L-ID/G-ID の対応を通知する低頻度型管理

に分類できる。mobile IP 方式は高頻度型管理のみ、VIP 方式は高頻度型管理を主体とし、低頻度型管理の導入、参考文献[58]の方式は低頻度型管理のみで構成する方式と考えられる。

MH の L-ID/G-ID 対応をネットワーク内に分散させるほど、MH への転送経路は効率化できる。高頻度型管理のみを用いる場合、MH の移動時における L-ID/G-ID の更新トラフィックが増大するが、最新の L-ID/G-ID 対応が管理されていることが保証される。一方、低頻度型管理のみを用いる場合、MH の移動の度の L-ID/G-ID 更新トラフィックは生じないが、最新の L-ID/G-ID 対応が管理されている保証は無く、MH への通信要求が生じた場合、L-ID/G-ID 対応の検索が必要になる。また、L-ID/G-ID 対応の無矛盾性の維持も検討課題である。このように、高頻度/低頻度管理の特徴は異なり、これらをバランスよく導入することで、MH への効率的な経路と移動に伴う制御トラフィックの抑圧を行うことができると考えられる。

$IP^2$  では、ホーム、フォーリンモビリティバインディング管理機能に対して、高頻度型管理を適用する。MH が移動したとき、これらの終端点でモビリティバインディング更新を失敗すると、その MH のモビリティバインディングを保有しないノードからは、移動後の MH へデータグラムを送信できなくなる。このため、これらの管理機能に対して高頻度型管理を適用し、MH へのデータグラム到達を保証する。一方、低頻度型管理を一時モビリティバインディング管理機能に適用する。この管理機能では、モビリティバインディングをキャッシュし、受信した  $IP^2$  データグラムの L-IP/G-IP ヘッダに基づいてモビリティバインディングを更新する。MH と通信を行う初期段階では、一時モビリティバインディング管理機能はモビリティバインディングを有しておらず、ホーム、フォーリンモビリティバインディングのサポートが必要だが、一度、 $IP^2$  データグラムを処理することで、モビリティバインディングの更新は完了する。このように、 $IP^2$  では、一時管理機能におけるモビリティバインディング更新を行うための制御トラフィックは発生することはない。

### 3.2.3. $IP^2$ 方式の特徴と評価

本節では、 $IP^2$ の実現形態、スケーラビリティ、MH に対する通信経路制御について示し、 $IP^2$ の有する特徴を明らかにする。

#### 3.2.3.1. $IP^2$ の実現形態

MH 導入に向けて、ネットワークの運用管理の視点から考えると、異なる要件を満たすことが求められる。例えば、多くの MH を有するネットワークでは MH を収容するためのオーバーヘッドを抑圧することが望ましい。一方、MH 数が少ない場合は、できる限り導入コストを抑えることが望まれる。 $IP^2$ は、その機能の配置により、様々な実現形態をとることができる。

低コストでの MH 導入のためには、ホームおよびフォーリンモビリティバインディング管理機能を導入すればよい。これは、mobile IP 方式のシステム構成と同様のものになる。また、MH にフォーリン移動管理機能を導入することも可能であり[62]、この場合は、ホームモビリティバインディング管理機能のみの導入で実現できる。さらに、MH に一時モビリティバインディング管理機能を導入すれば、mobile IP 方式に経路最適化オプションを適用したシステムと同様の構成となり、MH 間の通信経路の効率化が図られる。

また、ホーム/フォーリンモビリティバインディング管理機能を有するルータに加え、SH に対する一時モビリティバインディング管理機能を有するルータを導入することで、SH と MH 間の通信経路も効率化される。このように、 $IP^2$ は、移動サポート機能の導入コスト、通信経路の効率化の要件に即して、柔軟な形態での実現を可能とする。

#### 3.2.3.2. スケーラビリティ

ネットワークの大規模化、移動範囲の広域化を考慮すると、移動サポート機能がスケーラブルに実現される必要がある。本節では、移動管理の鍵となるモビリティバインディングの管理形態とホスト移動に伴うオーバーヘッドを評価し、規模に即して柔軟にシステムを構成できることを示す。

##### 3.2.3.2.1. モビリティバインディングの管理

$IP^2$ では、モビリティバインディングは、ホーム/フォーリン/一時モビリティバインディング管理機能で管理される。これらの各管理機能において管理するモビリティバインディング数は、ネットワーク全体の規模や MH の総数とは独立に設定できることが求められる。

ホームモビリティバインディング管理機能では、MH の L-ID で定められるローカルネットワークに属する MH のモビリティバインディングのみを管理する。また、フォーリンモビリティバインディング管理機能では、接続するローカルネットワークに移動してきた MH に関するモビリティバインディングのみを管理すればよい。このため、ホーム/フォーリンモビリティバインディング管理機能は、接続するローカルネットワークの運用ポリシーにしたがって、管理するモビリティバインディングを設定する

ことができる。さらに、一時モビリティバインディング管理機能は、経路最適化が必要なホストの通信相手に限定できる。このように、各管理機能で管理するモビリティバインディング数は、ネットワーク規模や MH 総数とは独立に、運用ポリシーに基づいて設定すればよい。

### 3.2.3.2.2. 移動管理制御メッセージ

MH が異なるネットワークに移動すると、MH は、そのモビリティバインディングをホーム/フォーリンモビリティバインディング管理機能に通知する。同時に、その MH のモビリティバインディングを管理する一時モビリティバインディング管理機能にも、新たなモビリティバインディングを通知する必要がある。IP<sup>2</sup> では、一時モビリティバインディング管理機能へのモビリティバインディング通知は、低頻度型管理で行われるため、新たな制御メッセージは発生しない。ここで、 $N_{MH}$  を MH 数、 $\mu$  を MH の平均移動頻度とすれば、単位時間当たりの平均移動通知メッセージ数  $N_{MES}$  は、

$$N_{MES} = 2\mu N_{MH} \quad (3-1)$$

となる。mobile IP 方式における単位時間当たりの平均移動通知メッセージ数は、式(3-1)の  $N_{MES}$  を用いると、 $N_{MES} / 2$  となる。これは、フォーリンモビリティバインディング管理機能と同等の機能を持つ Foreign Agent と呼ばれるノードへの通知が行われなかったためである。一方、VIP 方式では、MH のモビリティバインディングは、ホームモビリティバインディング管理機能に相当するノードおよび、その MH と通信相手の通信経路上に存在するルータ群で管理される。MH が移動すると、移動前のモビリティバインディングを管理するルータに対して、移動通知メッセージが選択的にフラグディングされる。この場合、 $N_{MES}$  は、

$$N_{MES} = \mu N_{MH} (L_R + 1) \quad (3-2)$$

となる。ここで、 $L_R$  は、MH のモビリティバインディングを管理しているルータ数である。式(3-2)において、 $L_R$  は MH が通信する通信相手数や通信相手とのホップ数の増大と共に増加するため、 $N_{MES}$  はネットワーク規模と MH の移動エリアの範囲に依存する。

以上のように、IP<sup>2</sup>、mobile IP 方式の平均移動通知メッセージ数は、MH 数 ( $N_{MH}$ ) のみに比例するが、VIP 方式では、 $N_{MH}$  と  $L_R$  の積に比例するため、ネットワーク規模に依存するものになる。この様子を図 3-11 に示す。図より、IP<sup>2</sup> における移動通知メッセージ数は、ネットワーク規模への依存性を抑圧することで、VIP 方式と比較して大幅に削減できることが分かる。

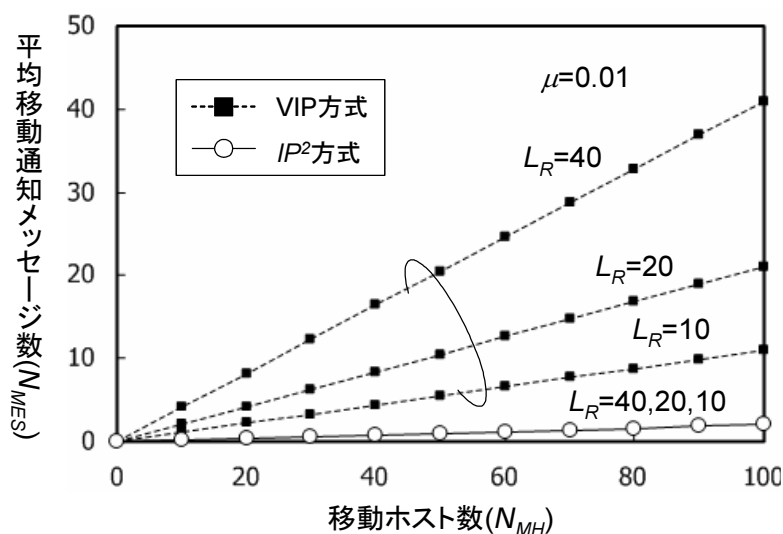


図 3-11 平均移動通知メッセージ数の比較

### 3.2.3.3. 通信経路制御

移MHの導入初期においては、MH数も少なく、SHとの通信がメインになると考えられる。このとき、MH宛の $IP^2$ データグラムも多くは、ホームモビリティバインディング管理機能を経由する冗長な通信経路で転送される。反対に、MHから送信される $IP^2$ データグラムは、一時モビリティバインディング管理機能により、最短な通信経路で送信される。ここで、MHが単位時間内に送受信する平均データグラム数を $N_{TX}$ 、 $N_{RX}$ 、MHの対SH平均送信/受信比率を $\lambda_{TX}/\lambda_{RX}$ とすれば、MHのSHとの送受信に関する平均データグラム数は $\lambda_{TX}N_{TX}$ 、 $\lambda_{RX}N_{RX}$ となる。 $IP^2$ では、SHからMHへ送信されるデータグラムは、常にホームモビリティバインディング管理機能を介するため、冗長な通信経路となる単位時間当たりの平均データグラム数 $N_{HM}$ は、

$$N_{HM} = \lambda_{RX}N_{RX} \quad (3-3)$$

となる。一方、mobile IP方式のように、一時モビリティバインディング管理機能を持たないシステムでは、MHからSHに向けて送信されるデータグラム以外は、全てホームモビリティバインディング管理機能を経由することとなるため、 $N_{HM}$ は

$$N_{HM} = N_{RX} + (1 - \lambda_{TX})N_{TX} \quad (3-4)$$

と表すことができる。さらに、VIP方式のように、一時モビリティバインディング管理機能と同等の機能を持つルータが導入されていれば、一度、MHとその通信相手との間で図3-4や図3-6のようなデータグラムのやり取りが行われると、一時モビリティバインディング管理機能により通信経路は最適化される。このため、この場合は、 $N_{HM}$ はゼロとなる。ここで、MHが送受信するデータグラムのうち、冗長な通信経路を経由するデータグラムの割合を平均冗長経路比率( $R$ )とすると、



$$R = \frac{N_{HM}}{(N_{TX} + N_{RX})} \quad (3-5)$$

と表すことができる。簡単のために、 $N_{TX} = N_{RX}$ 、 $\lambda_{TX} = \lambda_{RX} = \lambda$  (対 SH 平均通信比率)とし、 $\lambda$ と  $R$  の関係を図 3-12 に示す。MH が SH とのみ通信している場合 ( $\lambda = 1$ )、MH が送信する全データグラムは、直接 SH に向けて経路制御されるが、MH 自身が一時モビリティバインディング管理機能を持つ/持たないに関わらず、MH 宛の全データグラムは MH のホームモビリティバインディング管理機能を経由する冗長な通信経路となる。図では、 $N_{TX} = N_{RX}$  としているため、 $R = 50\%$  となる。mobile IP 方式のように、一時モビリティバインディング管理機能を持たない MH サポート方式(式 3-3)では、MH 間で送受信される全てのデータグラムは、各 MH のホームモビリティバインディング管理機能を経由する冗長経路をとるため、MH 同士の通信が増加する ( $\lambda$  が小さくなる)につれて、 $R$  が増加する。一方、一時モビリティバインディング管理機能を有する  $IP^2$  では、MH が一時モビリティバインディング管理機能を持てば、MH 同士で直接データグラムの送受信が可能になるため、 $R$  は減少する。また、一時モビリティバインディング機能を搭載するルータを導入し、SH から MH に向けて送信されたデータグラムをカプセル化することで、さらに、 $R$  を減少させることが可能である[32]。

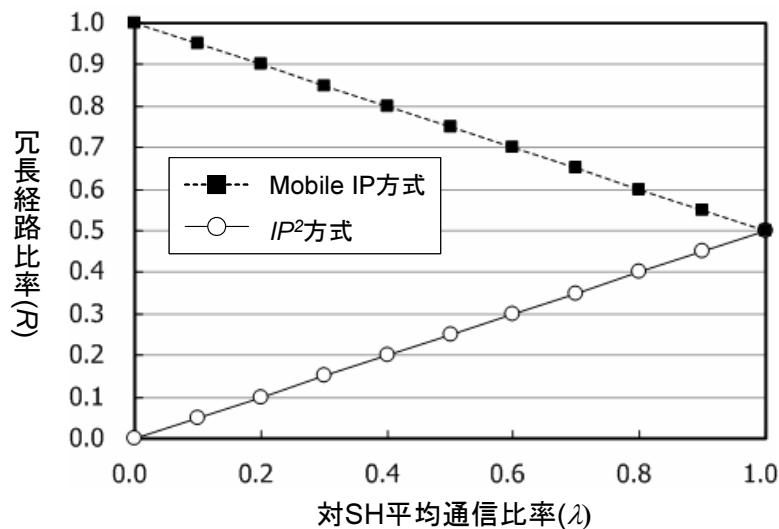


図 3-12 冗長経路比率の比較

以上、IPv4 におけるユニキャスト通信に対する MH 収容方式として、 $IP^2$  方式を提案した。 $IP^2$  は、既存のホスト移動を考慮していない IPv4 機器との互換性を維持しつつ、移動管理トラフィックの抑圧と通信経路の効率化を両立させることができることを示した。 $IP^2$  の特徴を以下にまとめる。

- IP データグラムを終端せずに IP ヘッダチェックサム処理の拡張でカプセル化/非カプセル化データグラムの識別を行う確率的な識別手法を適用したカプセル化方式を適用した。これにより、移動対応ホスト、中継ルータでもモビリティバインディングを管理することを可能と

した。

- ホーム/フォーリン/一時の 3 つのモビリティバインディング管理機能を定義した。特に、一時モビリティバインディング管理機能を有効に活用することで、MH 間、MH-SH 間の冗長な通信経路を削減することができる。
- さらに、モビリティバインディング管理手法として、高頻度型/低頻度型管理の 2 つの手法を定義し、これらの手法を適切に使い分けることを提案した。高頻度型管理は、ホーム/フォーリンモビリティバインディング管理機能に適用し、MH の通信の接続性を維持する。一方、低頻度型管理は、一時モビリティバインディング管理機能に適用し、冗長な通信経路の発生を抑制する。低頻度型管理は、上記カプセル化手法を用いることで、付加的な管理トラフィックが不要となり、移動管理トラフィックの増大を抑えることができる。

### 3.3. IP Multicast の移動拡張方式

Internet において、固定地点間の 1 対 1 通信(ユニキャスト通信)に加え、N 対 N のマルチポイント通信(マルチキャスト通信)や MH との通信が検討されている。これらのプロトコルは、それぞれ、IP Multicast[63]、mobile IP[56]と呼ばれる。IP Multicast は、同一情報を一度に複数の宛先に転送でき、帯域を有効に利用した遠隔会議、ファイル配送等を実現する手段として検討されている[64][65]。一方、mobile IP は、上位アプリケーションに対して、場所に依存せずトランスペアレントなネットワーク環境を提供でき、モバイルコンピューティング環境の実現手段として期待されている。

マルチキャスト通信によるサービスは、限られたメンバー間で情報を共有することを目的とする。メンバー限定要因として、ネットワークポロジのような物理的要因、メンバーの管理主体のような論理的要因があると考えられる。例えば、商店街の広告のようなサービスには、近隣に存在する全ホストが対象となるため物理的要因に基づくメンバー限定、会議スケジュール調整のようなサービスには、所在地に依らず会議参加者という論理的要因に基づくメンバー限定の適用が望ましいであろう。管理主体が異なるネットワークの相互接続で構成される Internet では、Internet への接続点が不変の SH については、ネットワークポロジに基づいてホストを限定することで、その管理主体も同時に限定できる。しかし、接続点が変化する MH を考慮すると、物理/論理的要因を分離し、それぞれの要因でメンバーを独立に限定した新しいサービス形態を提供する必要がある。

また、MH をサポートする基本的な機能は、パケット/回線交換を問わず、MH の位置を管理する固定的なポイントから転送することである[56][66]。MH をマルチキャスト通信に参加させる方法として、全マルチキャストトラフィックを各 MH に個別転送することが考えられる。しかし、これは、各 MH への転送に必要な付加的なトラフィックを発生させ、マルチキャスト通信の利点の一つの帯域有効利用を考えると、望ましいとは言えない。このため、MH をサポートするための帯域増加分をできるだけ抑える必要がある。

本節では、IP Multicast と mobile IP を融合し、MH を考慮したマルチキャストサービスの提供を目指した方式を提案する。提案方式では、帯域の有効利用とともに、ホスト移動を考慮したメンバー限定を行える柔軟なマルチキャスト通信サービスを提供できることを示す。

#### 3.3.1. IP Multicast の移動ホスト対応の課題

本項では、現状の IP Multicast と mobile IP による MH の動作を概観し、IP Multicast が MH に対応するために必要な技術課題を明らかにする。

##### 3.3.1.1. IP Multicast の概要

IP Multicast は、図 3-13 のように、複数のホストをメンバーとするマルチキャストグループに 1 つの IP マルチキャストアドレスを対応させ、グループ全体が IP マルチキャストアドレスを持つ 1 つの仮想ホストとする Host Group モデル[67]に基づいて実現される。図のように、ホストは、同時に複数

のグループに参加することもできる。このモデルにより、上位アプリケーションは、マルチキャスト通信もユニキャスト通信と同様に扱える。

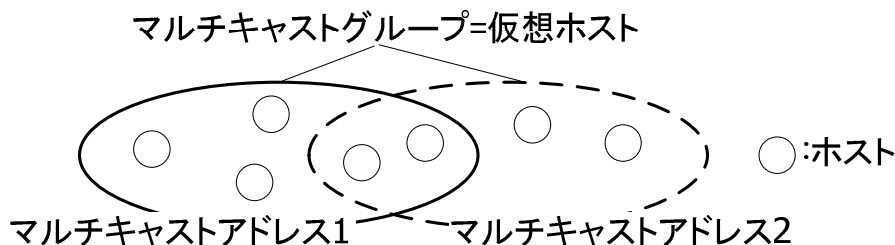


図 3-13 Host Group モデル

さらに、IP Multicast の特徴として、scope[67]の概念が導入されている点がある。scope は、各マルチキャストグループに対して独立に定義され、そのグループのデータグラムが転送されるネットワークポロジを定める。同時に、scope は、管理主体のネットワークに基づいたグループのメンバー限定も実現する。IPv4 では、scope は TTL (Time-To-Live)値[10]に基づいて定義される[65]。図 3-14 に TTL 値に基づく scope の例を示す。scope の境界にはボーダールータと呼ばれるルータが配置され、TTL スレッシュホールド( $L$ )が設定される。ボーダールータは、 $L$  よりも小さい TTL 値のデータグラムを転送せず、マルチキャストデータグラムの転送エリアを制限する。scope 内の最長経路(図中、太線)をデータグラムが通過できる TTL 値を  $K$  とすれば、 $L$  は、 $K \leq L$  と定められる。この scope 内でマルチキャスト通信を行う場合、グループの scope を定める TTL 値( $M$ )は、 $K \leq M \leq L$  を満足するように設定される。また、図のように、scope 内部に異なる scope を含むこともできる。

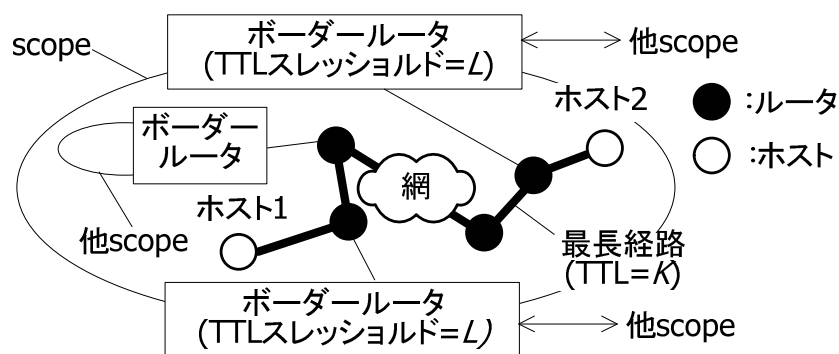


図 3-14 TTL に基づく IP Multicast の scope

また、マルチキャスト通信を行うには、メンバー間で通信に必要なパラメータを共有する必要がある。パラメータとして、IP Multicast では、使用するポート番号、アプリケーション、マルチキャストアドレス、グループを識別する ID (S-ID: Session Identifier)等がある[68]。これらのパラメータを共有するプロトコルとして、SAP (Session Announcement Protocol)[69]がある。マルチキャストグループを構成し、通信を行おうとするユーザ(originator)は、まず、そのグループの scope とともに前述のパラメ

ータを定める。さらに、これらのパラメータからSAPメッセージを構成し、グループのscope内に周期的に報知する(図 3-15 参照)。SAPメッセージを報知するアドレスは、well-known アドレスとして設定される。scope内に存在するホスト(図中○)は、originatorから報知されるSAPメッセージを受信し、グループ参加に必要なパラメータを得てそのグループに参加する。一方、scope外のホスト(図中、×)は、SAPメッセージを受信できず、そのグループには参加できない。

