



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	デジタル統合サービス向け小型ユーザ局を対象とした国際衛星通信システムの設計に関する研究
Author(s)	野原, 光夫
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第4974号
Issue Date	1996-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3112163
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51344
Type	doctoral thesis
File Information	000000297355.pdf



デジタル統合サービス向け小型ユーザ局を対象とした
国際衛星通信システムの設計に関する研究

野原光夫

①

デジタル統合サービス向け小型ユーザ局を対象とした 国際衛星通信システムの設計に関する研究

野原 光夫

内容梗概

衛星通信では、今後の多様なデジタルサービスの提供に向けてその多元接続性、同報性、運用の柔軟性、機動性、広域性、広帯域性等の特長を活かしたシステムの設計、設計結果の実現および検証が重要な研究課題となっている。

本論文は、小型地球局からなるユーザが直接衛星にアクセスする形態の国際衛星通信システムにおいて、ユーザの伝送要求に応じつつ衛星資源の活用を図るための通信システム設計およびその要素技術の試作評価に関する一連の研究成果をまとめたものである。その主な目的は、より小型のユーザに対して、より簡便でかつ適切な通信手段を提供することにある。さらにこの通信システムは、多様なデジタルサービスの利用を目指すユーザの指向に即したものでなければならない。

本研究は、現状の衛星通信に即したシステム構成および衛星構成まで含めた将来的なシステム構成について段階的に検討を行ったものであり、以下の6章から構成される。

第1章は緒論であり、本研究の目的と構成について述べた。

第2章では、現在の代表的な衛星としてインテルサット衛星を想定し、周波数帯域として小型地球局の利用を容易にするKu帯(14/11, 12 GHz帯)を中心に、ユーザを直接収容する国際ビジネス衛星通信サービスを効率良く運用するための網構成、デマンド割当て方式および伝送方式について具体的な設計を行った。この結果、衛星資源の一元的な管理とユーザ情報の分散的な管理を同時に効率良く行うために集中制御と分散制御を併用する階層的な網構成を提案した。衛星回線に関しては、呼制御情報を伝送する制御回線とトラヒック・データを伝送するトラヒック回線を個別に設け、制御回線は固定接続とし、トラヒック回線は呼の発生毎に所要の回線を適宜設定するデマンド割当て運用を採用した。伝送方式としてはTDMA回線を用い、回線種別ごとのダイナミックな容量割当ておよび衛星リソースの有効利用を図ると共に、各種地球局を統合的に包括したIBSシステムを構築した。

これら設計に基づき実験システムを開発した。この実験システムを用いて衛星実験を行った結果、伝送特性についてはC/N対BER特性の理論値からの劣化が1 dB以内、呼接続遅延特性については回線設定所要時間が10秒以内と、それぞれ所望の特性が得られることを確認した。

第3章では、多数の受信専用ユーザ局を対象として同報モード衛星回線を用いてデータ配信を行うシステムに階層的な制御網を適用する構成を提案した。このシステムではユーザ局の他に衛星を介したデータ配信を行う1つの中央局と、ユーザごとの受信確認を行う複数の副制御局を設ける構成を採用した。この階層的な網構成において、中央局－副制御局間と副制御局－ユーザ局間の処理時間の比をパラメータとしてポーリングによる受信状態応答処理時間を最小にする最適な副制御局数があること、ユーザ局の通信コストをパラメータとして階層化制御網構成のほうが従来の集中網構成よりシステムコストを低減し得ることを明らかにした。またこの網構成をもとにG3ファクシミリ同報配信システムの試作を行い、その動作を確認した。

第4章では、複数の低周回軌道衛星を用い、光衛星間リンクにより広帯域衛星間通信を実現する構成を提案し、ユーザ／衛星間および衛星間リンクの伝送パラメータを解析した。この結果、ユーザ／衛星間リンクでは衛星地上高度とユーザからの最小運用仰角がサービス品質要求および装置実現の観点から重要なパラメータとなることを示した。具体的には伝送損失、衛星可視期間そして所要衛星数について調べ、各項目ごとに衛星高度と最小運用仰角の最適値が異なってくること、従って衛星パラメータを決定するにはトレードオフスタディが必要となることを示した。

衛星間リンクについては、衛星の軌道解析により2衛星間の伝送パラメータの変化を調べた。その結果、同一軌道面上の隣接衛星間ではその相対的な位置がほぼ固定されることから光衛星間通信を用いた広帯域リンクの設定に適していること、および隣接軌道面上を同一方向に周回する衛星間では極域において大きく変化することを明らかにした。この結果をもとに、隣接する軌道面上の同一方向に周回する衛星間に、低緯度地域のリンク状態

が安定している期間のみ軌道面間リンクを設定する網構成を提案した。この網構成により、任意の2地点間を衛星リンクのみで接続し、全世界をカバーする通信網を構築することができる。

さらに光衛星間リンクについて回線設計を行い、低周回衛星間では 3,000 km 程度の距離を見込めば良く、この程度の衛星間距離を対象とした場合の伝送パラメータが現在の光学および光通信技術で実現可能であることを示した。

第5章では、第4章に示した広帯域光衛星間リンクを実現するための核となる半導体レーザ送信機の実現性を実証するため同装置の設計および試作評価を行った。その結果、0.8ミクロン帯のLDを対象に出力 60 mW、伝送速度 2.5 Gbit/s、波面精度 $\lambda/16$ で直径 5 mm の円形コリメート光出力を得た。この試作において、コリメータは非球面レンズの適用により全長 50 mm、3枚のレンズ構成で上記特性を達成した。これにより小型・軽量で特性の優れたLDコリメータを実現できる見通しを得た。併せて、非球面シリンドーレンズにより全長 30 mm、2枚のレンズ構成で同等の特性が得られる設計結果を示した。また、実際の通信装置を構成する際に必要となるシリコン・アバランシェフォトダイオードを用いた光受信機も開発した。この受信機はカプリング光学系の損失を除いた平均光受信レベル -30.6 dBm でビット誤り率 1×10^{-9} を達成し、0.8 ミクロン帯での従来の検討の最高速度である 2.5 Gbit/s 伝送が可能であることを示した。また今後の課題として、これら伝送装置の衛星間通信以外の分野への適用が考えられることを示した。

第6章は結論であり、本論文のまとめを行うと共に今後の課題について整理し、小型ユーザ局を対象とした国際衛星通信システムの将来的な展望を示した。

以上

目次

第1章 緒論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的と内容	2
第2章 デマンド割当て／国際ビジネス衛星通信システムの設計	7
2. 1 緒言	7
2. 2 IBSシステムの網構成	8
2.2.1 集中局と網制御局による網運用	10
2.2.2 衛星回線の構成	11
2.2.3 制御回線	12
2.2.4 トラヒック回線	13
2.2.5 デマンド割当て制御用信号方式	15
2. 3 キャリア／クロック再生および同期方式	16
2.3.1 キャリア／クロック再生	17
2.3.2 フレーム／バースト同期	18
2. 4 トラヒック回線の設計	21
2.4.1 フレーム／バースト構成	21
2.4.2 衛星回線割当て方式	22
2. 5 制御回線の設計	25
2.5.1 デマンド割当て用制御プロトコル	25
2.5.2 フレーム／バースト構成	28
2. 6 送信電力制御方式	31
2. 7 実験システムの構成	32
2. 8 衛星実験	35
2.8.1 伝送特性	35
2.8.2 呼接続遅延特性	35
2.8.3 UPC制御特性	37
2. 9 結言	38
第3章 階層化分散制御を用いた衛星同報システムの設計	41
3. 1 緒言	41
3. 2 階層化分散制御網構成	43
3. 3 制御網構成の評価	44
3.3.1 受信状況確認応答処理時間	44
3.3.2 制御網コスト	48

3. 4	同報モード衛星回線を用いたG3ファクシミリ配信システムの設計	51
3.4.1	制御シーケンス	52
3.4.2	データフレーム繰返し伝送	54
3. 5	G3ファクシミリ配信実験システムの開発	58
3. 6	結言	61
第4章	光衛星間通信を用いた低集回衛星通信システムにおける リンク特性評価および回線設計	63
4. 1	緒言	63
4. 2	ユーザ／衛星間回線	65
4.2.1	伝送損失	66
4.2.2	ユーザ端末からの衛星可視期間	69
4.2.3	所要衛星数	70
4. 3	衛星間リンク	71
4.3.1	リンク解析	71
4.3.2	光衛星間リンク回線設計	79
4. 4	結言	81
第5章	光衛星間通信用LD送信機の設計と特性	83
5. 1	緒言	83
5. 2	LD送信機の設計	85
5.2.1	LDコリメータ	86
5.2.1.1	LDコリメータの小型化	89
5.2.2	LDドライバ	92
5. 3	LD送信機の特性	93
5.3.1	LDコリメータ	93
5.3.2	LDドライバ	94
5.3.3	LD送信機	95
5. 4	Si-APD受信機の開発	99
5.4.1	Si-APD受信機の設計	100
5.4.2	Si-APD受信機の特性	102
5. 5	結言	104
第6章	結論	107
	謝辞	110
	参考文献	111
	発表論文リスト	116

第1章 緒論

1. 1 研究の背景

衛星通信は、1960年代のサービス開始から現在まで30年以上にわたる運用実績を有してきている。その歴史は静止軌道衛星を中心とし、衛星の大型化、高機能化に沿って進展してきている^{(1),(2)}。また最近では、黎明期に用いられていた低、中高度の周回軌道衛星に再び着目して新たな移動体衛星通信サービスが提案され、インマルサット-Pやイリジウム計画等、システム実現に向けての検討が各所で進められている⁽³⁾。

国際通信の分野においては、インテルサットにより一元的にサービスが提供され、順次衛星の大型化、高機能化が図られてきた。最近では、インテルサットの他、ユーテルサット等の地域システム、パンナムサット等の個別国際システム、パラパやアジアサット等の個別システム、日本サテライトシステムズのJCSAT衛星や宇宙通信のSuperbird衛星による日本国内システム等、多様な衛星通信システムが運用されるようになってきている⁽⁴⁾。そして衛星の高機能化ともあいまって、かつての30m級のアンテナを用いた国際通信キャリアによる広帯域基幹伝送から、小型の地球局を用いたユーザの個別システムやテレビジョン番組配信等へと通信サービスの内容も多様化してきている。

また、1982年よりインマルサットが移動体ユーザを対象に国際移動体衛星通信サービスを提供しており⁽⁵⁾、その対象も当初の船舶から航空機、そして携帯端末へと広げられ、現在では重量10kg程度の携帯端末からの電話利用が実現されている。この通信サービスはさらに1999年から開始予定のインマルサット-Pでは350g程度のハンディターミナルにも拡張される計画である。

衛星通信はこれまで、短波通信や同軸海底ケーブル等に替わる大容量伝送路の提供手段として発展してきた。しかしながら1980年代以降、より大容量の伝送媒体として光ファイバ海底ケーブルが開発され⁽⁶⁾、これにより国際通信において主要国間を接続する広帯域伝送メディアとしての役割は、今後順次光海底ケーブルに移行するものと思われる。

一方、地上通信網では情報速度64 kbit/sの回線を主体としたISDNサービスからさらに高速・広帯域なB-ISDNサービスへと、音声だけでなく画像やデータを含めた多様なデジタルサービスが総合的に提供されるようになってきており⁷⁾、衛星通信もこれに対応していくことが求められる。

このような一連の衛星通信の発展および周辺状況の変化に伴い、今後の衛星通信では多元接続性、同報性、運用の柔軟性、機動性、広域性、広帯域性等の特長を活かしたシステムの開発、提供が重要となってくる。そしてこの通信システムは、今後さらに多様化するデジタルサービスのニーズに応えたものでなければならない。本論文では、このような背景のもと、将来的な衛星通信システムの設計およびその実現のために必要となる伝送系の要素技術について論じている。

1. 2 研究の目的と内容

今後の衛星の利用形態の一つとして、衛星の多元接続性および運用の柔軟性を活用するものとしてユーザが直接衛星にアクセスする構成が考えられる。このシステムを構築するには、小型のユーザ地球局の利用を可能とする衛星の高機能化および衛星回線の設定が必要であり、また異なる伝送特性のユーザ地球局を一元的に収容する配慮が必要である。さらに衛星回線を効率的に運用するには、ユーザの要求毎に衛星リソースを割当ててデマンド割当て運用が重要な技術となる。また網を高い信頼性でかつ柔軟に運用していくためには、網の運用制御とユーザ情報の管理を効果的にそれぞれ実施する必要がある。そして将来的には、従来の静止軌道衛星に留まらず、低高度周回軌道衛星を用いた衛星通信システムの検討も、ユーザ地球局の一層の小型化や高機能化に対応するために必要となる。一方ユーザ局においては、回線設定のための伝送機能の他、通信網に直接収容される加入者端末としての回線設定／解放に係わる呼制御機能の実現、その他付加サービスへの対応等が必要となる。また、これら衛星通信システムおよびユーザ局として、地上固定網やセルラ網等の多様な伝送メディアも統合的に活用し、所望のデジタル伝送サービスを効率的に

実現し、運用するものが要求されてくる。

本論文では、小型地球局からなるユーザが直接衛星にアクセスする形態の国際衛星通信システムにおいて、ユーザの伝送要求に随時応じつつ衛星資源の活用を図る通信システムの設計およびその実現のために必要となる伝送系の要素技術の試作評価に関する一連の研究成果を示している。その主な目的は、より小型の設備で多様なデジタルサービスの利用を指向するユーザに対して、より簡便でかつ適切な通信手段を提供することにある。

本研究では、まず現状の衛星通信に即したシステム構成について、次いで衛星構成まで含めた将来的なものについてと段階的に検討を行った。

以下、本論文の内容をその章構成に沿って示す。

第2章では、現在の代表的な衛星としてインテルサット衛星を想定し、周波数帯域として小型地球局の利用を容易にするKu帯(14/11, 12 GHz帯)を中心に、ユーザを直接収容する国際ビジネス衛星通信(IBS)サービスを効率良く運用するための網構成、デマンド割当て方式および伝送方式について具体的な設計を行う。

IBSシステムは現在固定接続により運用が行われているが、将来的には衛星リソース有効利用の観点から、衛星回線のデマンド割当て運用に基づくシステムに発展するものと考えられる。そこでこの種の次期IBSシステムの設計に関して、網構成、デマンド割当て制御、衛星回線構成等について論じる。まず、網として要求される機能を網管理運用と加入者管理に分類し、各々を単一の集中局と複数の網制御局で実行する網構成が、国際通信での運用の観点から適していることを示す。衛星回線に関しては、デマンド割当て制御情報を伝送する制御回線とトラヒック・データを伝送するトラヒック回線をT DMA運用に基づき個別に設け、制御回線は固定接続、トラヒック回線はデマンド割当て運用とすることによって、KuおよびCバンド用の各種地球局を包括したグローバルなシステムが実現可能であることを示す。また、伝送、回線割当て、呼処理等の各種特性に基づく設計より、IBSシステムに適した上記両回線の具体的なフレーム／バースト構成を明らかにする。

この設計結果に基づき実験用デマンド割当て／T DMA通信装置を開発し、インテルサッ

ト衛星を用いたフィールド実験を実施し、開発したシステムが良好な通信特性を達成していることを確認した。本章ではさらにこの実験システムおよび試作装置の構成、そして衛星フィールド実験結果について示す。この実験システムは集中局と網制御局から構成され、この階層的構成により信頼性の高い網運用と柔軟なユーザ情報管理が行われている。また、トラヒック回線として伝送速度4.64 Mbit/sのTDMA衛星回線を複数波利用するマルチキャリアTDMA方式を採用することにより、1波当たり2 Mbit/sまでのISDNプライマリ回線を収容しつつ、衛星回線の効率の良い利用を可能としている。

第3章では、衛星通信の同報性を活用したシステムとして、多数の受信専用ユーザ局を対象に同報モード衛星回線を用いてデータ配信を行うシステム構成について検討する。ここではこの同報システムにおけるユーザごとの受信確認を効率的に行うべく、ユーザ局に衛星を介したデータ配信を行う1つの中央局と、ユーザごとの受信確認を分散して管理する複数の副制御局からなる階層的な制御網構成を提案する。そしてこの制御網構成の評価を行い、地上回線を用いてユーザごとの受信確認を順次行う際に応答処理時間の観点から分散制御局数に最適値があること、階層化制御網構成を用いることにより、従来の構成と比べてユーザ回線コスト部分の低減が図れる場合にはかえってシステムコストを低減できること等を定量的に明らかにする。

さらにこの階層的な網構成設計結果をもとに、G3ファクシミリデータを対象とした受信確認機能付き衛星同報FAXシステムを開発し、その動作を確認した。このシステムはパーソナルコンピュータをベースとした3局分の通信装置から構成されている。本章ではこの試作システムの構成および実験結果についても示す。

第4章では、機動性、広域性、そして広帯域性に富んだ将来的な通信システムとして移動体を対象に高速・広帯域通信サービスを提供する衛星通信システムについて論じており、その国際的なシステムの実現のために複数の低集回軌道衛星を用い、光衛星間リンクによる広帯域衛星間通信を採用した構成を提案する。本章では、低周回軌道衛星を対象に、ユーザ／衛星間リンクおよび衛星間リンクについて検討した結果を示す。ユーザ／衛

星間リンクについては、リンク損失、ユーザからの衛星可視期間、そして所要衛星数の観点から、それぞれ衛星地上高度と最低運用仰角の影響について定量的に調べ、衛星地上高度と最低運用仰角がサービス定義および通信装置実現の観点から重要なパラメータとなることを示す。衛星間リンクについては、極円軌道を対象に軌道条件をパラメータとしてそのリンク状態の変化を調べた。その結果、同一軌道面上の2つの衛星間ではそのリンク状態が極めて安定しており、あたかも固定リンクであるかのようにみなすことができることから、光を用いた広帯域伝送リンクの設定に適しているとの判断を得た。一方、隣接する軌道面上の衛星間ではそのリンク状態が高速かつ広範囲に変化している。このような条件のもとで隣接する軌道面間のリンクを延ばすために、同一方向に周回する隣接軌道面上の衛星間に、低緯度地域上空においてリンク状態が安定している場合にのみリンクを設定する構成を提案する。光衛星間リンクの回線設計では所要レーザ出力等を明らかにし、その値が実現可能な範囲であることを示す。

第5章では、第4章に示した大容量光衛星間通信を実現するための重要な鍵となる半導体レーザ送信機について論じる。この光衛星間通信用半導体レーザ(Laser Diode: LD)送信機では高出力、高速応答そして良好な光ビーム形状を備えたものが要求される。この要求に応えるものとして、波長 $0.83\ \mu\text{m}$ 帯のLDを対象に高波面精度を得るためのLDコリメータ光学系および高速応答を得るためのLDドライバを設計・試作し、それらを組合せてLD送信機を実現した。設計では、LDコリメータについては高波面精度の達成と所要レンズ枚数の低減を目指し、非球面レンズを適用することによってレンズ3枚でコリメータが構成できること、さらに回転対象系以外の非球面レンズを用いれば2枚で構成できることを示す。LDドライバについては大電流・高速応答を実現するためにLD高速駆動用ガリウム・砒素集積回路(GaAs-IC)を並列に配置し、電流合成を行う構成にした。この設計に基づいて実際にLD送信機を試作し、特性を評価した結果、LD送信機からの直径5mmのコリメート光出力として出力 60 mW、伝送速度 2.5 Gbit/s、波面精度 $\lambda/16$ を達成した。この結果は低周回軌道衛星間での光ISLシステム要求を満足し得る。本章ではこのLD送信機の設

計・試作評価結果を述べる。

また、このLD送信機と対向して伝送系を構成するのに必要となるシリコン・アバランシェフォトダイオード(Si-APD)を用いた受信機を開発し、その受信特性を調べ、 $0.8\ \mu\text{m}$ 帯での2.5 Gbit/s伝送のための送受信系が実現可能であることを示した。本章ではこのSi-APD受信機の開発結果についても述べる。

第6章では、結論として本研究で得られた一連の成果をまとめると共に今後の課題について整理し、小型ユーザ局を対象として多様なデジタルサービスを統合的に提供する国際衛星通信システムの将来的な展望についてとりまとめる。

第2章 デマンド割当て／国際ビジネス衛星通信システムの設計

2.1 緒言

衛星通信は、その多元接続性により多様なデジタル回線を容易にかつ経済的に提供し得る。近年この特長を生かして、ビルの屋上や工場敷地内等のユーザに小型の地球局を設置し、小型地球局から衛星へ直接アクセスすることによって、地上通信網の制約なく、音声、画像、データ等の各種デジタル通信サービスを総合的に提供するビジネス衛星通信サービスが、企業間通信を中心として積極的に導入される傾向にある。これまでに実用化された国内および地域通信分野における典型的なビジネス衛星通信システムとしては、米国のSBS^{(8),(9)}、フランスのTELECOM 1^{(10),(11)}、日本のCS2⁽¹²⁾および欧州EUTELSATのECS/SMSが挙げられる。

このような小型地球局から構成される国内／地域ビジネス衛星通信システムの実用化と並行して、企業間の国際ビジネス衛星通信トラヒックを疎通することを目的とした国際ビジネス衛星通信(International Business Satellite Communications: IBS)システムが、1983年末よりインテルサットによりインテルサットビジネスサービスとして運用されている⁽¹³⁾。この初期の国際ビジネス衛星通信は、SCPC/FDMA方式に基づき衛星回線を固定接続した専用線をベースとした通信形態で運用されており、当面この通信形態で移行するものと予想される。一方、ISDNを中心とするデジタル通信サービスの今後の普及にともない、衛星電力や周波数帯域等の限定された衛星リソースを効率的に使用するIBSシステムの構築が、次段階として要求されることになろう。

衛星回線をユーザ間で共有し、呼の要求ごとにユーザ間に適宜衛星回線を設定する衛星回線のデマンド割当て機能は、多元トラヒック処理時にも衛星リソースの利用効率を著しく向上させうる⁽¹⁴⁾という点で、次期IBSシステムに必須の機能と考えられる。しかしながら、国際通信を目的としたIBSシステムでは、多数の小型地球局が各国に分布し、しかも衛星への直接アクセスによって、それら地球局間の通信がデマンドベースで実行されることより、回線割当て、加入者照合を含む呼処理が大きな課題となる。また、小型アンテナ

による通信を可能とすべく衛星上に搭載されたマルチスポットビーム構成もIBSシステムの広域性を達成する上で大きな要因となる。

さらに、異なる特性を有する各種地球局（例えば、インテルサット標準E1～E3やF1～F3地球局）に対して、ユーザの要求に応じた多様な伝送サービスを同等の品質で提供することが必要である。また、これら異なる特性を有する各種地球局に対して、ユーザの要求に応じた多様な伝送サービスを同等の品質で提供することが必要である。

筆者等は、IBSシステムの上記特殊性を考慮して、システム実現の鍵となる網構成、デマンド割当て制御、デジタル伝送等の各種技術に関する検討を進め、その結果に基づき次世代IBSシステムの設計および実験システムの開発を行い、さらにインテルサット衛星を使用した衛星実験によりその評価を行った。

本章は、このIBSシステムの設計・開発結果について述べたものであり、2. 2では国際通信の特殊性を考慮した網構成を中心に述べる。2. 3から2. 6では、衛星回線のTDMA伝送方式、フレーム構成、デマンド割当て方式、制御プロトコル、送信電力制御方式等に関する具体的な設計手順と設計結果に関して、定量的評価を含めて詳細に論じる。続いて2. 7において開発した実験システムの構成について示し、2. 8に衛星実験により得られた評価結果について述べる。そして2. 9にまとめを示す。

2. 2 IBSシステムの網構成

デマンド割当てに基づくIBSシステムの具体的設計を進めるに当たって、まず以下のサービス条件を考慮した。

(1) デマンド割当てによる回線交換サービスの提供

衛星回線のデマンド割当て運用による回線交換サービス〔固定割当て、予約および閉域ユーザグループ(Closed User Group: CUG)サービスを含む〕を提供する。

(2) ISDNデジタルサービスの総合的提供

衛星回線の割当ては、ベアラサービスを基本とする回線交換に基づき行う。また、近い将来におけるISDNの急速な進展の可能性を重視して、ISDNサービスとして規定されてい

るB (64 kbit/s)、 H_0 (384 kbit/s)、 H_{11} (1,536 kbit/s)および H_{12} (1,920 kbit/s)サービス⁽¹⁵⁾を各加入者へ提供することを前提とする。

(3) 高品質なデジタル通信サービスの提供

ビジネス衛星通信システムとして稼働しているインテルサットビジネスサービス⁽¹³⁾、SBSおよびTELECOM 1における伝送品質に準拠し、仰角 10° 以上の地球局において、晴天時 10^{-8} 以下および1年の99 %以上の時間率で 10^{-6} 以下のビット誤り率を同時に満足することを前提とする。

また、システムの運用条件としては、以下の項目を前提とした。

(1) インテルサット衛星の使用

国際間のビジネス通信という観点より、インテルサット衛星の使用を考慮する。また、各種インテルサット衛星のうち、サービスエリアを拡大するために、KuバンドのスポットビームとCバンドの半球ビームとを結合するトランスポンダを搭載したインテルサットVB(VA-IBS)号衛星⁽¹²⁾の使用を前提とする。ここで、インテルサットVB衛星は、ビジネス通信サービス用に用意されたもので、14/12GHz帯周波数の使用並びにトランスポンダチャンネル (3-4) におけるKu帯スポットビームとC帯ヘミビーム間のビーム結合モード (SBM: Super Braodcast Mode)の提供を特長としている。

(2) インテルサット標準EおよびF地球局の参加

衛星回線の固定接続により、専用線形の国際ビジネス衛星通信を提供している現行のインテルサットビジネスサービスにおいて、電氣的仕様が規定されているアンテナ径の異なるKuバンド用の三種類の標準E地球局(E1, E2, E3)およびCバンド用の標準F地球局(F1, F2, F3)⁽¹²⁾を継続的に網内に収容することを前提とする。

以下では、上記前提のもとに、IBSシステムの網構成、衛星回線の設計およびデマンド割当て制御用信号方式について概説する。

2. 2. 1 集中局と網制御局による網運用

デマンド割当てに基づくIBSシステムでは、加入者端末間の通信を実現するために、呼の発生ごとに各地球局間に衛星回線が設定される。任意の加入者間の接続を達成するためには、網は衛星回線の運用状態のみならず、各地球局ならびに各加入者の情報を正確に把握する必要がある。

網として要求される主要機能は、下記の二種類に大別される⁽¹⁶⁾。

- ・ 網管理運用機能（衛星回線の割当て、地球局情報の管理、網運用状態の把握）
- ・ 加入者管理機能（加入者情報の管理、加入者照合、課金等の呼処理）

図2. 1は、上記機能を効率的に実行する網構成を示したものである。図中、集中局 (Central Station: CS)は網内に一局だけ設けられ、上記網管理運用機能を実行する。網制御局 (Network Coordination Station: NCS)は各国または各地域ごとに設けられ、自局が管轄す