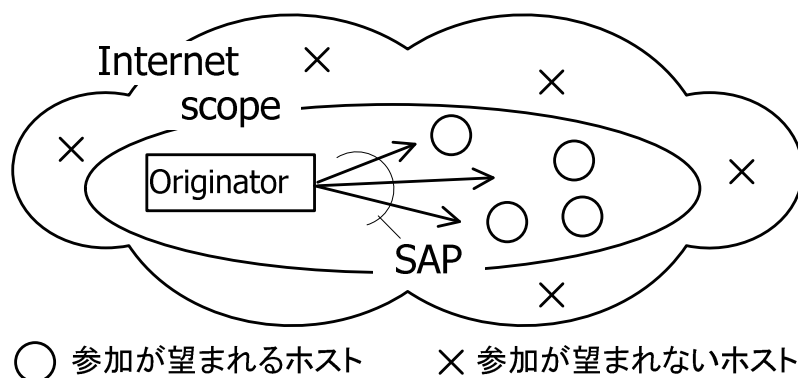


図 3-15 SAP メッセージの報知

### 3.3.1.2. 移動ホストのマルチキャストデータグラム送受信

mobile IP 機能を持つ MH は、ホームアドレスと呼ばれる位置に依存しない一定の IP アドレスと移動先に依存した一時的な IP アドレスである CoA の 2 つの IP アドレスを持つ。MH のトランスポート層以上の通信はホームアドレスのみに基づいて行われ、MH の移動を意識する必要はない。また、ホームアドレスで定められるネットワークは、その MH のホームネットワーク (HN: Home Network)と呼ばれる。さらに、mobile IP は、MHをサポートするMobility Agentと呼ばれる機能を導入する。Mobility Agent は、MHのHNに存在するホームエージェント (HA: Home Agent)と移動先での通信をサポートするフォーリンエージェント (Foreign Agent)の 2 種類がある。HA には、MHの移動の度に新しいモビリティバインディングが登録される。HA は、モビリティバインディングに基づき、MHの通信相手 (CH: Correspondent Host)からMHのホームアドレス宛に送信されたデータグラムをMHのCoAに基づいたヘッダでカプセル化し、MHの移動先へ転送することで、MHへの通信を保証する。HA は、MHの管理主体と考えることができる。図 3-16 にMHの移動手順及び通信手順を示す[56]。

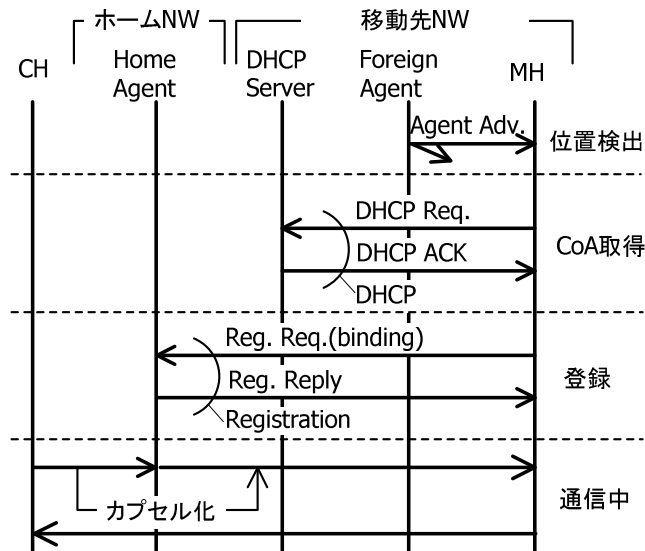


図 3-16 mobile IP の制御, 通信手順

さらに, mobile IP では, MH のマルチキャストデータグラム送受信方法として,

- HAとMHの間にマルチキャストデータグラムを転送するユニキャストの双方向のトンネルを形成し, MH は HA を経由してマルチキャストデータグラムの送受信を行う方法(図 3-17)
- MH が移動先で直接マルチキャストデータグラムの送受信を行う方法(図 3-18)

の2方法が規定される. 本節では, これらの方法を, それぞれ, トンネル法, 直接法と呼ぶ.

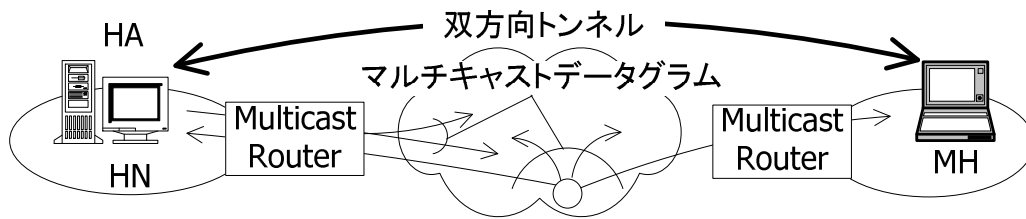


図 3-17 トンネル法によるマルチキャストデータグラム送受信

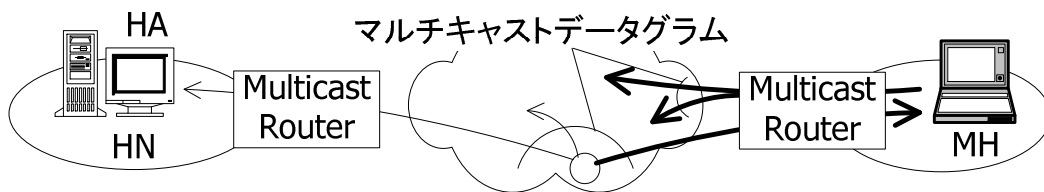


図 3-18 直接法によるマルチキャストデータグラム送受信

### 3.3.1.3. 技術課題

トンネル法では、MHは、移動場所に関わらず、そのHNをscopeに含む全マルチキャストグループに参加できる。これは、originator にとっては、MHの移動先を考慮せずにscopeの設定を行うことができるという長所である。しかし、図3-19のように、MHがscope内に移動している場合、MHは、共有マルチキャストツリーを介してそのグループのデータグラムを受信できるにもかかわらず、HAからのトンネルを介して受信する。このため、MHにはマルチキャストデータグラムが重複して転送され、共有マルチキャストツリーによる帯域有効利用を図ることができない。

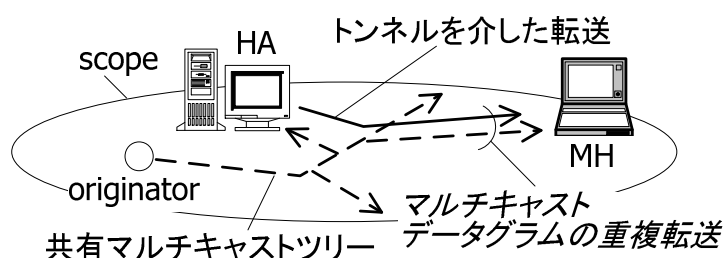


図 3-19 トンネル法におけるマルチキャストデータグラムの重複転送

一方、直接法では、MHは共有マルチキャストツリーを介してグループに参加する。このため、トンネル法で生じる不要な帯域増加はなく、MHは、その所在地がscopeに含まれる全マルチキャストグループに参加できる。しかし、これは、scopeに基づくメンバーの限定とは矛盾する。具体的には、MHが、

- グループのメンバーであるが、そのグループに参加できない、
- グループのメンバーとして想定されないが、参加する

という2つのケースが生じる。この様子を図3-20に示す。図において、MH-1、MH-2のMHは、それぞれ、HA1、HA2をHAとし、HA1、HA2はscopeの内、外に、MH-1、MH-2はscopeの外、内に移動している。このとき、HAをscope内に持つMH-1はこのマルチキャストグループへの参加が期待されるが、MH-2はHAがscope外に存在するため参加は期待されない。しかし、直接法では、MH-1は共有マルチキャストツリーに接続できず、グループへ参加できない。また、MH-2は共有マルチキャストツリーを介して参加すべきでないグループに参加できるという課題がある。

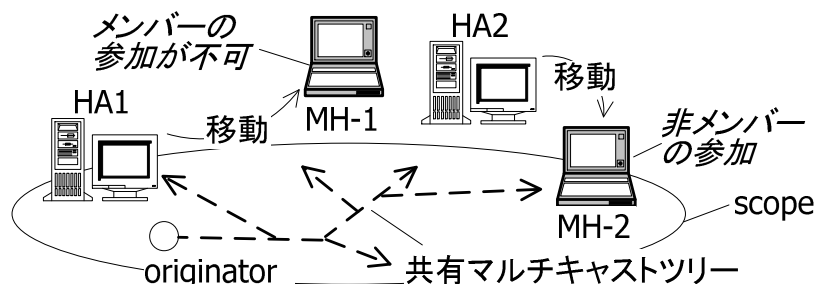


図 3-20 直接法におけるメンバー管理の課題

### 3.3.2. IP Multicast の拡張による mobile IP 対応方式

前項で示したように、トンネル法、直接法は、それぞれ、長所/短所を有する。そこで、この 2 方法を適切に使い分け、前項に示した課題を解消して、MH をサポートするマルチキャスト通信方式を提案する。このために、scope の拡張と HA と MH 間の制御手順を導入する。

#### 3.3.2.1. scope の拡張

ある scope (scope-A)を持つマルチキャストグループに対する MH とその HA の所在地及び scope-A の包含関係を考えると、MH は、図 3-21 のように、

- 1) HA, MH ともに scope 内(MH-A1)
- 2) HA は scope 内, MH は scope 外(MH-A2)
- 3) HA は scope 外, MH は scope 内(MH-B1)
- 4) HA, MH ともに scope 外(MH-B2)

と分類できる。図中、MH-A1, MH-A2 の HA は HA-A, MH-B1, MH-B2 の HA は HA-B である。

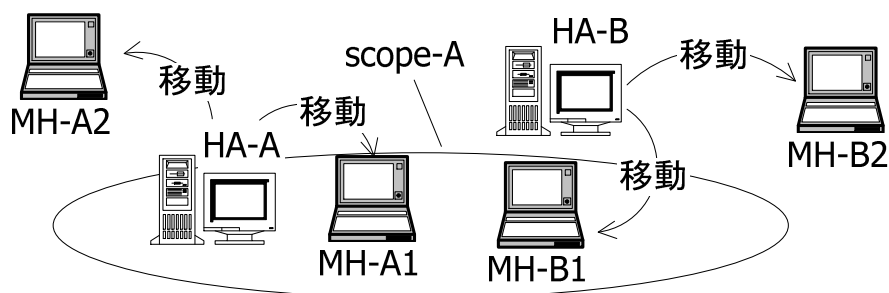


図 3-21 MH, HA 及び scope の関係

originator は必ずしもメンバーとして期待する MH の所在地を知ることはなく、MH の位置に依存せずに scope を定めて、メンバーを限定できることが望ましい。本節では、originator は、MH の所在地に依存しない HA の位置に基づいて scope を定めることとする。これは、現状の IP Multicast における scope の設定方法と同様である。この scope の定め方により、1), 4)の包含関係における MH は限定できる。つまり、1), 4)の場合は、それぞれ、MH, HA 共に scope 内, 外に存在するので、scope によるデータグラム転送エリアの限定で限定可能である。一方、2), 3)の包含関係の場合は、MH とその HA の所在地は、それぞれ、scope の外/内, 内/外であり、scope のみによる限定は難しい。そこで、MH を考慮して、scope に対して、新たに、

- HA からのトンネルを介した転送を許可するか否かを示す属性(転送可否属性(TA: Transferable Attribution))
- メンバーを scope 内に HA を持つ MH のみに限定するか否かを示す属性(メンバー限定属性(MA: Membership Limitation Attribution))



の2属性を付加することを提案する。これらの属性を scope に付加することで、表 3-1 に示すように MH を考慮してメンバーを限定できる。originator は、構成するグループに適したメンバーに応じて、scope とこれらの属性を設定し、SAP メッセージで報知する。

**表 3-1 追加属性による参加メンバー制御ポリシー**

		転送可否属性(TA)	
		転送可	転送不可
メンバー限定属性 (MA)	限定有	MH の移動先に関わらず scope 内に HA を持つ MH	HA が scope 内に存在し、scope 内に移動している MH
	限定無	移動先に関わらず scope 内に HA を持つ MH と HA の位置に関わらず scope 内に存在する MH	HA の位置に関わらず、scope 内に移動している MH

表 3-1 に示した属性を適用することで、MH を考慮したメンバー限定が可能になり、次のようにカテゴリ化されるマルチキャストサービスを提供できる。現状の IP Multicast によるメンバー制限は、TA=転送不可/MA=限定無に相当する。

- TA=転送可/MA=限定有:  
会議日程調整等の所在地を問わない、scope 内のネットワークをホームネットワークとするホストとの通信
- TA=転送可/MA=限定無:  
ネットワーク障害等の scope 内のネットワークをホームネットワークとするホストとそのネットワークに接続しているホストへの通知
- TA=転送不可/MA=限定有:  
会議等の scope 内のネットワークをホームネットワークとするホストとの閉じた通信
- TA=転送不可/MA=限定無:  
遊園地の迷子情報等のローカルな不特定多数への通信

### 3.3.2.2. Agent-移動ホスト間の制御手順

帯域の有効利用のためには、MH は転送に頼らず、できる限り直接法でマルチキャストグループに参加することが好ましい。一つの実現方策として、MH が参加できるグループの scope 内に存在する場合には直接法、scope 外に存在する場合にはトンネル法で参加する方策がある。この方策を図 3-21 のMHに適用し、各MHのメンバー限定形態のグループへの参加法を表 3-2 にまとめる。表において、一は、参加が認められないグループ形態を示す。

表 3-2 MH の各グループ形態への参加方法

	(TA,MA) (可,有)	(TA,MA) (不可,有)	(TA,MA) (可,無)	(TA,MA) (不可,無)
MH-A1	直接	直接	直接	直接
MH-A2	トンネル	—	トンネル	—
MH-B1	—	—	直接	直接
MH-B2	—	—	—	—

表 3-2 の参加法を実現は、SAP メッセージ内の TA, MA に基づいて行うため、MH がマルチキャストグループの SAP メッセージを直接受信できるか否かで制御方法が異なる。MH が SAP メッセージを受信できない場合は、トンネル法での参加のみが可能であり、少なくとも、MH の HA が SAP メッセージを受信できる必要がある。この場合には、HA が主体となる制御が必要である。一方、MH が SAP メッセージを直接受信できても、その HA が受信できるとは限らない。この場合には、MH が主体となる制御が必要である。以下、HA, MH 主体の制御手順を示す。

### 3.3.2.3. ホームエージェント主体の制御手順

HA は、scope 内に MH の HN を含む全マルチキャストグループの SAP メッセージを直接受信できるが、scope 外の MH は受信できない。scope 外の MH の参加が望まれるグループは、MA とは無関係に、TA=転送可の属性を持つ。そこで、HA は、mobile IP の手順で登録されている MH から scope 外に移動している MH を選択して、選択した MH を TA=転送可のグループにトンネル法で参加させる制御を起動する。MH が scope 内/外に移動しているかは、MH がそのグループの SAP メッセージを直接受信する/しないかで区別できる。この制御を行うための HA の動作フローを図 3-22 に示す。

HA は、SAP メッセージを受信すると、まず、そのマルチキャストグループの TA が転送可であるか否かを検出する。転送可であれば、登録されている MH に対して、そのグループの SAP メッセージを受信しているか否かを問合わせる。問合わせの際には、グループを識別するために、そのグループの S-ID を用いる。この問合わせの結果、同一 S-ID の SAP メッセージを受信していない MH のみに対してトンネルを構成してトンネル法で参加させる。他の MH は scope 内に存在するので、トンネルを構成しない。

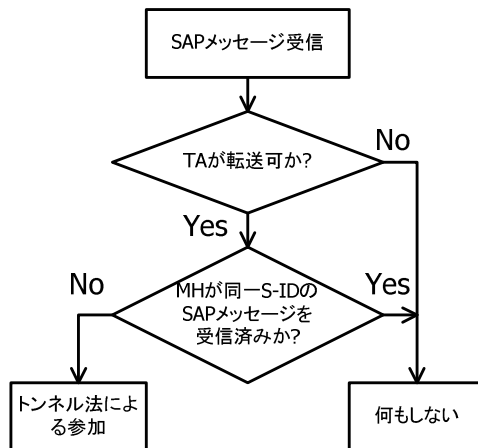


図 3-22 HA の動作フロー

この制御のシーケンスを図 3-23 に示す. HA から MH に対する問い合わせメッセージ(図中, Query) には, 問い合わせるグループの S-ID が含まれる. このシーケンスにより, HA は, scope 外に存在する MH-2 との間にトンネルを構成し, TA=転送可のグループに参加させることができる.

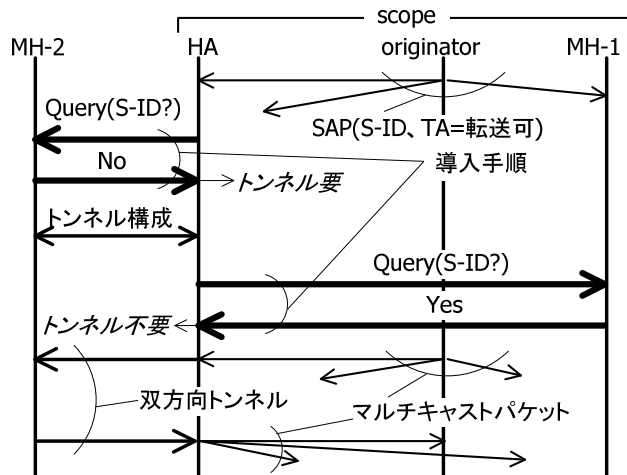


図 3-23 HA によるトンネルの構成手順

#### 3.3.2.4. 移動ホスト主体の制御手順

この制御は, マルチキャストグループの scope 内の MH が直接受信した SAP メッセージに基づき, そのグループに直接法での参加可否を判断することが目的である. MH は直接法を用いることができるので, TA に依存せず MA のみを考慮すればよい. MA=限定無のグループには, その SAP メッセージを受信できる全 MH が参加できる. これに対し, MA=限定有のグループの場合, MH はその SAP メッセージを受信しても, 参加できるとは限らない.

この制御は, MH, HA 共に SAP メッセージを受信していれば両者はそのグループの scope 内に存在し, MH のみが SAP メッセージを受信していれば HA は scope 外に存在するので, MH と HA が共に同一グループの SAP メッセージを直接受信しているか否かを検出することで実現できる.

以上の制御は、図 3-24 に示すフローの動作を MH に適用することで実現できる。MH は、SAP メッセージを受信すると、MA を検出する。MA=限定無であれば、そのグループに直接法で参加する。一方、MA=限定有であれば、MH は、その HA に対して、同一グループの SAP メッセージを受信しているか否かを問合わせる。その結果、HA が同一グループの SAP メッセージを受信していれば MH は直接法で参加し、していなければ MH はグループへの参加を辞退する。

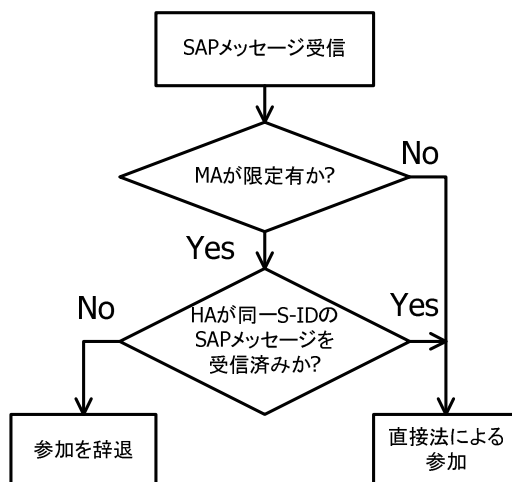


図 3-24 MH の動作フロー

この制御シーケンスを図 3-25 に示す。MH から HA に対する問い合わせメッセージ(図中、Query)には、問合わせるマルチキャストグループを識別するための S-ID が含まれる。MA=限定有のグループには、MH-A はその HA である HA-A が scope 内に存在するので直接法で参加し、MH-B はその HA である HA-B が scope 外に存在するので参加を辞退する。

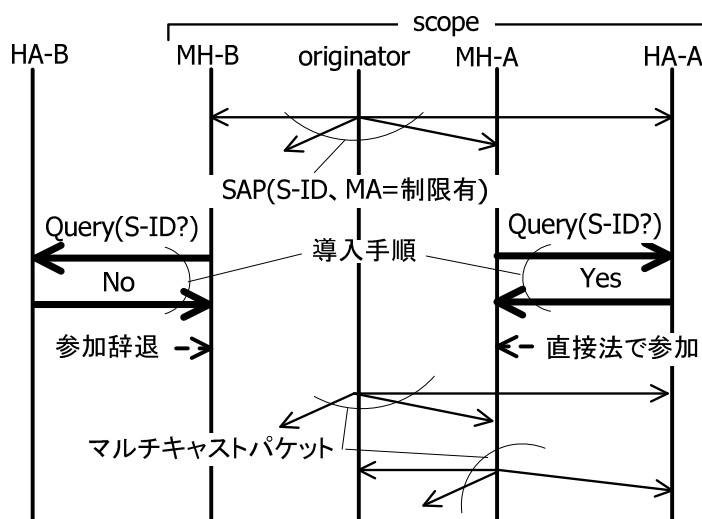


図 3-25 MH 主体の制御シーケンス

### 3.3.3. IP Multicast の移動拡張による効果

以上, Internet 上で MH をサポートできるマルチキャスト通信を目指し, 移動を考慮したメンバー限定, 帯域の有効利用を実現する制御方式を示した. まず, IP Multicast と mobile IP を分析し, 1) マルチキャスト通信の長所である帯域有効利用を十分に生かせない, 2) ホスト移動によりグループのメンバーを限定できないという課題があることを示した.

この課題を解決する方策として, まず, 移動を考慮したグループにとって望ましいメンバーを明確にするために, IP Multicast の scope に,

- 1) マルチキャストデータグラムの転送が可能か否か
- 2) メンバーを scope 内に HA を持つ MH に限定するか否か

を示す属性を付加して拡張することを提案した. この拡張により, ホスト移動を考慮した新しいマルチキャストサービスの可能性を示唆した. さらに, scope と MH, その HA の包含関係を認識するために, MH とその HA 間でマルチキャストグループの SAP メッセージの受信を問い合わせる手順を導入した. 導入した scope の属性と手順の結果に応じて, mobile IP で定義される2つのマルチキャストデータグラム送受信方法を適切に使い分けることで, 帯域有効利用を考慮して MH をサポートできるマルチキャスト通信を実現できることを示した.

## 3.4. 結言

本章では, ユニキャスト通信, マルチキャスト通信の双方に関し, 現状, 主流である IPv4 で MH を収容する方式を提案した.

ユニキャスト通信に関し, ホスト移動を考慮していない既存の IPv4 機器との互換性を維持しつつ, 移動管理トラヒックの抑圧と通信経路の効率化を両立することを可能とする新しい MH 収容方式 ( $IP^2$  方式)を提案した.  $IP^2$  方式のポイントは, IP データグラムを終端せずに IP ヘッダチェックサム処理の拡張でカプセル化/非カプセル化データグラムの識別を行う確率的な識別手法を適用したカプセル化方式の適用にある. これにより, 移動対応ホスト, 中継ルータでもモビリティバインディングを管理することを可能とした. さらに, 3 種類のモビリティバインディング管理機能と 2 種類の管理手法を定義し, 提案したカプセル化方式と併せて, 管理機能と管理手法を適切に使い分けることで, 移動管理トラヒックの抑圧と通信経路の効率化の両立を実現することを明らかにし, その効果を定量的に示した.

マルチキャスト通信に関し, まず, IP Multicast と mobile IP を分析し, これらを組合わせて MH を収容しても, 1) マルチキャスト通信の長所である帯域有効利用を十分に生かせない, 2) ホスト移動によりグループのメンバーを限定できない, という課題があることを示した. この課題を解決する方策として, 移動を考慮したグループにとって望ましいメンバーを明確にするために, IP Multicast の scope に, 1) マルチキャストデータグラムの転送が可能か否か, 2) メンバーを scope 内にホームエー

エージェントを持つMHに限定するか否か、を示す属性を付加し、固定ホストのみを考慮していた scope の概念をホスト移動に対応できるように拡張することを提案した。この拡張により、ホスト移動を考慮した新しいマルチキャストサービスカテゴリの可能性を示唆した。さらに、IP Multicast が定義する scope と MH、そのホームエージェントの包含関係と scope の属性に応じて、mobile IP で定義される 2 つのマルチキャストデータグラム送受信方法を適切に使い分けることで、帯域有効利用を考慮して MH をサポートできるマルチキャスト通信を実現できることを示した。

本章で示した IP の MH 収容技術は、上位層に対するホストの物理的移動の仮想化のみならず、携帯電話と無線 LAN のように異なるネットワーク間の接続切替も実現できる。この接続切替は、上位層に対してアクセス網を仮想化するものであり、IP のオープン化に大きく寄与する。



## 第4章 移動通信サービス活用の技術と方策

### 4.1. 緒言

本章では、移動通信システムの需要喚起に向けて、オープン化されたインタフェースを活用し、エンドユーザにとって質的变化をもたらす新サービス創出のための技術ならびに方策のあり方について述べる。多種多様なサービスが存在しうる中、「質的变化をもたらすサービス」の必要条件として、“既存の通信事業者では実現困難なサービス”という視点に基づいて検討する。

新サービス創出技術に関し、異種・複数の通信事業者が提供するサービスを束ねることで、単独通信事業者では実現困難な広域・広帯域アクセスリンクを創出する方式を提案する。このリンクを列車内 Internet アクセスへの適用することを想定し、列車内での実験を通して有用性を示す[35][36]。

新サービス創出の方策のあり方に関し、個別最適化が求められる法人企業向け内線電話に、通信事業者が提供する移動通信サービスを適用するために必要な運用ならびに接続ルールのあり方を検討する。フェムトセル基地局の利用者設備化、無線リソース管理業務の部分委託、音声通話に関する帯域幅課金、みなし MVNO の導入により、通信事業者サービスの法人向け内線電話適用の可能性が高まることを示す[37]。

### 4.2. ヘテロジニアスな無線回線バンドリングサービス

Internet の普及、ADSL の低価格化に伴い、オフィスや家庭でのブロードバンド Internet アクセスが一般化している。また、ノート PC は、無線 LAN デバイスを内蔵しているものが多く、PC さえあれば、無線 LAN への接続が可能である。この流れの中、外出先でのブロードバンドアクセス提供に向けて、公衆無線 LAN スポットが広がっている。図 4-1 に、2002 年にガートナー社が先進的な IT ユーザを対象に行った無線 LAN スポットが欲しい場所に関するアンケート結果[70]を示す。



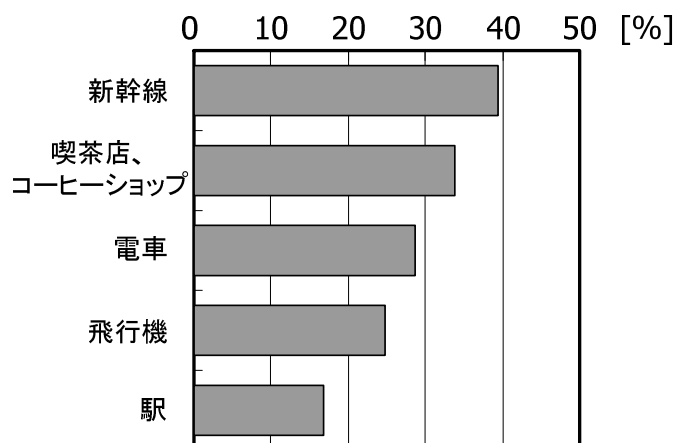


図 4-1 無線 LAN スポットが欲しい場所

現在、無線 LAN スポットは、駅や空港、ホテル、喫茶店などに広く展開しているが、これらに加え、新幹線、電車、飛行機等の乗物内の無線 LAN スポットが期待されている。ユーザは、移動時間を乗物という空間に束縛され、移動に伴う時間と空間の有効活用を期待するためと推定される。

乗物内無線 LAN スポットの難しさは、乗物と外部網を接続するアクセス手段の確保にある。周囲が自由空間である飛行機内の無線 LAN スポット化は、ボーイング社が提供する Connection by Boeing のように衛星を使って実用化されつつある。しかし、地上は、周囲の建物、トンネルなど電波伝搬環境が複雑であり、飛行機と同様に扱うことはできない。本節では、各種の列車向け無線 LAN スポットサービス概要を 4.2.1.1 にて比較し、逆多重という構成法を用いた異種複数無線ネットワークを統合する BBRide<sup>®6</sup>を提案する。

#### 4.2.1. 公共交通機関向け Internet アクセスサービス・BBRide<sup>®</sup>

図 4-2 に、BBRide<sup>®</sup>のコンセプトの概要を示す。BBRide<sup>®</sup>は、車両内に設置されたモバイルルータ(MR: Mobile Router)、地上局に設置されたホームエージェント (HA)、MR に接続される車両内無線 LAN アクセスポイントで構成される。MR と HA を結ぶアクセス回線として、既存の無線回線を束ねた 1 本の論理リンクを構成し、これを活用する。既存の回線としては、第 2 世代移動通信網、IMT-2000 網、PHS (Personal Handy-phone System)網、無線 LAN などを活用することができる。無線 LAN を活用する際には、高速ハンドオーバー[71]を導入し、高速移動にも対応できる。乗客は、車両内無線 LAN アクセスポイント (AP: Access Point)に接続し、MR-HA 間の論理リンクを介して Internet にアクセスする。これは、ユーザから見ると、通常無線 LAN スポットと同様の構成であり、無線 LAN 内蔵 PC さえあれば、Internet アクセスが可能となる。

<sup>6</sup> BBRide は日本電気株式会社の登録商標である。

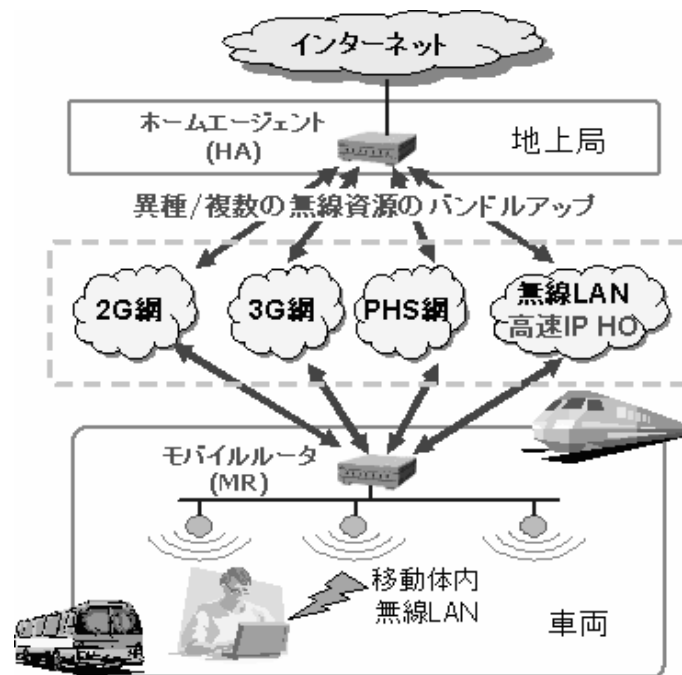


図 4-2 BBRide<sup>®</sup>による車両-地上間接続の概要

BBRide<sup>®</sup>の特徴は、車両-地上間を結ぶアクセス回線にある。このアクセス手段に対する要件は、次の3点である。

- 1) ADSL 等のブロードバンド環境に慣れているユーザが満足できる程度の広帯域性
- 2) 高速で広域に移動する列車乗車中であっても継続して接続できる広域性
- 3) ビジネスとして成立可能な低コスト(経済性)

#### 4.2.1.1. 車両-地上間のアクセス手段の比較

現在検討が進められている方式も含め、車両内のユーザトラフィックを地上局との間で転送するアクセス手段として、1)個人携帯、2)漏洩同軸ケーブル(LCX: Leaky Coaxial Cable), 3)沿線無線LAN、4)衛星通信、5)BBRide<sup>®</sup>がある。以下、これらの特徴を示す。

##### 1) 個人携帯:

- 接続形態:乗客個人の携帯電話で地上局と接続
- 広帯域性:IMT-2000 の場合、数百 kbps 程度
- 広域性:移動通信事業者のエリア設計に依存
- 経済性:新インフラ不要だが、ケーブル購入などのユーザ負担が生じる

##### 2) LCX[72][73]:

- 接続形態:沿線に敷設されたケーブルから漏洩する電波を介して、車両と地上局を接続
- 広帯域性:技術的には数 Mbps 程度の伝送が可能。既設のものは数百 kbps 程

度のものが多い

- 広域性:ケーブルが敷設されれば広域展開可能
- 経済性:広帯域ケーブルを用いたインフラが必要

3) 沿線無線 LAN[74][75]:

- 接続形態:沿線に敷設した無線 LAN AP を介して, 車両と地上局を接続
- 広帯域性:最大 54 Mbps が使える可能性がある
- 広域性:AP 当たりのエリアは 100 m 程度である. また, 干渉の影響を考慮した広域設計は難しい
- 経済性:全線に渡って AP 及び AP までの回線敷設が必要であり, インフラコストが大きい

4) 衛星通信:

- 接続形態:衛星を介して車両と地上局を接続
- 広帯域性:30 Mbps 程度までの伝送容量が得られる可能性がある
- 広域性:トンネルや山岳地帯での利用が難しい
- 経済性:車両の移動に伴い, 衛星をトラッキングする必要があり, 車両設備のコストがかさむ

5) 逆多重方式(BBRide<sup>®</sup>):

- 接続形態:セルラー, 無線 LAN 等, 既存の無線資源を束ね, 車両と地上局を接続
- 広帯域性:複数の回線を束ねることで, 数 Mbps 以上の伝送速度が得られる
- 広域性:異なる移動通信事業者の回線のように異種回線を束ねることで, 不感地帯を抑圧できる
- 経済性:既存無線資源を活用するため新規インフラ不要. ユーザは PC にバンドルされた無線 LAN のみで利用可能

以上のように, BBRide<sup>®</sup>は, 広帯域性, 広域性, 経済性に優れた方式である. 経済性に関しては, 新規インフラの要否を軸として考えると, これらの特徴は表 4-1 のようにまとめられる.

表 4-1 車両-地上局間のアクセス手段の特徴

	広帯域性	広域性	経済性(新規インフラ要/不要)	
個人携帯	×	△	○	新規インフラ不要
LCX	○	△	×	新規インフラ要
沿線 WLAN	○	×	×	新規インフラ要
衛星通信	○	×	○	新規インフラ不要
逆多重方式(BBRide <sup>®</sup> )	○	○	○	新規インフラ不要

#### 4.2.1.2. BBRide<sup>®</sup>のビジネス的側面

BBRide<sup>®</sup>は、鉄道会社と周波数利用ライセンスを保有する移動通信事業者の双方にとってのビジネスを新たに創出する可能性を持つ。

- 鉄道会社にとってのメリット

BBRide<sup>®</sup>は、主として、常時 PC を活用するビジネスユーザが利用する。現在、通勤客へのサービス向上に向け、指定券や整理券で座席を確保する優等列車が人気を博している。また、大都市圏を結ぶ高速列車の利用者の多くはビジネス利用であり、このような乗客に対して、インターネットアクセスを付加サービスとして提供することで、鉄道会社の付帯事業の増収が期待できる。

- 移動通信事業者にとってのメリット

コンシューマ市場の飽和、ARPU (Average Revenue per User)減少のため[77]、コンシューマ事業での増収は難しい。また、番号ポータビリティ導入により、移動通信事業者変更の敷居が下がるため、移動通信事業者間の契約者囲い込み競争の激化が予想される。このような中で、コンシューマに加え、大口法人に対する回線卸ビジネスが一つの有力な施策となりうる。このような状況の中、多くの乗客を抱える鉄道会社を対象とする BBRide<sup>®</sup>運用者は、移動通信事業者にとっての大口法人ユーザとなりえる。

#### 4.2.2. BBRide<sup>®</sup>アーキテクチャ

図 4-3 に、BBRide<sup>®</sup>のシステム構成を示す。地上局に設置された HA は、異種・複数の無線回線を束ねたアクセス回線を介して、運行中列車のそれぞれに配される MR と接続され、同時に複数編成の列車と通信する。

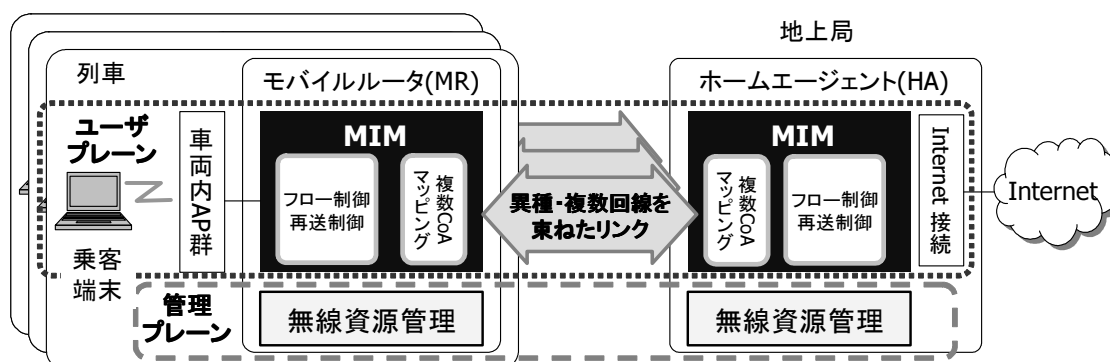


図 4-3 BBRide<sup>®</sup>アーキテクチャ

このような通信を効率的に実現するために、BBRide<sup>®</sup>は、1)ユーザトラフィックを伝送するユーザープレーン、2)システム全体の無線資源を管理する管理プレーンの2つのプレーンで構成される。

#### 4.2.2.1. ユーザプレーン

ユーザプレーンの目的は、HA と MR 間を結ぶ異種・複数の無線回線を束ね、束ねた回線を効率的に活用することにある。このために、HA と MR 間に、MIM (Mobile Inverse MUX)を導入する。ユーザプレーンのレイヤ構成を図 4-4 に示す。MIM は、MR-HA 間のプロトコルとして定義され、車内のユーザ端末やインターネット上のサーバにはトランスペアレントである。また、ユーザ端末の IP からみると、MR-HA 間の 1 ホップのリンクを制御するリンク層プロトコルとなる。また、無線回線の変動に起因する TCP スループット劣化抑圧のために、MR-HA 間で TCP を分断する TCP スプリット[76]の導入も可能である。

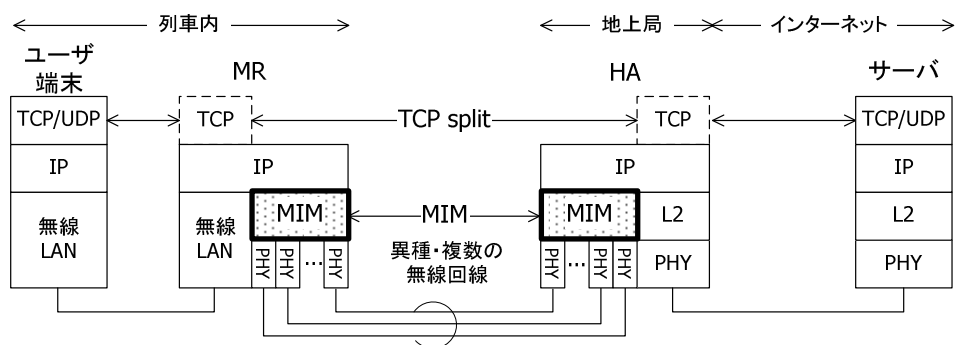


図 4-4 ユーザプレーンのレイヤ構成

図 4-5 に、HA, MR に導入する MIM の基本機能をレイヤ構成とともに示す。MIM は、次の 2 つの機能で構成される。

- (1) IP を用いて、異種・複数の無線回線を汎用的に束ねる複数 CoA マッピング機能
- (2) 高速移動に伴ってリンク品質が独立かつ高速に変動する異種・複数の無線回線を高効率に束ねて伝送する高効率伝送機能

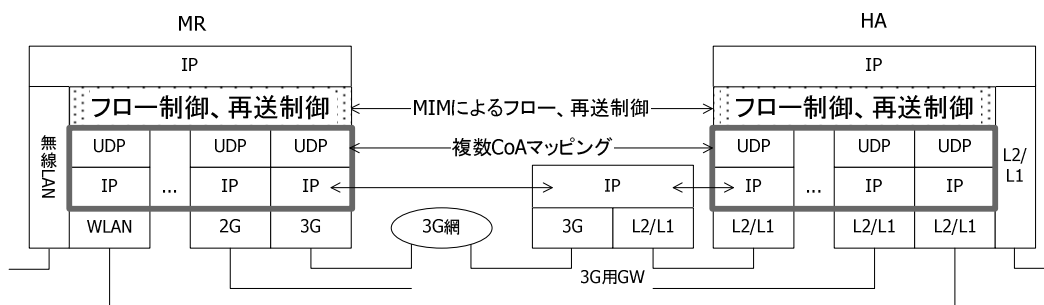


図 4-5 MIM の基本機能とレイヤ構成

MIM は、BBRide<sup>®</sup>を支えるコア技術であり、次節でこれらの機能を詳細に示す。

#### 4.2.2.2. 管理プレーン

BBRide<sup>®</sup>では、専用無線資源を用いずに、既存の無線資源を活用するため、サービスエリア全域の無線資源は要望通りに利用できるとは限らない。また、基地局設置位置は、必ずしも BBRide<sup>®</sup> に最適化されたものではなく、無線資源供給に地域偏在性がある。さらに、無線資源利用料金も必要である。管理プレーンは、これらの点を考慮し、同時に在線する列車に対し、適切な無線資源を割当てる。

資源割当ての最適化基準は、資源利用料金最小化、通信容量最大化など、BBRide<sup>®</sup>の運用ポリシーによって定められる。このポリシーを満たすために、

- 列車在線位置で利用できる各無線資源量
- 列車で必要とする通信容量
- 各無線資源利用料金

に基づいて、無線資源の最適割当を行う。

#### 4.2.3. モバイル逆多重(MIM: Mobile Inverse MUX)方式

逆多重方式は、64 kbps の ISDN 回線を 2 本束ねて 128 kbps の 1 本の回線として扱う技術[78]として知られている。しかし、この方式は、品質の安定した有線回線を前提としており、通信品質が時変となる無線回線への適用は困難である。本節では、多様な無線アクセス回線を束ねられるように、汎用的な IP 接続が提供される無線システムに適用できる構成を検討対象とし、通信品質が不安定な無線回線に適用できる逆多重方式として、MIM 方式の構成と制御手順の詳細ならびにその特性をコンピュータシミュレーションにより明らかにする。