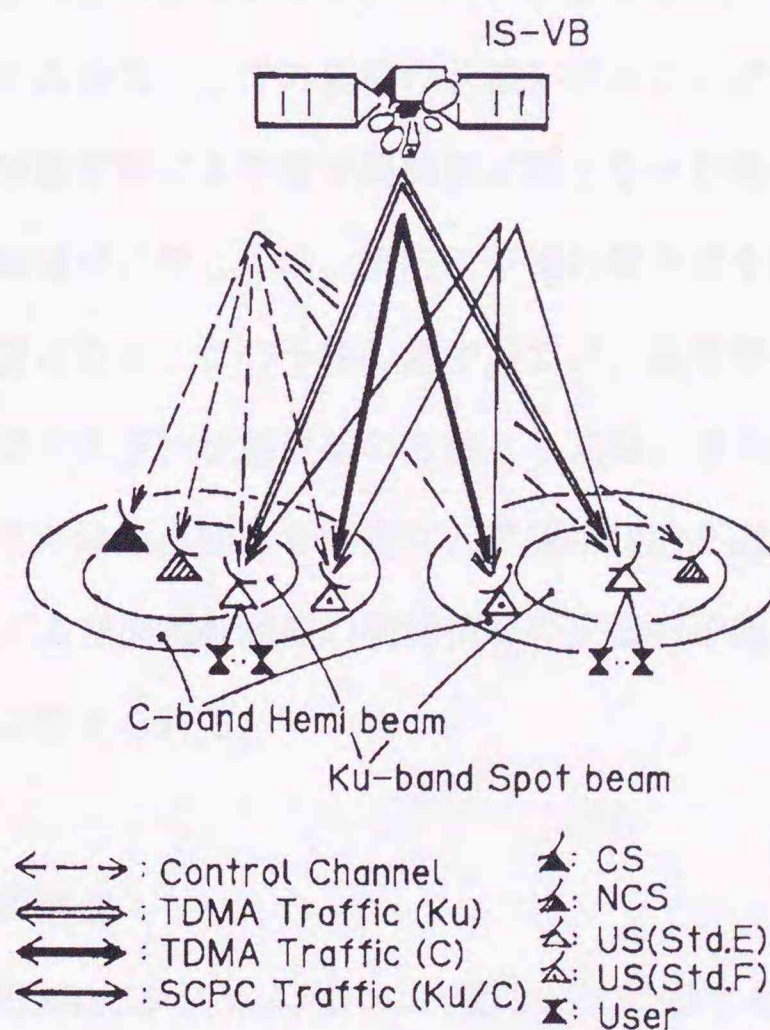


図2. 1 IBS網構成

る加入者に対して上記加入者管理機能を実行する。加入者が接続されるその他の多数の地球局（以下、ユーザ局(User Station: US)と呼ぶ）は、加入者からの呼発生の要求を集中局へ伝達し、集中局からの指示に基づき相手加入者が接続されているユーザ局との間に衛星回線を適宜設定する。

上記網構成の利点は、以下の通りである。

(1) 衛星回線の管理運営は集中局によってのみ実行されるので、信頼性に富んだ効率的な衛星リソースの使用が可能となる。更に、各ユーザ局は集中局からの指示に基づき、衛星回線を忠実に設定すればよく、ユーザ局の機能の簡素化が図れる。

(2) 複雑かつ取扱いに注意を要する加入者関連の情報の分散管理が可能となる。従って、各網制御局は自局管轄の加入者個々に関する情報の更新、通信の履歴等を独自に、しかも柔軟に処理することが可能となる。

(3) 各ユーザ局で要求される主要機能は、集中局からの指示に基づく衛星回線の設定と自局に接続されている加入者の管理になる。網内に多数存在するユーザ局の機能を簡素化することにより、システム全体としての価格の低減を図ることが可能となる。

なお、太陽妨害や設備障害等により集中局機能が断となった場合には、網全体の機能が停止するため、実際の網運用に際しては、網内に予備の集中局を設置して、集中局交替手順を実行することが必要となる。この予備の集中局では、運用中の集中局と同一の網運用状態を常時把握する必要があり、状態更新の方法としては、運用中の集中局と予備の集中局との間に独自の衛星または地上回線を設定し、網運用状態を適宜転送する方法や、運用中の集中局、ユーザ局および網制御局間の制御情報の交信を予備の集中局がモニタして、状態を更新する方法等が考えられる。

2. 2. 2 衛星回線の構成

提案するデマンド割当てIBSシステム内には、図2. 1に示すとおり2種類の衛星回線（制御回線とトラヒック回線）が設けられる。制御回線は、集中局、網制御局及びユーザ局間のデマンド割当て情報の伝達に使用される。一方、トラヒック回線は呼の発生ごとに

ユーザ局間に設定され、実際のトラヒックデータの伝送に用いられる。

ここで制御回線とトラヒック回線を別々に設けているのは、トラヒック回線については対象とするインテルサットシステムで用いられているKu帯東西スポットビーム、C帯東西ヘミビームの多様なビーム接続要求に対応可能とし、一方、制御回線はSBMトランスポンダ内に配置することにより、すべての参加ユーザ局が同一の制御回線にアクセスできるようにしたためである。以下、各衛星回線ごとに伝送系の構成を説明する。

2. 2. 3 制御回線

IBSシステム内には、集中局とユーザ局間および集中局と網制御局間の2種類の制御回線が設けられる。デマンド割当て情報を伝送するこれら制御回線の設計に当っては、下記の特性を十分考慮する必要がある。

- (1) デマンド割当てに関わる呼処理特性の劣化を招かないような良好な伝送品質
- (2) インテルサット標準EおよびF地球局等各種地球局の参加を可能にするようなグローバルな接続性
- (3) 制御情報の伝送に対するユーザ局の負担をできる限り抑えるような低い所要HPA出力

上記(2)項を満足するためには、KuバンドスポットビームとCバンド半球ビームを結合するトランスポンダに制御回線を設定することが有効である。上記(1)と(3)項は相反する関係にあり、HPA出力を低減する目的で伝送速度を極端に低くすると、制御情報の伝送容量が低下し、呼処理の遅延を招く。伝送速度と呼処理特性の関係については2. 5節で述べる。

多元接続方式としては、多数のユーザ局参加時にも呼処理特性を良好に保ち、衛星回線を有効に利用すべく固定接続のTDMA方式を採用する。バースト同期に関しては、各地球局が自局送出バーストを受信できることを利用して、クローズドループ同期方式を用いる。また、制御回線において常時確立しているバーストタイミングをトラヒック回線のバースト同期へ適用することにより、トラヒック回線における呼発生ごとの初期捕捉を不

要とし、最短の回線設定時間を達成することが可能になる。本バースト同期の手順および特性については2. 3節で述べる。

性能の異なる各種地球局がアクセスする衛星回線をT DMA運用する場合の回線設計は、所望のマーゲンを得るのに最も厳しい送受地球局種別の組合せによって決定される⁽¹⁷⁾。

図2. 2は上記特殊性を考慮した回線設計結果のうち、KuおよびCバンド各々に対して最もアンテナ径の小さい標準E1およびF1地球局を対象に、伝送速度と所要HPA出力の関係を示したものである。なお、変調方式としては4相PSK変調、FEC方式としては符号化率1/2、拘束長7のたたみ込み符号化／ビタビ復号化方式を採用し、回線設計上のハードウェア・マーゲンとして1.5 dBを見込んでいる。

伝送速度に関しては、2. 5. 2で後述する呼接続遅延、図2. 2に示した所要HPA出力および変復調器の実現の容易性を考慮して160 kbit/sとした。なお、本伝送速度に対する標準E1およびF1地球局の所要HPA出力は、各々11ワットおよび37ワットとなる。

2. 2. 4 トラヒック回線

トラヒック回線は、加入者端末における呼の発生ごとにユーザ局間に設定され、トラ

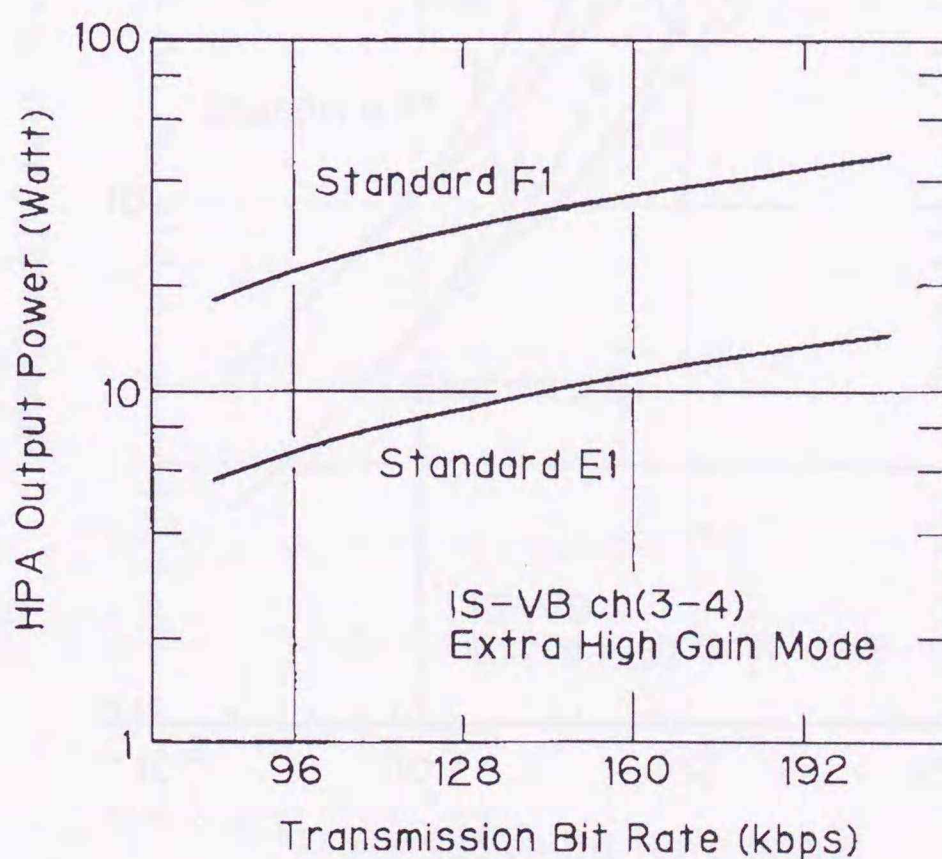


図2. 2 制御回線所要HPA出力

ビックデータの伝送に用いられる。多元接続方式の選択は、加入者へ提供するデジタルサービスの情報速度とユーザ局の所要 HPA 出力に密接に関係している。多種多様な多元トラヒックを総合的に取扱う IBS システムにおいては、所要 HPA 出力が極端に大きくなり、サービス種別のダイナミックな変更柔軟に柔軟に対処でき、衛星リソースの有効利用が図れるという点より、TDMA 方式が適している。

標準 E 地球局間相互および標準 F 地球局間相互のトラヒック回線は、各々 Ku および C バンド専用のトランスポンダを介して設定することにより、比較的低い HPA 出力で数 Mbit/s の伝送速度を得ることができる。図 2. 3 は、標準 E1 および F1 地球局が 4 相 PSK 変調された FEC 符号化率 1/2 のトラヒック回線を送受信した場合の伝送速度に対する所要 HPA 出力を、トランスポンダ当りのキャリア数をパラメータにとって図示したものである。単一キャリアによる TDMA 運用は、衛星リソースを最大限有効に利用できるが、ISDN サービス H_{12} を

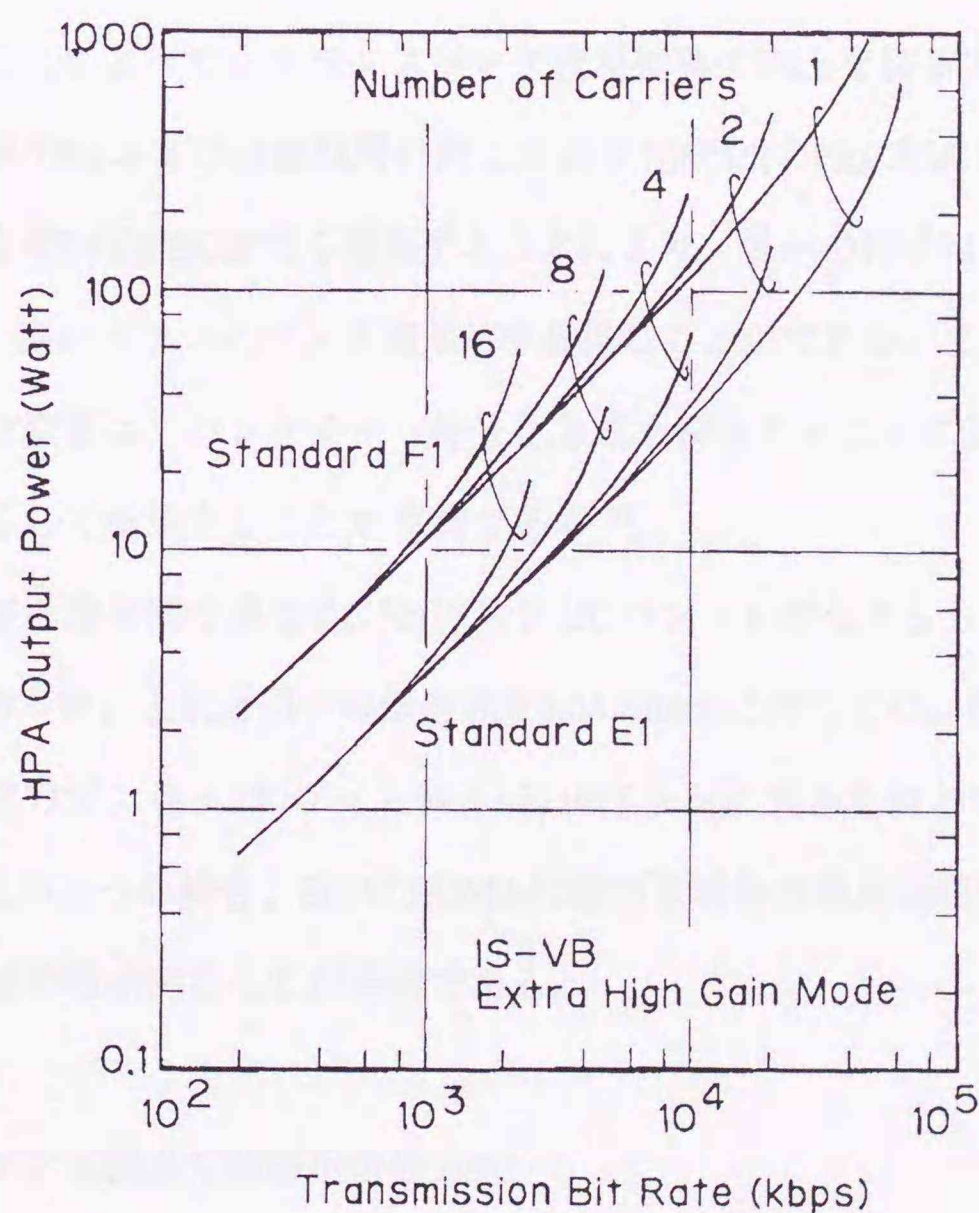


図 2. 3 トラヒック回線所要 HPA 出力

最大情報速度として提供し、通常のユーザ局当りの情報速度も同程度と考えられるIBSシステムにおいては、ユーザ局当りの所要HPA出力が不必要に大きくなるという欠点がある。一方、少数の複数キャリアによるTDMA運用は、トランスポンダ当りの総合伝送速度を大きく低下させることなく、所要HPA出力を低減できるという利点を有する。このような利点および制御回線におけるバーストタイミングのトラヒック回線への適用に関する検討に基づき、1トランスポンダ当り伝送速度4.64 Mbit/sのキャリア8波によるTDMA運用を採用する。本伝送速度は、符号化率1/2のFECにより符号化されたISDNサービスH₁₂を約20%の余裕をもって伝送する容量を有する。なお、所要HPA出力は、標準E1およびF1地球局に対して、各々31ワットおよび120ワットである。

更に、各種ユーザ局が参加するIBSシステムにおいては、FEC符号化率を適宜変化させる方法が衛星リソースの利用効率の点から有効である。これは、回線設計上必要とされるマージンが得られるように、受信ユーザ局のアンテナ径に応じて異なる符号化利得のFEC方式を適用することによって、トランスポンダ使用効率の向上を図る方法である⁽¹⁷⁾。本方法に基づき、標準E1およびF1地球局に対して符号化率1/2のFEC方式を、その他の地球局に対して符号化率3/4のFEC方式を適用することにより、単一の符号化率を一様に適用する場合に比べて、高いトランスポンダ使用効率を得ることができる。また、FEC符号化率のダイナミックな変更は、パンクチャド符号化方式を採用することにより、ハードウェアの大幅な増大なくして実現することが可能である⁽¹⁸⁾。

なお、標準EとF地球局間の通信は、KuバンドとCバンドを結合するトランスポンダを介して実現可能であるが、上記と同一の伝送速度4.64 Mbit/sに対しては、標準E1およびF1地球局の所要HPA出力が、各々220ワットおよび710ワットと大きな値となり、実用的でない。すなわち、このような場合、SCPC/FDMAに基づき所望の衛星回線を個々に設定し、HPAに対する負担を軽減することが得策である。

2. 2. 5 デマンド割当て制御用信号方式

IBSシステムにおける信号方式としては、集中局、網制御局およびユーザ局間の衛星回

線のデマンド割当て制御にかかわる衛星系シグナリングとユーザ局と加入者端末間の回線設定にかかわる地上系シグナリングとがある。

衛星系シグナリングは、ユーザ局間の衛星回線の呼ごとの設定を能率よく、しかも確実に達成できるように設計されなければならない。また、技術的問題点を最小限に抑え、地上系シグナリングとの整合性を図るために、できる限り既存の標準信号方式に準拠することが望ましい。集中局、網制御局およびユーザ局の各地球局をシグナリング情報を終端する交換局と位置付け、各種サービスを統合的に取扱い、多種多様な機能を有するという点より、ITU-T (旧CCITT) 信号方式No. 7⁽¹⁹⁾を衛星系シグナリングとして採用する。なお、レベル4における制御プロトコルは、できる限り、No. 7のISDNユーザ部(ISUP)で規定されているプロトコルに準拠するが、両方向、片方向、送受異速度の各種サービスの提供、割当て衛星回線番号の指示等IBS特有の機能を実現するために、新規メッセージを追加する。制御プロトコルの詳細については、2. 5節で述べる。

加入者端末とユーザ局間の地上系シグナリングに関しては、近い将来におけるISDN用端末の急速な普及の可能性を重視して、加入者端末が直接ユーザ局に接続される形態に対しては、ISDN信号方式であるDチャンネル・プロトコル⁽¹⁵⁾を、加入者端末とユーザ局の間に交換局が介在する形態に対しては、局間信号方式であるNo. 7をユーザ局において処理する。

2. 3 キャリア／クロック再生および同期方式

本節では、PSK復調に際して必要なキャリアおよびクロック再生、TDMAフレームの受信タイミングを確立するためのフレーム同期および自局からのバーストを送出するタイミングを確立するためのバースト同期について述べる。検討は、2. 2節で述べたIBSシステムの伝送品質基準を考慮して、符号化率1/2のFEC採用時の復号後のビット誤り率(BER) 10^{-6} および 10^{-8} に相当する2種の回線状態(復号前のBERは各々 3.8×10^{-2} と 2.2×10^{-2})を仮定して行う。なお、標準F地球局間、すなわちアップ／ダウン両リンクに対してCバンドが使用される場合には、時間率99%の降雨減衰は、ほとんど無視できるので、BER 10^{-8} に

相当する回線状態のみが問題となる。

2. 3. 1 キャリア／クロック再生

TDMAシステムにおける受信バーストの復調は、バースト先頭部に位置するプリアンブルからキャリアおよびビット・タイミングを再生することによって行われる。よって、プリアンブル長の選定が設計の主題となる。

キャリア再生において、伝送品質に影響を与える主な要因は、位相ジッタおよびサイクルスリップの発生である。位相ジッタは等価C/N劣化量に換算可能であるのに対して、サイクルスリップによる劣化は回線設計上のハードウェアマージンとして簡単に見積れない。そこで、サイクルスリップのビット誤り率に対する影響を1%以内に抑えるという設計目標を設け、まずプリアンブル長に関する設計を行う。

図2. 4は、QPSKキャリア再生回路として4通倍+2段タンク回路を適用した場合

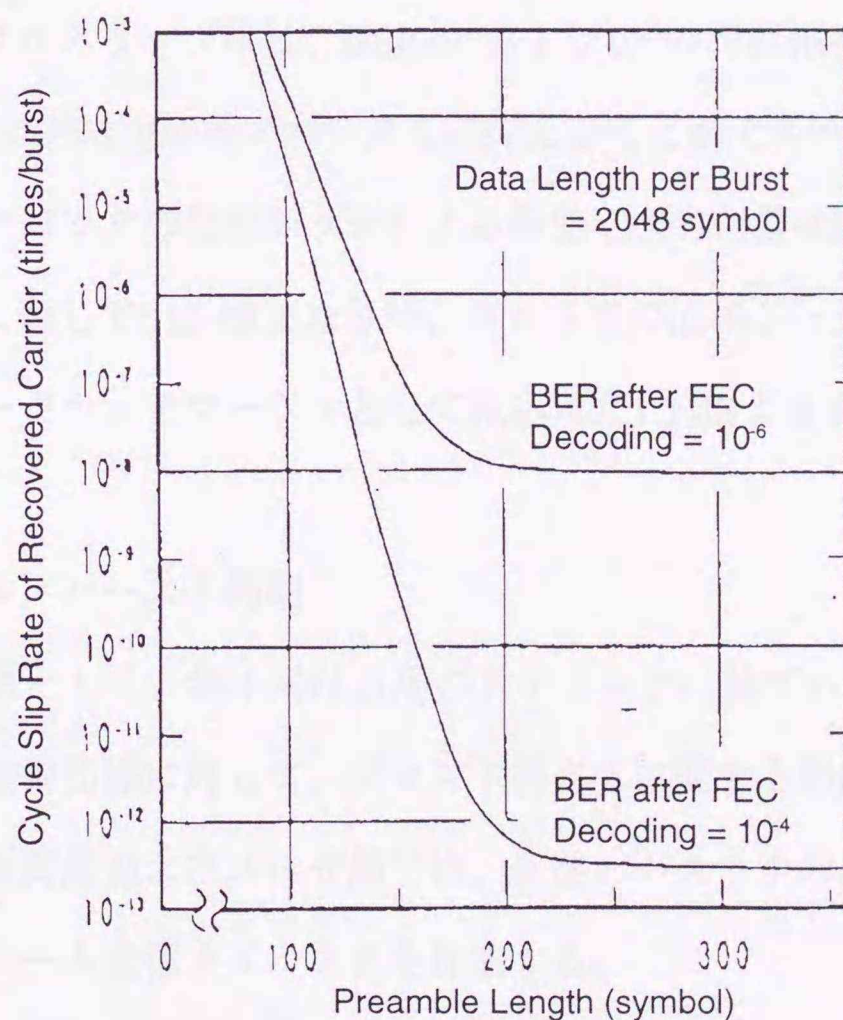


図2. 4 プリアンブル長に対する再生キャリアのサイクル・スリップ率

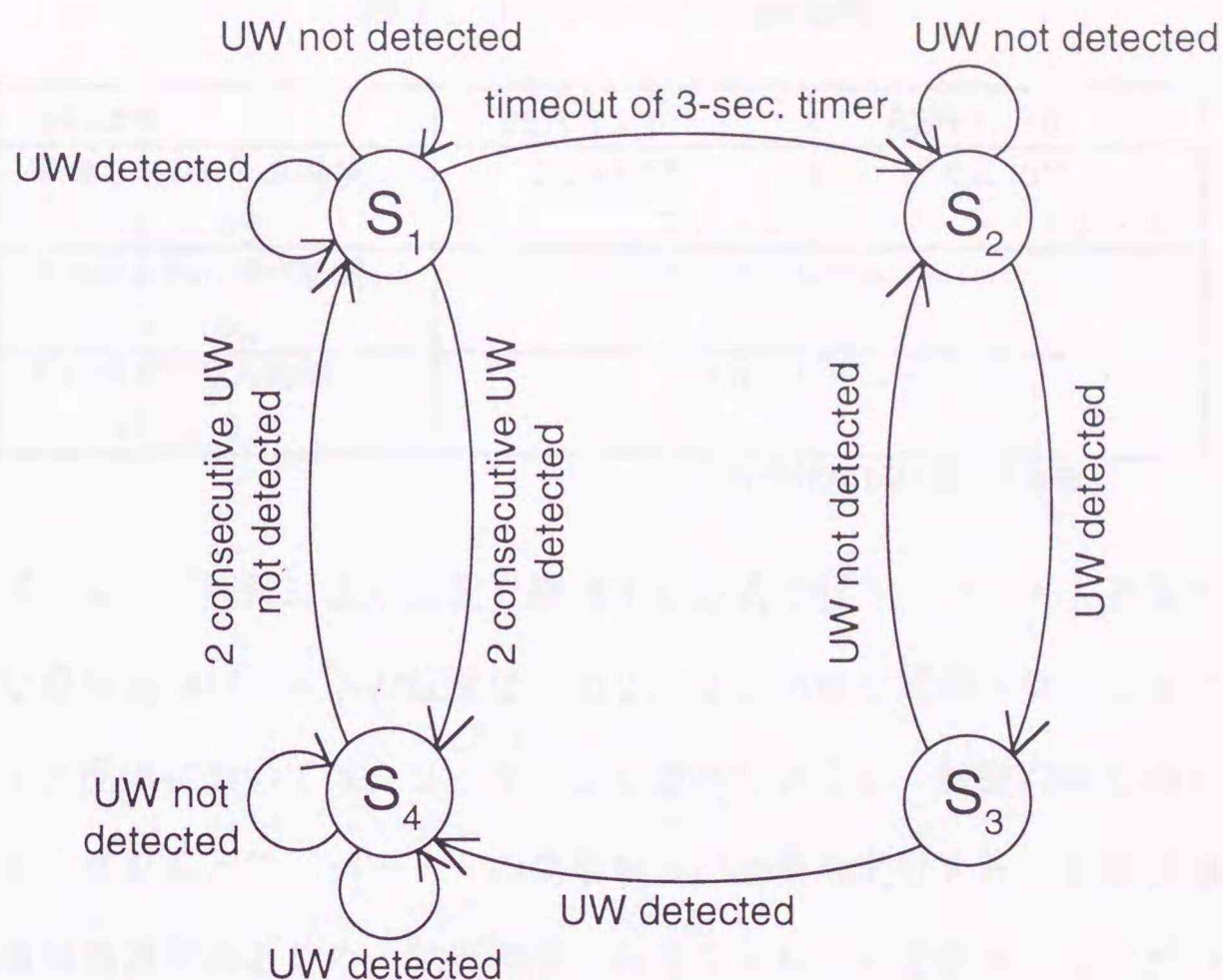
の、プリアンブル長とサイクルスリップ率との関係を、文献(20)に示されている手法に基づき算出した結果を示したものである。同図より、FEC復号化後のBERが 10^{-6} に相当する回線状態における特性から、プリアンブル長が決定されることがわかる。また、サイクル・スリップのビット誤り率に対する影響を1%以内に抑えるという前記設計目標、すなわちサイクル・スリップ率を 10^{-8} 以下とするためには、225シンボルのプリアンブルが必要となる。このとき、位相ジッタによる等価C/N劣化量は0.03 dB以内であり⁽²¹⁾、ハードウェア・マージンの1/50程度に抑えられている。なお、キャリア再生回路としては、短いプリアンブル長で所望の特性が得られる逆変調方式⁽²²⁾等があるが、インテルサット系TDMAシステムにおいて広く適用されている4通倍+2段タンク回路をプリアンブル長選定の検討対象とした。

また、クロック再生に関しても同様に、インテルサット系TDMAシステムで広く用いられている、入力PSK波を直接0.5シンボル遅延検波する方法⁽²³⁾を用いることとした。この場合、225シンボルのプリアンブルの後半150シンボルを再生用ビットとして用いれば、クロックのサイクルスリップ率は、BER 10^{-6} および 10^{-8} の両回線状態に対して、各々 3×10^{-9} 回/バーストおよび 2×10^{-11} 回/バーストに抑えることができ⁽²⁰⁾、伝送品質の劣化は無視できる。また、クロックの位相ジッタによる等価C/N劣化量はFEC復号化後のBER 10^{-6} および 10^{-8} の両者に対して0.15 dBとなり⁽²¹⁾、キャリアの位相ジッタによる等価C/N劣化量と合計しても、ハードウェアマージンとして見込んだ1.5 dBよりかなり小さい。