##### 4.2.3.1. 複数 CoA マッピング

この機能は、第 3 章に示した IP の移動対応技術を応用して異種・複数の無線資源を仮想化し、汎用的に束ねる機能である。この機能により、BBRide<sup>®</sup>は、IP パケットを伝送できる無線システムであれば全て束ねることが可能であるという特徴を有する。

無線システムは、IP パケット伝送のために、接続ノードに IP アドレスを割当てる。MR は、接続する異種・複数の無線システムから得た IP アドレス群を各無線システムに対する CoA とし、HA に登録する。下り伝送では、HA が 1 つの MR から登録される複数 CoA を宛先とした IP パケットを並列送信することで、異種・複数の無線資源を束ねる。図 4-6 に、このパケットフォーマットを示す。



図 4-6 BBRide<sup>®</sup>のパケットフォーマット

図のように、ユーザの IP パケットに 4.2.3.2 に示す高効率伝送機能を実現するヘッダ(MIM ヘッダ)を付加し、UDP/IP ヘッダでカプセル化する。上り方向は、IP カプセル化ヘッダのソースアドレスを各 CoA とし、無線回線群を束ねて伝送する。

#### 4.2.3.2. 高効率伝送機能

それぞれの無線回線は、パケットロス率や遅延が異なり、単純に束ねても効率的な伝送を行うことができない。効率的な伝送のために、フロー制御と再送制御を導入する。

##### 4.2.3.2.1. フロー制御[79][80]

フロー制御の目的は、品質が異なる無線回線群を束ねて、利用できる全帯域を使い切ることにある。このために、

- (1) プローブ: 動的に変動する回線品質のモニタ
- (2) スケジューラ: 回線品質に基づく最適な帯域利用

の 2 機能を導入する。フロー制御方式概要を図 4-7 に示す。

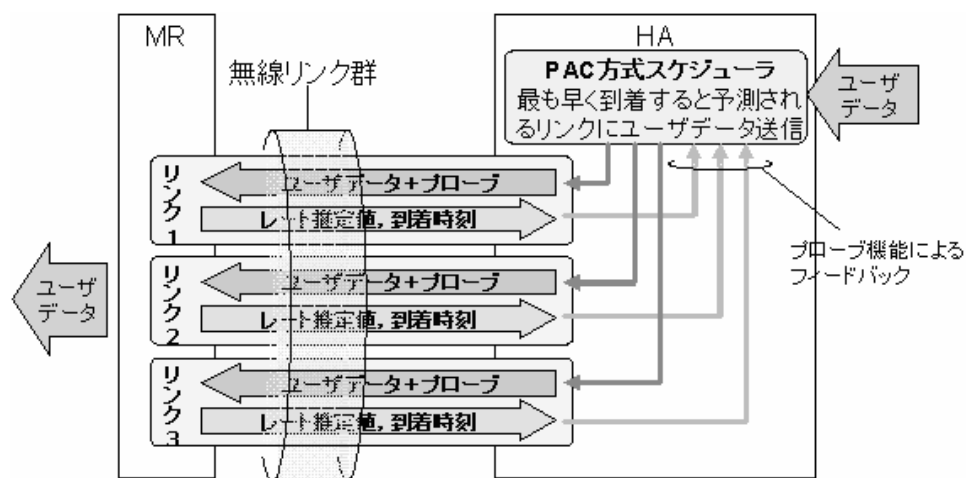


図 4-7 フロー制御方式概要

HA は、各回線品質のモニタのために、ユーザデータにオーバレイさせたプローブ信号を周期的に送信する。プローブ信号を受信した MR は、各回線の受信速度を推定するとともに、到着時刻を HA に応答する。各無線回線品質は、この閉ループでモニタされる。スケジューラには、PAC (Predict And Correct)方式[79][80]を適用する。この方式は、モニタされた最新の回線品質を用いて、それぞれの回線で送信済みのパケット到着時刻を再推定し、現在送信するパケットの伝送時間が最短になるリンクを選択して送信する。

#### 4.2.3.2.2. 再送制御[79][81]

再送制御の目的は、無線回線で生じたパケット損失を迅速に検出し、適切な無線リンクで再送することで、再送遅延を最小にすることにある。このために、

- (1) 順序制御と再送制御の分離
- (2) 単一または複数の回線から構成される再送単位

を特徴とする再送制御を導入する。

図 4-8 に、再送制御方式の概要を示す。BBRide<sup>®</sup>では、同時に複数ユーザのセッションを扱うが、順序制御はユーザセッション単位とし、再送制御と分離する。これにより、パケット損失検出をユーザセッション毎の順序制御を行う前に全セッションに対して統一的に実施することで、迅速な再送制御の起動を図る。また、再送単位として、単一回線あるいは遅延差が少ない回線群を選ぶことで、再送パケット間での順序入換等のオーバーヘッドを抑圧し、効率的な再送を提供するものである。図では、3本の回線群を再送単位として、2本のユーザセッションを伝送する場合を一例として示す。

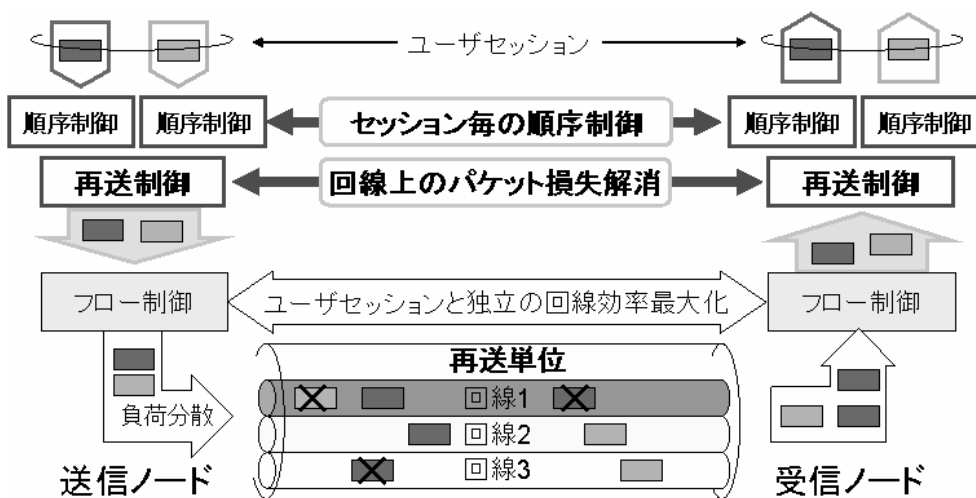


図 4-8 再送制御方式概要

図 4-9 に、提案する再送制御の3本のユーザセッションに対する動作概要を示す。3本のセッションキューにキューイングされるユーザセッションのパケットは、再送単位毎の再送キューに入力される。再送キューのパケットには、ユーザセッションとは独立に、再送番号と呼ぶシーケンス番号を付加し、順次、送信する。再送番号が付加されたパケットを受信すると、再送番号に基づいて、ユーザセッションとは独立にパケット損失を検出する。また、ユーザセッション毎の順序制御はセッション毎のキューで行い、パケット損失が無いユーザセッションのパケットは、順次転送される。



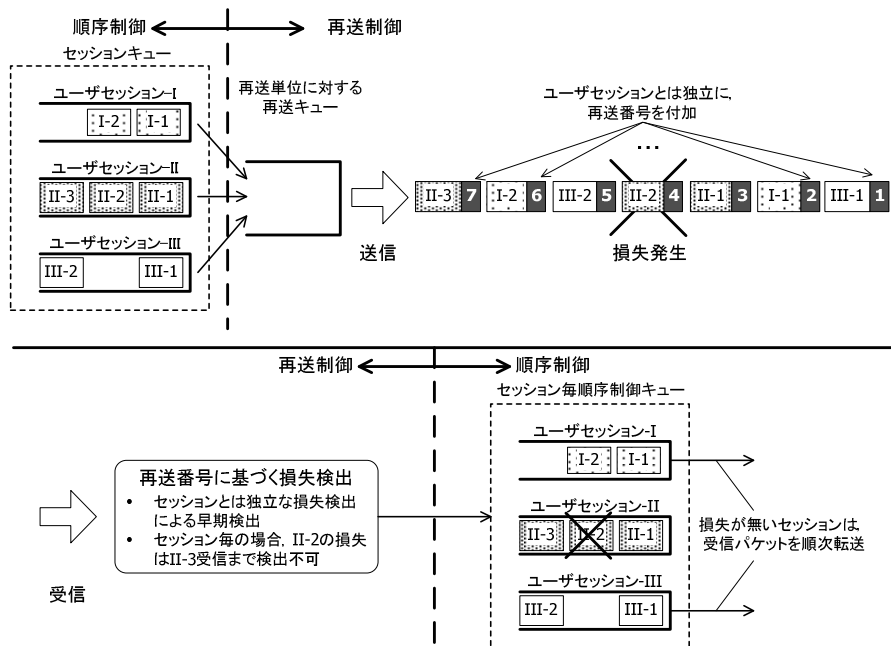


図 4-9 再送制御の動作概要

以上の動作で、再送番号=4 のパケットが損失すると、受信側では、再送番号=3, 5 の順番でパケットを受信するため、再送番号=5 の受信時に損失を検出できる。これは、順序制御と再送制御を分離したことにより得られるメリットである。これらの制御が分離されないと、再送番号=4 の損失は、同一セッションの次パケット、すなわち、図中、再送番号=7 の受信まで検出できない。また、再送要求、再送パケットは、4.2.3.2.1 のフロー制御により、再送単位を構成する回線群の中から、適切な回線を用いて伝送される。

#### 4.2.4. モバイル逆多重方式の性能評価

コンピュータシミュレーションにより、MIM のスループット特性を評価する。無線回線モデルとして、"Bad"と"Good"の 2 状態をランダムに遷移するモデルを用いる。Bad/Good 状態の平均滞在確率を 50%とし、平均状態遷移周期を変化させることで、無線回線変動を模擬する。各状態に対して、各回線の伝送特性を模擬するパラメータを設定し、W-CDMA, cdma2000 回線をそれぞれ 2 本、合計 4 本の回線を束ねる。また、既存方式との比較のために、TCP Vegas[82]で定められる制御を用い、スループット最大化(Win1)と遅延最小化(Win2)の 2 つの設定の場合について評価する。

評価結果を図 4-10 に示す。図において、実線は、MIM, Win1, Win2 の総スループット、破線は、遅延が 1 秒以内となるスループットである。総スループットでは Win1 が最大だが、実用的な遅延時間 1 秒以内を条件として課すと、MIM は、Win1, Win2 の性能よりも 50 %程度の大きなスループット向上を可能とする。これは、ネットワークの輻輳回避を主目的とした TCP のフロー制御に対し、PAC を軸とした MIM のフロー制御が、伝送特性の時間変動が激しい無線回線に対応してパケットを適切な回線に送信していることに起因する。データ通信が主たる利用形態である Internet アクセ

スでは、エンド-エンドの通信には TCP を用いる場合が多い。TCP のエンド-エンドスループットの最大値は、エンドシステムの受信ウィンドサイズとエンド-エンドの RTT (Round Trip Time) の比で与えられるため、遅延時間を抑圧する MIM による逆多重により、エンド-エンドのスループット向上が期待できる。

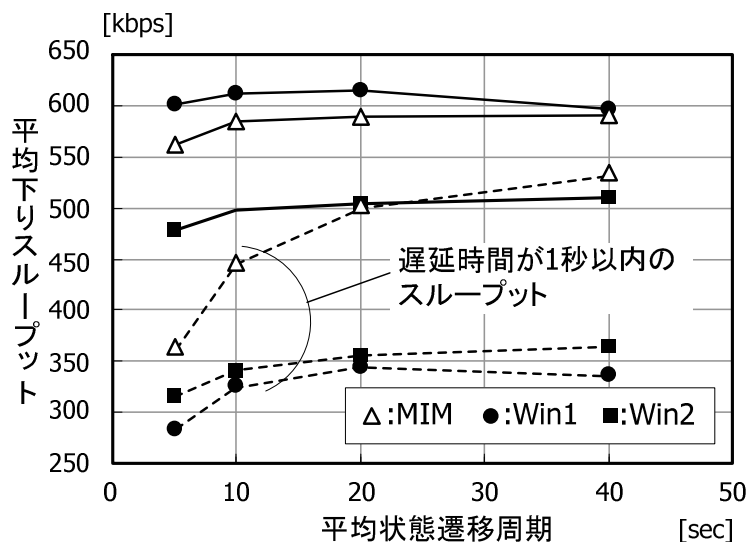


図 4-10 シミュレーション結果

また、図 4-11 に首都圏の約 60 km に渡る特急列車内で、IMT-2000 システムの回線を 1 回線用いた場合と MIM で異種事業者の複数 IMT-2000 システムの回線を束ねた場合のスループット測定結果を示す。干渉状況や受信状態によって、複数伝送速度モードを動的に割当ててる制御オーバーヘッド、高速移動に伴う伝送品質の劣化により、スループット変動は生じるが、MIM によって 1.5 Mbps 以上のスループットが得られることがわかる。

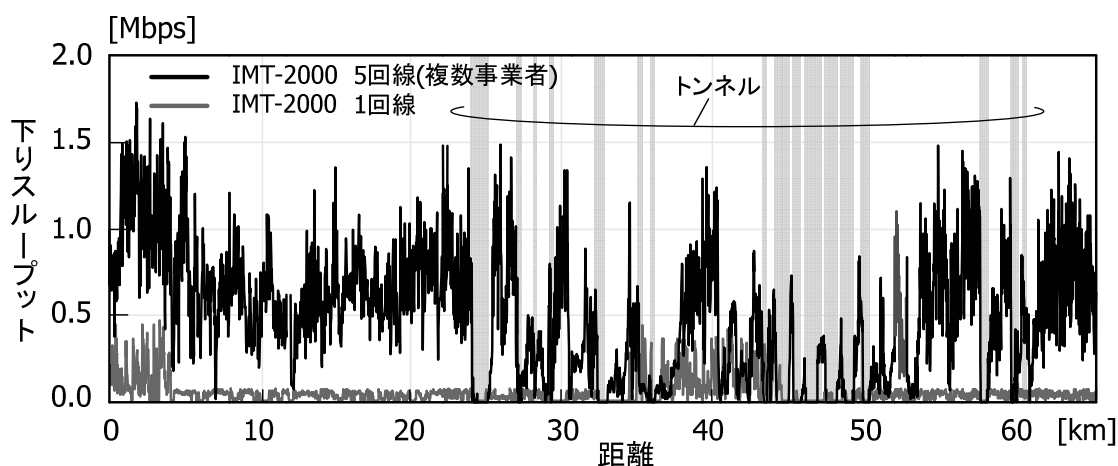


図 4-11 MIM の実フィールド評価結果

MIM によって提供されるアクセスリンクは、公衆無線回線を束ねて構成されるものである。図 4-11

に示すように、全線に渡る広帯域化を実現するが、一般利用者の利用状況等によって、そのスループット特性も変動し、常に同様のスループットを保証することは困難である。このため、このアクセスリンクを用いたサービスは、スループットに関してはベストエフォート型のサービスとして提供する必要がある。このサービスは、エンドユーザに対して、広帯域のスループットに加えて、全線に渡ってアプリケーションが切断されないということもメリットの一つとして提供できる。このメリットを確実に提供するためには、MR が TCP を仮想終端し、エンドユーザ端末との間で TCP keep-alive を行う等、サービス提供に向けた工夫も必要になると考える。

本節では、列車内ユーザに対するインターネットアクセスサービスを提供する BBRide<sup>®</sup>を提案した。具体的な技術としては、逆多重方式(MIM)ならびにスケジューリング方式(PAC)等の新しい技術を導入している。BBRide<sup>®</sup>は、鉄道会社、通信事業者に対する新サービスビジネスをもたらすものである。また、実環境での評価を行い、異種事業者の複数 IMT-2000 回線を束ねることで 1.5 Mbps 以上のスループットが得られることを明らかにした。

### 4.3. 通信事業者サービス活用方策

国内の通信利用形態は、大きな変革期を迎え、ライフラインとしての電話に加え、インターネットに代表されるデータ通信のアクセスとして、無線通信系の重要性が高まってきている。音声系、データ系の状況[83][84]を図 4-12, 図 4-13 に示す。図 4-12 は、国内における固定電話, IP 電話, 携帯電話/PHS (図中, mobile phone)から発呼された総通話時間(棒グラフ)と総発呼回数(線グラフ)の変遷を示している。この図より、固定電話発の通話時間, 回数とも減少傾向が続き, 2007 年には, 通話時間, 発呼回数ともにモバイルからのものよりも小さくなっている。

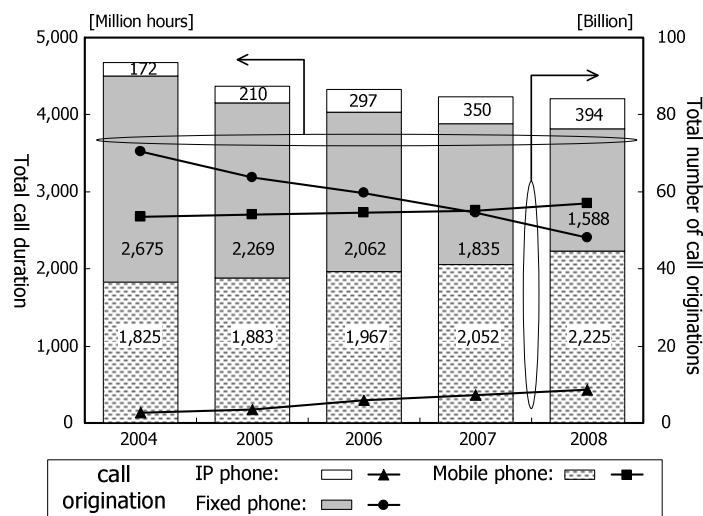


図 4-12 国内の電話トラフィック動向

また, 図 4-13 は, インターネットアクセスに利用する端末別のインターネットアクセス人口である。2000 年頃は, PC のみでアクセスする人口が最大であったが, PC と携帯を両方使ってアクセスする人口が増加し, 現時点では, 両端末の利用が一般化している。PC と携帯は, 画面の大きさ, 起動時間など, 異なる特質を持っており, 利用シーンに応じて端末を使い分けるという文化が浸透している[84]。

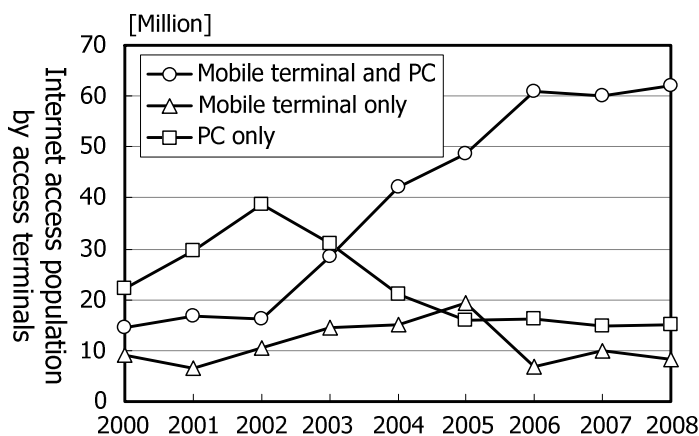


図 4-13 Internet アクセス人口のアクセス手段ごとの推移

無線通信へのニーズの高まりは、企業においても同様であり、業務を支える電話/データ通信に無線通信を適用し、従業員の通信機能の高度化、業務効率化などが図られてきている。

このような無線通信活用の進展に伴い、図 1-2 に見られるように、国内の携帯電話加入者数は飽和し、その増加率はきわめて低く[3]、無線通信市場の大きな部分を占める移動通信市場は成熟期を迎えている。フラットレートの導入が一般化する一方、スマートフォン利用者の増加による指数関数的なデータ通信量の増大によるインフラ整備要求が高まる中、移動通信事業者は、新たな収益源を確保することが急務となっている。これに向け、移動通信事業者は、従来のネットワークインフラ事業に加えて、i モードに代表されるポータル事業の拡充、端末に組込まれた IC チップを利用した電子マネー事業等の様々な打開策を打ち出している。

並行して、総務省は、政策ロードマップ「新競争促進プログラム 2010」[4]を策定した。これは、移動通信のみならず、NGN (Next Generation Network)に代表される有線網も含む広範なものである。移動通信に関しては、現状の移動通信事業者による端末からアプリケーションまでの垂直統合モデルを水平分業化し、新たなサービス提供者の参入を促進することで活性化を図ることをコンセプトとしている。このロードマップの実現に向けて、新規サービス提供者としてのMVNO参入促進[85]、フェムトセルによるアクセスの多様化[86][87][88]、ドミナント制度や接続ルールの見直し[4][89]、SIM (Subscriber Identity Module)ロック解除[90]など、様々な具体的な施策が検討されている。これらの検討結果に基づき、電波法や電気通信事業法の改正、現行法の適用範囲の明確化を図るガイドラインの発行等が進められている。

このように、移動通信市場の活性化に向けて、移動通信事業者自身のアプローチ、新規サービス提供者の参入促進アプローチが同時並行的に進められている中で、法人企業市場は両アプローチの接点に位置するものと考えられる。移動通信事業者からみると、スマートフォンを中心とした2台目需要や組込モジュール市場の拡大が期待されている[91]。また、コンシューマ応用が中心のマスを対象としたサービスでは実現しにくい法人企業毎のカスタマイズは、新規サービス提供者の付加価値となりえる。