2. 3. 2 フレーム/バースト同期

フレーム同期の基準として、集中局は自局のタイミングに基づいて、網制御局およびユーザ局との間の両制御回線に対して、デマンド割当てに関する制御情報を含む基準バーストを送出する。網制御局およびユーザ局では、基準バースト中のユニークワードを検出することによってフレーム受信タイミングを作成する。

図2. 5は、基準バーストに対する受信同期フローを示したものであり、特に基準バーストの瞬断時にも同期がはずれないように、同期保持モードから同期捕捉モードへの遷移



IN-FRAME MODE

- S_0 : Normal State
 S_1 : Search Stand-by State
 S_2 : Search State
 S_3 : Search Pause State

OUT-OF-FRAME MODE

- $(a = \pm 0 \text{ symbol}, \epsilon = 11 \text{ bit})$
 $(a = \pm 0 \text{ symbol}, \epsilon = 11 \text{ bit})$
 $(\text{Open Aperture}, \epsilon = 6 \text{ bit})$
 $(a = \pm 0 \text{ symbol}, \epsilon = 8 \text{ bit})$

a: Aperture, ϵ : Error Tolerance Bits

図2. 5 基準バーストに対するフレーム同期フロー

に対して3秒間のタイマーが設けられている。この設定値3秒は、受信地球局が基準バーストから抽出されるクロック周波数に対して $\pm 4.2 \times 10^{-6}$ ずれたクロック周波数で自走した場合に、1シンボル偏移するのに要する時間に相当する値であり、単なる瞬断によって同期捕捉モードへの遷移が生じないように設計されている。表2. 1は、上記受信同期の諸特性を示したもので⁽²⁴⁾、運用上問題のない良好な特性が得られていることがわかる。

制御回線におけるバーストの初期捕捉および同期は、局ごとに割当てられているバーストスロットのほぼ中央に、固定されたタイミングでショートバーストを送出し、それが衛星折返しで受信されれば、バーストを所定の位置に移動させ、その後データ部分も付加し

表 2. 1 フレーム同期特性

回線状態	BER 1×10^{-6} *	BER 1×10^{-8} *
平均ミスフレーム間隔 ($S_0 \rightarrow S_1$)	9.0×10^{13} フレーム	1.6×10^{19} フレーム
平均同期外れ検出時間 ($S_0 \rightarrow S_1$)	2.0 フレーム	
平均同期引込み時間 ($S_2 \rightarrow S_0$)	3.0 フレーム	

* 符号化率1/2 FEC復号後

てクローズドループ制御により送信を継続する方式で行う。バースト送信タイミングの制御に必要な自局送出バーストの位置は、図 2. 5 と同様の同期フローに基づき検出する。

トラヒック回線においては、2. 2. 3 で述べたように、制御回線で確立しているバーストタイミングをもとに、バーストの受信および送信を実行する。制御回線に比べてトラヒック回線は高速であるため、制御回線におけるフレーム受信タイミングのわずかな誤差が、トラヒック回線のシンボル長に換算すると大きな影響となって現れる。そこで、トラヒック回線に対する送信バースト同期に関しては、制御回線における基準バーストの受信タイミングおよび自局バーストの受信タイミングをそれぞれ平均化し、その平均化したタイミングをもとに送出タイミングを決定することにより、同期精度を向上させる。再生クロックの位相誤差により生じるバースト受信タイミングのずれの平均は、再生クロックのジッタ量およびバースト受信タイミングの平均化回数より定まる分散をもつ正規分布に従うと考えられる。従って、基準バーストおよび自局バーストのタイミング平均化回数とともに 8 とした場合に、トラヒック回線においてバースト送出タイミングがガードタイム（8 シンボル）の半分以上偏移する確率は、BER 10^{-6} と 10^{-8} に相当する両回線状態において、各々 5×10^{-41} および 4×10^{-48} となり、バースト衝突による伝送品質の劣化は無視できる。

一方、トラヒック回線における受信バースト同期は、制御回線中の基準バーストの平均受信タイミングをもとに、受信トラヒックデータバーストの公称位置に対して前後 3 シンボルのアパチャを設け、ユニークワードを検出することにより達成する。この場合、ユ

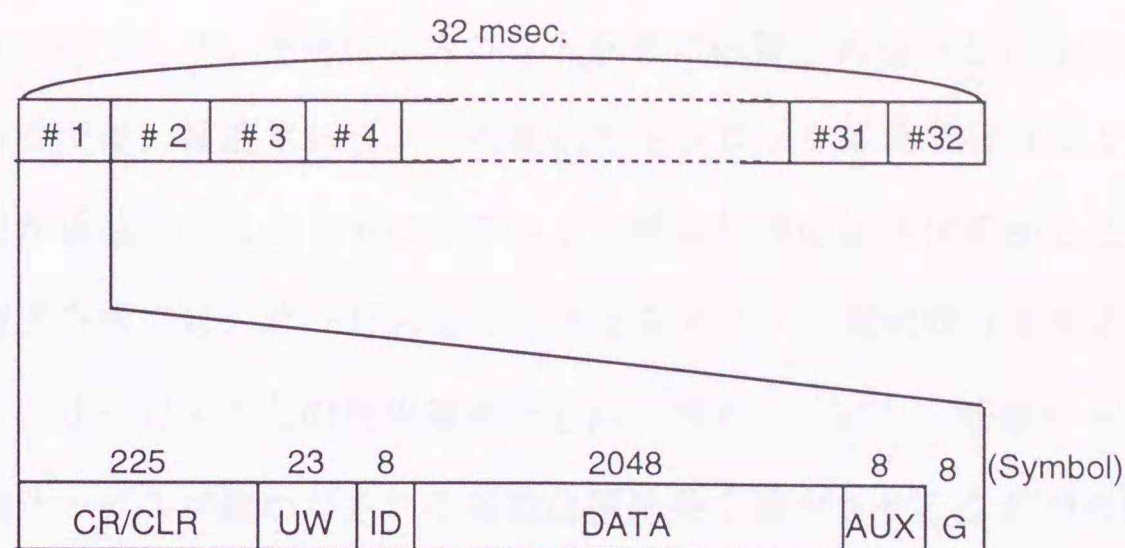
ニークワードの不検出およびユニークワードの位置は正しいが位相の確定を誤ったり、偏位状態でユニークワードを誤って検出する誤検出は、ビット誤り率の劣化として現われる。文献⁽²⁴⁾に示されている手法に基づき、ユニークワード長23シンボル、許容誤りビット数12ビットに対する不検出および誤検出確率は、BER 10^{-6} に相当する回線状態に対して各々 1×10^{-8} および 4×10^{-9} 、BER 10^{-8} に対して各々 1×10^{-11} および 3×10^{-11} となり、ビット誤り率に対する影響は1%以内に抑えられている。

2. 4. トラヒック回線の設計

2. 4. 1 フレーム／バースト構成

TDMAトラヒック回線上で多様な多元トラヒックを複数種のFEC符号化率を用いて提供する場合に効率良い回線運用を実現する方法として、低速サービスに対応した固定長バーストによりTDMAフレームを構成する手法が有効である。低速サービスを単位とするこの構成では、バースト数に比例してプリアンブル損が増大するものの、高速サービスに対しては、所要数のスロットを適宜割当てることによって効率の良い運用が可能となる。サービスとしてB、 H_0 、 H_{11} および H_{12} を、またFEC符号化率として1/2および3/4を適用する本IBSシステムでは、64 kbit/sサービスにFEC符号化率1/2を適用した場合の伝送データ量に対応したバースト長を基本単位とするバースト構成の採用が効果的である^{(25), (26)}。

上記検討および2. 3節で述べたプリアンブルに関する検討に基づき、図2. 6に示すフレーム／バースト構成を採用する。同図に示すように、各バーストにはプリアンブルおよび符号化率1/2のFECが施された64 kbit/sに相当するトラヒックデータのほか、8シンボルのユーザ局識別符号および8シンボルのFEC完結用符号が付加されている。なお、TDMAフレーム長は、処理遅延を考慮するとともに、制御回線におけるバースト同期のトラヒック回線への適用を容易にするために、制御回線と同一の32 msとする。制御回線のTDMAフレーム長32 msの選定については2. 5節で述べる。本構成により、1 TDMAキャリア当りの伝送速度は2. で述べた4.64 Mbit/s、データ部分を除いたプリアンブル損は12%となる。



CR/CLR: Carrier and Clock Recovery Sequence
 UW: Unique Word
 ID: Transmit Earth Station ID
 DATA: Traffic Data Encoded by FEC
 AUX: Bits for Completion of FEC Coding
 G: Guard Time

図 2. 6 トラヒック回線のフレーム構成

2. 4. 2 衛星回線割当て方式

低／高速サービスへのTDMAスロット割当て方式として以下の3種類を想定し、衛星トラヒック回線の使用効率および呼損率の観点から検討を行った。

(1) ランダムスロット選択方式

高速サービスへのスロット割当ては、所要スロット数を任意に選択することにより行う。

(2) 定位一括選択方式

スロット選択はサービスごとに与えられた選択順位に従い、高速サービスへは所要数連続したスロットを一括して割当てする。

(3) ランダム一括選択方式

高速サービスへは一括して連続スロットを割当てするが、スロットの選択は任意に行う。

ランダムスロット選択方式では、高速サービスに対しては、必要数分だけの空スロット

があれば割当てが可能であり、使用中のスロット分布に影響されないという利点がある。一方、一括選択方式では、高速サービスへの割当てをブロック単位で行うことにより、バーストの連続性が保証されるとともに、スロット検索処理の簡単化を図ることができる。更に、定位選択方式では、サービスごとに異なるスロット選択順位を与えることによって、スロットのサービスごとの使用確率を分散し得ることから、低速サービスの使用分布によって高速サービスが締めだされる端数出線効果を減少させることが可能となる。

4.64 Mbit/s キャリア 1 波に相当する 32 スロットを対象とし、1 スロットで提供される低速サービスと、6 スロット必要とする高速サービスの 2 種類のサービスを取扱った場合

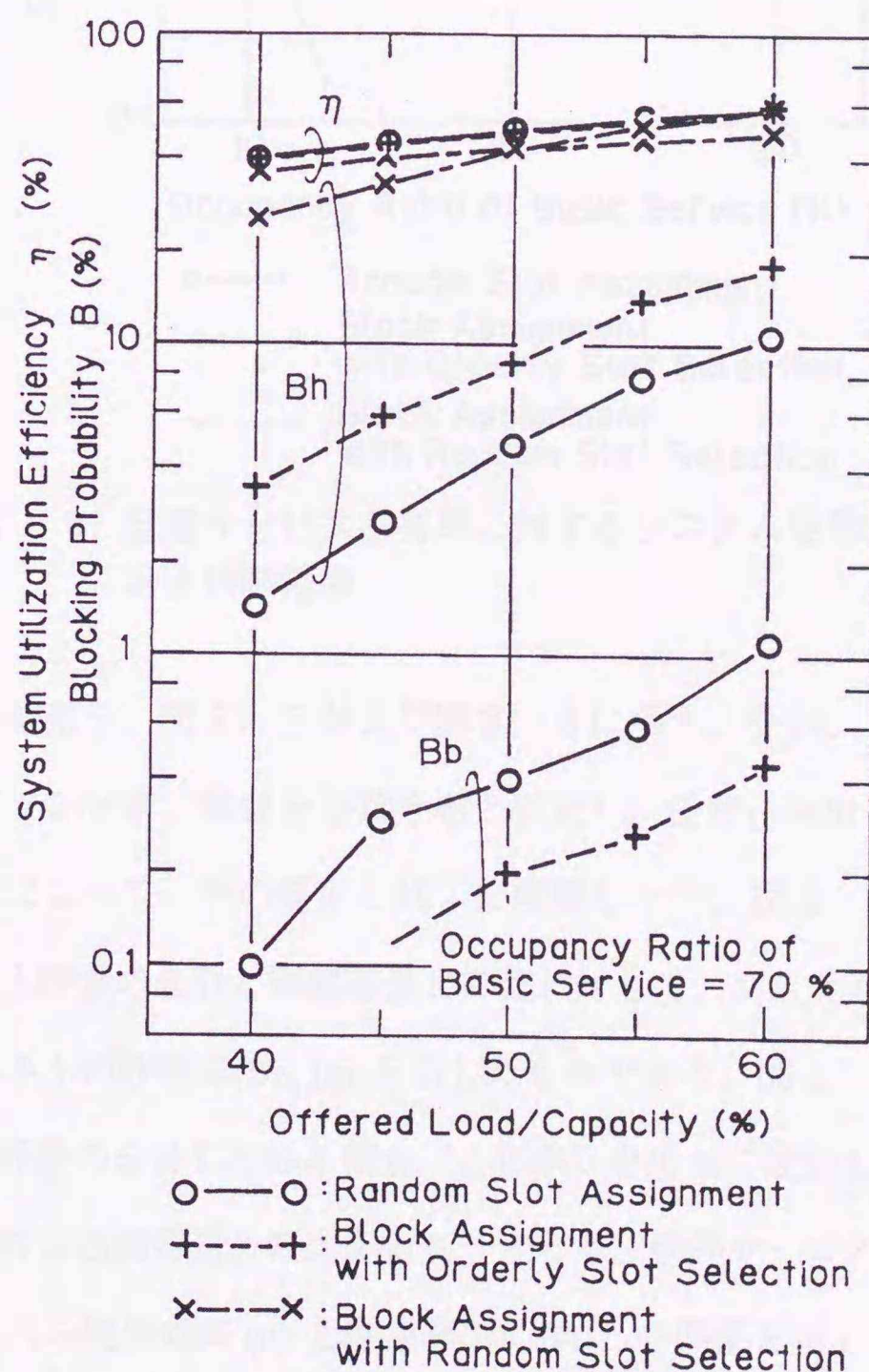


図 2. 7 入呼量に対するシステム使用効率および呼損率

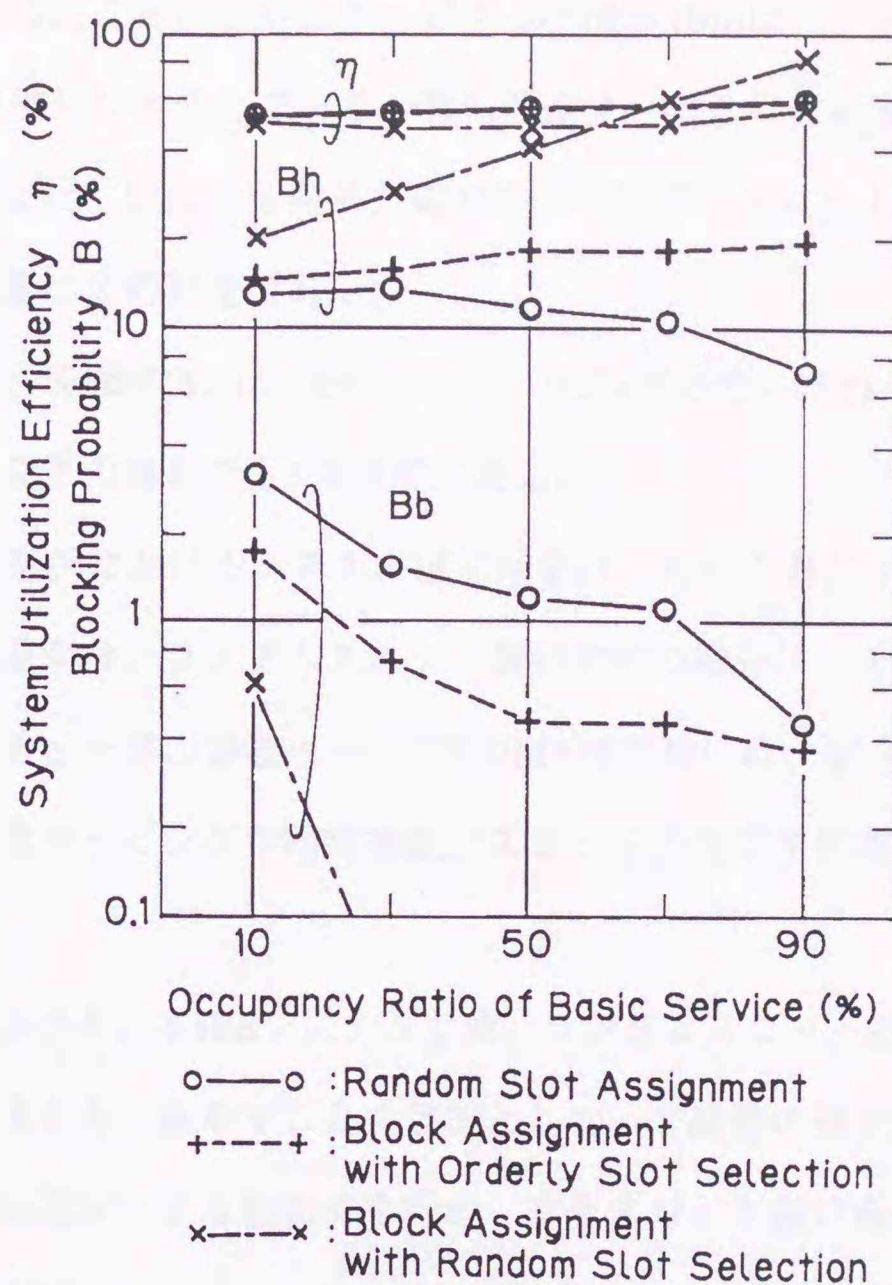


図2. 8 低速サービス占有率に対するシステム使用効率
および呼損率

のシミュレーション結果を、図2. 7および図2. 8に示す。なお、シミュレーションでは、呼の生起をポアソン分布、保留を指数分布と仮定し、任意に抽出された乱数値をしきい値と比較することによって、呼の発生と終了を模擬した⁽¹⁶⁾。図2. 7は、三つの回線選択方式について、入呼量の合計と回線容量との比に対して、システム使用効率(η)および低・高速サービス各々の呼損率(B_b , B_h)を示したものである。図2. 7の計算に当っては、低速サービス入呼量の全体に占める割合(占有率)を70%に設定している。また、図2. 8は、入呼量合計と回線容量との比を60%一定とし、低速サービス占有率をパラメータとした場合のシステム使用効率(η)と呼損率(B_b , B_h)との関係を示したものである。これらの図より、以下のことがわかる。

(1) ランダム一括選択における高速サービスの呼損率 (Bh)は、ランダムスロット選択方式に対して1.5~11倍程度劣化しており、特に低速サービスの占有率が高い所でその劣化量が大である。また、定位一括選択方式では、ランダムスロット選択より劣化しているものの、その劣化量は2倍程度である。

(2) 低速サービスの呼損率(Bb)は、Bhと比べて1/10以下となっており、ランダムスロット選択で与えられる最悪の場合でも3%程度である。

(3) ランダム一括選択におけるシステム使用効率は、他の2方式より劣化している。

高速サービスの呼損率は、ランダムスロット選択方式の場合に、そのスロット選択の任意性により最良となる。一方、複数キャリアTDM運用時には、割当て制御および運用の容易性から、周波数ホッピングや同時複数波スロットの使用を回避し得る定位一括選択方式が有効である。

以上の検討結果に基づき、本IBSシステムでは、ランダムスロット選択および定位一括選択方式の有する特長を共に生かすことを目的として、2段階の選択方式を採用する。すなわち、まず定位一括選択による割当てを行い、空きスロット数に余裕が有りながら高速サービスへの割当てが行えない場合には、更にランダムスロット選択による割当てを行う。このように、両選択方式の長所を組み合わせることにより、運用の容易性と高速サービスに対する低い呼損率を得ることが可能となる。

2. 5 制御回線の設計

2. 5. 1 デマンド割当て用制御プロトコル

集中局(CS)および網制御局(NCS)の機能分担に基づく呼接続解除制御手順の一例を図2. 9に、またIBS特有の制御メッセージを表2. 2に示す。図に示す制御手順において、発呼端末は、サブアドレスを含む被呼/起呼アドレスおよび所要情報速度により、自局ユーザ局(US)に対して発呼要求を行う。集中局では、発呼側ユーザ局(OUS)からの呼接続要求(IAM)中の加入者アドレスより発呼側および着呼側ユーザ局(IUS)の属する網制御局を判定し、網制御局に対して加入者照合、およびユーザ局に対して呼接続/回線割当

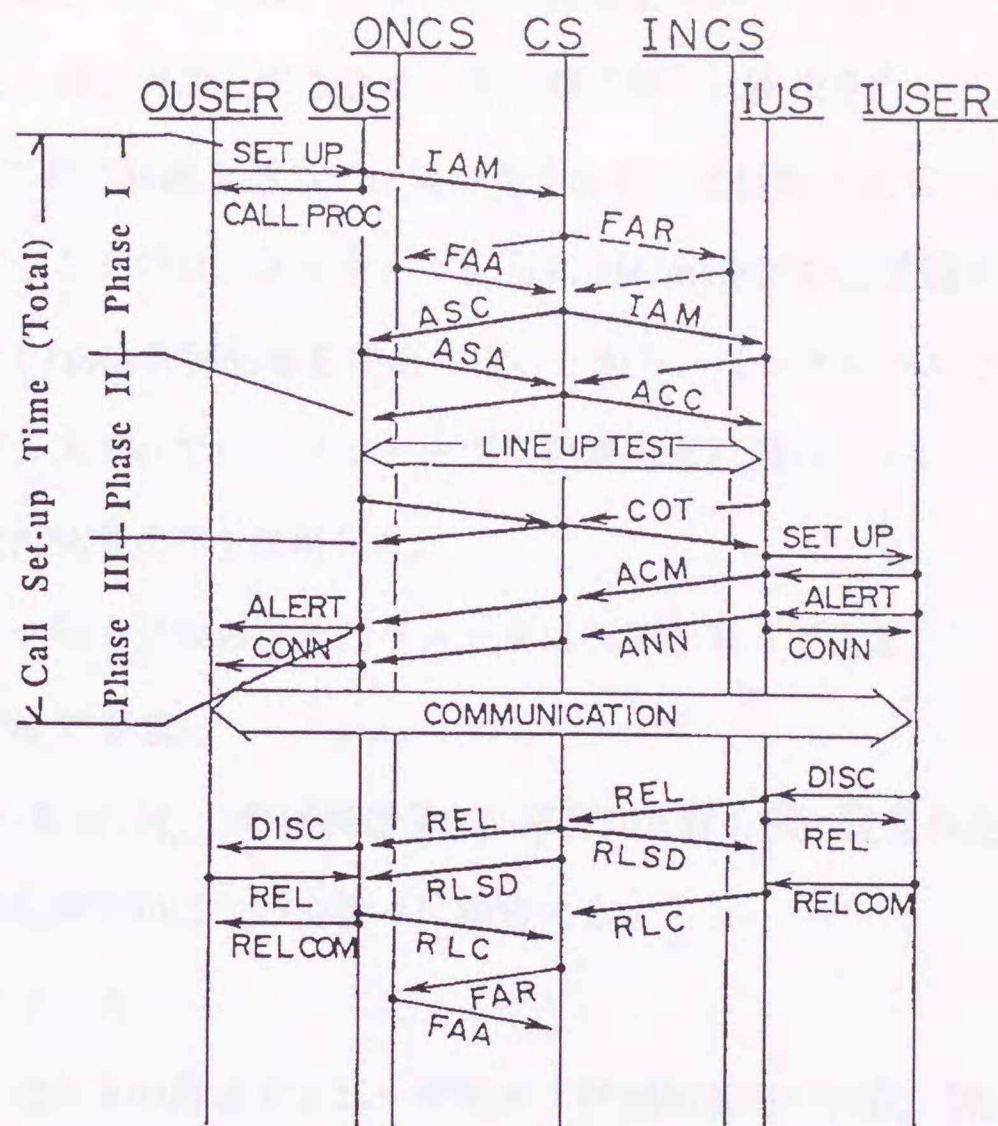


図 2. 9 呼接続解除シーケンス例

表 2. 2 呼制御メッセージ

略号	メッセージ内容	備考
IAM	呼接続要求	機能追加
ASC	衛星回線割当て指示	新規
ASA	衛星回線指示了解	新規
ACC	衛星回線割当て完了	新規
FAR	ユーザ照合、課金情報通知、予約通知	機能追加
FAA	ユーザ情報応答	機能追加
FRJ	ユーザ情報応答拒否	機能追加
UBM	呼接続失敗通知	機能追加
COT	導通試験	
SAM	後続サブアドレス通知	
ACM	呼接続完了	
ANN	応答	
REL	終話	
RLSD	衛星回線復旧	
RLC	衛星回線復旧完了	
PAM	ユーザ間情報用	

て指示を行う。導通パターンは、トラヒック回線上でユーザ局間にてやりとりされるが、片方向通信等にも対応可能とするため、着呼側で個々に検出を行い、成否を導通試験メッセージ(COT)にて制御回線を通じて、集中局を介して送信側に通知する。

衛星系シグナリングでは、メッセージ転送に 300 ms程度の伝送遅延を要し、また、複数の局が同一のTDMA制御回線を使用することから、リンクレベルでの制御を工夫する必要がある。本システムでは、メッセージに発着局確認用のアドレスを付加し、また、誤り再送制御にはPCR方式⁽²⁷⁾を採用した。

一方、制御メッセージ中の主要パラメータは以下の通りである。

(1) 伝送メディア要求

ISDNサービス($B, H_0, H_{11/12}$)の情報速度を、双方向／片方向／送受異速度の各モードで提供するため、送受両方向について個々に指定する。

(2) 加入者アドレス

加入者照合、加入者の所属するユーザ局および網制御局の判定、課金処理を網内で行うために、発呼側および着呼側の両加入者アドレスを、発呼側のIAMメッセージに付加する。

(3) 回線属性表示

受信地球局種別ごとに適用されるFEC符号化率を表示する。

(4) 衛星回線表示

情報速度、FEC符号化率により定まる伝送容量を有する衛星トラヒック回線の指定を行う。TDMAトラヒック回線中のスロットについては、伝送速度128 kbit/sのサービスを基本単位とし、高速サービスに対しては所要スロット数を割当ててゐる。スロット指定は、個別指定／ビットマップ指定により効率良く行う。

(5) 暗号用情報

呼ごとに割当てゐるトラヒック回線用暗号鍵を、集中局からユーザ局に対して、各ユーザ局固有の鍵により暗号化して伝送する。

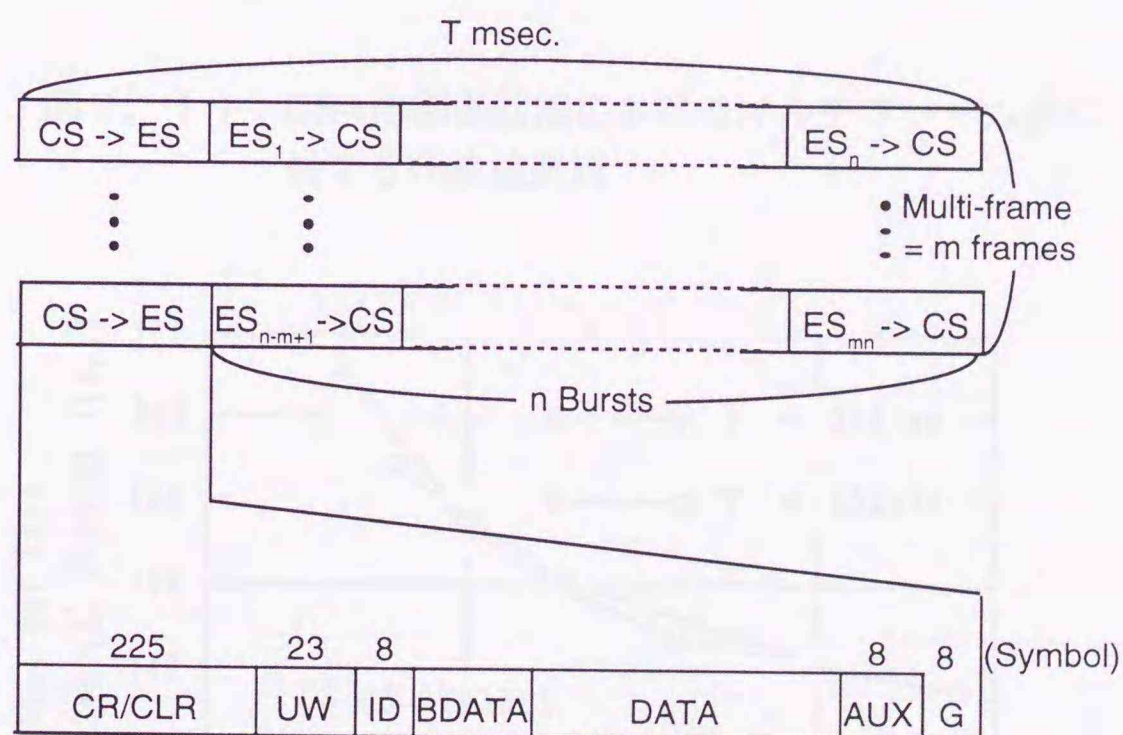
上記機能のほか、本制御プロトコルでは予約呼サービスおよび閉域加入者グループ

(CUG)サービスも行う。予約呼サービスでは、通常の発呼手順と同様の加入者からの予約要求に対して、網制御局で加入者照合を行った後、集中局に登録しておき、呼の指定開始時刻の一定時間前から回線の確保を行い、開始時刻に発着両加入者を呼び出す。CUGサービスでは、あらかじめ網制御局に登録されている加入者グループリストに基づき、呼の要求時に該当する加入者の発着規制を行う。

2. 5. 2 フレーム／バースト構成

図2. 10に、制御回線のTDMフレームの基本構成を示す。同図に示すように、マルチフレームを複数のフレームにより構成し、集中局はフレームごとに、ユーザ局および網制御局はマルチフレームごとにバーストを送出する。集中局からのバーストにおいては、ユーザ局あるいは網制御局へ向けてのデータが多重化されている。

制御回線のフレーム構成は、デマンド割当てにかかわる呼処理特性に大きな影響を与える。特に、加入者端末が発呼してから端末間に回線が設定されるまでの呼接続遅延と地球



ES, ES1 ~ ESmn: NCS or US

BDATA: Broadcasting Information from CS
(Reserved for Future Use)

DATA: Control Signalling Information

*1st symbol of ID in CS burst is used as a multi-frame marker.

図2. 10 制御回線フレームの基本構成

局の所要HPA出力を決定する伝送速度のトレードオフに関する検討が重要である。そこで、1 制御回線当り 24 局のユーザ局を収容することとし、各種フレーム構成に対する呼接続遅延と、所要伝送速度を定量的に評価する。図 2. 1 1 および図 2. 1 2 は、集中局・ユーザ局間制御回線に関して、各々マルチフレーム長に対する呼接続遅延および伝送速度の特性を、TDMA フレーム長をパラメータにとってシミュレーションした結果を示したものである⁽²⁸⁾。なお、本制御方式で用いている PCR 再送方式では、呼接続遅延は、制御

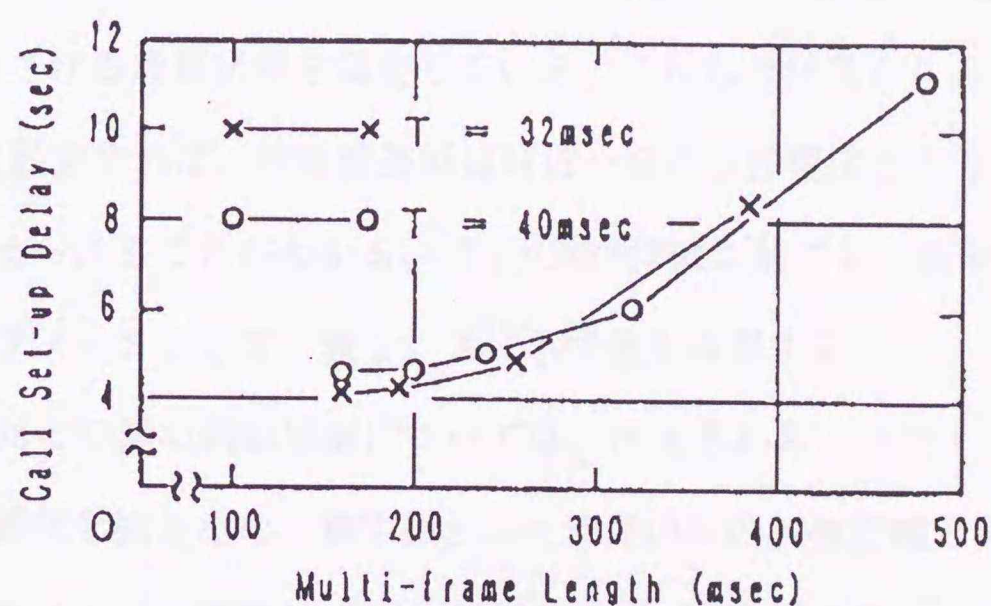


図 2. 1 1 CS-US制御回線におけるマルチフレーム長に対する呼接続遅延

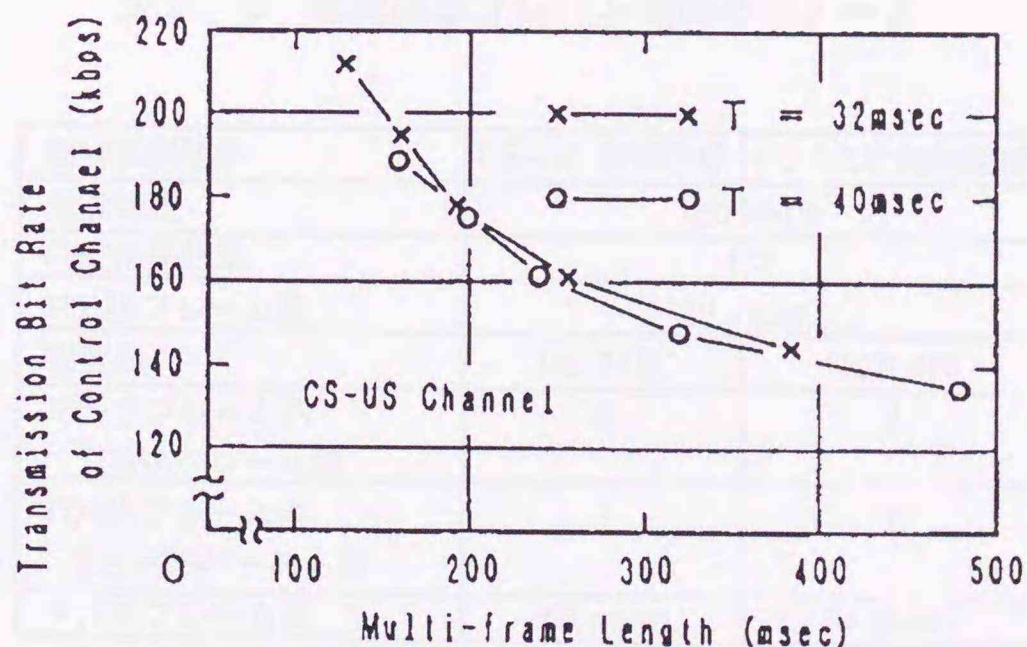


図 2. 1 2 CS-US制御回線におけるマルチフレーム長に対する所要伝送速度

メッセージの送信待ち時間と伝送誤りによる再送に要する時間の影響を受ける。送信待ち時間は、制御情報入呼量の制御回線伝送容量に占める割合を低くすることによって低減できる。ここでは、この点と回線有効利用の兼ね合いから、その割合を25 %以下に設定している。一方、伝送誤りによる再送に起因する接続遅延に関しては、FEC復号後のビット誤り率が本システムの伝送品質基準である 10^{-6} 以下の場合、その増加分は小さく、無視することができる²⁹⁾。特性評価に当っては、1 トランスポンドにより提供される全トラヒック回線（64 kbit/s換算256回線）が、多元トラヒックにより、負荷100 %、64 kbit/sサービス呼損率約4.6 %で運用される最繁状態を仮定している。これらの結果より、マルチフレーム長を200～300 msに設定すれば、呼接続遅延はほぼ一定の5秒程度となり、伝送速度も160 kbit/s程度に抑えられることがわかる。以上の検討結果に基づき、集中局・ユーザ局間のフレーム構成パラメータとして、表2. 3に示す値を採用する。

集中局と網制御局との間の制御回線については、伝送されるメッセージは少ないが、ハードウェアの共通化を図るため、集中局とユーザ局の間の制御回線と同一の伝送速度とする。本制御回線のフレーム構成パラメータを表2. 3に併記する。

表2. 3 制御回線フレーム構成パラメータ

制御回線種別	CS-US 制御回線	CS-NCS 制御回線
伝送速度	160 kbit/s	
FEC符号化率	1/2	
TDMAフレーム長	32 msec.	
収容局	US 24局	NCS 4局
マルチフレーム内 TDMAフレーム数	8	2
TDMAフレーム内 ES->CSバースト数	3	2
マルチフレーム長	256 msec.	64 msec.
CS->ESバーストBDATA長	32 symbol	16 symbol
CS->ESバーストDATA長	576 symbol	864 symbol
ES->CSバーストDATA長	288 symbol	432 symbol
フレーム利用効率	57.5 %	68.1 %

2. 6 送信電力制御方式

送信電力制御(Uplink Power Control: UPC)は、降雨が伝送特性に影響を与えるKu帯の衛星通信に置いて必須の技術である。本システムでは、各局からの電力が衛星上で常に一定となるようにUPCを行う。本システムで用いているUPCは制御回線を利用するものであり、その全体的な概念を図2. 13に示す。図中、リファレンス局となる集中局ではパイロット波を送信し、その衛星折り返し波から同一パスの上り／下り回線で生じた降雨減衰量をモニタし、更に周波数比で換算することにより上り回線における減衰量を求める。リファレンス局はこの上り回線で生じた減衰を補償すべく、送信電力を制御する。

一方、他の局は制御回線中のリファレンスバーストと自局からの送信バーストの折返しとのレベル差を、自局から衛星への上り回線における減衰量としてモニタする。これは、下り回線の減衰が両方のバーストに等しく影響し相殺されるためである。このUPC方式により、特にユーザ局では専用のパイロット波やビーコン波の受信機を持たなくて済み、簡易な構成で実現される。

なお、制御回線における受信レベルの検出は、復調器からのデジタル出力の平均から換算して求められる。

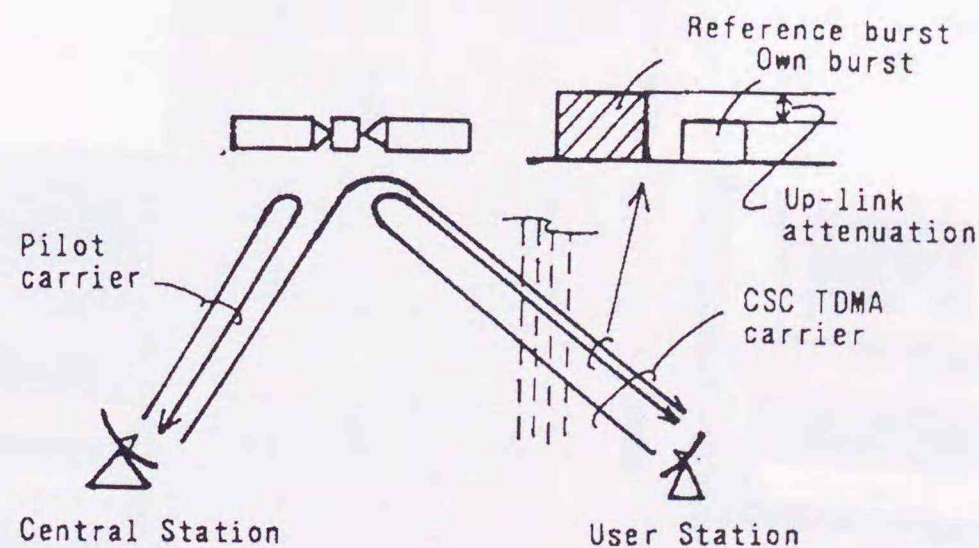


図2. 13 UPC構成

2. 7 実験システムの構成

前節までの設計に基づき、その機能を検証するための実験システムを開発した^{(31),(32)}。実験システムの外観を図2. 14に示す。実験システムは制御局機能、ユーザ局機能、そして送信電力制御 (UPC) 機能をそれぞれに有する2架から構成される。また、実験システム本体のほか、デマンド割当て制御モニタ用コンソール等を備えている。

図2. 15に実験システムの機能ブロック図を示す。UPC部は集中局で行うパイロットモードUPC制御のためのパイロット波送受信部 (Pilot TX/RCVR) とUPC制御量を算出するためのUPC処理部 (UPC PROC) そしてIF帯での信号の合成/分離部 (IF COMB/IF DIV, IF COMBにUPC用送信IFアッテネータを含む) から成る。制御局部はデマンド割当て処理 (CS/NCS DAMA) 部と、制御回線用TDMA端局 (CSC-I CTTE) から成る。ユー

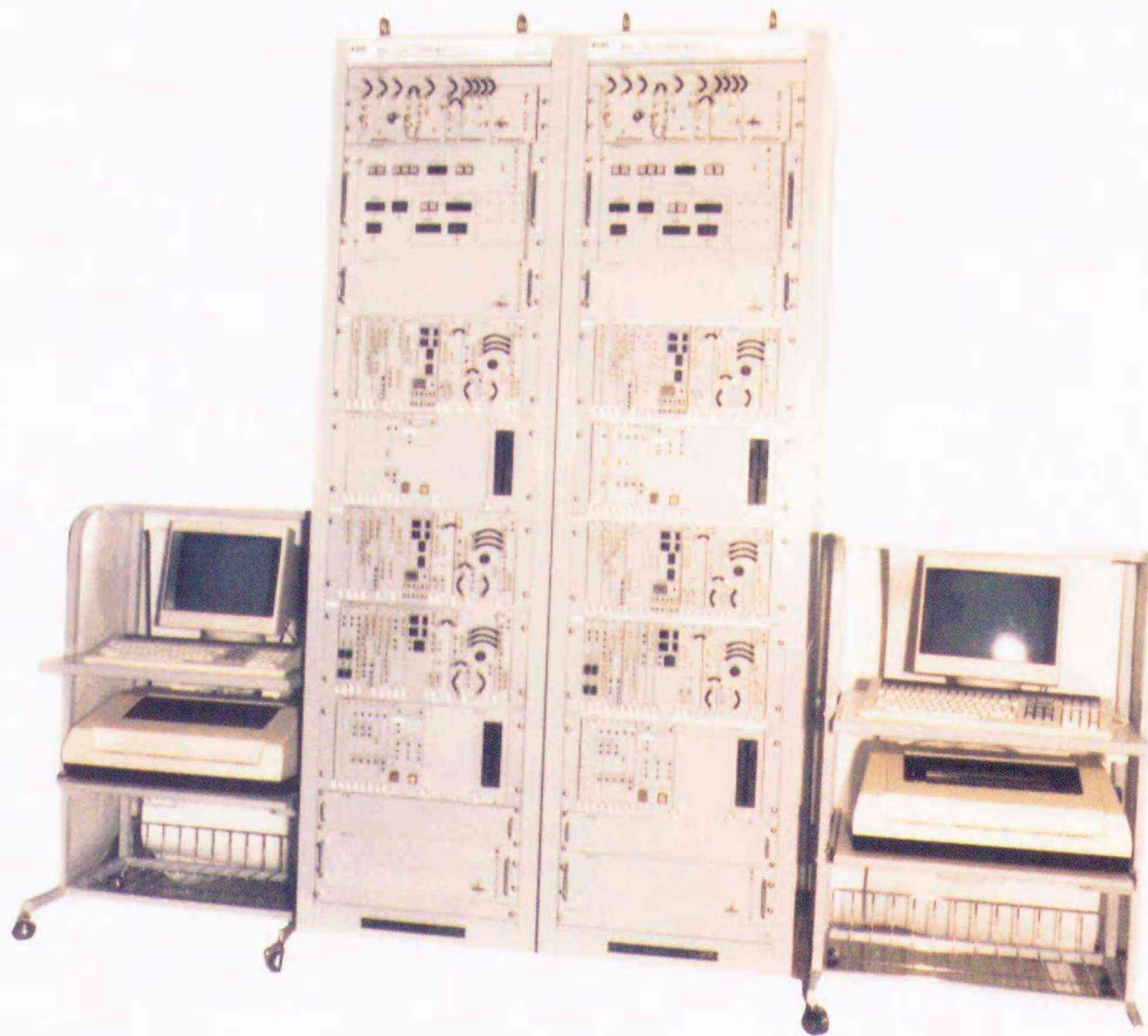


図2. 14 IBS実験用デマンド割当て/TDMA通信システム外観

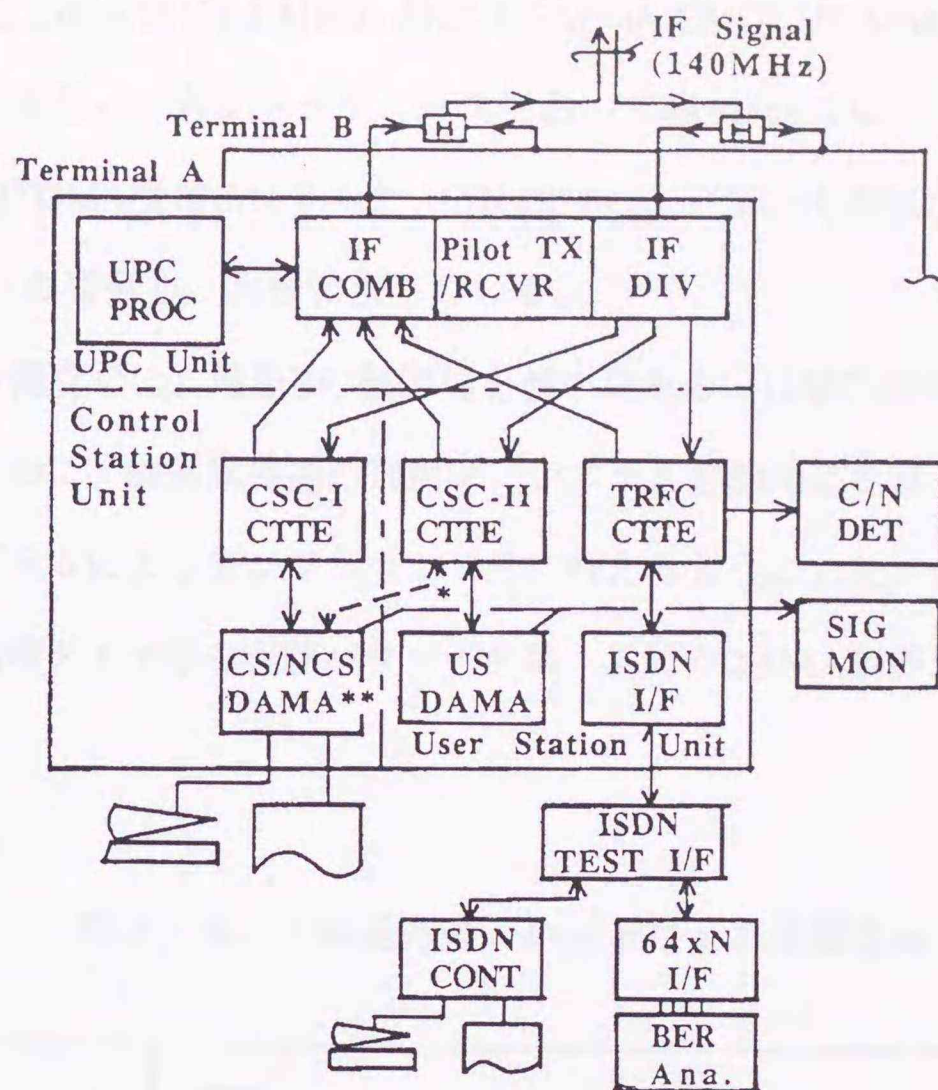


図 2. 1 5 実験システム機能ブロック図

ザ局部はUS DAMA部、CSC-II CTTE部のほか、トラヒック回線用TDMA端局（TRFC CTTE）、地上系加入者用ISDNインタフェース（ISDN I/F）を有する。

なお、端局Bでは装置の簡素化のためCSC-II CTTE一式を制御局とユーザ局とで共有している。TDMA端局の実現に当たっては、装置のデジタル化を図っており、ビタビ復号用加算比較選択（ACS）回路のカスタムLSI化、ROMを用いたデジタルフィルタの実現等を行っている。DAMA部では、機能ごとにモジュールを分割し、それぞれを16-bit CPU（8086/8088）を用いた1チップボードで実現して拡張性を持たせている。表2. 4に、伝送系のハードウェア実現の主要構成を示す。

また、実験用周辺装置としてISDNテスト端末を開発した。このテスト端末ではDチャネルプロトコルによる呼制御機能を16bit CPUパーソナルコンピュータ（NEC PC9801 VM2）で実現しており、また電話、G4ファクシミリあるいはビット誤り率（BER）測定機器等を

接続するために地上端末側に1.5 Mbit/s AMI, 1.5 Mbit/s CMI及び2 Mbit/s HDB3の3種の標準インタフェースを設け、各インタフェースにおいて64 kbit/sスロット単位で接続可能としている。その他TDMA受信C/Nモニタ (C/N DET)、デマンド割当て制御メッセージモニタ (SIG MON) を開発し、実験に供している。

実験システムの構成では、端局Bの制御局を集中局あるいは網制御局とする2通りの網構成を実現するために、制御局機能の選択は、システム起動時にフロッピーディスクからロードするプログラムによってソフトウェア的に行えるようにした。また、局構成、ユーザ端末登録、呼処理タイマ等の実験パラメータは、各局のDAMA制御用コンソールから入力、設定される。

表 2. 4 伝送方式／ハードウェア主要諸元

項目	方式
変調方式	CQPSK
送受信フィルタ	40 %ルート余弦ロールオフフィルタ 送信：ROMテーブル参照方式 受信：24タップFIRデジタルフィルタ
キャリア再生	制御回線：ヒステリシス付き改良型コスタスループ方式 (帯域幅可変、2相／4相切替) トラヒック回線：4通倍方式
クロック再生	制御回線：自乗検波＋ヒステリシス付きPLL トラヒック回線：自乗検波＋クリスタルフィルタ
総合AFC	パイロット波を使用
バースト間AFC	4通倍／タンクリミッタ回路によるバースト毎 周波数偏位の検出、補正
FEC 制御回線 トラヒック回線	符号化率1/2畳込み符号化／16値軟判定ビタビ復号 符号化率可変(1/2, 3/4)パンクチャド符号化／ 16値軟判定ビタビ復号
スクランブラ	15段PN系列、バースト先頭毎に初期化 多項式： $1 + x^{14} + x^{15}$
暗号化 制御回線 トラヒック回線	DES、バースト先頭毎に初期化 ECBモード、地球局毎の固有ベクトルで暗号化 (暗号化情報のみ) OFBモード、鍵ベクトル56ビット、初期ベクトル8ビット
プレジオクロナス スリップ制御	125 μ s (ISDN Primary Interface) 250 μ s (ISDN Basic Interface)

2. 8 衛星実験

前節で示した実験システムを用いて、1988年7月から1989年4月まで衛星を介したフィールド実験を行い、特性の評価を行った⁽³³⁾。実験は、KDD研究所（目黒区中目黒）内に設置されたIBS実験用標準E1地球局（直径3.3m）⁽³⁴⁾に実験システムを接続し、インテルサットV号衛星（太平洋地域）のKu帯西スポットビームを折り返しモードに設定して行った。

フィールド実験では、システムの評価項目として伝送特性と呼接続遅延特性、そして総合的な動作特性の一つとしてUPC制御特性等について調べた。以下、各項目ごとに実験結果を示す。

2. 8. 1 伝送特性

伝送特性については、TDMA回線の総合的なBERにより評価を行った。TDMA回線のC/N測定については、TDMA回線上の特定のバーストのC/Nをリアルタイムでモニタできる前述のC/N DETを使用した。このC/N DETは、測定定周期 2秒の場合、受信C/Nが4～14 dBの範囲で誤差1 dB以内での測定が可能である⁽³³⁾。測定は、制御回線、トラヒック回線（符号化率1/2、3/4）の3種類の回線に対して行った。

測定結果の一例として、トラヒック回線で符号化率 1/2の場合の受信C/N対BER特性を図2. 16に示す。図中、ドットは連続する10秒間の測定結果を、楕円は該当するC/Nに対する全測定期間の平均を示す。図の結果から、理論値からの劣化が各BERにおいて1 dB以内となっていることが分かる。符号化率3/4のトラフィック回線や制御回線の場合にも、ほぼ同様の結果が得られている。

2. 8. 2 呼接続遅延特性

デマンド割当てシステムの評価のため、ユーザ端末からの呼要求に対してトラフィック回線の設定に要する呼接続遅延を測定した。測定は、デマンド割当て制御用のシグナリングメッセージを前述のSIG MONを用いて時刻情報と共に集め、メッセージ間の所要時間を見ることにより行った。

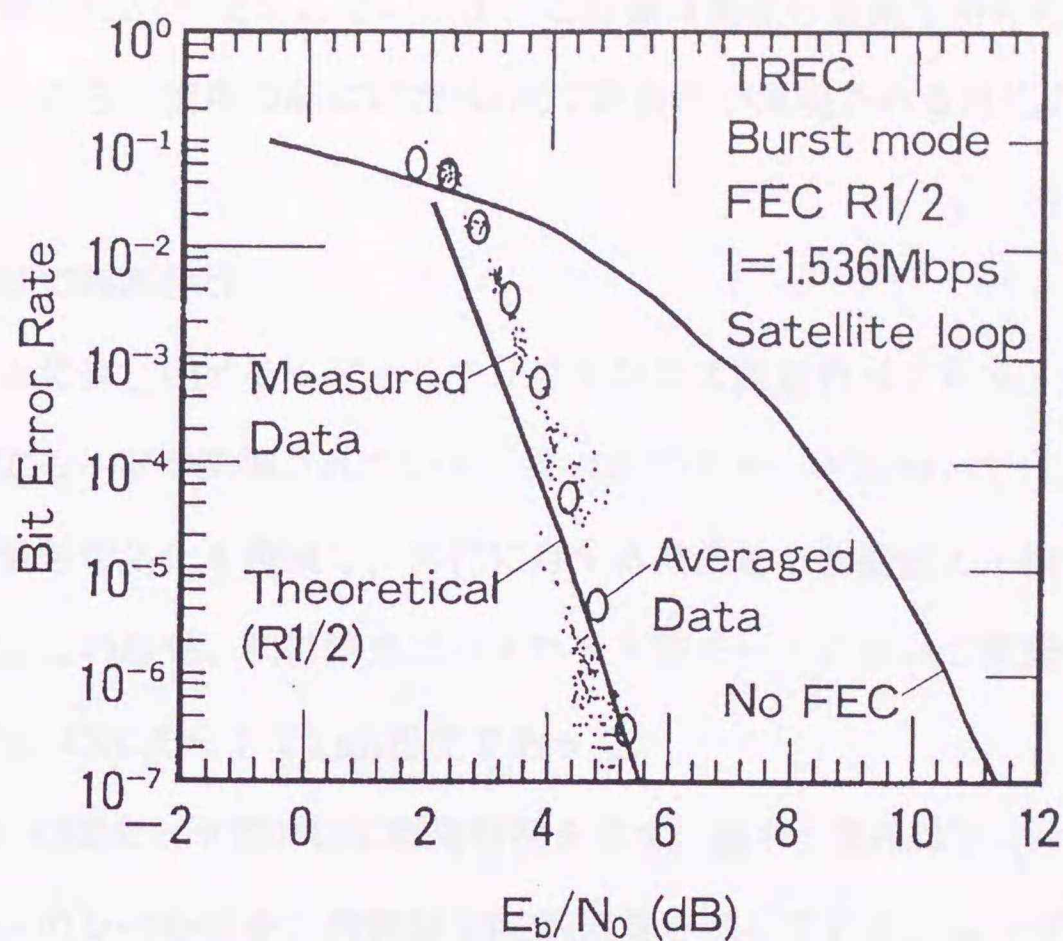


図2. 16 BER特性測定結果（トラヒック回線、符号化率1/2）

区間	推定値	測定結果
I 発呼～衛星回線割当て完了	3,207 ms	3,888 ± 37 ms
II ～回線試験完了	1,565 ms*	1,843 ± 55 ms*
III ～着信側端末応答	3,211ms**	3,626 ± 118 ms**
合計	7,983 ms	9,451 ± 104 ms