本節では、法人市場に注目し、法人向け移動通信市場をより活性化していくために必要な政策提言を行う。まず、国内の法人企業における無線通信の活用状況を俯瞰し、無線通信システムに求められる要件を明らかにする。次に、国内の移動通信市場活性化に向けた政策パッケージと法人企業の要件を比較し、法人企業ユーザがより移動通信を利用しやすい環境となるための施策を提言する。

#### 4.3.1. 法人企業内無線通信インフラの要件

企業内においても、無線によってもたらされるユビキタス性を有効に活用する機運が高まり、無線通信の需要も増大している。例えば、昨今のエコロジー意識の広がりと共に、紙による資料配布から電子ファイル配布が一般化し、会議や打合せにノートPCを持ち寄る機会が増えている。また、内線電話に関して、会議室等への構内移動や外出時であっても、シングルナンバーでつながることにより、業務効率の格段の向上が期待されている。さらに、倉庫や店舗のようなオフィス以外の職

場においては、ハンディ業務端末に無線機能がバンドル化され、在庫検索や検品がリアルタイムで実行できるため、業務の効率化が可能となる。

このように、様々な企業内活動を支える通信インフラとして、無線通信システムへの期待は高まっている。企業内インフラに適用する際、通信品質はもとより、業務システムとの連携、レイアウト変更や異動によるトラフィック分布の変化への対応などの運用面、コスト面、技術の陳腐化リスクも、重要な検討項目となる。

#### 4.3.1.1. データ通信の現状

データ通信に関しては、数十 Mbps 以上のピークレートを提供する IEEE 802.11 無線 LAN が主要な技術として用いられている。無線 LAN は、1999 年に標準化された IEEE 802.11b から最新の IEEE 802.11n に至るまで、後方互換性を配慮して先端的な技術が盛り込まれたグローバル標準規格である。コストインパクトが大きい端末に関しては、国内においては、既にノート PC の 60%以上にバンドルされている[4]。また、倉庫や店舗等のフィールド業務用ハンディ端末への無線 LAN 搭載も進んでおり、オフィス、フィールド共に、先端技術の導入が容易である。さらに、グローバル標準規格であるため、規模による経済効果の恩恵を享受することもできる。

また、2.4 GHz 帯、5 GHz 帯のアンライセンズバンドを用いるため、利用者設備としてインフラの設置、運用が可能であり、企業の責任において柔軟な運用体制を構築することができる。一方で、他ユーザの無線 LAN からの干渉による通信性能劣化リスクは常に存在する。しかし、データ通信においては、若干のスループット劣化が生じるものの、CSMA-CA (Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance)等の Listen before talk に基づくエチケットルールの遵守が図られている限り、大きな影響は出にくい。

#### 4.3.1.2. 音声通信の現状

内線電話に代表される構内音声通信は、事業所 PHS が主要な技術であり、無線 LAN を使った VoIP も提案されている。事業所 PHS は、免許不要で利用できるため、無線 LAN と同様に柔軟な運用体制が構築できる。また、回線交換をベースとした技術であり、安定した音声品質が提供できる。

しかし、PHS は、1)実質的に国内独自システムであり端末購入価格など経済性に課題がある点、2)音声中心に検討された技術であり、高速データには物足りない点という課題が挙げられており[92]、陳腐化リスクが高い。一方、無線 LAN VoIP (Voice over IP)は新しい技術であり、期待は高いものの技術的な成熟度は低く、例えば、端末の電池もち時間など改善が必要である。さらに、上述のように他ユーザの無線 LAN からの干渉問題を内包している。干渉の影響は、データ通信と音声通信では根本的に異なり、リアルタイム性が求められる音声通信品質に対しては著しく品質を劣化させる。このため、無線 LAN VoIP では、一定の通信品質を維持することが極めて困難である。

#### 4.3.1.3. 企業内無線インフラの高度化へのアプローチ

以上のように、データ通信に関しては、無線LANが通信品質、運用、コストの全ての面で優れており、今後も主力システムとなる。一方、内線電話に関しては、現状では、望ましいシステムが存在せず、企業内インフラの大きな課題となっている。

このような状況の中、移動通信事業者による携帯電話を用いた内線電話サービスが発表されている[93][94][95]。法人企業からみたこのサービスのメリット、懸念点をまとめると、次のようになる。

- メリット
  - ◇ 構内/構外を問わずシングルナンバーリーチが実現でき、業務効率化に極めて有効である。
  - ◇ 端末に関し、国内の無線電話端末(携帯電話端末、PHS 端末、無線LAN IP 電話機能付端末(無線LAN 専用 IP 電話端末および携帯/無線LAN デュアル端末))の総出荷台数に対する事業所 PHS 端末、無線LAN IP 電話機能付端末の割合は、それぞれ、1.5%、0.2%程度で推移している[96]。このため、携帯電話端末は、PHS や無線LAN VoIP 端末と比較して、規模による経済効果が期待できる。さらに、先端技術の投入サイクルも短くなり、導入コスト、陳腐化リスクに対して有利である。
  - ◇ 公衆向けの電話サービスと同じ技術を用いていることから、公衆サービスと同程度の品質を享受できる。
- 懸念点
  - ◇ ライセンスバンド上の移動通信事業者のサービスであるため、事業所 PHS や無線LAN にはない月々のランニングコストが発生する。
  - ◇ マスに対するサービス提供を基本とした移動通信事業者が、個別法人企業に対する最適化、カスタマイズに柔軟に対応できない。

懸念点は、ランニングコストと個別最適化された運用に集約される。この 2 点は、「新競争促進プラン 2010」の検討範囲に含まれるものである。すなわち、ランニングコストに関しては、ドミナント制度や接続ルール見直しの範疇であり、個別最適化運用を新サービスとするMVNOの一形態として実現の可能性がある。

個別最適化運用に関して、多くの企業では、部門代表内線番号を持ち、固定/無線電話が共存することが一般的であり、固定系内線電話と一体化した無線内線電話の運用が求められる。具体的な例としては、

- 部門の新設や改変に伴う固定内線電話も含む内線番号計画への対応
- レイアウト変更や異動に伴うトラヒックや利用エリアの変動に対するカバレッジ保証[97]
- インフラ機器や端末のネットワーク機器増設や撤去、故障対応[97]

が挙げられる。このように、固定/無線双方の機器そのものからネットワークコンフィグレーションまで、幅広く個々の企業が求める運用要件に対応する必要がある。マスに対するサービスが中心の移動通信事業者では、各法人企業の個別要件を満たすことが困難であり、企業内の内線電話を構築するベンダー/SIer (System Integrater)が MVNO となり、固定/移動の内線電話サービスを提供する形態が一つの望ましいアプローチの一つであると考ええる。

#### 4.3.2. 企業内無線内線電話の高度化に向けた提言

ここでは、ベンダー/SIer が MVNO となって、企業内の無線内線電話サービスを運用するために必要となる追加施策を提言する。追加施策のポイントは、ランニングコストの低減と個別最適化運用に向けた制度改革にある。この追加施策により、MVNO が各企業に向けた個別最適化を図ることで、マスサービスの提供を中心とする移動通信事業者の欠点を補うことができ、その市場拡大が加速される。一方、企業ユーザは、低コストで安定した無線内線電話サービスを楽しむことができる。このための MVNO の形態としては、電波法第 5 章第 4 節に示される無線局の免許人等が他者に当該無線局の運用を行わせることを可能とする「無線局の運用の特例」制度を活用してサービスを提供する「みなし MVNO」[85]によるサービス提供が適している。

##### 4.3.2.1. 運用のあり方

法人企業の無線内線電話にとって最も重要なポイントは、構内の必要な場所であれば、どこでもつながるといふ点にある。携帯電話を内線電話として活用する場合、一般公衆用に用いられる屋外基地局の電波を利用することも可能であるが、地下階や高層階フロアなど、屋外基地局からの電波が弱いエリアが存在する。このようなエリアを補完するために、送信出力を無線 LAN と同程度に抑えて、狭いエリアのみをカバーできるフェムトセルの活用が期待できる[86]。フェムトセルは、「モバイルビジネス活性化プラン」において、モバイルアクセス網の多様化の推進の 1 アイテムとして定義され、フェムトセル基地局の取扱に向けた方針が示された[86]。この方針には、事業者設備としてのフェムトセル基地局、利用者設備としてのフェムトセル基地局の両方の形態について、制度整備及び法の適用の明確化を行うことが明記されている。企業で利用するという観点から見れば、基地局増設や撤去が比較的容易に行える利用者設備として、フェムトセル基地局を扱えることが望ましい。しかし、現時点では、事業者設備としてのフェムトセル基地局を前提として、電波法、電気通信事業者法適用のガイドライン[87]、携帯電話サービスを提供するための運用ガイドライン[88]が発行されているのみである。

一方、「みなし MVNO」は、従来、PHS 等の小電力の基地局等を前提としていたが、2008 年 1 月の第 169 回国会において、フェムトセル基地局への適用が議決されている[85][98][99]。大規模企業では、PBX (Private Branch eXchange)や固定電話端末を自社設備として保有、運用する形態を採用するケースが多い[100]。このような企業では、有線/無線電話を統合的に運用することが望まれ、無線内線電話も自社設備として保有、運用できることへの期待は高い。フェムトセル基地



局の運用においては、移動通信事業者が提供する公衆サービスと同じ周波数帯を利用するため、公衆サービスと企業内サービス間の干渉を回避するための制御が必要になる。この制御には、無線通信技術の知識が必要であるため、例えば、無線通信が得意な「みなし MVNO」による運用が適していると考える。また、この制御は、無線周波数ライセンスを保有する移動通信事業者の主導の下で実施されることが妥当であると考えられるため、「みなし MVNO」のような運用者と移動通信事業者との間での情報の共有が不可欠になる。しかし、現時点では、「みなし MVNO」は、[85]において、電波法が定める「無線局の運用の特例」制度を活用して運用サービスを提供する事業者と定義されているものの、実運用に向けた移動通信事業者との責任分担、制約条件などが不明確であり、事実上、運用者としての事業が困難になっている。

以上のように、携帯電話を用いた企業内無線内線電話の運用に向けて、フェムトセル、「みなし MVNO」という枠組みは定義されている。しかし、既存の固定内線電話との統合管理、公衆サービスへの影響の抑圧を実現するためには、

- 利用者設備としてのフェムトセル基地局の法制度適用、運用指針の明確化
- 「みなし MVNO」によるフェムト基地局運用に向けた指針の明確化

を、早急に施策として展開することが重要である。

#### 4.3.2.2. 料金のあり方

一般的には、内線電話に対するランニングコストは無料であることが期待されている。しかし、ライセンスバンドを利用する場合は、免許人である移動通信事業者のリソースを利用するため、必然的にランニングコストが発生する。このため、法人企業の内線電話として活用するためには、ランニングコストが十分に低廉であることが求められる。また、法人企業にとっては、接続料金の予見性が高い定額制の適用が容易な帯域幅課金が望ましい。この課金体系は、一般には、契約端末数に依存した料金と利用可能な最大帯域幅に依存した料金の和で構成される。前者は契約管理コストから算定される料金、後者は通信路を構成する設備に関わるコストから算定される料金であり、独立性の高いものである。現在、移動通信事業者の料金体系は多様化しており、これらの料金体系で規定される要素を組み合わせることで、現実的なランニングコストで提供できるという仮説の下、ドミナント事業者指定<sup>7</sup>を受け、接続約款が公開されている国内大手移動通信事業者を例にして、法人

---

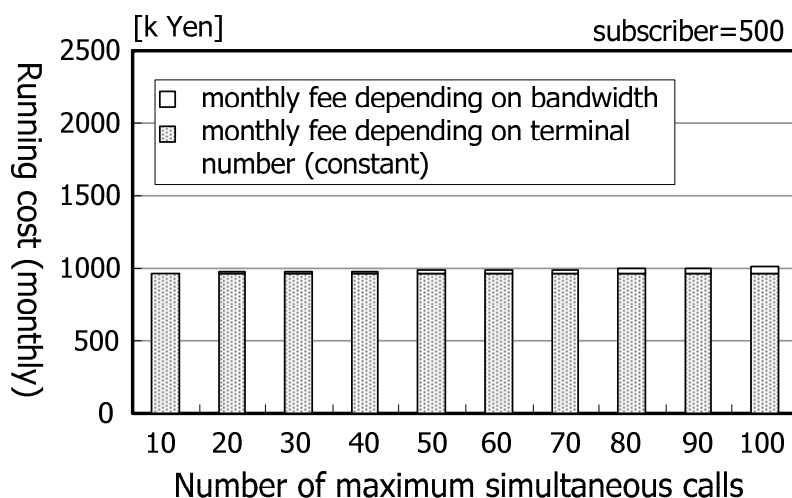
<sup>7</sup> 通信市場への影響力が大きく支配的(ドミナント)と判断される通信事業者。移動通信に関しては、端末シェアと収益額シェアの両方が 25 %を超える事業者であり、現在、NTT ドコモ社ならびに KDDI 社がこれに該当する。2001 年の電気通信事業法改正にて、移動通信事業者に対して、他事業者との接続ルールや接続料金などを定めた約款の届出制が採用された。接続料算定の適正性・透明性を高めるために、2010 年 3 月のガイドライン[89]において、固定通信事業者と同様に、接続料金算定の枠組みが定められた。現時点では、移動通信事業者の場合、固定通信事業者と異なり、設備のボトルネック性は認められていない。

企業の内線電話に対するランニングコストの試算を試みる。表 4-2 に、移動通信事業者が提供する法人企業内線電話サービス料金[101]と接続約款に示されるパケットの相互接続料金[102]の概要を示す。

**表 4-2 事業者の内線サービスとパケット接続約款の概要**

		事業者の内線サービス	パケット接続約款
回線(端末)数 依存料	携帯基本契約料金	980 円/回線/月 (法人向け最安値) 1)	
	内線電話サービス料	945 円/回線/月 1)	
	回線管理費		97 円/回線/月 1)
帯域幅依存料	内線接続料	420 円/チャンネル/月 3)	
	レイヤー3 接続料金		10Mbps: 12,567,408 円/月 3) 10Mbps を超える 1Mbps 毎: 1,256,741 円/月
その他	内線グループ料金	2100 円/内線サー ビスグループ/月 2)	

まず、移動通信事業者が提供する法人企業向け内線サービスを利用した場合のランニングコストを示す。最大のドミナント事業者が提供するサービスを例にすると、このサービスのランニングコストは、1)回線(=端末)単位に発生する月額基本料金、2)契約企業単位に発生する月額基本料金、3)最大同時通話数(=帯域幅)に対する月額料金、4)移動通信事業者網と企業網を接続する月額固定回線料金の 4 つのカテゴリから構成される。無線リソースに関連する料金として 1)~3)に着目し、表 4-2 内の対応項目に 1)~3)を付記する。500 端末を契約する場合を例に、最大同時通話数をパラメータとした場合のランニングコストを図 4-14 に示す。図において、1)と 2)の総和を契約端末数依存コスト (monthly fee depending on terminal number and contraction), 3)を帯域幅依存コスト (monthly fee depending on bandwidth)として示す。また、最大同時通話数は、それぞれの企業の業態、業務フローに依存する設計パラメータであり、一般的な数値を示すことは困難であるが、通常のオフィスであれば、総端末数の 10-15 %程度となる



**図 4-14 移動通信事業者サービス利用時のランニングコスト**

図 4-14 より、ランニングコストの支配要素は、契約端末数依存コストであることがわかる。また、端末 1 台あたりのランニングコストは、最大同時通話数による差は極めて小さく、ほぼ、2000 円程度になる。

次に、接続約款に記載されるパケット通信接続料金をベースに試算する。パケット通信と音声通信では、移動通信事業者網の構成要素が異なるため、パケット通信接続料をそのまま音声通話に適用することはできないが、ランニングコストの目安にはなりえると考える。パケット接続料金は、1) 契約端末単位の料金、2) 帯域幅に依存した料金、の 2 つのカテゴリで構成される。表 4-2 に示すように、現状の料金体系では、10 Mbps を最低帯域幅として規定し、10 Mbps を超える 1 Mbps 毎に追加料金を設定しているが bit 単価は等しいので、音声通話に必要な容量に比例した料金が課金されると仮定する。IMT-2000 システムの音声コーデックの 1 つに AMR-NB (Adaptive Multi-Rate-Narrow Band)がある。これは、4.75-12.2 kbps の可変レートであり、平均 8 kbps とする。上り下りを考慮し、1 通話あたりの占有帯域幅を 16 kbps とする。このとき、図 4-14 と同様の条件でランニングコストを求めると、図 4-15 のようになる。

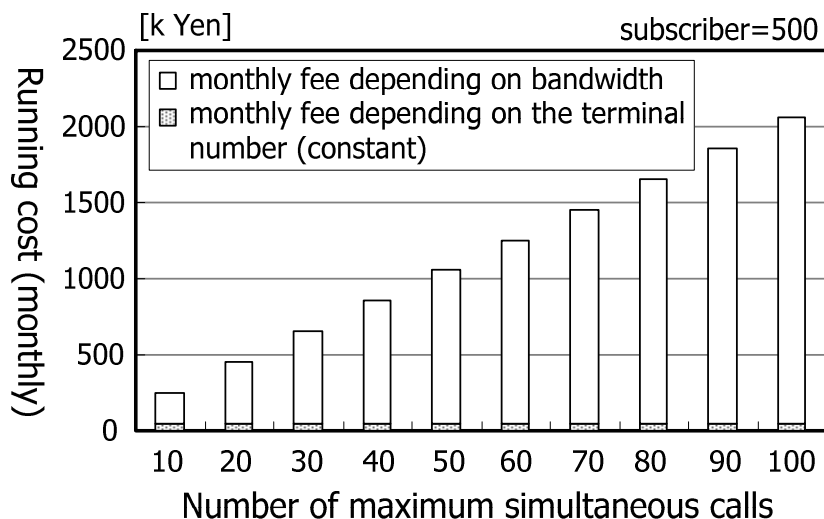


図 4-15 データ接続約款を用いたコストの推定

この場合は、図 4-14 とは反対に、帯域幅に依存する料金が支配項となる。端末あたりのランニングコストは、最大同時通話数に大きく依存し、最大同時通話数を全端末の 10 %程度とすれば、2000 円程度となることがわかる。

従来、内線電話に対するランニングコストが不要であることを考えると、端末あたり数千円の月々のランニングコストが受け入れられ難い。しかし、移動通信事業者が提供する内線電話に対する帯域幅依存料金とパケット通信接続に適用される端末数依存料金を組み合わせると、ランニングコストは図 4-16 のようになる。

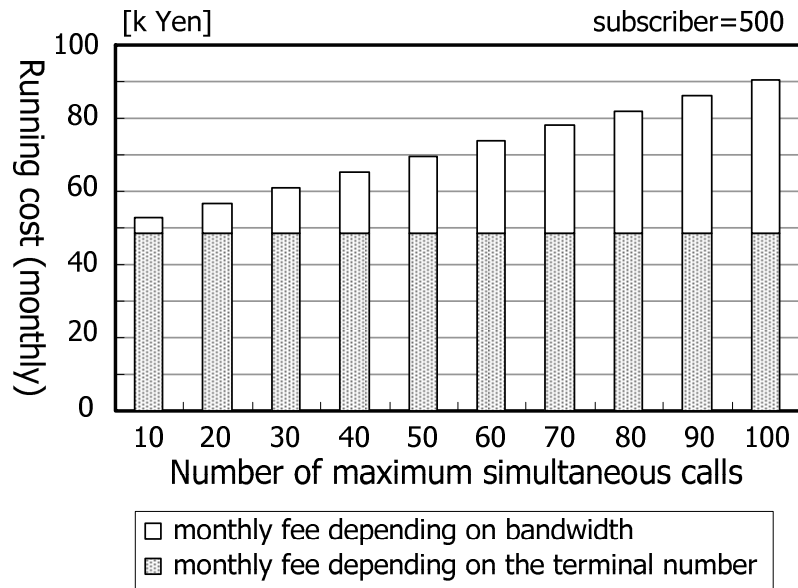


図 4-16 通信事業者サービスの帯域幅料金とパケット通信約款の端末数依存料金の組合わせ

図 4-16 のランニングコストは、図 4-14、図 4-15 と比較すると、ランニングコストは 1/10 以下となり、ライセンスバンドを用いた内線電話の実現性は、現実的なものになる。

日本では、接続ルールの見直し[4]が行われており、2010 年 3 月 29 日に、移動通信事業者との接続ルールのガイドライン[89]が発行されたばかりである。このガイドラインによれば、データ通信、音声通話の接続料金は、それぞれ、帯域幅課金、従量制課金を基本としている。しかし、移動通信事業者の法人向け内線サービスとして、音声通話料金を最大同時接続数に基づく定額課金という帯域幅課金と同等のコンセプトで提供しているという現実がある。また、図 4-16 に示すように、移動通信事業者が提供する料金を適用できれば、「みなし MVNO」によるライセンスバンドを用いた内線電話サービスも現実的なものになり、新たなモバイル通信市場が創出される可能性が創出される。このためには、