* トラヒック回線導通試験タイム 0.5秒を含む。

** 着信端末応答時間 (2,131 ms) を含む。

表2. 5に、図2. 9のシーケンスにおいて双方向B（64 kbit/s）回線を要求した場合の呼接続遅延測定結果を示す。表中、区間I, II, IIIは図2. 9に示す通り、それぞれ呼要求の受付から衛星回線割当て及び指示までの区間、割当て回線における回線設定試験実施及び結果通知までの区間、設定試験通知受信から着信ユーザ端末受信応答の発信側ユーザ端末への通知までの区間を表わしている。

実験の結果、呼接続遅延として9.45秒要しており、その内訳は区間Iで3.9秒、区間IIで1.8秒、区間IIIで3.6秒となっている。この結果はパソコンで実現しているユーザ端末の着信

応答のために要した2.1秒を含んでいるが、この値は実際の端末を用いた場合には省略が期待されることから、実用の際には7秒程度で呼接続が実現される見込みである。

2. 8. 3 UPC制御特性

実験システムには、UPCモードとしてリファレンス局用のパイロット波モードとその他の局用のCSCモードが準備されている。これらの各モードについて、送信電力を変えることにより信号の劣化を模擬し、劣化に対する補償量を理論値と比較することにより評価を行った。この結果、制御誤差はパイロット波モードにおいて減衰が0～15 dBの範囲で0.5 dB以内、CSCモードで2 dB程度であった。

図2. 17にCSCモードでのUPC制御特性を示す。図中、横軸はリファレンスバーストと自局バーストのレベル差を、縦軸はUPC制御量を示している。ユーザ局におけるUPC制御誤差は、リファレンス局の制御誤差と自局の制御誤差とが重畳されて与えられること

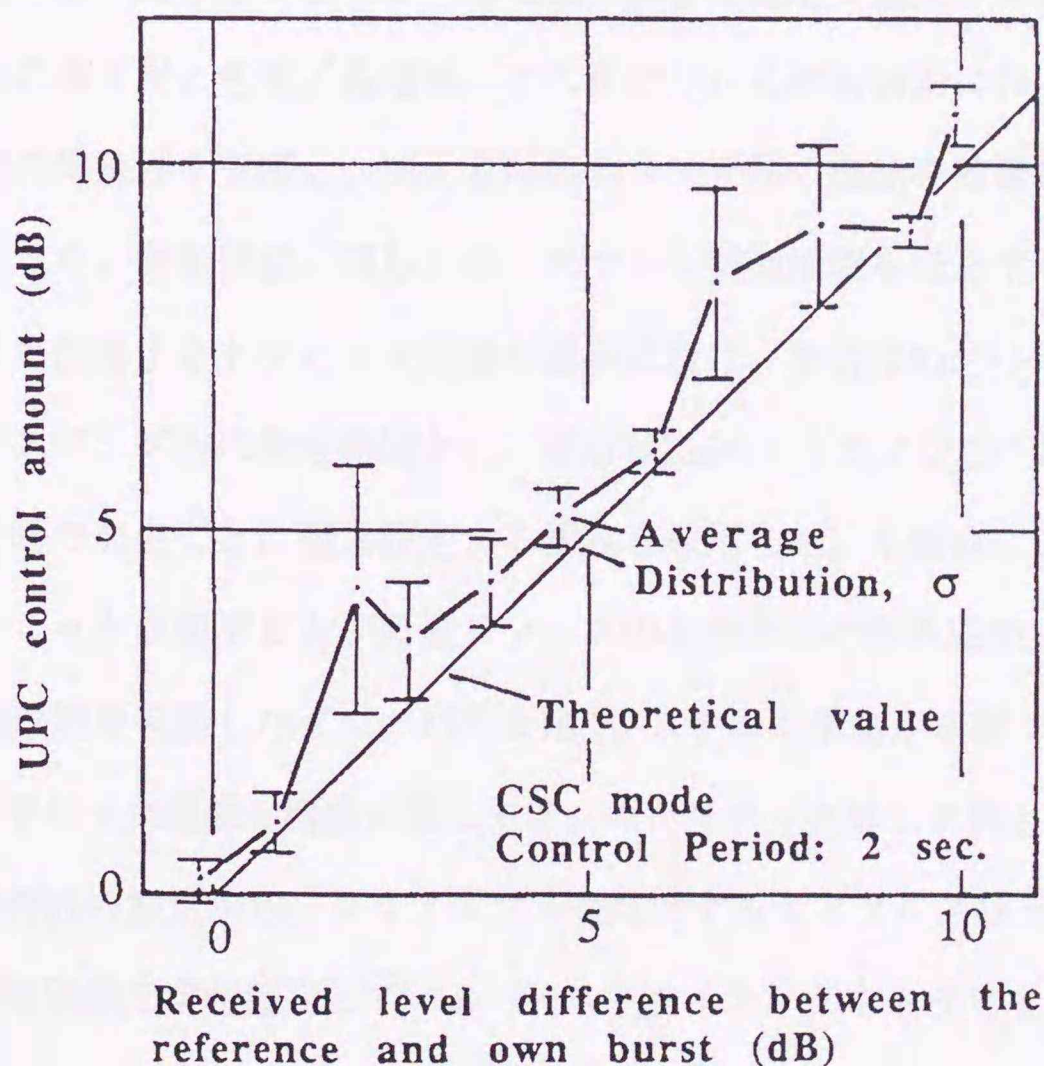


図2. 17 UPC特性測定結果 (CSCモード)

から、全体では3 dB程度となる。

なお、この結果はUPC制御周期を2秒とした場合についてのものであるが、制御周期をパラメータとしてその誤差の分散を調べると、定常的な劣化に対しては制御周期が2秒で0.3 dB、32秒で0.1 dBと、期間を長くするほど特性がよくなる傾向を持つ⁽³³⁾。しかしながら、実際のKu帯の衛星回線では受信レベルの変動が10秒程度まではランダム性が成り立つとの報告がなされている⁽³⁵⁾ことから、制御周期としては2～10秒の範囲で選択すればよいと思われる。

2. 9 結言

小型地球局から衛星へ直接アクセスすることによって、地上通信網の制約なく、多種多様なデジタル通信サービスをデマンド割当てベースで総合的に提供しうる国際ビジネス衛星(IBS)システムに関して、インテルサット衛星を検討対象に具体的な設計を行った。

網構成に関しては、網として要求される機能を網管理運用と加入者管理に分類し、各々を網内一局の集中局と各国／各地域ごとに設けられる網制御局において実行する構成が、国際通信の特殊性を克服し、加入者対応のユーザ局の機能を簡素化する上で有効であることを示した。衛星回線に関しては、デマンド制御情報を伝送する制御回線とトラヒックデータを伝送するトラヒック回線を個別に設け、前者はKuバンドとCバンドを結合するトランスポンダ内に固定接続とし、後者はKuバンドおよびCバンド専用のトランスポンダ内で呼の発生ごとに適宜設定する構成を採用した。本構成により、トラヒック種別のダイナミックな変更および衛星リソースの有効利用の図れるTDMA運用が可能となり、各種地球局を包括したグローバルなIBSシステムの構築が実現できる。

制御回線とトラヒック回線の構成に関しては、キャリア／クロック再生およびフレーム／バースト同期特性の観点から、プリアンブル長に対するサイクルスリップ率と等価C/N劣化量および制御回線で常時確立しているバーストタイミングをトラヒック回線のバースト同期へ適用する方法を含めた各種同期手順とその特性を明らかにした。一方、制御回線については、IBSシステム特有のメッセージを含む、ITU-T No. 7信号方式に基づくデマン

ド割当て制御プロトコルを示し、フレーム／バースト構成と呼接続遅延特性の関係を評価した。

本論文で示したIBSシステムの主要設計パラメータの諸元を表2. 6に示す。

これらの設計に基づき実験システムを開発した。この実験システムを用いて衛星実験を行った結果、伝送特性については理論値からの劣化 1 dB 以内、呼接続遅延特性については 10 秒以下、UPC 制御特性については制御誤差 3 dB 以内と、それぞれ良好な特性が得られることが確認された。

ここで得られた設計指針および試作結果は、次世代のIBSシステム実用化に大いに役立つものと期待される。さらに実用システムの開発に当たっては、冗長構成による信頼性の向上、通信端局の小型化等についての検討が課題となる。

表 2. 6 IBS主要設計パラメータの諸元

対象衛星	インテルサットVA(IFS)号衛星
地球局種別	集中局、網制御局、ユーザ局
回線種別	制御回線およびトラヒック回線
変調方式	同期検波 4 相位相変調(QPSK)
多元接続	制御回線: 固定接続(PA)/TDMA トラヒック回線: DA/TDMA
バースト同期	制御回線: クローズド・ループ同期 トラヒック回線: 制御回線におけるバースト・タイミングを利用
衛星回線割当て	サービス種別毎に優先割当て領域を設け、定位選択、ランダム選択を段階的に適用して回線を割当てる方式。
サービス基準	BER 1×10^{-6} 以下 (時間率99 %以上) 1×10^{-8} 以下 (晴天時)
サービス種別	ISDN (B, H ₀ , H ₁₁ , H ₁₂)サービス 即時、専用および予約呼サービス 閉域加入者グループサービス
サービス形態	双方向対象、非対称および片方向回線
信号方式	衛星系信号方式: 新規メッセージを含むITU-T No. 7標準信号方式 地上系信号方式: ISDN DチャネルプロトコルおよびNo. 7信号方式
制御回線 (CS-US, CS-NCS間)	
伝送速度	160 kbit/s (TDMAフレーム長: 32 ms)
マルチ フレーム長	256 ms (CS-US) 64 ms (CS-NCS)
誤り訂正方式	畳み込み符号/ビタビ復号化方式
所要EIRP	約 60 dBW (標準E局、F局)
トラヒック回線 (標準E局間、F局間)	
伝送速度	4.64 Mbit/s/キャリア (TDMAフレーム長: 32 ms)
キャリア数	8 キャリア/トランスポンダ
バースト割当て	所要数の基本バースト (伝送速度128 kbit/s) を割当てる方式。
誤り訂正方式	符号化率 1/2または 3/4を適宜選択。
暗号化	呼毎に、CSからUSに対して、各US固有の鍵により暗号化した暗号鍵を配付
所要EIRP	約 65 dBW (標準E局間、F局間)

第3章 階層化分散制御を用いた衛星同報システムの設計

3.1 緒言

衛星通信の特長の一つとして多元接続性および同報性があり、この特性により衛星通信システムでは一つのアップリンク回線を多数のユーザ局で同時に受信する同報モードのサービスを容易に実現することができる。同報サービスではユーザ数が多い程1局あたりの衛星回線使用コストが下がるため、経済的にもそのメリットが活かされる。

一方、同報サービスにおいてユーザ局を受信専用とするとユーザ局の送信設備が不要となり、また電波発射による他への妨害等の心配が無いことから設備の仕様を緩和し、設置工事を容易にすることができる。従って、ユーザ局の導入コストを格段に低くできる。

これらより、受信専用ユーザ局を対象とした衛星同報システムは、今後広い範囲での利用が考えられる。そこで本章ではこの受信専用ユーザ局を対象とした衛星同報システムについて検討を行う。

近年、衛星回線を介して画像やデータを同報的に配信するシステムの利用が各種図られてきている⁽³⁶⁾⁻⁽³⁹⁾。図3.1に、同報モード衛星回線を用いた、データ配信システムの概要を示す。図のシステムは一つの中央局と多数のユーザ局から構成され、中央局から送信されたデータは同報モード衛星回線を介して各ユーザ局へ配信される。一方、各ユーザからの情報は地上制御回線を介して中央局へ伝送される。このような同報モード衛星回線を用いたデータ配信システムを高い信頼度でかつ効率的に構築するには、一回の伝送で配信されるデータごとに高い伝送成功確率を得ることと、各ユーザごとに正しく受信できたかどうか確認することが重要である。このユーザごとの受信確認を数千から数万局規模の受信専用ユーザ局を対象として行うには、既存の地上通信網の効率的な利用が必要となる。

この受信状況の確認については、これをユーザごとに行うことにより信頼性を高める

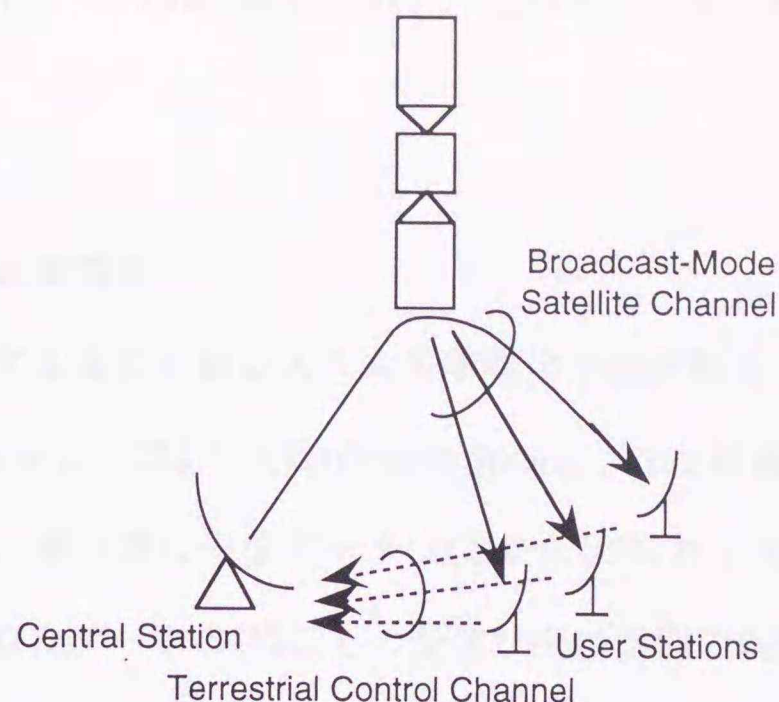


図 3. 1 同報モード衛星回線を用いたデータ配信システム概要

ことができるものの、データ配信元の中央局が多数のユーザ局の受信状況を 1 局で集中管理する場合大きな負担となる。そこで本章ではシステムを効率良く運用するためにユーザ局を複数のグループに分割し、中央局の下に階層的に副管理局を設け、副管理局毎に担当するグループのユーザ情報管理を分散して行う構成を提案する。この階層化制御網でユーザ局ごとの受信状況を管理する場合その確認応答処理時間が、また制御網全体ではその設置運用コストが重要な課題である。そこでこれら 2 つの観点から定量的な検討を行い、制御網構成の最適化を図る。

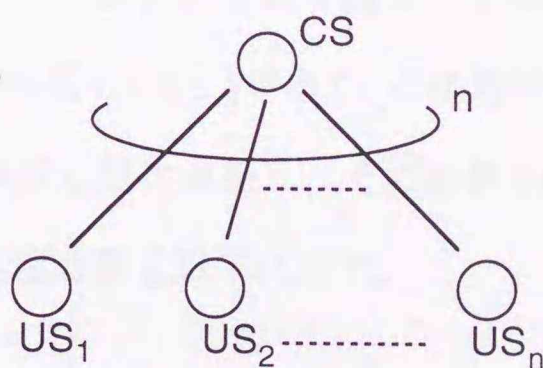
次に、上記階層化制御網を有する同報システムの一例として、G3ファクシミリデータを対象とし、そのデータ配信を高い信頼度で実現するシステム構成の設計を行った。その一環として、同報モード衛星回線において高いファクシミリ配信成功確率を得るためのデータフレーム繰返し送信方式について定量的な検討を行い、さらにこれら検討結果をもとに 3 つの局種別に対応する通信装置をパーソナルコンピュータを用いて開発し、提案した網構成での制御が正常に機能することを実験により確認した。

以下、3. 2 で階層化分散制御網構成を示し、3. 3 において確認応答処理時間およびシステムコストの観点からの評価を行う。次に 3. 4 で G3ファクシミリデータ配信

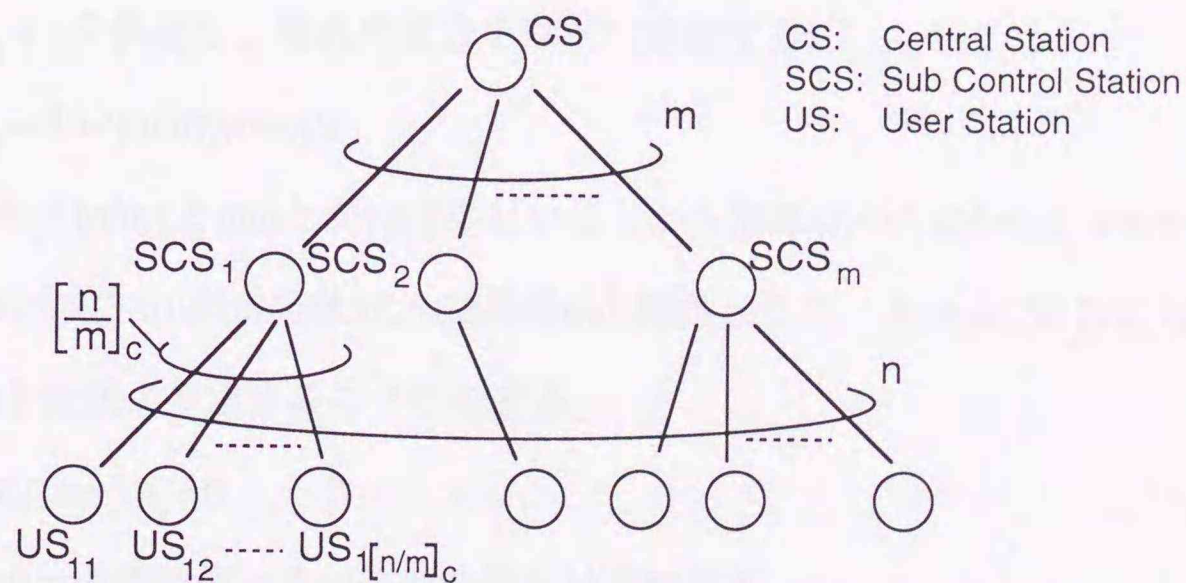
システムの設計、3. 5でその試作結果を示す。そして3. 6に最適化の指針を含めてまとめる。

3. 2 階層化分散制御網構成

図3. 2に今回提案する衛星同報システム用階層化分散制御網の構成を示す。図中、USはユーザ局(User Station)、CSは中央局(Central Station)、SCSは副制御局(Sub Control Station)をそれぞれ表し、画像等の送信データはCSからUSに対して衛星同報回線を通じて配信される。配信されたデータのUSごとの受信状況は個別の制御回線を通じて上位の局で管理される。図3. 2(a)はCSが全てのUSを一元的に管理する通常の2階層の、また図3. 2(b)は今回提案するCSとUSとの間にSCSを配置し、SCSにおいてその担当



(a) 2-Layered configuration in which the CS directly controls the USs



(b) Proposed 3-Layered configuration in which each SCS controls the USs belonging to the SCS

図3. 2 衛星同報システム用階層化分散制御網構成

するUSの情報を分散制御する3階層の構成をそれぞれ示す。US局数が n 局の場合、図3.2(a)ではCSとUSとの間に n 本の制御回線が設定される。一方、図3.2(b)では m 局のSCSを設け、USを $[n/m]_c$ 局毎にサブグループ化し、各SCSがそれぞれのユーザサブグループを管理する。ここで $[*]_c$ は $*$ を下回らない最小の整数値を表し、SCSの管理するUSは各SCSに均等に分割されるものとする。SCSとUSとの間には最大 $[n/m]_c$ 本の、またCSとSCSとの間には m 本の制御回線がそれぞれ設定される。

3.3 制御網構成の評価

3.3.1 受信状況確認応答処理時間

図3.2の各網構成に対して、US局の受信状況を確認するための応答処理時間について検討する。ここでは応答シーケンスとして図3.3に示すシリアルポーリングを想定する。図3.3(a)ではCSが n 局のUSと1局当り t_p の処理時間で順次連絡する。図3.3(b)ではSCSが処理時間 t_{p1} で各USと順次連絡し、その結果をCSが処理時間 t_{p2} で各SCSと順次連絡する。各構成の所要処理時間を以下に示す。

$$t_{p,a} = nt_p \quad (3.1)$$

$$t_{p,b} = [n/m]_c t_{p1} + mt_{p2} \quad (3.2)$$

ここで $t_{p2} = \alpha t_{p1}$, $t_{p1} = t_p$ を仮定し、両式の差分を以下に定義する。

$$\Delta t_p \equiv t_{p,a} - t_{p,b} = \{n - ([n/m]_c + \alpha m)\} t_p \quad (3.3)$$

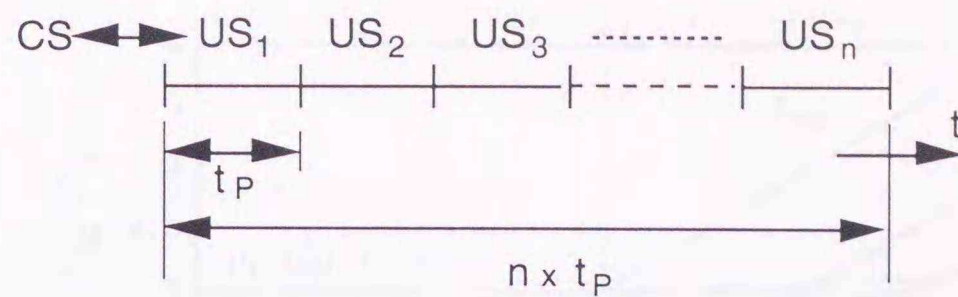
局数比 n/m が大のとき $[n/m]_c$ と n/m とがほぼ等しいことから簡単化のため $[n/m]_c = n/m$ として扱う。このとき、式(3-3)はUS局数 n とSCS局数 m の関数となり、ある n に対して処理時間を最小とする m を次式より求めることができる。

$$d\Delta t_p/dm = (-\alpha + nm^{-2})t_p = 0 \quad (3.4)$$

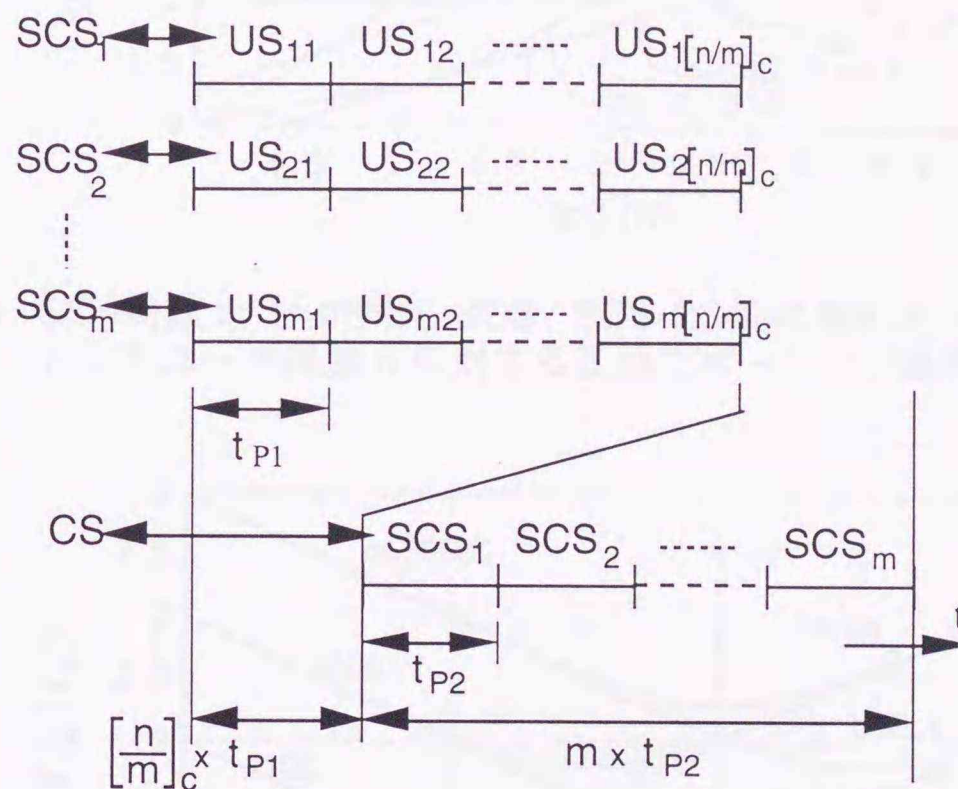
ここで m は非負より m の最適値とその処理時間を以下に得る。

$$m = \sqrt{n/\alpha} \quad (3.5)$$

$$t_{p,b} = (n/m + \alpha m)t_p = 2\sqrt{\alpha n} t_p \quad (3.6)$$



(a) Polling sequence for Config. (a)



(b) Polling sequence for Config. (b)

図 3. 3 各制御網構成でのポーリング手順および処理時間

例として、 $n=100$, $\alpha=1$ のとき、 $m=10$, $t_{p,b}=20t_p$ となる。これは同じ US 局数に対する制御網構成(a)での処理時間 $t_{p,a}=100t_p$ の $1/5$ である。

図 3. 4 に SCS 局数 m と US-SCS/SCS-CS 処理速度比 α をパラメータとしたときの US 局数 n に対する t_p で正規化されたポーリング応答処理時間 $t_{p,a}/t_p$ および $t_{p,b}/t_p$ をそれぞれ示す。また US 局数 n に対して SCS 局数を最適化した場合の $t_{p,b}/t_p$ も示す。図 3. 4 より、制御網構成(a)では US 局数に比例して処理時間がかかるのに対して、制御網構成(b)では US 局数に対して SCS を最適局数としたとき処理時間が US 局数の平方根に比例することから、US 局数の増加に対する処理時間低減量が大きくなることがわかる。また、図 3. 5 に制御網構成(b)における US 局数 n と US-SCS/SCS-CS 処理速度比 α をパラメータとしたとき

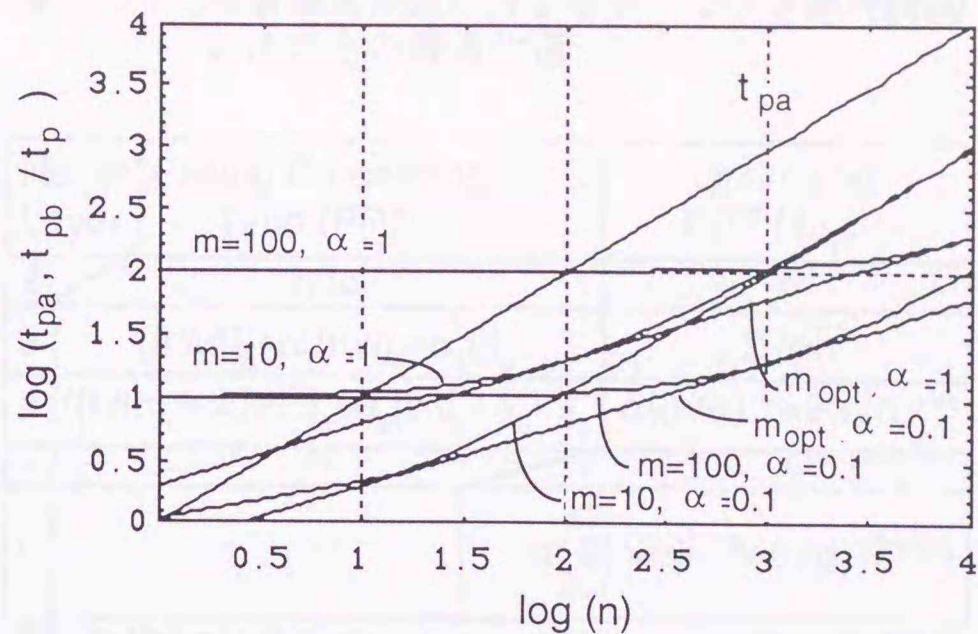


図3. 4 SCS局数 m およびUS-SCS / SCS-CS処理速度比 α をパラメータとしたユーザ局数 n に対する正規化ポーリング処理時間

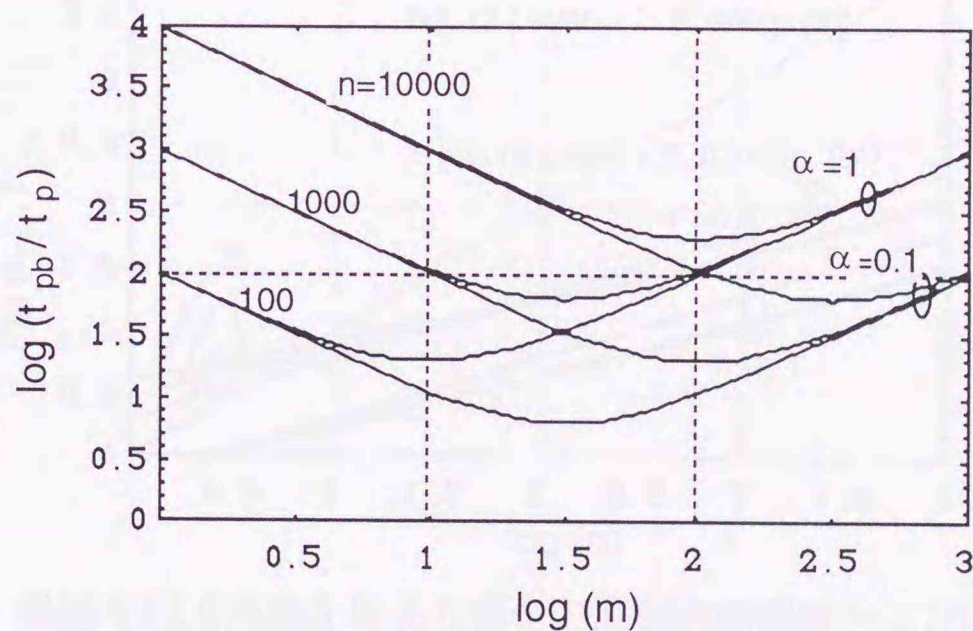


図3. 5 ユーザ局数 n およびUS-SCS / SCS-CS処理速度比 α をパラメータとしたSCS局数 m に対する正規化ポーリング処理時間

のSCS局数 m に対する応答処理時間 t_{pb}/t_p を示す。図3. 5より、処理速度比 α を小さくする、即ちSCS-CS間処理速度をUS-SCS間処理速度に比べて速くすることにより全体の応答処理時間を短縮することができ、一方そのときのSCS最適局数が増加することがわかる。

次に、階層化構造の段数について検討する。図3. 2(b)ではCSとUSとの間にSCSが加わり3階層構造となっているが、このSCS層をさらに多層化することを考える。例え

表 3. 1 階層構造段数に対するポーリング処理時間
およびその最適化値

No. of Layer	Polling Processing Time (PPT)	Optimized PPT $(1/t_p)^{*1}$
2	$n t_p$	n
3	$\{[n/m]_c + \alpha_1 [m/l]_c + \alpha_2 l\} t_p$	$2\sqrt{\alpha n}$
4	$\{[n/m]_c + \alpha_1 [m/l]_c + \alpha_2 [l/k]_c + \alpha_3 k\} t_p$	$\alpha \{ (n/\alpha)^{1/2} + 2(n/\alpha)^{1/4} \}$
⋮	⋮	⋮
i	⋮	$\alpha \{ \sum_{k=1}^{i-2} (n/\alpha)^{1/2^k} + (n/\alpha)^{1/2^{(i-2)}} \}$

*1: in the case where $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_i = \alpha$ is assumed.

$[*]_c$: minimum integer not less than $*$.

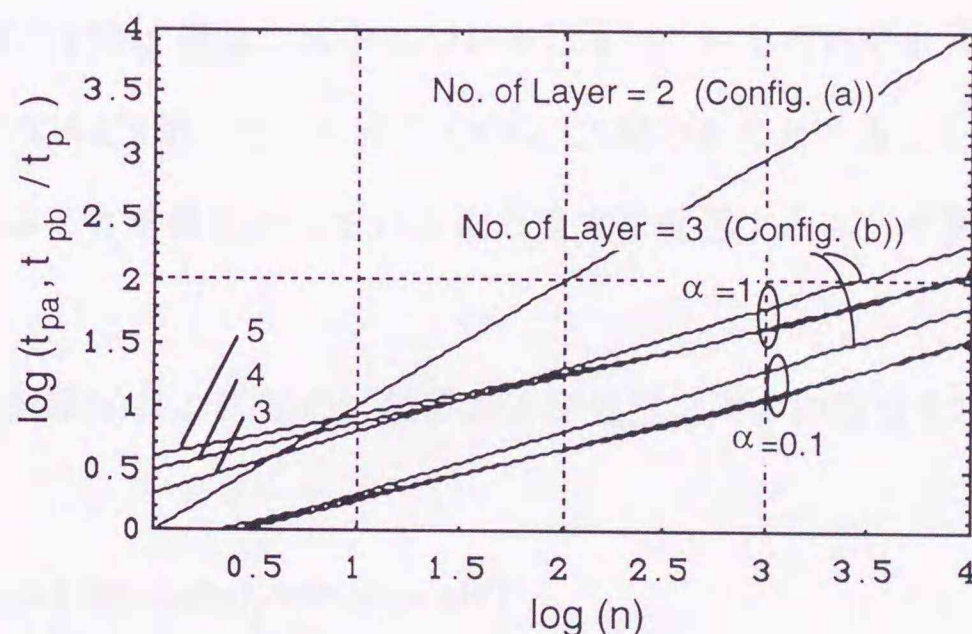


図 3. 6 最適なSCS局数を与えた場合の制御網階層数およびUS-SCS / SCS-CS処理速度比 α をパラメータとしたユーザ局数 n に対する正規化ポーリング処理時間

ば、SCSをいくつかまとめてグループ化し、そのSCSを管理する上位のSCS局を設ける。表 3. 1 に、前述の議論を拡張した、階層構造段数に対するポーリング処理時間を示す。また、SCS以上の局間での処理時間比 α_i を一様とした場合の最適化ポーリング処理時間も併せて示す。なお、表 3. 1 においても議論の簡単化のため最適値を求める際には制御回線数を実数で表している。図 3. 6 に、 $\alpha=1, 0.1$ の場合の局数 n に対する正規化ポーリング処理時間を階層段数をパラメータとして示す。図 3. 6 の結果より、US局数 n の大きな領域で 4、5 階層構成の場合 3 階層の場合より処理時間が低減されるも

の、2階層の場合からの処理時間短縮効果はほぼ同等であることがわかる。

3. 3. 2 制御網コスト

図3. 2(a)と(b)に示された構成の衛星同報システム制御網を構築し、運用するために必要となるコストとして装置設置コストおよび回線使用により生じる通信コストについて検討する。表3. 2に、網構成(a), (b)それぞれの場合の比較検討対象項目として設置および通信コストを示す。表3. 2の設置コストにおいて、aはCSにおけるUS毎の、a'はSCSにおけるUS毎の、そしてb'はCSにおけるSCS毎のインタフェースコストをそれぞれ示す。また、網構成(a)のCS設置コストをA、網構成(b)のSCSおよびCS設置コストをそれぞれA', B'とする。通信コストについては a_c, a'_c, b'_c をそれぞれ網構成(a)のCS-US間、網構成(b)のSCS-US間、そして同じくCS-SCS間のものとする。なお、ここでは網構成間の差を調べることを目的としているため双方に共通するユーザ局コスト等は考慮していない。

表3. 2の網構成(a)および(b)の、設置および通信コストの差分を次式により定義する。

$$\begin{aligned}\Delta IC &\equiv \{na+A\} - \{ma'[n/m]_c + mb' + mA' + B'\} \\ &= n(a-a') - m(b'+A') + (A-B')\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}\Delta CC &\equiv \{na_c\} - \{ma'_c[n/m]_c + mb'_c\} \\ &= n(a_c - a'_c) - mb'_c\end{aligned}\quad (3.8)$$

なお、ここで再び $[n/m]_c = n/m$ とした。式(3.7)より、USと対向するインタフェースコスト

表3. 2 制御網構成(a), (b)の設置および通信コスト比較

Item	Config. (a)	Config. (b)
Implementation Cost	$na+A$	$ma'[n/m]_c + mb' + mA' + B'$
Communication Cost	na_c	$ma'_c[n/m]_c + mb'_c$

(a, a')およびCS設置コスト(A, B')がそれぞれ同等であれば $\Delta IC \approx -m(b'+A')$ となり、設置コストの差分はm局分のSCSのコストで決定されることがわかる。

一方、通信コストについて網構成(b)の通信コストを式(3.9), (3.10)で表し、式(3.8)に代入して式(3.11)を得る。

$$a_c' = \beta a_c \quad (3.9)$$

$$b_c' = \gamma a_c \quad (3.10)$$

$$\Delta CC = -\{n(\beta-1)+m\gamma\}a_c \quad (3.11)$$

式(3.9)の β は網構成(a)のCS-US間通信コストと網構成(b)のSCS-US間通信コストの比を表すことからこれをUSアクセス回線通信コスト比と呼ぶ。今、式(3.11)において $\Delta CC=0$ とおき、 $a_c \neq 0$ とした場合、制御網構成(a)および(b)の通信コストが等しくなるしきい値 β_{th} は、

$$\beta_{th} = 1/n (n-m\gamma) = 1-\gamma m/n \quad (3.12)$$

となる。式(3.12)においてmがnに対して十分小さければ $\gamma m/n \rightarrow 0$ となり、このとき $\beta_{th} \rightarrow 1$ となる。例えば、 $\gamma=1$, $n=10,000$, $m=100$ では $\beta_{th}=0.99$ である。これより、網構成(b)の通信コストを網構成(a)と同等にするためのUSアクセス回線通信コスト低減はわずかで良いことがわかる。

一方、制御網全体のコスト差を以下で表す。

$$\begin{aligned} \Delta C &\equiv \Delta IC + \Delta CC \\ &= -m(b'+A') + n(a_c - a_c') - m b_c' \\ &= -mC + n a_c (1-\beta) - m \gamma a_c \end{aligned} \quad (3.13)$$

ただし $C=b'+A'$ とおく。また、ここでは設置コストと通信コストを同列で比較するため、どちらも総額とする。従って、通信コストについてはある想定される運用期間全体に対する費用とする。式(3.13)に対して前述の議論と同様に $\Delta C=0$ とおくことにより網構成(a), (b)のシステムコストが同額となるUSアクセス回線通信コスト低減率しきい値として以下の結果を得る。

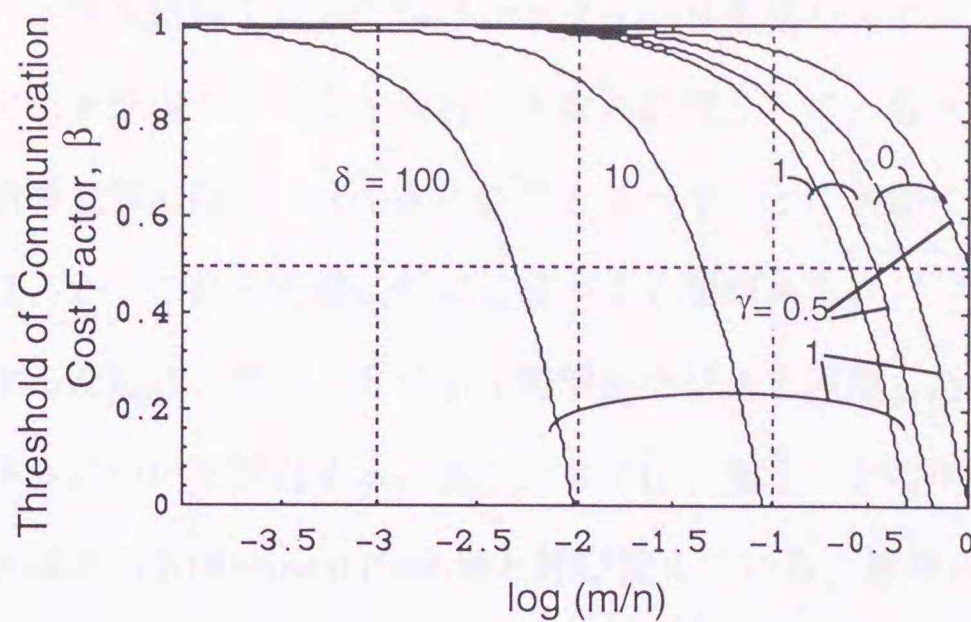


図 3. 7 SCS設置 / US-CS通信コスト比 δ およびSCS-CS / US-CS通信コスト比 γ をパラメータとしたSCS局数 m とユーザ局数 n の比に対して制御網構成間システムコストを同額とするUS-SCS / US-CS回線コスト比 β のしきい値

$$\begin{aligned}\beta_{th, total} &= 1 - m(\gamma a_c + C)/(n a_c) \\ &= 1 - m(\gamma + \delta)/n\end{aligned}\quad (3.14)$$

ただし $\delta = C/a_c$ とした。図 3. 7 に、SCS-CS/US-CS通信コスト比 γ と SCS設置 / US-CS通信コスト比 δ をパラメータとして SCS/US局数比 m/n に対する $\beta_{th, total}$ を求めた結果を示す。図 3. 7 で、 $\delta=0$ の場合が式(3.12)に相当する。図 3. 7 より、 m/n 局数比が小さい、即ち US局数 n が SCS局数 m に対して十分大きければ、 δ の値に依存するものの $\beta_{th, total}$ が 1 に収束することがわかる。一方、式(3.5)の最適 SCS 局数条件下では、図 3. 7 の横軸を $m/n = 1/\sqrt{\alpha n}$ と読替えることができ、ユーザ局数 n と回線速度比 α を与えると横軸上の値が定まる。この時、式(3.14)より $\beta_{th, total}$ と δ のトレードオフになる。例えば、 $n=10,000$, $\alpha=1$ では $\log[m/n]=-2$ となり、 $\gamma=1$ の場合、図より $\beta_{th, total}=0.9$ とするための条件として $\delta<10$ が得られる。これら関係より、通信コスト等の制約条件を与えると設備コストの上限が得られる。

3. 4 同報モード衛星回線を用いたG 3 ファクシミリ配信システムの設計

衛星を用いたデータ配信システムを設計する際の課題として、各ユーザに対して1回のデータ配信を信頼度高く行い、またその結果をユーザごとに個別に効率良く管理することが重要であり、かつこれらを経済的に達成する必要がある。

これらを実現するために、図3. 8に示す階層的な構造を適用したG 3 ファクシミリデータ配信システムについて検討する。図3. 8では、図3. 2の中央局をハブ(Hub)局、副制御局を地域ホスト(Regional Host)局と呼び変えている。地域ホスト局は地域ごとに設置され、担当地域内のユーザ情報管理を分散的に独立して行う。図3. 9に分散化された制御網構成を示す。図において、ファクシミリ配信用の片方向同報モード回線はハブ局からユーザ局および地域ホスト局へ衛星経由で設定される。一方、制御情報を伝送するための制御回線はハブ局と各地域ホスト局、および地域ホスト局と各ユーザ局との間に設定される。この制御回線は公衆電話網やパケット網等の地上網を用いて設定される。このような階層構成を用いることにより、ハブ局の機能はユーザ情報管理を含

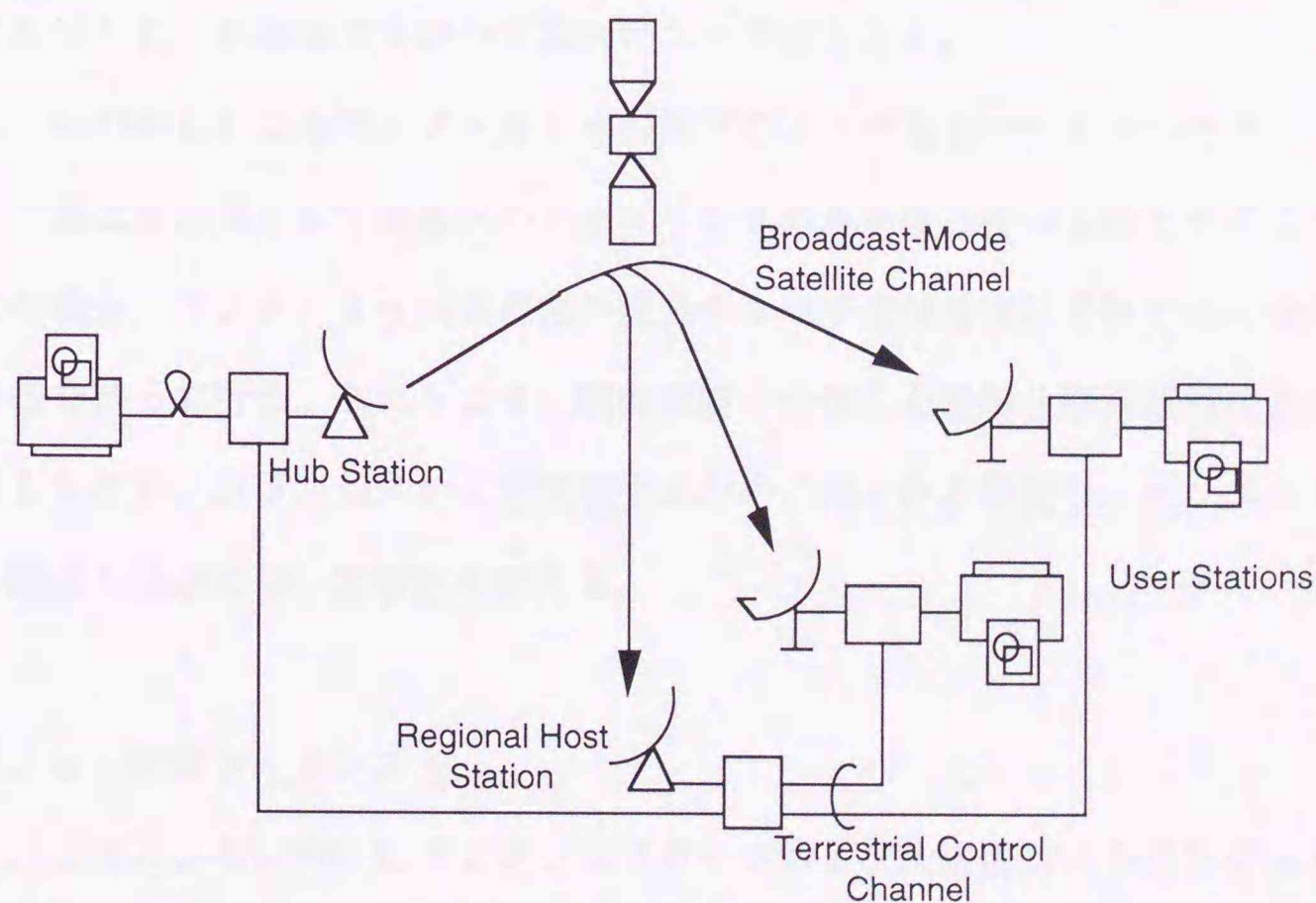


図3. 8 同報モード衛星回線を用いたG 3 ファクシミリ配信システム概要

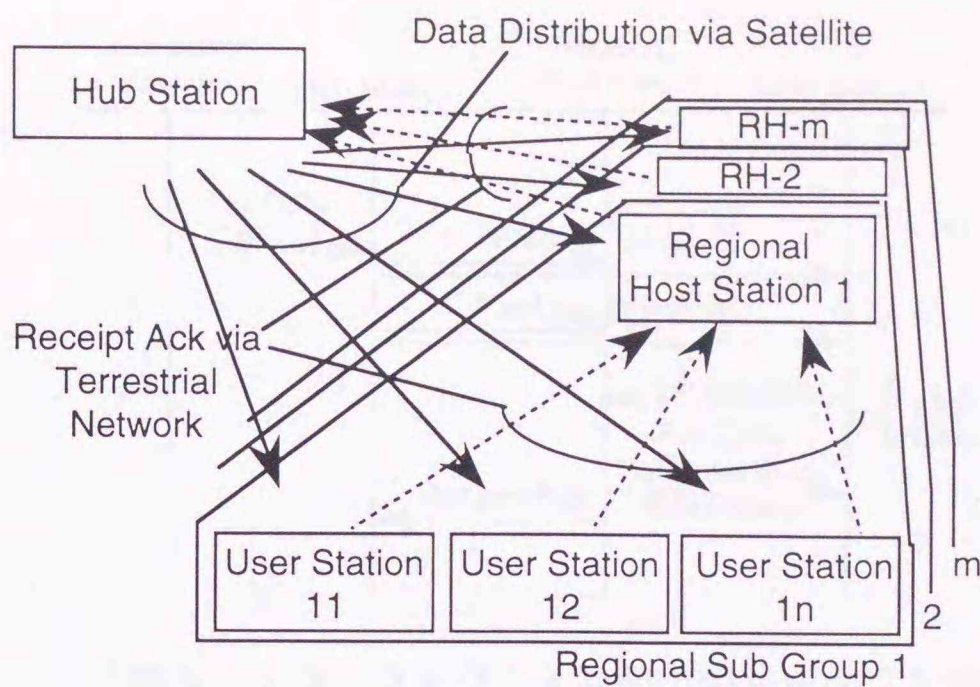


図3. 9 G3ファクシミリ配信システム制御網構成

まない、ファクシミリ配信に関わる簡単なものとする事ができる。一方、各地域ホスト局では担当地域内のユーザ情報管理を独立して柔軟に行うことができる。

この階層化された網構成を用いた配信サービスイメージとして、地域的に支社や工場が分散している企業での情報伝達への適用が想定される。この場合、ファクシミリ配信は本社において集中的に、一方ユーザ情報管理は各地域を統括する支社ごとに分散的にそれぞれ行われ、各地域の支店や営業所がユーザ局となる。

また、別の例として地域ホスト局とその配下のユーザ局を一つのユーザグループとし、ハブ局は共用局として衛星へのアップリンクのみを受け持つものとする事もできる。この場合、ファクシミリ伝送ごとの課金やユーザ情報管理はそれぞれの地域ホスト局が責任を持って行う。これらより、制御機能を分散した階層化制御網構成の多様な活用が考えられる。以下、システムを実現するための鍵となる制御シーケンスおよびプログラム繰返し伝送について検討を加える。

3. 4. 1 制御シーケンス

図3. 10に、今回用いたファクシミリデータおよび制御用シグナリングメッセージの基本的なシーケンス例を示す。図において、まずハブ局は情報プロバイダから配信す

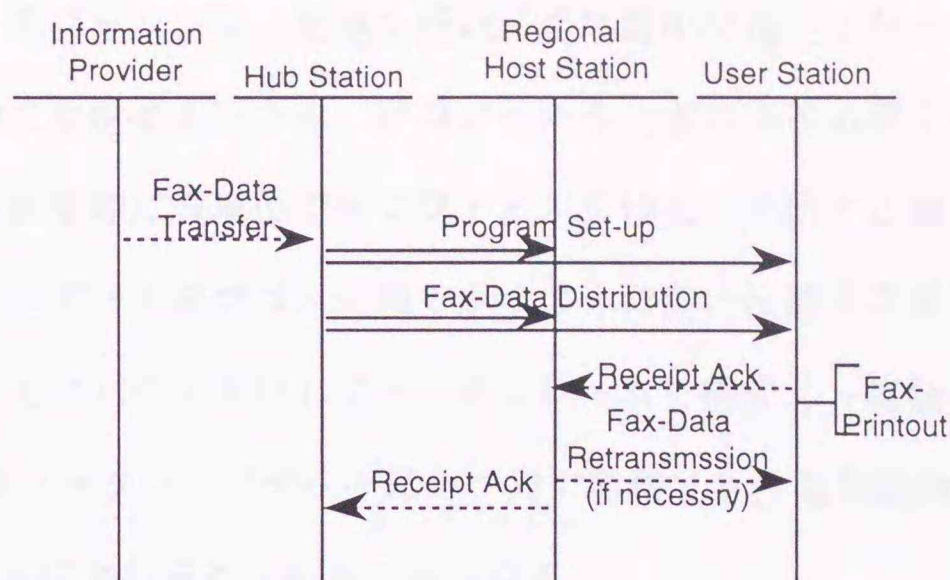


図 3. 1 0 ファクシミリ配信のシーケンス例

Flag
DSAP/SSAP
Sequence No.
Circuit ID Code
Message ID
Data
Flag Check Sequence
Flag

図 3. 1 1 データおよび制御メッセージフレーム構成

べきデータを受信、蓄積する。次いで配信用回線を設定するためのセットアップメッセージを地域ホスト局およびユーザ局に対して送信する。この回線制御メッセージおよびファクシミリデータ共、データフレーム構成としてハイレベルデータリンク制御手順 (High-Level Data Link Control Procedure: HDLC) ⁽⁴⁰⁾ フォーマットを用いる。図 3. 1 1 にメッセージフレーム構成を示す。このメッセージ中の送受信アドレス部に受信対象となるユーザ局IDを示す。このID種別として全ユーザー一斉と地域ユーザー一斉を用意する。ここで、各受信ユーザは個別、地域およびシステム全体の3種類のID番号を持ち、システムIDはハブ局IDを兼用する。ハブ局はファクシミリ伝送ごとに呼識別番号を与え管理すると共に、ユーザ局に暗号化鍵を渡す。このメッセージに引き続き、ハブ局は同報モー

ド衛星回線を介してファクシミリ配信を行い、受信局IDで指定された各ユーザおよび地域ホスト局において受信する。なお、数頁にわたる文書の再送処理を効率良く行うために、ファクシミリ配信時に頁単位でサブファイルを作成、配信する構成を採用した。

このファクシミリデータ部では、次節で示すように高い伝送成功確率を得るために、一定長のデータごとにパケット化してデータフレームを構成し、複数回繰返し送信する。この結果、G3ファクシミリデータはハブ局で蓄積され、衛星回線上では独自のHDLCフォーマットにより伝送されることとなる。

各ユーザ局ではファクシミリデータ受信後、その受信結果を地域ホスト局に連絡する。受信結果の成否の判断は、セットアップメッセージで伝えられるデータサイズと、正常受信されたデータサイズとの比較で行う。地域ホスト局では管轄のユーザ局の結果を集め、その結果をハブ局に通知する。ここで受信不良のユーザ局に対しては、地域ホスト局から個別に地上回線を介して再送処理を行う。