- 帯域幅課金と同等の最大同時通話数に基づく音声通話接続料金の導入

も視野に入れ、接続料金の透明化を推進していくことを提言する。

#### 4.3.3. 企業内無線内線電話へのライセンスバンド活用の条件とその意義

本節では、国内企業の無線通信インフラを俯瞰し、現状の免許不要の通信システムでは、無線内線電話に求められる要件を満たすことが困難であることを示した。この課題を解消するアプローチとして、ライセンスバンドの携帯電話を適用することを検討した。その結果、現行制度下においては、既存固定電話との統合運用、公衆携帯サービスに対する影響の低減、ランニングコストについて、要件を満たせないことを示した。要件を満たすためには、

- 利用者設備としてのフェムトセル基地局の法制度面、運用面の明確化
- 「みなし MVNO」によるフェムト基地局運用に向けた指針の明確化
- 音声通話に対する帯域幅課金ベースの相互接続料金の導入

が必要であることを示した。これらにより、「みなし MVNO」が各企業に向けた個別最適化を図り、マスに対するサービスの提供を得意とする移動通信事業者の欠点を補うことで、移動通信事業者自身の市場拡大と新たな MVNO 事業領域の拡大が加速される。さらに、企業ユーザにとっては、低コストで安定した無線内線電話サービスを楽しむことができる。

#### 4.4. 結言

本章では、多種多様なサービスが存在しうる中、「質的变化をもたらすサービス」の必要条件とし、「既存の通信事業者では実現困難なサービス」という視点から、移動通信システムの需要を新たに喚起するサービス創出に向けた技術と方策に関する研究成果を述べた。

新サービス創出に関しては、MIM 方式を利用し、異種・複数の移動通信事業者が提供する無線アクセスリンク群を束ねて、単一の無線アクセスリンクとして提供する無線回線バンドリングサービスを提案した。MIM 方式は、IP のカプセル化技術を活用して複数の移動通信事業者の通信サービスを仮想化し、上位層に対して1本の論理リンクとして提供する。また、時々刻々変動する無線アクセスリンク群を効率的に束ねるために、複数のリンク群に跨るフロー制御(PAC 方式)、再送制御方式を導入した。MIM で構成される無線リンクのサービスエリア・伝送速度は、各移動通信事業者によって異なるサービスエリア・伝送速度の和で与えられるため、単一の移動通信事業者では実現困難な広帯域・広域な無線アクセスリンクを提供できる。このリンクの適用先として、広帯域・広域性が求められる鉄道やバス等の公共交通機関の乗客に対するインターネットアクセスサービスを想定し、首都圏の約 60 km の鉄道路線における MIM 方式の実伝搬路評価を実施した。その結果、異種・複数通信事業者の IMT-2000 回線を束ねることで、トンネル区間を除くほぼ全線での接続が可能であり、ピークレートで 1.5 Mbps 以上のスループットが得られることを明らかにした。このように、単一の移動通信事業者では提供困難なサービスを創出することで、新たな需要の創出を喚起することができる。

さらに、新サービス創出方策に関し、個別最適化が求められる法人企業向け無線内線電話に対して、移動通信事業者が提供するサービスを適用するための運用制度、接続ルールのあり方を分析検討した。この結果、現在、国内の多くの企業では、免許不要の PHS や無線 LAN を活用した無線内線電話が用いられているが、技術の陳腐化の進展、干渉による品質確保・維持が困難である点、規模の経済性が見込みにくい点等、多くの課題を抱えていることが明らかになった。この領域に、移動通信事業者の回線を活用し、課題を解消するための運用制度、接続ルールを提言した。具体的には、フェムトセル基地局の利用者設備化、無線リソース管理業務の部分委託、音声通話に関する帯域幅課金、みなし MVNO の導入により、運用面、コスト面の両面に対して、移動通信事業者サービスの法人向け内線電話適用の可能性が存在することを明らかにした。これらの運用制

度や接続ルールの更改により、一般コンシューマを中心としたマスを対象とするサービス提供を基本とする移動通信事業者のサービスを個別最適化が求められる領域へ展開することで、新たな需要の創出を見込めることを示した。



## 第5章 結論

本論文は、エンドユーザが享受する価値の向上と産業としての発展を両立可能な移動通信産業全体の健全な成長の実現を目的として、筆者が大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻博士後期課程在学中ならびに日本電気株式会社在職中に行った研究成果をまとめたものである。以下に、本研究で得られた成果を総括して述べる。

第1章では、国内の移動通信産業の現状分析ならびに固定アクセス系の過去の推移の振り返りに基づき、移動通信産業全体の健全な成長を生物界における持続発展可能なシステム、すなわちエコシステムとして捉え、その構造分析を行った。その結果、健全な成長を支えるための構成要素として、「無線通信のブロードバンド化」、「システムのオープン化によってもたらされるオープンシステム」、「活用技術/法制度」があることを明らかにした。

第2章では、無線通信のブロードバンド化に向け、TDMA 移動通信システムのブロードバンド化の課題である、時間変動する符号間干渉を抑圧できる低コストな等化方式を提案した。提案方式は、最適受信方式として知られる MLSE 方式を基本方式として、低コストでその等化能力を引き出すものであり、

- サンプルタイミング制御を不要とする分数間隔サンプル型 MLSE 方式
- 固定小数点演算で高速な時間変動に追従可能な QT-LMS アルゴリズムの適用
- フロントエンドにログアンプを導入した極座標信号入力型 MLSE 方式による簡素化した受信信号レベル制御方式

から構成される。提案方式について、計算機シミュレーションならびにプロトタイプ機を用いた実験による評価を行い、その有用性を明らかにした。

第3章では、IP による MH 収容技術を提案し、MH 収容が IP のもつオープン性を高めるものであることを示した。有線、無線等の多様なリンク層以下のアクセス技術を集約して上位層に対して仮想化すると共に、上位層に対して共通の API を提供する IP は、オープンシステムとしての Internet の軸となるプロトコルである。しかし、固定ホストを前提としたプロトコルであり、ホストの移動に対して通信を継続させることは困難である。そこで、ユニキャスト通信、マルチキャスト通信の双方に対し、MH を収容する各種の新しい方式を提案した。

ユニキャスト通信に関し、既存のホスト移動を考慮していない IPv4 機器との互換性を維持しつつ、移動管理トラフィックの抑圧と通信経路の効率化を両立する方式を提案した。この方式は、1)IP ヘッダチェックサム処理の拡張でカプセル化/非カプセル化データグラムの識別を行う確率的な識別手法を適用したカプセル化方式の適用、2)ホストの移動管理機能と管理手法の適切な活用を特徴と



している。これにより、移動管理トラヒックの抑圧と通信経路の効率化の両立が可能となった。

マルチキャスト通信に関し、ホストの移動を考慮したグループメンバー管理ポリシーの拡張、MH に対するサービスカテゴリのあり方に対する分析検討を加え、サービスカテゴリ、管理ポリシーとホストの接続位置、ホストのホームネットワークの位置を考慮したデータグラム転送方式を提案した。また、提案方式による帯域有効利用が可能であることを明らかにした。

また、IP からみると、ホスト移動は、「ネットワークへの接続点の変化」と捉えられる。IP が MH を収容できれば、物理的なホスト移動に対する通信の継続性に加えて、異なるリンクを跨る通信の継続性も実現できる。これは、多様なリンク層を集約する下位層に対するオープン性の機能を高めるものであることを明らかにした。

第 4 章では、移動通信システムの需要を新たに喚起する新サービス創出に向け、「質的变化をもたらすサービス」の必要条件として、「既存の通信事業者では実現困難なサービス」という視点から、新サービス創出技術ならびに方策について分析検討を加えた。

新サービス創出技術に関し、MIM 方式を利用し、異種・複数の移動通信事業者が提供する無線アクセスリンク群を束ねて、単一の無線アクセスリンクとして提供する無線回線バンドリングサービスを提案した。これにより、単一の移動通信事業者では実現困難な広帯域・安定かつ広域なアクセスリンクを提供可能となった。また、本提案の効果と実現可能性を明らかにするため、首都圏の約 60 km の鉄道路線での実伝搬路を用いた実験的検討を加えた。その結果、トンネルを除く全線をカバーし、ピークレートで 1.5 Mbps 以上のスループットが得られ、提案方式に対する有効性を確認した。この技術により、単一の移動通信事業者では実現困難な新たなモバイルインターネットアクセス環境の可能性を示した。

新サービス創出に向けた方策に関し、個別最適化が求められる法人企業向け無線内線電話に対して、移動通信事業者が提供するサービスを適用するための運用制度、接続ルールに対する検討を加え、各種方策に対し、運用面、総合コストの定量的比較を行った。この結果、フェムトセル基地局の利用者設備化、無線リソース管理業務の部分委託、音声通話に関する帯域幅課金、みなし MVNO の導入により、運用面、コスト面の両面に対して、移動通信事業者サービスの法人向け内線電話への適用可能性が高まることを明らかにした。これらの運用制度や接続ルールの更改により、マスに対するサービスを基本とする移動通信事業者のサービスを個別最適化が求められる領域へ展開することで、新たな需要の創出を見込めることを示した。

移動通信事業者が提供するサービスは成熟期を迎え、移動通信産業の成長は踊り場局面に入った。この局面を打開するためには、エンドユーザに質的变化をもたらす新しいサービス提供が必須である。本研究では、質的变化をもたらすサービスの創出を支える必須基盤として、移動通信のブロードバンド化、オープン化を達成した。さらに、移動通信事業者が提供するサービスを加工して新たなサービスを創出するための技術ならびに運用制度・法制度整備に向けた方策を明らかにした。これらの成果により、移動通信産業の健全な持続的成長を促すことが可能になった。

## 参考文献

- [1] 総務省, 通信・放送産業基本調査, 平成 14 年度調査～平成 20 年度調査  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics01b.html>.
- [2] 総務省報道発表, 「通信・放送産業基本調査」(平成 21 年 10 月実施)の結果, 2010 年 2 月.
- [3] 情報通信統計データベース・携帯・PHS の加入契約数の推移,  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt01020101.xls>.
- [4] 情報通信審議会, 「電気通信市場の環境変化に対応した接続ルールの在り方について」  
答申, 2009 年 10 月 16 日.
- [5] 総務省, “モバイルビジネス活性化プラン”, 2007 年 9 月 21 日.
- [6] 総務省, “新競争促進プラン 2010 第 2 版”, 2009 年 6 月 26 日.
- [7] 総務省 統計局, 日本の長期統計系列 第 11 章 情報通信, 11-4 電気通信サービスの  
加入等の状況(昭和 12 年度～平成 16 年度),  
<http://www.stat.go.jp/data/chouki/zuhyou/11-04.xls>.
- [8] 総務省 統計局, “平成 17 年国勢調査 最終報告書「日本の人口」上巻一解説・資料編”,  
第 12 章, 2010 年 3 月 26 日.
- [9] R. Perlman, Interconnections: bridges, routers, switches, and internetworking protocols 2<sup>nd</sup>  
Edition, Chapter 7, Addison-Wesley, 2000.
- [10] D. E. Comer, Internetworking with TCP/IP Volume I, Chapter 31 Summary Of Protocol  
Dependencies, 4th Edition, Presentice Hall, 2000.
- [11] ITU-T Recommendation I.321, “BISDN Protocol Reference Model and its Application”,  
April 1991.
- [12] ITU-T Recommendation I.361, “B-ISDN ATM layer specification”, November 1995.
- [13] The ATM Forum Technical Committee, “Native ATM Services: Semantic  
Description Version 1.0”, February 1996.
- [14] W. R. Stevens, B. Fenner, A. M. Rudoff., UNIX Network Programming: The sockets  
networking API Volume 1 Third Edition, Part 1, Chapter 1, Addison-Wesley, 2004.
- [15] R. Zakon, “Hobbes' Internet Timeline”, RFC2235, IETF, November 1997.
- [16] 郵政省電気通信局, “加入者系ネットワークにおける xDSL の可能性”, 「ネットワークの高  
度化・多様化に関する懇談会」報告書, 1997 年 6 月 24 日.
- [17] 郵政省(現総務省), “接続の基本的ルールの在り方について 答申” 1996 年 12 月.
- [18] 内閣府, 消費動向調査, 第 10 表 主要耐久消費財等の普及率(一般世帯), 2010 年 3 月  
<http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/2010/1003fukyuritsu.xls>.
- [19] J. Postel, “SIMPLE MAIL TRANSFER PROTOCOL”, Request for Comments: 788,  
RFC788, November 1981.
- [20] J. K. Reynolds, “POST OFFICE PROTOCOL”, Request for Comments: 918, RFC918,

October 1984.

- [21] T. Berners-Lee, R. Fielding, H. Frystyk, “Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.0”, Request for Comments: 1945, RFC1945, May 1996.
- [22] <http://www.ncsa.illinois.edu/Projects/mosaic.html>.
- [23] IEEE1394-1995, Standard for a High Performance Serial Bus, IEEE, 1995
- [24] Digital Transmission Licensing Administrator, “Digital Transmission Content Protection Specification Volume 1 Revision 1.0”, 1998.
- [25] Digital Transmission Licensing Administrator, “DTCP Volume 1 Supplement E Mapping DTCP to IP Revision 1.0”, January 2004.
- [26] M. J. O'Mahony, “Optical multiplexing in fiber networks: progress in WDM and OTDM”, Communications Magazine, IEEE, vol. 33, issue. 12, December 1995
- [27] 立野, “光通信技術と産業の動向と今後の進め方への提言—シーズとニーズの融合を目指して—”, 文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向・月報, No. 45, 2004年12月.
- [28] 総務省, “競争政策と通信料金の推移”, グローバル時代における ICT 政策に関するタスクフォース, 過去の競争政策のレビュー部会 第六回会合資料, 2010年3月1日.
- [29] 岡ノ上, 後川, 古谷, “分数間隔サンプル型最ゆう系列推定器”, 信学論(B-II), vol. J77-B-2, no. 10, pp. 517-527, 1994年10月.
- [30] K. Okanou, A. Ushirokawa, H. Tomita, Y. Furuya, “A Fast Tracking Adaptive MLSE for TDMA Digital Cellular Systems”, IEICE Trans. Commun., vol. E77-B, no. 5, pp. 557-565, May 1994.
- [31] K. Okanou, A. Ushirokawa, H. Tomita, Y. Furuya, “New MLSE Receiver Free from Sample Timing and Input Level Controls”, Proceedings of IEEE 43rd Vehicular Technology Conference, pp. 408-411, Secaucus NJ, USA, May 1993.
- [32] K. Okanou, T. Ohsawa, “IP Mobility Support with IP-Squared ( $IP^2$ ) Encapsulation Technique”, IEICE Trans. Commun., vol. E80-B, no. 8, pp. 1198-1207, August 1997.
- [33] T. Ohsawa, K. Okanou, K. Takeda, “A Network and Transport Layers for Mobile Computing over Internet”, Proceedings of 28th European Microwave Conference 1998, vol. 2, pp. 772-777, Amsterdam, Netherlands, October 1998.
- [34] 岡ノ上, 大澤, “移動ホスト対応に向けた IP Multicast の拡張”, 電子情報通信学会技術研究報告 交換システム, SSE97-133, 1997年10月.
- [35] 岡ノ上, 中田, 丹生, 田島, 山崎, 矢野, “鉄道インターネットサービス: BBRide”, 第41回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文番号 812, pp. 1-4(CDROM), 2004年11月.
- [36] T. Nakata, Y. Noguchi, Y. Suda, K. Okanou, S. Yamazaki, “BBRide -Broadband Internet Access Onboard Rapid Transportation-”, Proceedings of the 7th Conf. International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication 2004, MA4-3, pp. V1-92-V1-96, Abano Terme, Italy, September 2004.

- [37] K. Okanou, K. Tsukamoto, S. Komaki, "New Competition Rule Strategy of the Enterprise Internal Wireless Telephony Systems over Licensed Bands in Japan", Proceeding of 18th Biennial Conference, 29-1-J-3, International Telecommunications Society, June 2010.
- [38] 剛, 新, 吉野, "ITU 無線通信総会(RA-07)報告", NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol. 16, No. 1, pp. 57-60, 2008 年 4 月.
- [39] J. G. Proakis, "Adaptive Equalization for TDMA Digital Mobile Radio", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 40, pp. 333-341, May 1991.
- [40] 久保, 村上, 藤野, "高速フェージング伝送路のための適応形最ゆう系列推定器", 1990 年電子情報通信学会秋季全国大会, B-283, 1990 年 9 月.
- [41] 府川, 鈴木, "移動無線における逐次最小 2 乗形適応最ゆう系列(RLS-MLSE)の特性", 信学論(B-II), J75-B.II, no. 8, pp. 535-546, 1992 年 8 月.
- [42] 岡ノ上, "適応型ビタビ MLSE 受信器の追従性向上に関する一検討", 1991 年電子情報通信学会春季全国大会, SB・4-4, 1991 年 3 月.
- [43] 岡ノ上, 後川, 古谷, "QT-LMS アルゴリズムを用いた適応形 MLSE 受信機の提案", 電子情報通信学会技術研究報告 無線通信システム, RCS92-119, 1993 年 1 月.
- [44] J. G. Proakis, Digital Communications, 4<sup>th</sup> edition, Chapter 11, McGraw-Hill, 2000.
- [45] 邱, 白井, 阿部, "追従性の良い LMS 適応アルゴリズムによる時変パラメータ推定の一手法", 信学論(A), J72-A, no. 7, pp. 1038-1044, 1989 年 7 月.
- [46] 邱, 白井, 阿部, "QT-LMS 適応アルゴリズムのステップサイズの最適性に関する解析", 信学論(A), J73-A, no. 5, pp. 1003-1005, 1991 年 5 月.
- [47] S. Stein, J.J. Jones, 関英男監訳 現代の通信回線理論—データ通信への応用—, 第 4 章 ランダム過程, 森北出版, 1970.
- [48] 山口, 山尾, "リミタ増幅器を用いた低消費電力形線形受信機", 電子情報通信学会春季全国大会, B-366, 1991 年 3 月.
- [49] H. Tomita, Y. Yokoyama and T. Matsuki, "Digital intermediate frequency demodulation technique for cellular communication systems", Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference 1990, IEEE GLOBECOM'90, vol. 3 pp. 1827-1831, San Diego, CA USA, December 1990.
- [50] J.-E. Berg, J. Rupprecht, J.-P. de Weck and A. Mattson, "Specular reflection from high-rise buildings in 900 MHz cellular systems", Proceedings of the 41st IEEE Vehicular Technology Conference, VTC'91, pp. 594-599, St Louis, MI USA, May 1991.
- [51] J. Postel, "INTERNET PROTOCOL", Request for Comment: 791, RFC791, September 1981.
- [52] 三瓶, "コグニティブ無線の動向と展開", 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, No. 5, pp. 35-45, 2008 年 5 月.
- [53] S. Deering and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", Request for

- Comments: 1883, RFC1883, December 1995.
- [54] D. B. Johnson, C. Perkins and J. Arkko, “Mobility Support in IPv6”, Request for Comments: 3775, IETF, June 2004.
  - [55] F. Teraoka, “Options for Mobility Support in IPv6”, INTERNET DRAFT, IETF, January 1996.
  - [56] C. Perkins, Editor, “IP Mobility Support”, Request for Comments: 2002, IETF, October 1996
  - [57] F. Teraoka, “VIP: A Protocol Providing Host Migration Transparency”, Computer Software, Vol. 10, No. 4, pp. 22-38, July 1993.
  - [58] J. Ioannidis, D. Duchamp, and G. Q. Maguire Jr., “IP-Based protocols for mobile internetworking”, The proceedings of SIGCOMM91, pp. 235-245, September 1991.
  - [59] C. Perkins, “IP Encapsulation within IP”, Request for Comments: 2003, RFC2003, October 1996.
  - [60] D. B. Johnson and C. Perkins, “Route Optimization in Mobile IP”, INTERNET DRAFT, IETF, February 1999.
  - [61] J. Reynolds and J. Postel, “Assigned Numbers”, Request for Comments: 1700, RFC1700, October 1994.
  - [62] 岡ノ上, 大澤, R. Frank, “高機能移動ホストによる Agent 非依存型 Mobile-IP”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-469 1995 年 9 月.
  - [63] S. Deering, “Host Extensions for IP Multicasting”, Request for Comments: 1112, IETF, August 1989.
  - [64] B. Gronval, I. Marsh and S. Pink, “A Multicast-based Distributed File System for the Internet”, Proceedings of the 7th workshop on ACM SIGOPS European workshop: Systems support for worldwide applications, pp. 95-102, Connemara, Ireland, September 1996.
  - [65] Michael R. Macedonia and Donald P. Brutzman, “Mbone Provides Audio and Video Across the Internet”, IEEE Computer, pp. 30-36, April 1994.
  - [66] 立川監修, 最新デジタル移動通信, 5.2 章, 科学出版社, 2002 年.
  - [67] S. Deering, “Multicast routing in a datagram internetwork”, Ph. D. Thesis, Stanford University, 1991.
  - [68] M. Handley, V. Jacobson, C. Perkins, “SDP: Session Description Protocol”, RFC4566, IETF, July 2006.
  - [69] M. Handley, C. Perkins, E. Whelan, “SAP: Session Announcement Protocol”, RFC2974, IETF, October 2000.
  - [70] ガートナー・ジャパン, “無線 LAN の利用実態と需要動向調査”, 2002 年 9 月 5 日.
  - [71] 水越, 鄒, 狩野, “DSRC 網における IP ハンドオーバー方式の評価”, 電子情報通信学会技術研究報告 ITS(高度交通システム), ITS2002-128, 2003 年 2 月.
  - [72] 杉山, 前野, 古田, 丸山等, 丸山久幸, 足達, “東海道新幹線デジタル列車無線の開発と

- 導入”, 日立評論, vol. 92, no. 02 I68-I69, pp. 36-39, 2010 年 2 月.
- [73] 東海旅客鉄道株式会社ホームページ, “N700 系でインターネット接続サービス開始!(無線 LAN)”, <http://railway.jr-central.co.jp/wireless/index.html>.
- [74] 首都圏新都市鉄道株式会社, インテル株式会社, エヌ・ティ・ティ・ブロードバンドプラットフォーム株式会社, “つくばエクスプレス列車内・駅構内での無線 LAN 利用環境の整備について～ 将来の全線での利用に向けた実験運用を実施 ～”, プレスリリース, 2005 年 7 月 14 日.
- [75] 首都圏新都市鉄道株式会社ホームページ, “つくばエクスプレス 無線 LAN のご案内”, <http://www.mir.co.jp/wireless/service.htm..>
- [76] A. Bakre and B. R. Badrinath, “I-TCP: Indirect TCP for mobile hosts,” in Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 136–143, Vancouver, Canada, June 1995.
- [77] 野村総合研究所, 情報通信利用者の動向【第 13 回調査結果の概要】, [http://www.nri.co.jp/opinion/r\\_report/clo/index.html](http://www.nri.co.jp/opinion/r_report/clo/index.html).
- [78] K. Sklower, B. Lloyd, G. McGregor, D. Carr, T. Coradetti, “The PPP Multilink Protocol (MP)”, Request for Comments: 1990, IETF, August 1996.
- [79] T. Nakata, Y. Noguchi, K. Okanoue, T. Nyu, A. Miyashita, H. Yomo, W. Domon, S. Yamazaki, “Efficient bundling of heterogeneous radio resources for broadband Internet access from moving vehicles”, Proceedings of Global Mobile Congress, Shanghai, China, October 2004.
- [80] 中田, 岡ノ上, 山崎, “移動体インターネット(2) —フロー制御方式—”, 2004 年電子情報通信学会総合大会, B-5-164, 2004 年 3 月.
- [81] 小野, 中田, 岡ノ上, 山崎, “移動体インターネット(3) —再送制御方式—”, 2004 年電子情報通信学会総合大会, B-5-165, 2004 年 3 月.
- [82] L. S. Brakmo and L. L. Peterson, “TCP Vegas: End-to-End Congestion Avoidance on a Global Internet”, IEEE JSAC, vol. 13, No. 8, pp. 1465-1480, October 1995.
- [83] 総務省・総合通信基盤局, トラヒックからみた我が国の通信利用状況【平成 20 年度】, 2010 年 1 月 29 日.
- [84] 総務省, 通信利用動向調査の結果・平成 16 年～平成 20 年, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05a.html>.
- [85] 総務省, “MVNO に係る電気通信事業法及び電波法の適用関係に関するガイドライン(再改定)”, 2008 年 5 月 19 日.
- [86] 総務省, “フェムトセル基地局の活用に向けた電波法及び電気通信事業法関係法令に関する取扱方針”, 2008 年 4 月 17 日.
- [87] 総務省, “フェムトセル基地局の活用に係る電波法及び電気通信事業法関係法令の適用関係に関するガイドライン”, 2008 年 12 月 2 日.