一方、地域ホスト局はその地域でのユーザ局の受信状況を代表するものとみなす。そして地域ホスト局が受信不良であった場合には、地域ホスト局からハブ局に再送要求を通知し、これを受けてハブ局から同報モード衛星回線を介してその地域のユーザ全てに対して同一内容のファクシミリデータを再送する。なお、ここで地域ホスト局はユーザ局より良好な回線稼働率を得るために、例えば一回り大きなアンテナの設置等により、ユーザ局より優れた受信特性を持つこととする。また、再送の際には該当地域のみを対象としてアドレス指定することにより、他の地域での重複受信を避けることができる。これら再送処理のうち、前者の個別再送によってハブ局および衛星上での負荷の低減が、また後者の同報モード再送により地域ホスト局での再送要求の輻輳を緩和することがそれぞれできる。

3. 4. 2 データフレーム繰返し伝送

受信専用ユーザ局を対象とする片方向リンクの同報モード衛星回線では、通常のデー

タ回線に適用される自動再送要求方式を用いることができない。一方、データ誤りを防ぎ、高い伝送成功確率を達成するにはなんらかのリンク制御が必要である。また、同報モード衛星回線は1回のファクシミリ伝送ごとに設定されるものとする。ここで、衛星回線での誤り検出／訂正は前述のHDLCフォーマットを用いて行う。ここでフレーム長や許容誤りビット数等はフレーム誤り率等を考慮した上で決定されるべき伝送パラメータとなる。さらに、同一フレームの繰返し伝送を行うことにより、ユーザ局でのファクシミリ受信成功確率を向上させることができる。

今、同報モード衛星回線のビット誤り率を P_{BER} 、フレーム長を N_{FRAME} 、ファクシミリデータ長を N_{FAX} 、フレーム誤り確率を P_{FRAME} 、ファクシミリデータ中フレーム数を N_{PF} 、そしてフレーム繰返し送信回数を K としてそれぞれ表し、フレーム誤り確率 P_{FRAME} が十分小さいと仮定すると、ファクシミリデータ伝送失敗確率 P_{FAX} は次式で表される。

$$P_{FAX} = N_{PF} P_{FRAME}^K \quad (3-15)$$

ただし、

$$N_{PF} = N_{FAX} / N_{FRAME} \quad (3-16)$$

であり、 P_{FRAME}^K は一つのフレームが K 回全て失敗する確率を示している。

今、リンク制御方式に誤り訂正能力がない場合、フレーム誤り確率は次式となる。

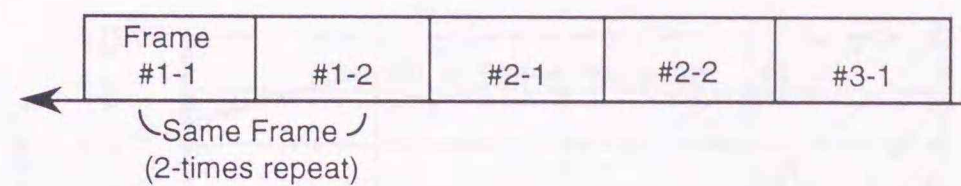
$$\begin{aligned} P_{FRAME} &= 1 - (1 - P_{BER})^{N_{FRAME}} \\ &\approx N_{FRAME} P_{BER} \end{aligned} \quad (3-17)$$

ここで、 P_{BER} は十分小さく、また誤り発生がランダムであることを仮定している。

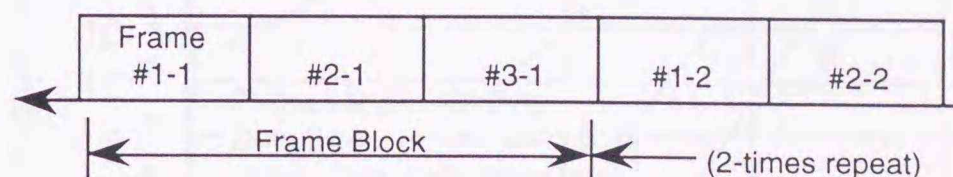
また、フレーム中の1ビット誤りまでの訂正機能を持つ場合、フレーム誤り確率は次式となる。

$$\begin{aligned} P_{FRAME} &= 1 - \{(1 - P_{BER})^{N_{FRAME}} + N_{FRAME} P_{BER} (1 - P_{BER})^{N_{FRAME}-1}\} \\ &\approx N_{FRAME} (N_{FRAME} - 1) P_{BER}^2 \\ &\approx (N_{FRAME} P_{BER})^2 \end{aligned} \quad (3-18)$$

図3. 12に、データフレーム繰返し送信方式の概要を示す。図3. 12では同一の



(a) 同一フレーム連続繰返し

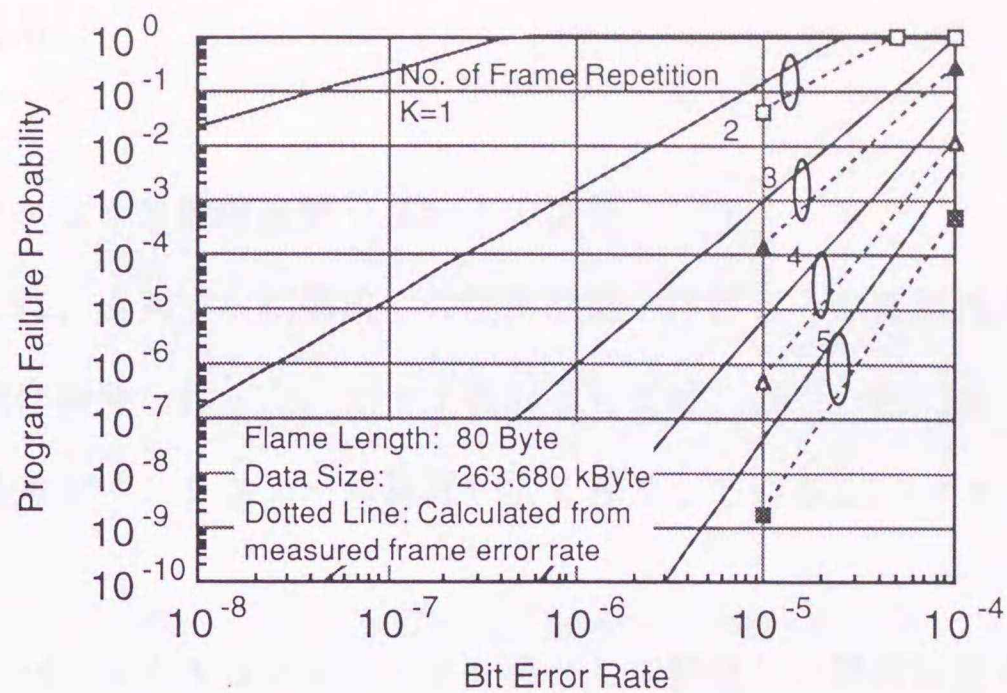


(b) フレームブロック毎繰返し

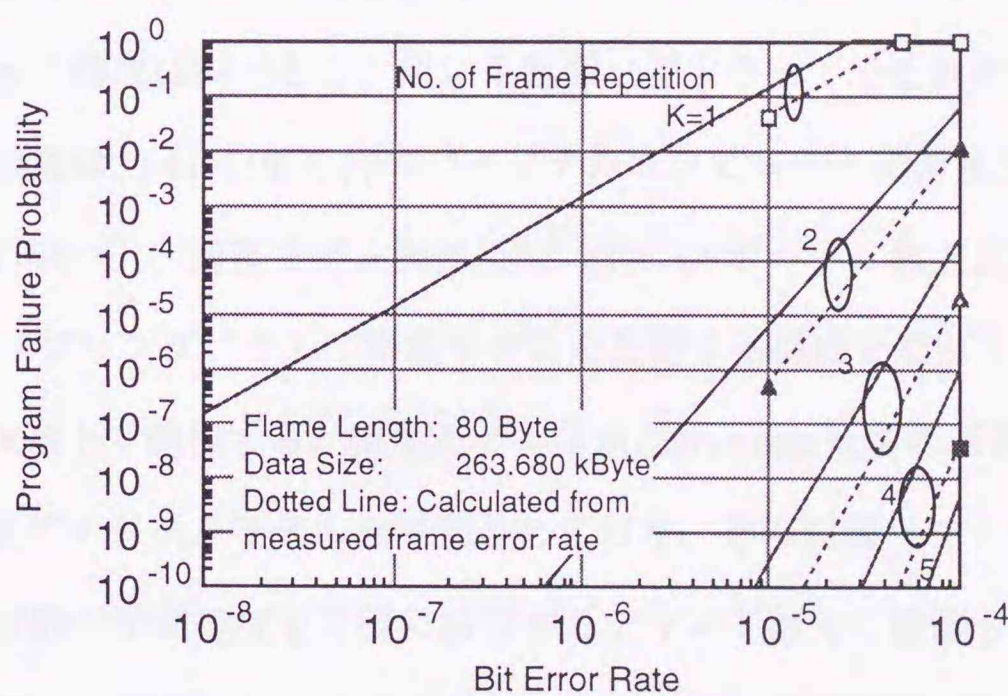
図3. 12 データフレーム繰返し送信方式の概要

フレームが2回ずつ、(a)では同一のフレームが連続して、また(b)では複数のフレームをブロックとしてこのブロックごとにそれぞれ繰返し伝送されている。受信側では、正常に受信したフレームを1つだけ採用し、他は棄却する。もしくは、正常受信したフレーム間で多数決判定する。図3. 13に、受信ビット誤り率とファクシミリ伝送失敗確率との関係を、データフレーム繰返し回数 K をパラメータとして求めた結果を示す。図3. 13において(a)はフレームごとの誤り訂正機能がない場合、(b)はフレームごとに1ビット誤りまでの訂正が行われる場合の結果を示し、それぞれ式(3-17)および(3-18)に対応している。ここで後述の実験との整合を図るためフレーム長は80 Byte、ファクシミリデータ長は263.680 kByte (2.1 Mbit)とした。このファイル長は図と文書を取りまぜた技術説明資料 (A4版原稿6頁) の例に従った。なお、実際には制御ビットがオーバーヘッドとしてデータに付加されるが、簡単化のためこれらオーバーヘッドは上記ビット数に含まれているものとした。図3. 13より、(a)、(b)どちらの場合でも繰返し回数を増やすことによって失敗確率が大きく低減されることがわかる。また、(a)と(b)の比較により、同一のビット誤り率において誤り訂正を行った場合には、行わなかった場合に比べて少ない繰返し回数で同等以上の特性が得られることがわかる。

さらに、この繰返し送信において図3. 12 (b)に示したブロック単位のフレーム繰返し送信を採用することにより、データフレームのバッファ機能を必要とするものの、数



(a) No frame-error correction



(b) 1-bit error correction in a frame

図3. 13 フレーム繰返し送信回数Kをパラメータとした場合の、受信ビット誤り率に対するプログラム伝送失敗確率

フレームにわたるような長い周期のバースト誤りもしくは瞬断の影響を回避することができる。

これらフレーム長や繰返し回数は、ファクシミリデータ配信を行うシステムでの運用ビット誤り率やデータ長等を考慮して適宜決めることとなる。一方、データの繰返し伝送は情報の冗長な送信となることから過度の繰返しは避ける必要がある。なお、データ伝送時間については、地上回線に比べて衛星回線を高速化することによって繰返しに

よる冗長分を補える。

3. 5 G3ファクシミリ配信実験システムの開発

上記検討をもとに、提案する網構成での制御機能の検証とその実現性の実証のために実験システムの試作開発を行った。データ種別としては、最も一般的なサービスであり、実際の通信端末やインタフェース装置が広く普及しているG3ファクシミリを対象とした。

図3. 14に、パーソナルコンピュータを核として開発した通信装置の機能ブロック図を示す。この開発では、3つの局種別であるハブ局、地域ホスト局そしてユーザ局についてハードウェア構成は同一とし、用いる制御ソフトウェアでそれぞれの局機能を規定した。各通信装置は32-bit CPUを持つパーソナルコンピュータに衛星通信用HDLCインタフェース(I/F)ボード、衛星モデム制御用RS-232C I/Fボード、地上回線データ伝送用FAX/Dataモデム、プリンタ、そして衛星モデムを接続する構成となっている。制御ソフトウェアはMS-DOS上で動作する。衛星モデムは米Comstream社製の情報速度およびFEC符号化率可変デジタルモデムを対象としており、その制御ソフトウェアではデータ配信ごとに周波数や情報速度を可変に指定するデマンド割当て機能も有している。ここで今回の装置では、採用したHDLC I/Fボードの制約により衛星回線の伝送速度が64

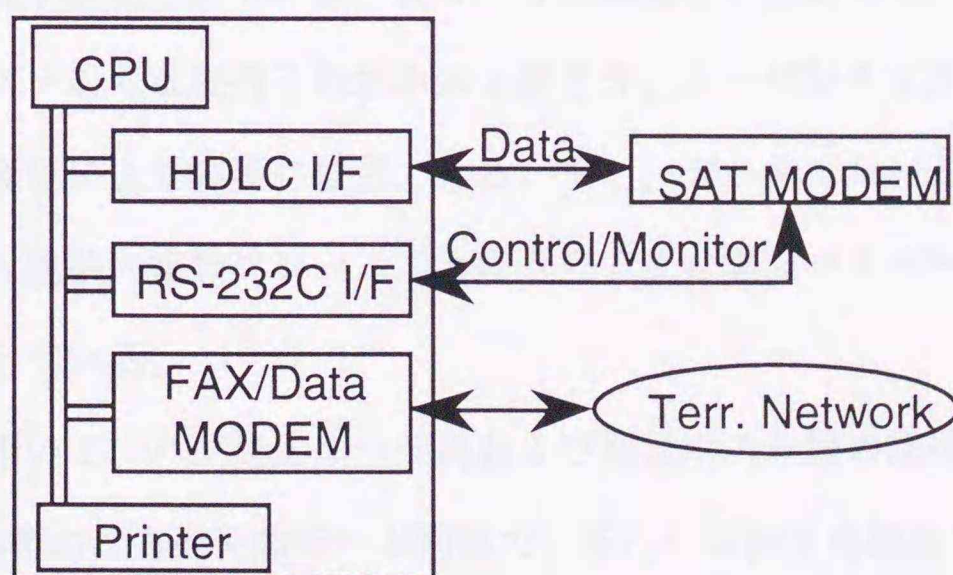


図3. 14 通信装置機能ブロック図



図3. 15 開発した通信装置の外観写真

kbit/s以下、HDLCデータフレーム中の誤り検出1 bitまで、また誤り訂正機能無しに制限されている。試作した装置において、ハブ局装置はファクシミリ配信機能を、地域ホスト局はユーザ情報管理機能を、またユーザ局は同報ファクシミリ受信機能をそれぞれ持っており、また制御情報をやりとりするための通信機能も有している。各通信装置は装置起動、伝送パラメータセット、同報運用、そしてOS制御の各動作モードを持ち、これら動作モード間の遷移は制御装置のグラフィカルユーザインタフェース上でオペレータからのコマンド投入により行われる。

図3. 15に、今回開発した通信装置3局分の外観写真を示す。図中、右端に衛星モデムが3台あり、パーソナルコンピュータおよび衛星モデム各1台によってそれぞれの局用の通信装置が構成されている。表3. 3に開発した通信システムの主要諸元をまとめる。このシステムでは取扱う地域ホスト局を5、ユーザ局を25としたが、これはデータベース変更により容易に拡張できる。また、データフレーム繰返し送信回数および同一フレーム連続/複数フレームごと繰返し方式は実験パラメータとして可変に与えられるようにしている。

この装置を用いて、ハブ局とユーザ局および地域ホスト局の衛星モデム間をそれぞれ中間周波数(IF)帯の片方向同報モード回線で、またハブ局と地域ホスト局および地域ホスト局とユーザ局のFAX/Dataモデム間をPBX内線交換の電話回線で接続して実験系を構成し、所定のビット誤り率(Bit Error Ratio: BER)でのファクシミリ同報配信および制御

表 3. 3 開発した通信システムの主要諸元

網構成	
収容局数	地域ホスト局: 5, ユーザ局: 25
プログラム伝送	
ユーザ指定	全ユーザ／地域
暗号化	プログラム毎指定
暗号化鍵更新	地上制御回線経由
フレーム繰返し伝送	繰返し回数可変
受信確認／プログラム再送	
ユーザ局	地域ホスト局と連絡／ 個別、地上電話回線を利用
地域ホスト局	ハブ局と連絡／ 同報モード衛星回線を利用

シーケンスの動作を確認した。伝送対象は前述の 6 頁資料を用い、データフレーム長を 80 Byte とした。実験の結果、全伝送フレーム中の CRC エラー数を調べて求めたフレーム誤り確率として $BER 1 \times 10^{-4}$ の伝送条件において 4.26×10^{-2} 、 $BER 1 \times 10^{-5}$ において 3.48×10^{-3} を得た。これは式(3-17)からの計算値よりそれぞれ若干良好な結果となっている。この測定値を用いてファクシミリ伝送失敗確率を計算した結果を図 3. 1 3 に併せて示す。実際には、フレーム繰返し回数 2 以上では $BER 1 \times 10^{-4}$ でも伝送成功結果を得た。

図 3. 1 6 に、ファクシミリ配信に要する時間を、フレーム繰返し送信回数をパラメータとし、ユーザ局でのセットアップメッセージ受信から最終データ受信までの期間と定義して測定した結果を示す。図の結果より、配信のための所要時間が繰返し回数にほぼ比例していることが確認できた。これと前述の議論より、実際の運用に際しては伝送条件とファクシミリデータ長とを勘案しながらフレーム繰返し回数を適宜選択することが必要である。またこれら実験を通じて、ファクシミリ配信の成否双方のケースについて制御シーケンスが正常に機能していることを確認した。なお、受信確認ではユーザ／地域ホスト局間、地域ホスト／ハブ局間でそれぞれ 40 秒程度要したが、これはほとんど電話回線の接続およびデータリンク設定のためのものであった。

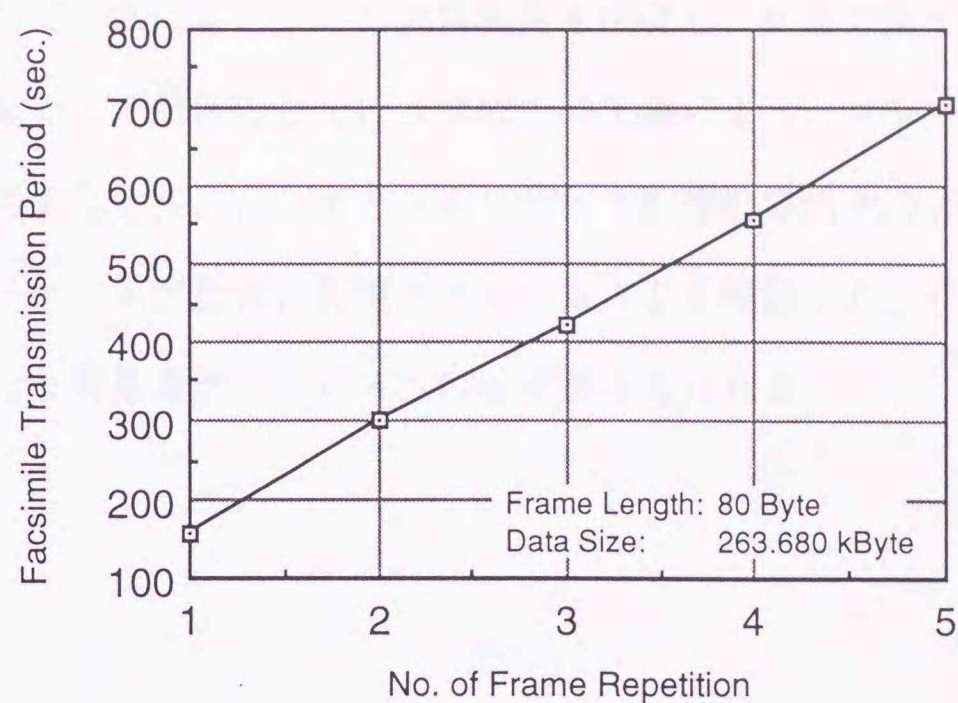


図 3. 1 6 フレーム繰返し送信回数Kに対する
ファクシミリ伝送所要時間

3. 6 結言

衛星同報システム用にユーザ情報を分散管理する階層的な制御網構成を提案し、評価した。この結果、分散制御局数に中央局-副制御局間と副制御局-ユーザ局間の処理時間の比 α をパラメータとしてポーリングによる受信状態応答処理時間を最小にする最適値 $\sqrt{n/\alpha}$ があること、多層化の効果は3階層構成ではほぼ達成されることを示した。また通信コストをパラメータとして制御網コストを比較すると、3階層構成の方が2階層構成の場合より下回り得ることが判明した。このためにはまず副制御局設置コストの低減が必要であり、これは副制御局を特定のユーザ局の一部の機能とすることで実現できる。またユーザ局アクセス回線通信コストの低減も必須であるが、これは制御回線として通信コストに距離依存性のある公衆電話網等を用いる場合に可能である。実際の配置としては副制御局を地域毎に設置し、その地域のユーザ局の情報を副制御局で集約し、中央局に連絡する構成が考えられる。

次に、衛星を用いたG3ファクシミリ同報配信システムにおいて、ユーザごとの受信確認および必要に応じた再送処理を効率良く行うために、階層化構造を適用した網構成

を提案した。そしてこれにもとづいた通信装置を開発し、IF帯で衛星回線部分を接続し、地上電話網を介して受信確認を行う構成での実験により、フレーム繰返し送信の効果を実証すると共に、ファクシミリデータ配信の成否双方のケースについて制御機能およびシーケンスが正常に実現されていることを検証した。今後はさらに、今回の開発結果の新たな衛星通信サービスへの適用が考えられる。

第4章 光衛星間通信を用いた低周回衛星通信システムにおけるリンク特性評価および回線設計

4.1 緒言

小型ユーザ局を対象とした衛星通信システムの実現形態として、前章までの固定通信の他に船舶、飛行機や自動車、さらには携帯端末を用いた移動体衛星通信が考えられる。

近年、この移動体衛星通信の分野では低高度周回衛星(Low-Earth Orbit satellite: LEO-SAT)を用いた通信システムに関する検討が各所で積極的に行われている⁽⁴¹⁾⁻⁽⁴⁹⁾。このLEO-SATを用いた通信システムでは、移動体衛星通信サービスを従来の船舶や飛行機、自動車だけでなく、携帯端末へも提供することが可能となる。

このLEO-SAT通信システムでは、特に数百から2,000 km程度の地上高度の範囲では一つの衛星からの地上サービス領域が限定され、かつ時変であることから、これを用いて国際的なサービスを提供するには、衛星を多数配置し、衛星間に回線を設置し接続することによって宇宙空間上に伝送ネットワークを構築する必要がある。そしてユーザからの発呼要求に対して、必要に応じて複数の衛星を介する最適な伝送路を提供する。このシステムを構築するには、ユーザへのサービス提供条件から定まる衛星配置条件のもとで、十分な伝送容量を有する衛星間リンク(Intersatellite Link: ISL)を持つことが重要である。

一方、地上通信網においては、B-ISDNに代表される高速・広帯域に関する研究開発が進められている⁽⁵⁰⁾。この高速・広帯域サービスの発展に伴い、衛星通信システムも地上網を補完する形でその一部を担うこととなる^{(51), (52)}。さらに、将来的には移動体衛星通信においても高速・広帯域通信サービスを提供することとなると思われる。LEO-SAT通信システムにおいてこの高速・広帯域通信サービスを提供するには、特に加入者回線および中継回線双方の役割を有することになるとと思われる衛星間リンクの容量を大きくとることが必要であり、この実現には光伝送の適用が有効であると考えられる。

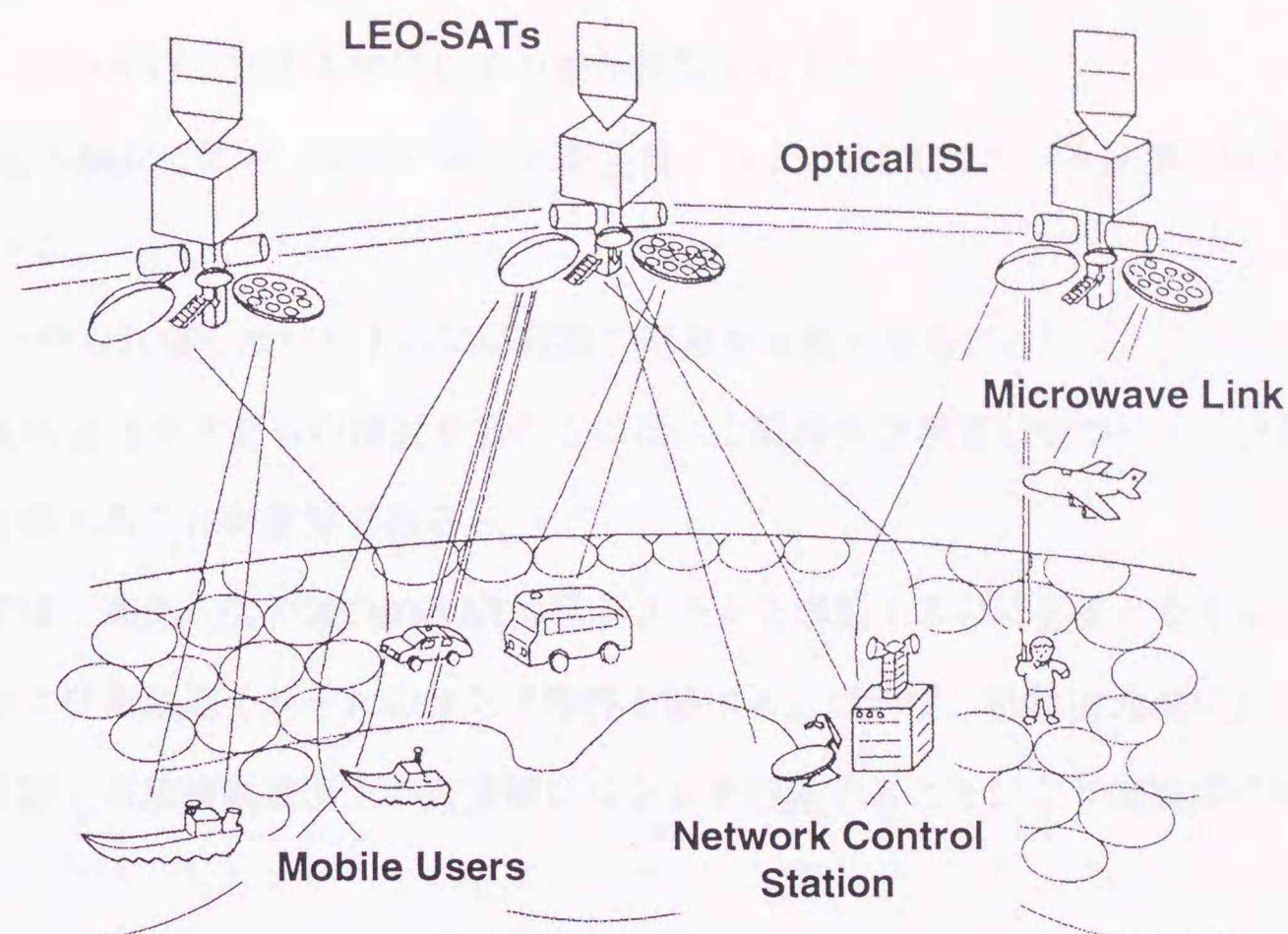


図4. 1 光ISL/LEO-SATシステムによる移動体高速・広帯域通信サービスイメージ

上記観点から、LEO-SAT通信システムに光衛星間リンクを適用し、移動体ユーザを対象に高速・広帯域サービスを提供するためのシステム構成について検討を行った。図4. 1に、LEO-SAT通信システムに光衛星間リンクを適用し、移動体ユーザを対象に高速・広帯域通信を提供するサービスのイメージを示す。