- [88] 次世代 IP 推進フォーラム, “フェムトセル基地局を利用した携帯電話サービスを円滑に提供するための運用ガイドライン”, 2008 年 12 月 10 日.
- [89] 総務省, “第二種指定電気通信設備制度の運用に関するガイドライン”, 2010 年 3 月 29 日.
- [90] 総務省, “SIM ロック解除に関するガイドライン(案)”, 2010 年 5 月.
- [91] 例えば, <http://plusd.itmedia.co.jp/mobile/articles/0810/24/news018.html>,  
<http://www.itmedia.co.jp/promobile/articles/0903/02/news047.html> 等
- [92] 情報通信審議会 情報通信技術分科会 小電力無線システム委員会, 「デジタルコードレス電話の新たな方式の技術的条件」に関する報告(案), 2010 年 4 月 22 日.
- [93] <http://www.docomo.biz/html/service/officelink/>
- [94] [http://www.kddi.com/business/call\\_direct/index.html](http://www.kddi.com/business/call_direct/index.html)
- [95] <http://tm.softbank.jp/business/solution/fmc/whiteoffice/index.html>
- [96] 富士キメラ総研, 2009 コミュニケーション関連マーケティング調査総覧 <上巻:通信機器/システム編>, II 個別製品編, 4 移動体関連機器, 2009 年 8 月 25 日.
- [97] K. Okanoue and K. Ebata, “Activities toward Wireless LAN Operation Service”, NEC Technical Journal, vol. 3, no. 3, pp. 54-58, September 2008.
- [98] 衆議院会議録情報 第 169 回国会 本会議 第 22 号  
<http://kokkai.ndl.go.jp/SENTAKU/syugiin/169/0001/16904170001022a.html>.
- [99] 参議院会議事録情報 第 169 回国会 本会議 第 21 号  
<http://kokkai.ndl.go.jp/SENTAKU/sangiin/169/0001/16905230001021a.html>.
- [100] 富士キメラ総研, 2009 コミュニケーション関連マーケティング調査総覧 <下巻:通信サービス編>, II 個別サービス編, 5 音声関連サービス, 2009 年 9 月 29 日.
- [101] <http://www.docomo.biz/html/service/officelink/rate.html>.
- [102] NTTドコモ, 電気通信事業法第 34 条第 2 項に基づく第 2 種指定電気通信設備に係る接続約款, 料金表,  
<http://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/disclosure/interconnection/term/dsr01.pdf>.

## 付録A ガウス雑音に対するブランチメトリックの導出

MLSE方式におけるブランチメトリックは、各状態遷移に対応する送信系列ベクトル候補 $\vec{s}$ のよう度で与えられる。雑音として平均がゼロ、分散が $\sigma^2$ のガウス雑音、サンプル周期を $T/N$ とした場合を示す。時刻 $kT \sim$ 時刻 $(k+(N-1)/N)T$ における雑音ベクトルを $\vec{n}(k) = (n(k), n(k+1/N), \dots, n(k+(N-1)/N))$ とすると、雑音ベクトルの確率密度関数 $p(\vec{n}(k))$ は、次式の $N$ 次元結合ガウス確率密度関数[47]で与えられる。

$$p(\vec{n}(k)) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} (\det \boldsymbol{\mu})} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \lambda_{ij} n(k+i/N) n^*(k+j/N) \right] \quad (\text{A-1})$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu}$ は $\vec{n}(k)$ の共分散行列であり、 $\vec{n}(k)$ の各要素の平均電力が等しく $\sigma^2$ 、 $n(k+i/N)$ と $n(k+j/N)$ の間の正規化相関係数を $\rho_{i,j}$  ( $i, j = 0, 1, \dots, N-1$ )とすれば、

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \sigma^2 & \cdots & \rho_{0,(N-1)} \sigma^2 \\ \rho_{1,0} \sigma^2 & \cdots & \rho_{1,(N-1)} \sigma^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{(N-1),0} \sigma^2 & \cdots & \sigma^2 \end{pmatrix} \quad (\text{A-2})$$

であり、 $\lambda_{ij}$ は共分散行列 $\boldsymbol{\mu}$ の逆行列の第 $i, j$ 成分、 $*$ は複素共役を示す。

さて、受信信号ベクトル $\vec{r}_T(k)$ は、雑音が存在しない場合の理想的な受信信号ベクトル(受信信号レプリカベクトル) $\vec{\hat{r}}_T(k) = (\hat{r}(k), \hat{r}(k+1/N), \dots, \hat{r}(k+(N-1)/N))$ と雑音ベクトル $\vec{n}(k)$ を用いて、

$$\vec{r}_T(k) = \vec{\hat{r}}_T(k) + \vec{n}(k) \quad (\text{A-3})$$

とかける。 $\vec{\hat{r}}_T(k)$ の $i$ 番目の要素、 $\hat{r}(k+i/N)$ は、 $\vec{\hat{r}}_T(k)$ に寄与する送信シンボル推定値を要素とするベクトル、 $\vec{\hat{s}}_T = (s(k), s(k-1), \dots, s(k-(m-1)))$ を用いると、

$$\hat{r}(k+i/N) = \vec{h}_i \cdot \vec{\hat{s}}_T^t \quad (\text{A-4})$$

である。ここで、 $t$ は転置ベクトルを示す。また、 $\vec{h}_i$ は、 $\hat{r}(k+i/N)$ に対する通信路インパルスレスポンスベクトルであり、図 2-3 に示す第 $i$ 番目のトランスバーサルフィルタのタップ係数を要素とするベクトル

$$\vec{h}_i = (h_{0,i}, h_{1,i}, \dots, h_{m-1,i}) \quad (\text{A-5})$$

である。ここで、式(A-3)より、 $\vec{n}(k)$ は、



$$\vec{n}(k) = \vec{r}_T(k) - \vec{\hat{r}}_T(k) \quad (\text{A-6})$$

と表現できる. 式(A-6)において,  $\vec{\hat{r}}_T(k)$ は,  $\vec{n}(k)$ には依存せず送信系列ベクトル $\vec{\hat{s}}$ (確率変数)と $\vec{\hat{r}}_T(k)$ の各要素に対する通信路インパルスレスポンスベクトル $\vec{h}_i$ (定数)のみで決まる値である. 更に,

$$\vec{\varepsilon}_T(k) = \vec{r}_T(k) - \vec{\hat{r}}_T(k) \quad (\text{A-7})$$

の変数変換を式(A-1)に適用すると, 式(A-1)は, 受信信号ベクトル $\vec{r}(k)$ と送信系列候補ベクトル $\vec{s}_c$ の結合確率密度関数に変換され,

$$p(\vec{r}(k), \vec{\hat{s}}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} (\det \boldsymbol{\mu})} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=0}^{N-1} \lambda_{ij} \varepsilon(k+i/N) \varepsilon^*(k+j/N) \right] \quad (\text{A-8})$$

となる. ここで, 各状態遷移に対応する送信系列候補ベクトル $\vec{s}$ の確率密度関数を $p(\vec{s})$ とすると,  $\Lambda(\vec{s})$ は, 式(A-8)にベイズの法則[47]を適用することにより,

$$\Lambda(\vec{s}) = p(\vec{r}_T(k) | \vec{s}) = \frac{p(\vec{r}_T(k), \vec{s})}{p(\vec{s})} \quad (\text{A-9})$$

で与えられる.

## 付録B 分数間隔サンプルされたガウス雑音の正規化相関係数

受信フィルタへの入力雑音を平均がゼロ、電力密度スペクトルが  $N_0$  の白色ガウス雑音として、受信フィルタの周波数特性が  $K(f)$  である場合を考える。このとき、受信フィルタ出力雑音の自己相関関数  $R(\tau)$  は、

$$R(\tau) = F^{-1} \left[ |K(f)|^2 N_0 \right] \quad (\text{B-1})$$

で与えられる(8)。但し、 $F^{-1}[\cdot]$  は逆フーリエ変換、 $|\cdot|$  は絶対値を示す。更に、雑音が定常過程かつエルゴード性が成立すると仮定すれば、受信フィルタ出力雑音の相関係数  $\rho(\tau)$  は、

$$\rho(\tau) = \frac{R(\tau)}{N_0} \quad (\text{B-2})$$

が成立する。式(B-1)および式(B-2)から、 $\rho(\tau)$  は、

$$\rho(\tau) = F^{-1} \left[ |K(f)|^2 \right] \quad (\text{B-3})$$

で与えられる。

図 B-1 に、受信フィルタとしてルートナイキストフィルタを用いた場合の正規化相関係数を示す。図において、 $\alpha$  はロールオフ係数である。この図より、 $\alpha = 0.35$  の場合、シンボル速度の 2 倍の速度でサンプルしたときの各サンプル間の雑音の正規化相関係数は 0.6 程度であり、雑音の相関の影響はかなり大きく出ると考えられる。

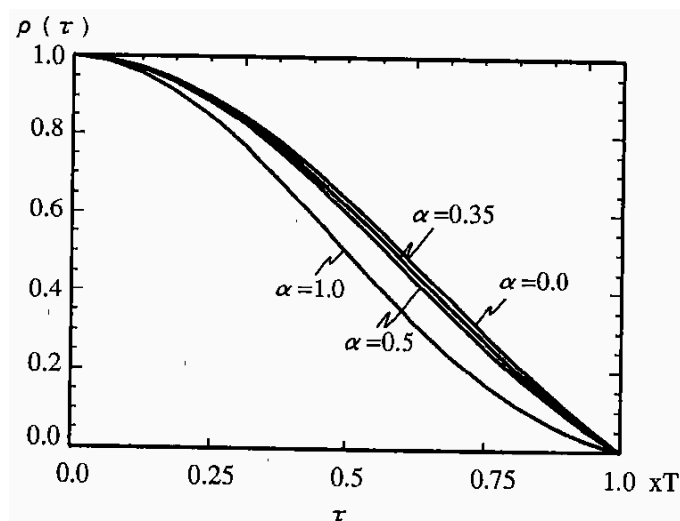


図 B-1 受信フィルタ出力雑音の相関係数



## 付録C QT-LMS アルゴリズムを適用した型 MLSE 受信器の導出

適応型 MLSE 受信器では、時刻  $k$  における判定結果ベクトルと現在の通信路インパルスレスポンス推定ベクトルから受信信号のレプリカを生成し、実際の受信信号と受信信号のレプリカとの誤差信号電力が最小になるように通信路インパルスレスポンス推定ベクトルを逐次的に推定していく [44]. ここでは、この逐次推定アルゴリズムとして、QT-LMS アルゴリズムを適用した QT-LMS 適応型 MLSE 受信器の構成を示し、基本的な動作特性を明らかにする。

### C-1 QT-LMS アルゴリズム

1次 QT-LMS アルゴリズムを用いた通信路インパルスレスポンス推定の概念図を図 C-1 に示す。図において、実線は実際の通信路インパルスレスポンスの変動、破線は通信路インパルスレスポンス推定値である。1次 QT-LMS アルゴリズムは、推定する時間変動をある周期(図中、リセット周期)に分割し、その周期内における変動を時間の1次式でモデル化して推定するアルゴリズムである。このアルゴリズムでは、推定すべき変数は、時間変動の1次微係数(1次変動成分:  $h_1$ )と周期における初期値(0次変動成分:  $h_0$ )の2変数である。以下に、一般化した高次( $L$ 次)QT-LMS アルゴリズムについて説明する。

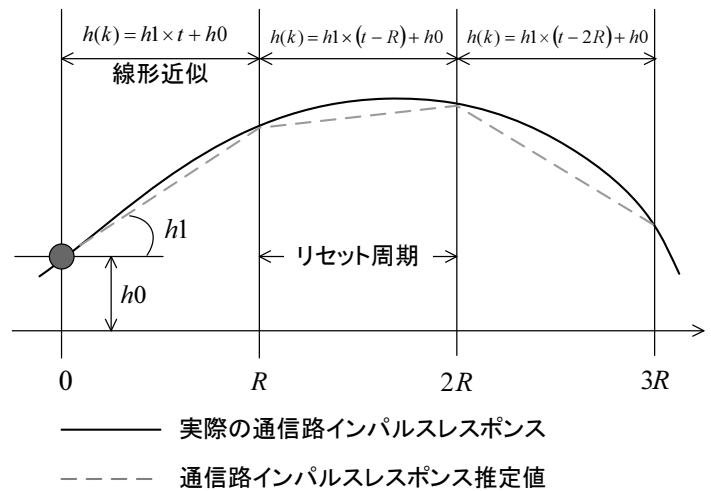


図 C-1 1次 QT-LMS アルゴリズムによる推定コンセプト

一般に、QT-LMS アルゴリズムは、通信路インパルスレスポンスの時間変動を  $L$  次の時間の多項式でモデル化することにより、より高速で高精度の追従特性を実現するアルゴリズムである。すなわち、時刻  $k$  における通信路インパルスレスポンスベクトル  $\vec{h}(k)$  を

$$\vec{h}(k) = \vec{h}(k, L) \cdot k^L + \vec{h}(k, L-1) \cdot k^{L-1} + \dots + \vec{h}(k, 0) \quad (\text{C-1})$$

とモデル化し、それぞれの係数ベクトル  $\vec{h}(k, L)$ ,  $\vec{h}(k, L-1)$ ,  $\dots$ ,  $\vec{h}(k, 0)$  を推定し、推定結果を式 (C-1) に代入して  $\vec{h}(k)$  を求める。このとき、係数ベクトルは、通信路インパルスレスポンスの時間変

動の高次微分係数( $L$ 次変動成分)である, また, 係数ベクトルの各要素は, 遅延波成分及び遅延波成分の時間変動の $L$ 次変動成分である. ここで,  $\vec{h}(k)$ と判定結果ベクトル $\vec{\hat{s}}(k)$ を用いると, 時刻 $k$ における受信信号レプリカ $\hat{r}(k)$ は,

$$\hat{r}(k) = \vec{\hat{s}}(k) \cdot \vec{h}(k) \quad (\text{C-2})$$

と表すことができる. ここで, 通信路インパルスレスポンス長を $m$ とすると,

$$\vec{\hat{s}}(k) = (\hat{s}(k), \hat{s}(k-1), \dots, \hat{s}(k-(m-1))) \quad (\text{C-3})$$

$$\vec{h}(k)^t = (h(0), h(1), \dots, h(m-1)) \quad (\text{C-4})$$

$$\vec{h}(k, i)^t = (h(k, i, 0), h(k, i, 1), \dots, h(k, i, m-1)) \quad (i=0, 1, \dots, L) \quad (\text{C-5})$$

である. 式(C-4), 式(C-5)において,  $t$ は転置ベクトルを示す. 式(C-1)及び式(C-3)~式(C-5)を式(C-2)に代入すると,  $\hat{r}(k)$ は,

$$\begin{aligned} \hat{r}(k) &= \sum_{j=0}^L \vec{\hat{s}}(k) \cdot \vec{h}(k) \\ &= \sum_{j=0}^L k^j (h(k, j, 0)\hat{s}(k) + h(k, j, 1)\hat{s}(k-1) + \dots + h(k, j, m-1)\hat{s}(k-(m-1))) \end{aligned} \quad (\text{C-6})$$

となり,  $\hat{r}(k)$ は $k^j$ の線形和で表現される. このため $k^j$ の係数ベクトル $\vec{h}(k, j)$ は, 次式に基づいてそれぞれ独立に推定できる.

$$\vec{h}(k+1, j) = \vec{h}(k, j) + \Delta_j \cdot \varepsilon(k) \cdot \vec{\hat{s}}(k)^* \cdot k^j \quad (\text{C-7})$$

ここで,  $\Delta_j$ は $j$ 次変動成分の逐次更新のためのステップサイズ,  $\varepsilon(k)$ は $\hat{r}(k)$ と $r(k)$ との誤差信号,  $*$ は共役複素,  $k$ は基準時刻からの時間を表す変数である.  $k$ が大きくなると, 通信路インパルスレスポンスの時間変動を $L$ 次式のモデルで近似することが困難になってくる. また,  $k$ は単調増加変数であるから,  $k$ が大きくなると式(C-7)右辺の第2項も大きくなり, 制御系が不安定になる可能性がある. このため, リセット周期 $R$ を定め,  $\text{mod}(k, R)$ が零となったとき,

$$\vec{h}(k, 0) = \sum_{j=0}^L (k-1)^j \cdot \vec{h}(k-1, 0) \quad (\text{C-8})$$

$$\vec{h}(k, j) = \vec{h}(k-1, j) \quad (j=1, 2, \dots, L) \quad (\text{C-9})$$

$$k = 0$$

$$(C-10)$$

にしたがって各変数をリセットする[45].

## C-2 受信機構成と追従特性

図 C-2 に、1次 QT-LMS アルゴリズムを用いた QT-LMS 適応型 MLSE 受信器のブロック図を示す. この受信機の適応通信路インパルスレスポンス推定回路では、まず、通信路インパルスレスポンスの 0 次変動成分と 1 次変動成分の推定値に基づいて判定結果を再変調して、受信信号レプリカ  $\hat{r}(k)$  を求める(式(C-6)). さらに、 $\hat{r}(k)$  と実際の受信信号  $r(k)$  との誤差信号  $\varepsilon(k)$  を用いて、通信路インパルスレスポンスの 0 次変動成分推定値( $\bar{h}(k,0)$ )と 1 次変動成分推定値( $\bar{h}(k,1)$ )を式(C-7)に基づいて逐次的に更新していく. MLSE 受信器に供給される通信路インパルスレスポンス推定値は、 $\bar{h}(k,0)$  と  $\bar{h}(k,1)$  から式(C-1)に基づいて求められる. また、カウンタ値がリセット周期  $R$  と等しくなった場合には、式(C-8)~式(C-10)に基づいて、各変数をリセットする. MLSE 受信器では、このようにして得られる通信路インパルスレスポンス推定値に基づいて、受信信号を復調する.

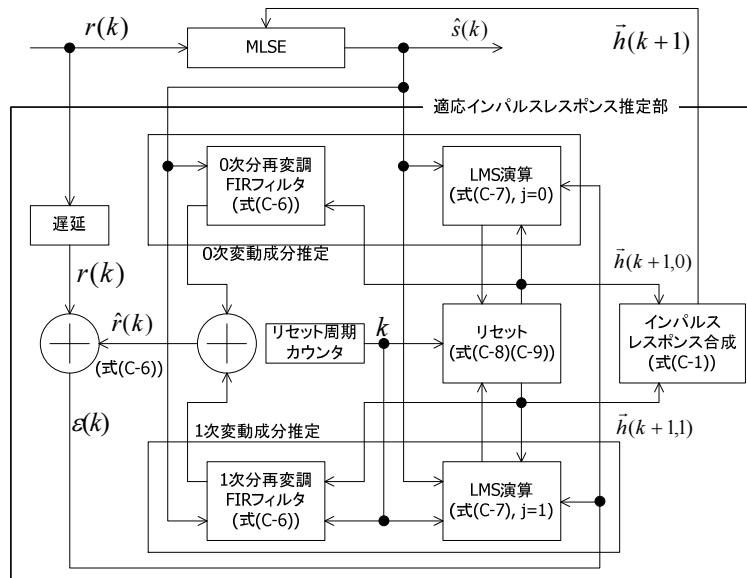


図 C-2 1次 QT-LMS アルゴリズムを用いた MLSE 受信器

図 C-3~C-5 に、通信路インパルスレスポンス長さ( $m$ )を 1, 0 次変動推定成分更新ステップサイズ( $\Delta_0$ )=0.05, 1 次変動推定成分更新ステップサイズ( $\Delta_1$ )=0.005, リセット周期( $R$ )をシンボル周期( $T$ )の 6 倍( $6T$ ), 最大ドップラ周波数を 80 Hz とし、計算機シミュレーションで得られた通信路インパルスレスポンス推定結果(実成分)を示す. シミュレーションの主要諸元は、表 2-1 と同様である. 図 C-3~C-5 は、それぞれ、0 次変動成分推定値, 1 次変動成分推定値, 0 次変動成分推定値と 1 次変動成分推定値の線形和(通信路インパルスレスポンス推定値)に対応する. これらの図より、図 C-1 に示した QT-LMS アルゴリズムの考え方と合致した動作であることが確認できる.

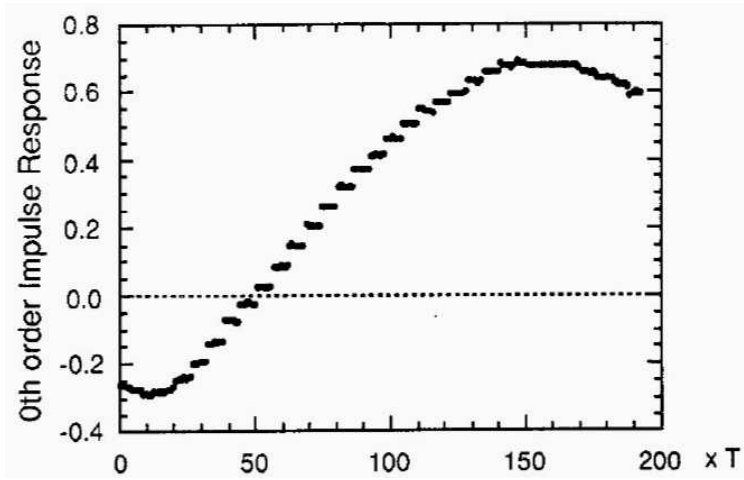


図 C-3 0次変動成分の推定例

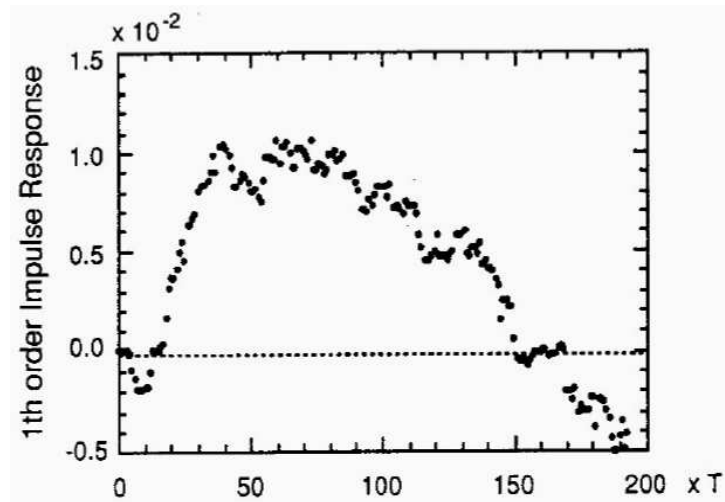


図 C-4 1次変動成分の推定例

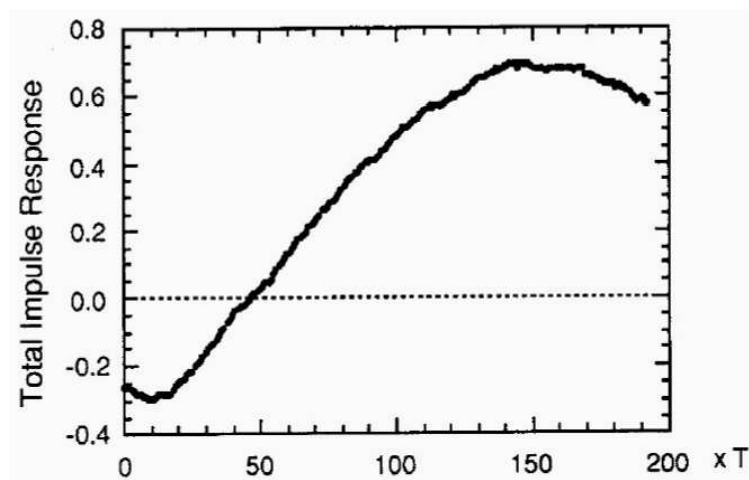


図 C-5 通信路インパルスレスポンスの推定例

また, 1 次 QT-LMS アルゴリズムの追従性能は, 0 次変動推定成分更新ステップサイズ( $\Delta_0$ ), 1 次変動推定成分更新ステップサイズ( $\Delta_1$ ), リセット周期( $R$ )の値の選択に大きく依存する[43]. 適用する環境に即して, 適切に設定する必要がある.





## 付録D 受信信号レベルのダイナミック変動に対処するフロントエンド構成

移動通信では、基地局・移動局間の距離に応じて受信機入力レベルが大きく異なる。特に、TDMA システムでは、基地局はスロットごとにレベル差の大きい信号を受信する可能性がある。レベル変動に対しては AGC (Automatic Gain Controller) を用いてレベルを補償する方式がよく知られているが、レベルの大きく異なる信号に対し瞬時に応答する AGC 回路を構成することは容易ではない。そこで、ログアンプを用いて受信信号を極座標表現し、得られた振幅信号と位相信号とを入力とする等化方式を示す。本方式によれば、複雑な AGC を用いずに広いダイナミックレンジと瞬時の応答が期待できる[48]。

### D-1 極座標信号入力型の MLSE 受信器構成

図 D-1 に提案する MLSE 受信器のブロック図を示す。入力は、ログアンプにより検出された RSSI 信号をサンプルした対数振幅情報  $\log(r)$  と振幅制限された受信信号を基に位相検出器[49]で検出した位相情報  $\theta$  である。等化器系では、まず対数振幅情報  $\log(r)$  に関し、スロット中の最大値を用いて正規化を行った後、線形な振幅情報  $r$  に変換する。次に、 $(r, \theta) \rightarrow (x, y)$  の座標変換を行い、直交座標系の直交信号を生成する。この直交信号を MLSE 受信器への入力とする。この一連の変換処理は、DSP を用いれば、200 サンプルのデータに対して 0.35 MIPS 程度で実現できる。

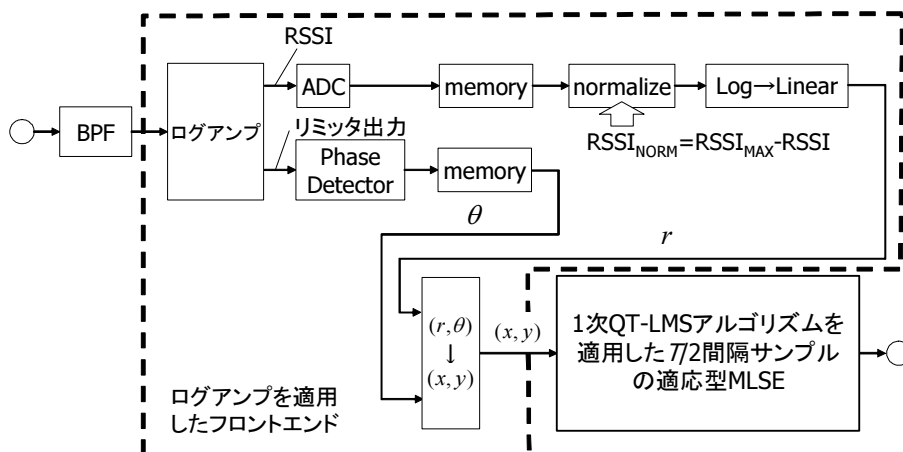


図 D-1 極座標信号入力型 MLSE 受信器

### D-2 極座標信号入力型 MLSE 受信器に対するフロントエンドの要件

フロントエンドの要件は、MLSE 受信器の受信特性に影響を与えない入力信号を供給することであり、以下の3点がポイントとなる。

- 入力信号の精度(量子化ビット数)が MLSE 受信器に与える影響

- 受信レベルによって異なる skew が MLSE 受信器に与える影響
- 素子によるログアンプ特性のばらつき(ログアンプ特性のゲインスロープ誤差)が MLSE 受信器に与える影響

表 2-2 に示す諸元のプロトタイプ機を用いて、これらの要件を評価した結果を、図 D-2～図 D-4 に示す。図 D-2 は、振幅情報、位相情報に必要なビット精度を調べたものである。図より  $\pi/4$  シフト QPSK 信号に対しては、振幅情報は 8 ビット(量子化レベル当たり 0.27 dB)、位相情報は 6 ビットあれば等化特性の劣化はないことがわかる。また、図 D-3 の skew 対ビット誤り率特性を参照すれば、 $\pm 0.05T$  の skew では等化器特性の劣化は少ないことが分かる。図 D-4 は、ログアンプ特性における直線部の傾きを変化させたときのビット誤り率の劣化を示したものである。横軸は、真の傾きに対する比の値を示している、20% までの傾き変化に対しては、等化器特性の劣化は少ない。

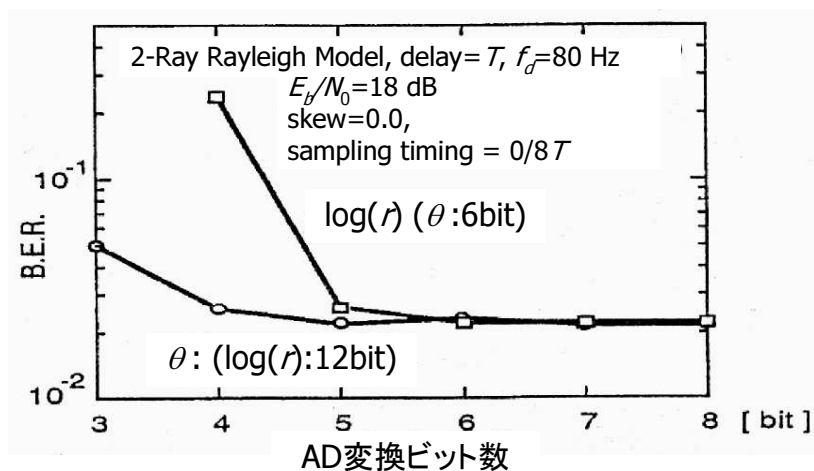


図 D-2 ビット誤り率対量子化ビット数特性

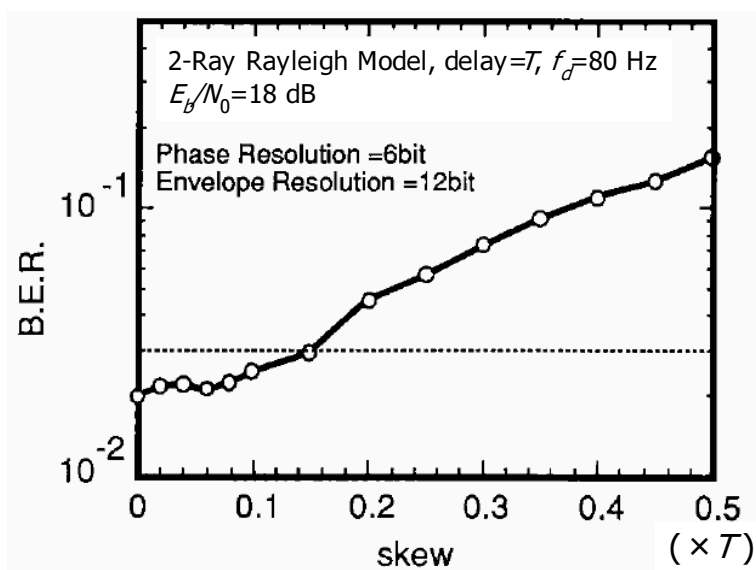


図 D-3 ビット誤り率対 skew 特性

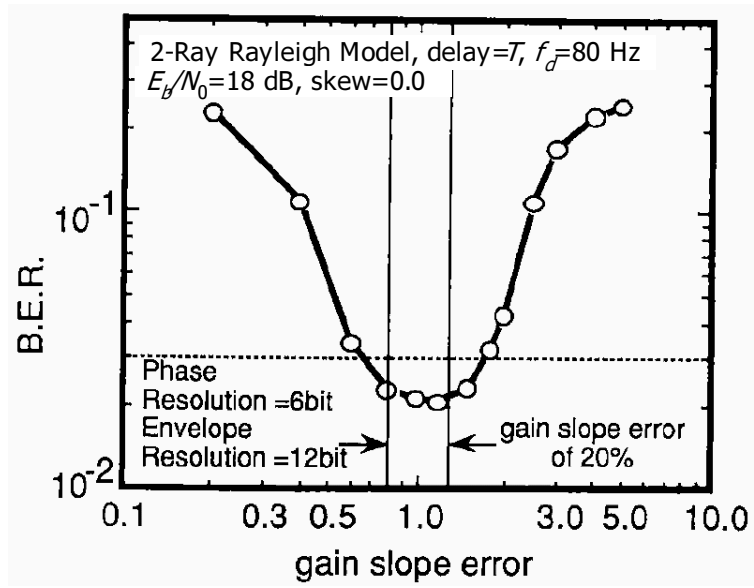


図 D-4 ビット誤り率対ログアンプゲインエラー特性

以上より、極座標信号入力に基づく移動通信用等化器は、AGC を用いずとも広いダイナミックレンジを実現できる。



## 付録E 略語集

ACS	Add, Compare and Select
ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
AGC	Automatic Gain Control
AMR-NB	Adaptive Multi-Rate-Narrow Band
API	Application Interface
ARPA	Advanced Research Projects Agency
ARPU	Average Revenue per User
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AV	Audio Video
B-ISDN	Broadband Integrated Service Digital Network
BSD	Berkeley Software Distribution
CD	Compact Disc
CDMA	Code Division Multiple Access
CH	Correspondent Host
CoA	Care-of-Address
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DSP	Digital Signal Processor
DTCP	Digital Transmission Content Protection
FTTH	Fiber To The Home
G-ID	Geographical Identifier
G-IP	Geographical IP
HA	Home Agent
HN	Home Network
http	HyperText Transfer Protocol
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
L-ID	Logical Identifier
L-IP	Logical IP
LAN	Local Area Network
LCX	Leaky Coaxial Cable
MA	Membership Limitation Attribution
MH	Mobile Host
MIM	Mobile Inverse MUX

MVNO	Mobile Virtual Network Operator
MLSE	Maximum Likelihood Sequence Estimation
NGN	Next Generation Network
MR	Mobile Router
NSF	National Science Foundation
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OS	Operating System
PAC	Predict And Correct
PBX	Private Branch eXchange
PDU	Protocol Data Unit
PHS	Personal Handy-phone System
POP	Post Office Protocol
PN	Physical Network
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QT-LMS	Quick Tracking-Least Mean Square
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTT	Round Trip Time
S-ID	Session Identifier
SAP	Session Announcement Protocol
SH	Stationary Host
SIer	System Integrater
SIM	Subscriber Identity Module
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
TA	Transferable Attribution
TDMA	TimeDivision Multiple Access
TTL	Time-To-Live
VIP	Virtual IP
VN	Virtul Network
VoIP	Voice over IP
WDM	Wavelength Division Multiplexing

## 本論文に関する原著論文

### 学会論文

1. Kazuhiro OKANOUE, Akihisa USHIROKAWA, Hideho TOMITA, Yukitsuna FURUYA, “A Fast Tracking Adaptive MLSE for TDMA Digital Cellular Systems”, IEICE Trans. Commun., vol. E77-B, no. 5, pp. 557-565, May 1994.
2. 岡ノ上和広, 後川彰久, 古谷之綱, “分数間隔サンプル型最ゆう系列推定器”, 信学論(B-II), vol. J77-B-2, no. 10, pp. 517-527, 1994年10月.
3. Kazuhiro OKANOUE, Tomoki OHSAWA, “IP Mobility Support with IP-Squared ( $IP^2$ ) Encapsulation Technique”, IEICE Trans. Commun., vol. E80-B, no. 8, pp. 1198-1207, August 1997.

### 国際学会発表(査読有り)

1. Kazuhiro OKANOUE, Akihisa UHIROKAWA, Hideho TOMITA, Yukitsuna FURUYA, “New MLSE Receiver Free from Sample Timing and Input Level Controls”, Proceedings of IEEE 43rd Vehicular Technology Conference, pp. 408-411, Secaucus NJ, USA, May 1993.
2. OHSAWA, T., OKANOUE, K., TAKEDA, “A Network and Transport Layers for Mobile Computing over Internet”, Proceedings of 28th European Microwave Conference 1998, vol. 2, pp. 772-777, Amsterdam, Netherlands, October 1998.
3. Tsuneo NAKATA, Yusuke NOGUCHI, Yukinori SUDA, Kazuhiro OKANOUE, Shuntaro YAMAZAKI, “BBRide -Broadband Internet Access Onboard Rapid Transportation-”, Proceedings of the 7th Conf. International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication 2004, MA4-3, pp. V1-92-V1-96, Abano Terme, Italy, September 2004.
4. Kazuhiro OKANOUE, Katsutoshi TSUKAMOTO, Shozo KOMAKI, “New Competition Rule Strategy of the Enterprise Internal Wireless Telephony Systems over Licensed Bands in Japan”, Proceeding of 18th Biennial Conference, 29-1-J-3, International Telecommunications Society, June 2010.

### 研究会発表

1. 岡ノ上和広, 後川彰久, 古谷之綱, “サンプリング位相ずれに強い分数間隔サンプル型 MLSE 受信器”, 電子情報通信学会技術研究報告 無線通信システム RCS92-33, 1992年6月.
2. 岡ノ上和広, 後川彰久, 古谷之綱, “QT-LMS アルゴリズムを用いた適応形 MLSE 受信機の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 無線通信システム, RCS92-119, 1993年1月.
3. 岡ノ上和広, 大澤智喜, 後藤浩也, 小松啓一郎, “ダブル IP( $IP^2$ )ヘッダ化による移動端末対応 IP 方式の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 交換システム, SSE95-93, 1995年9月.
4. 岡ノ上和広, 大澤智喜, “移動ホスト対応に向けた IP Multicast の拡張”, 電子情報通信学会



技術研究報告 交換システム, SSE97-133, 1997年10月.

5. 岡ノ上和広, 中田恒夫, 丹生隆之, 田島寛士, 山崎俊太郎, 矢野秀和, “鉄道インターネットサービス: BBRide”, 第41回鉄道サイバネ・シンポジウム, 論文番号 812, pp. 1-4(CDROM), 2004年11月. (査読有)

## 全国大会

1. 岡ノ上和広, 後川彰久, 古谷之綱, “サンプリング位相ずれに強い MLSE 受信器”, 1992年電子情報通信学会春季大会, B-297, 1992年3月.
2. 後川彰久, 岡ノ上和広, 富田秀穂, 古谷之綱, “極座標信号入力形移動通信用等化器の提案”, 1992年電子情報通信学会秋季大会, B-263, 1992年9月.
3. 岡ノ上和広, 後川彰久, 富田秀穂, 古谷之綱, “極座標信号入力型移動通信用等化器の特性”, 1992年電子情報通信学会秋季大会, B-264, 1992年9月.
4. 岡ノ上和広, 後藤浩也, 小松啓一郎, 大澤智喜, “新 Mobile-IP 方式 -アーキテクチャと導入シナリオ-”, 情報処理学会第50回(平成7年前期)全国大会, 1U-7, 1995年3月.
5. 岡ノ上和広, 後藤浩也, 小松啓一郎, 大澤智喜, “新 Mobile-IP 方式 -登録, 転送, 追跡機能-”, 情報処理学会第50回(平成7年前期)全国大会, 1U-8, 1995年3月.
6. 岡ノ上和広, 小松啓一郎, 後藤浩也, 大澤智喜, “新モバイル IP 方式 -導入シナリオとアーキテクチャ-”, 1995年電子情報通信学会総合大会, B-785, 1995年3月.
7. 岡ノ上和広, 後藤浩也, 小松啓一郎, 大澤智喜, “新モバイル IP 方式 -登録, 追跡機能-”, 1995年電子情報通信学会総合大会, B-786, 1995年3月.
8. 岡ノ上和広, 大澤智喜, “移動ホストを考慮した IP Multicast パケット転送制御”, 1997年電子情報通信学会総合大会, B-7-147, 1997年3月.
9. 岡ノ上和広, 中田恒夫, 須田幸憲, 小野真裕, 野口裕介, 山崎俊太郎, “移動体インターネット(1) -基本コンセプトとシステム構成-”, 2004年電子情報通信学会総合大会, B-5-163, 2004年3月.