LEO-SAT通信システムの利点を以下にまとめる。

- ・ 周回衛星を用いた場合、ユーザ端末の緯度上の位置にかかわらず、ユーザ端末からの衛星指向方向を高い仰角で運用することができ、これにより降雨減衰、マルチパスフェージングや周囲の建物等によるシャドウイングの影響を緩和することが可能となる。
- ・ 静止軌道衛星と較べてユーザ端末と衛星との距離が短いため、伝送損失および遅延が少ない。
- ・ 静止軌道衛星と異なり、高緯度地域に対しても通信サービスを良好な伝送条件で

提供することが可能となる。

一方、LEO-SATシステムでは以下の様な特徴も有する。

- ・ 衛星の移動に伴い、ユーザ端末と衛星間、およびISLでのリンク状態が時々刻々変化する。
- ・ 地上をもれなくカバーするには複数の衛星が必要となる。

LEO-SAT通信システムの検討を進めるには、上記得失を考慮しつつ、リンク特性を定量的に評価することが重要である。

本章では、高速・広帯域LEO-SAT通信システムを構築するのに必要となるユーザと衛星の間および衛星間それぞれのリンク特性を調べる。ついで、低緯度地域において同一方向に周回する隣接軌道面上の衛星間にリンクを設定することにより網構成の拡張を図る。

以下、4. 2では、移動体ユーザ端末と衛星との間の回線について、リンク損失、衛星可視期間および所要衛星数の観点から検討する。ここで、高速・広帯域サービスを行うために適用を考えるKa帯(30/20 GHz帯)での降雨減衰について述べる。4. 3では、光ISLについて周回衛星の軌道条件を含めて、軌道および伝送パラメータについて検討する。そして4. 4では、評価結果についてまとめ、さらに今回の検討で判明した課題について述べる。なお、本章でのLEO-SATシステムの定量的な評価においては、代表的な値として地上高度765 km⁽⁴¹⁾の場合について主な検討を行っている。

4. 2 ユーザ端末／衛星間リンク

LEO-SATシステムの設計においては、地上高度約36,000 kmの赤道上空に配置される静止軌道衛星と異なり、衛星高度とユーザ端末からの最低運用仰角をパラメータとして選定することが可能である。本節ではユーザ端末と衛星との間のリンク（ユーザ／衛星間リンク）に対して、これらパラメータについて検討する。

周回衛星の軌道高度を定める外的条件として、地球の重力およびバン・アレン帯と呼

ばれる放射線帯があげられる。まず地球重力については、地上高度が低い程その影響が大きく、これに反して一定の高度を維持するには大きな推進力を必要とする。また放射線帯は地上高度2,000～20,000 km程度のところに大きく分布しており、この放射線帯を通過する際に放射線の影響により衛星搭載電子機器に損傷が生じ得る。これら制限を考慮し、一般に周回衛星通信システムの検討では低高度として500～2,000 km、中高度として10,000 km程度が検討されている。以下の検討では典型的なLEO-SATの地上高度の範囲として500～2,000 kmについて調べる。

ユーザ端末／衛星間リンクパラメータは伝送品質のサービス要求から定められる。一方、リンクパラメータはアンテナ口径や送信機出力等の通信装置設計にも依存する。

本節では、リンクパラメータの主なものとして伝送リンクにおける伝送損失、ユーザ端末からの衛星可視期間そして所要衛星数について議論する。

4. 2. 1 伝送損失

図4. 2にLEO-SATシステムにおける伝送リンクの幾何的な配置を示す。図中、 R は

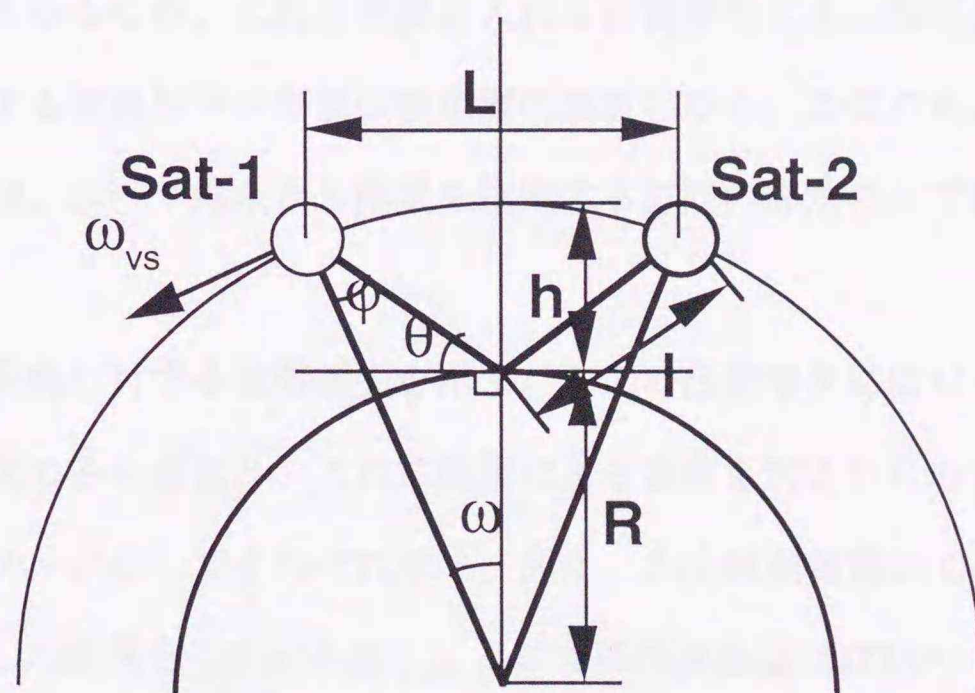


図4. 2 LEO-SATシステムにおける伝送リンクの幾何的配置

地球の半径、 h は衛星の地上高度、 l はユーザ端末と衛星との間のリンクの距離、 L は同一軌道面上に隣接する衛星間の距離、 θ はユーザ端末からの最低運用仰角、 ω は地球中心からみたユーザ端末と衛星とのなす角、 φ は衛星から地球中心を望むヨー方向に対して衛星からユーザ端末を指向する方向のオフセット角、そして ω_{vs} は衛星の角速度をそれぞれ表す。なお、ここでは地球と衛星周回軌道はそれぞれ円であると仮定する。

上述の表記を用いると、リンクパラメータは次式により与えられる。

$$l = R \sin(\omega) / \sin(\varphi) \quad (4-1)$$

$$L = (R + h) \sin(2\omega) / \cos(\omega) \quad (4-2)$$

$$\varphi = \sin^{-1}\{R \cos(\omega) / (R+h)\} \quad (4-3)$$

$$\omega = \pi/2 - (\theta + \varphi) \quad (4-4)$$

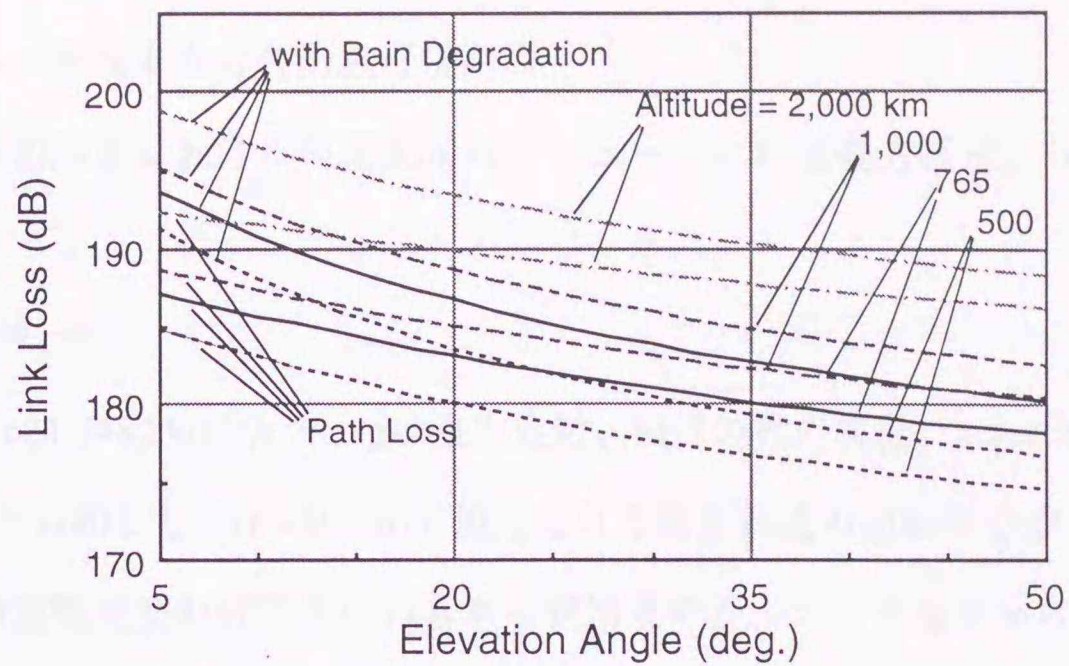
ユーザと衛星の間における、ビームの拡散による伝送損失は次式により与えられる。

$$L_p = (4\pi l / \lambda)^2 \quad (4-5)$$

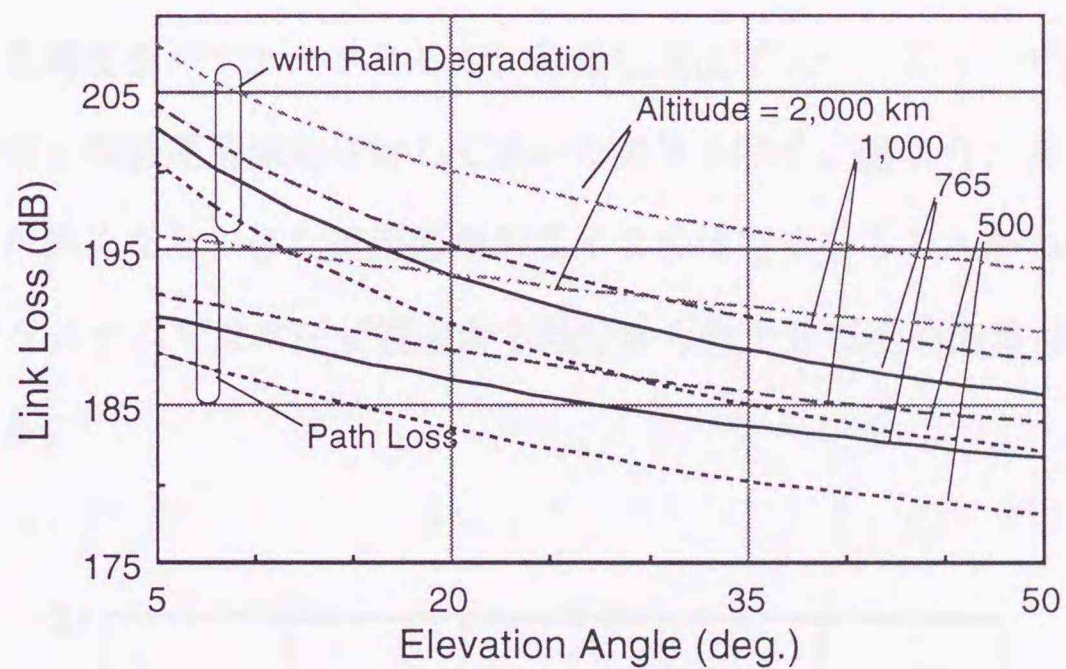
ここで、 λ は搬送波の波長を表す。

Ka帯に代表される高い周波数帯域を用いる場合には、降雨による信号の減衰（降雨減衰）の影響が大きくなるため、これを考慮に入れる必要が生じる。降雨減衰は、雨雲および雨域中を通過する無線信号の等価伝搬距離の関数となる。このため、雨域の高度を一定とした場合には、ユーザ端末から衛星を指向する方向の仰角のみで降雨減衰量が決定される。

図4. 3に運用仰角に対する伝搬損失を示す。ここで伝搬損失にはビームの拡散による自由空間伝搬損失のみの場合と、これに降雨による減衰を加えたものの2つを、衛星の地上高度をパラメータとしてそれぞれ示す。図4. 3(a)は周波数20 GHz、(b)は30 GHzについて計算した結果をそれぞれ表す。ここで降雨減衰量はITU-R（旧CCIR）報告で規定されている手法を用い、また天候条件として典型的な日本の例として、年間時間率0.01 %での降雨量を40 mm/hとし、年間時間率1 %での値を基準値として計算により求めた⁽⁵⁴⁾。図に示す結果より、運用仰角が低い程、降雨減衰の影響が大きく現われること



(a) Frequency = 20 GHz



(b) Frequency = 30 GHz

図4. 3 衛星高度をパラメータとし、降雨減衰を考慮した運用仰角に対する伝送損失

がわかる。一例として、衛星高度を765 km、周波数を30 GHzとしたときの伝送損失は運用仰角が10°の場合、30°の場合に比べて、降雨減衰量の差分4.2 dBを含めて全体で8.9 dB大きくなっている。これと反対に、運用仰角を高く設定することにより、伝送損失を低く抑えることが可能となる。

4. 2. 2 ユーザ端末からの衛星可視期間

円軌道上の周回衛星における角速度 ω_{vs} は、ニュートンの運動方程式より次式で与えられる。

$$\omega_{vs} = (gM)^{1/2} r^{-3/2} \quad (4-6)$$

ここで $(gM)^{1/2} = 631.3482 \text{ km}^{3/2}/\text{s}^{(55)}$ 、 g は重力定数、 M は地球の質量、 r は地球の半径 R と衛星の地上高度 h との和として($r = R + h$)で規定される衛星軌道の回転中心からの半径をそれぞれ示す。衛星軌道面の直下点にいるユーザ端末での、ユーザ端末から一つの衛星の可視期間は、最低運用仰角 θ に対して式(4-6)と(4-4)で得られる ω を用いて $2\omega / \omega_{vs}$ で求められる。

図4. 4に衛星高度をパラメータとして、衛星軌道直下点にいるユーザ端末から一つの衛星の可視期間を最低運用仰角に対して求めた結果を示す。図より、衛星高度が高くなれば可視期間が長くなり、また運用仰角が高くなれば短くなることがわかる。これらより、LEO-SATシステムではユーザ端末から数分から数十分程度の衛星可視期間が得られることがわかる。

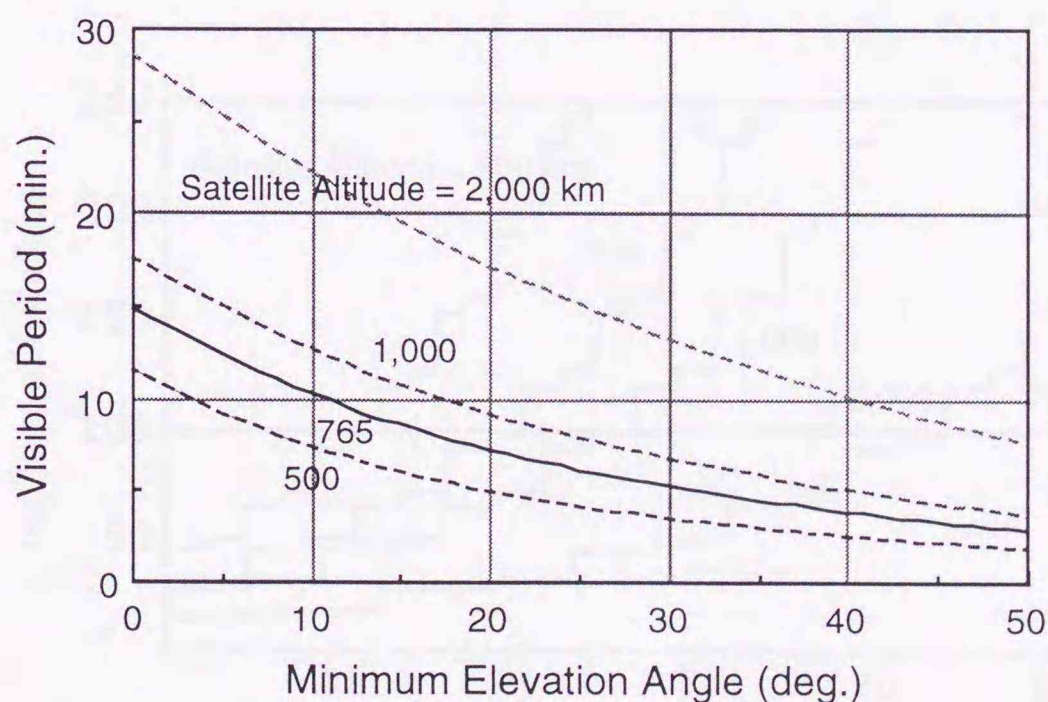


図4. 4 衛星高度をパラメータとした、最低運用仰角に対する軌道直下点のユーザ端末からの衛星可視期間

一つの衛星に対する可視期間の制約により、通信中の呼を持続するには衛星の移動につれて随時衛星を切替える機能が必要となる。このため、この切替え頻度を少なくするにはできるだけ長い可視期間を得ることが望ましい。一方、これを達成するにはできるだけ低い運用仰角、高い衛星軌道を用いれば良いことになるが、運用仰角については前述の伝送損失の観点からの要求とは反対するものとなっている。

4. 2. 3 所要衛星数

全地球表面をカバーするのに要する衛星個数も、直接システムコストに大きく影響することから重要な検討課題である。今回、所要衛星数を以下の式により求めた。

$$(\text{所要衛星数}) = \text{Ceiling}(\pi / \omega) * \text{Ceiling}(\pi / 2\omega) \quad (4-7)$$

ここで、 $\text{Ceiling}(*)$ は*を越えない最大の整数を表し、 ω は式(4-4)で与えられる。また、衛星軌道面としては複数の極円軌道を仮定している。式(4-7)右辺第1項は一つの軌道面上での衛星数を、また第2項は所要軌道面数をそれぞれ与えている。

図4. 5は、ユーザ端末からの最小運用仰角に対する所要衛星数を、衛星高度をパラメータとして式(4-7)を用いて求めたものである。図より、最低運用仰角が低い程、あるいは衛星高度が高いほど所要衛星数が少なくなることがわかる。例えば最低運用仰角を

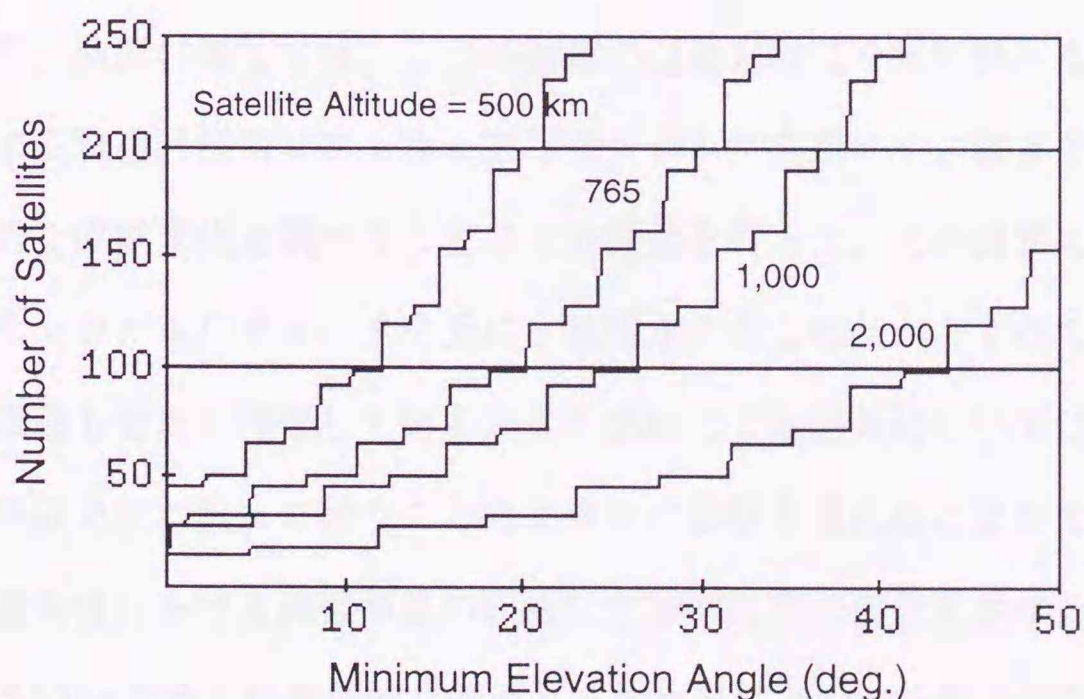


図4. 5 衛星高度をパラメータとした、最低運用仰角に対する所要衛星数

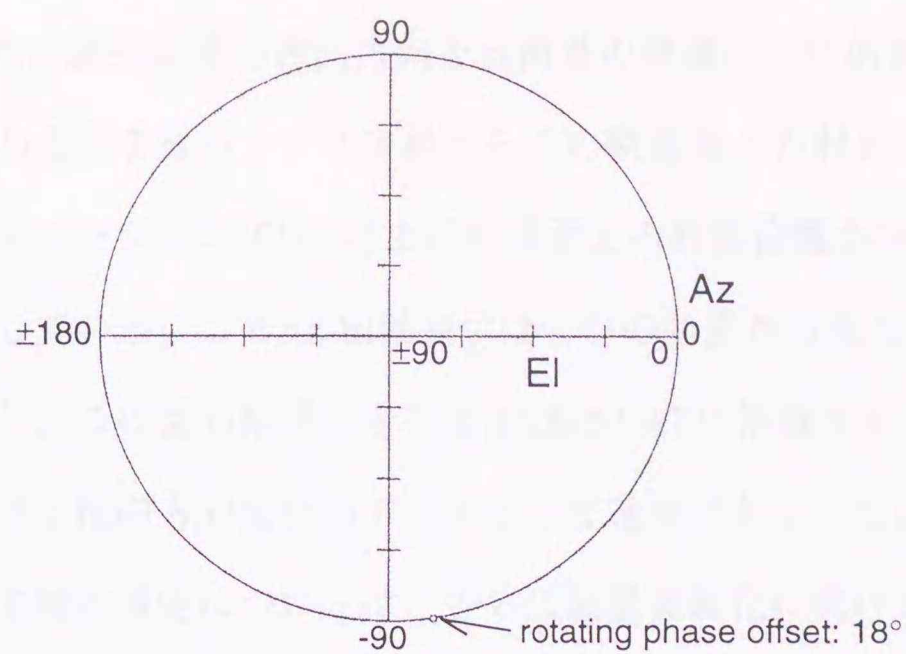
30°とした場合、衛星高度765 kmでは所要衛星数が200であり、高度2,000 kmでは50となる。式(4-7)の定義は、軌道面間の距離が最も大きくなる赤道地域においてもれなく地表をカバーするためのものであり、実際の運用では衛星が極域に近づく程衛星ビーム間同志のオーバーラップが生じてくるため、高緯度地域におけるこのオーバーラップもしくはオーバーラップした際のビーム間干渉を避けるためのビーム制御機能が必要である。

図4. 3、4. 4および4. 5はそれぞれ異なった観点からそれぞれの衛星高度および最低運用仰角の要求条件を示している。これら要求はそれぞれハードウェア実現上のインパクト、システム運用の複雑さ、そしてコストに密接に関連してくるものである。従って、実際のシステム設計においてはさらに最適化条件を考慮した上で、これら要素のトレードオフスタディを行うことが必要である。

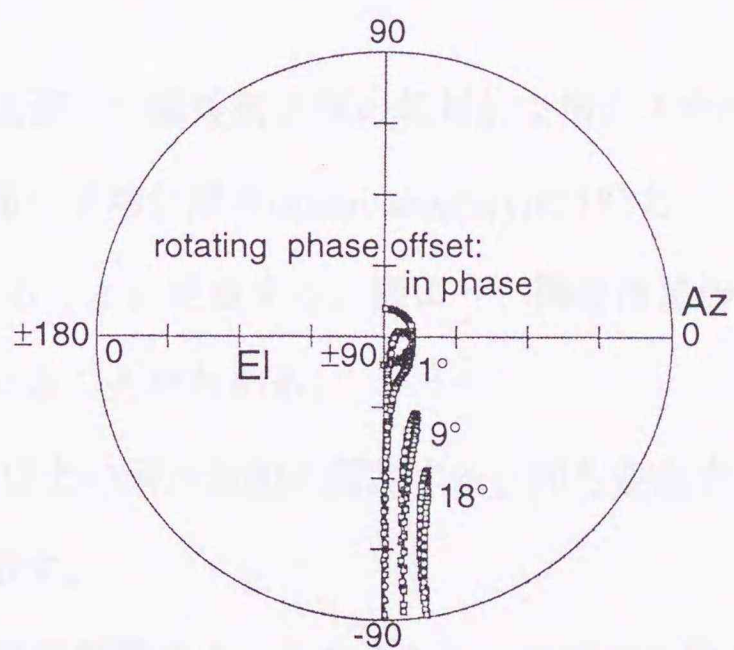
4. 3 衛星間リンク

4. 3. 1 リンク解析

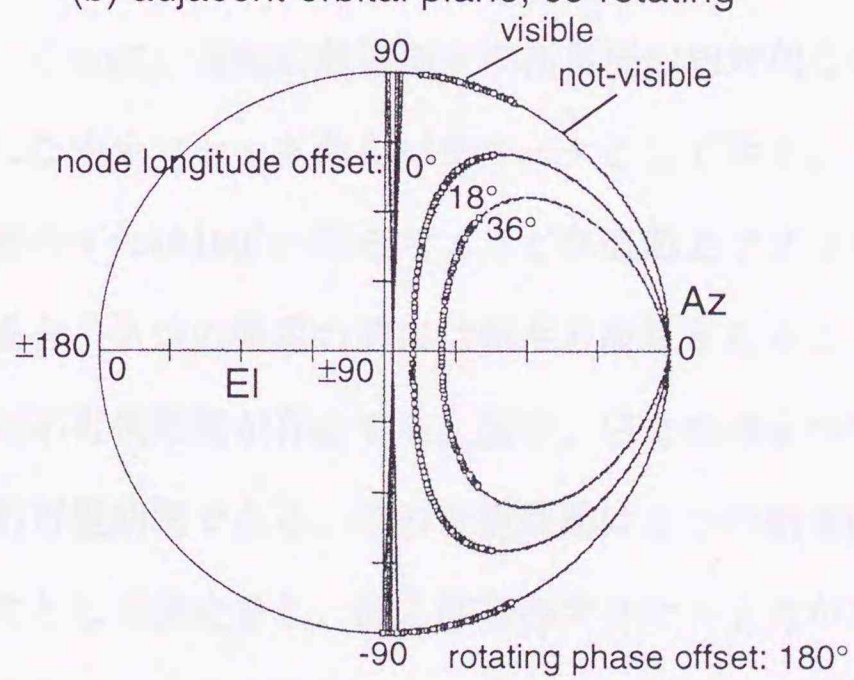
LEO-SATシステムでは、2つの衛星の間の相対的な位置関係が時々刻々変化する。このため、衛星間リンクを安定に設定、保持するにはこの軌道条件がどのように変化するかを定量的に知ることが極めて重要である。本節ではこの2つの衛星間のリンクの変化について調べる。検討に際しては、2つの衛星の運動方程式を元に様々な指向追尾パラメータを計算する軌道評価用ソフトウェアプログラム⁽⁵⁶⁾を用いて、隣接する2つの衛星の間の、相対的な位置変化を調べることにより評価を行った。この計算では、典型的な地球の重力ポテンシャルパラメータを元に、地球が完全な球状からずれていることによって生じる摂動も含めて評価している。この摂動による偏差については、軌道評価計算を1周回期間以上にわたって行うことによりその影響を見込むことができる。図4. 6に3つの軌道条件における隣接衛星の相対的な指向方向の変化を示す。ここで、前節と同じくLEO-SATシステムの典型的な値として衛星高度765 kmの極円周回軌道を仮定し



(a) same orbital plane, co-rotating



(b) adjacent orbital plane, co-rotating



(c) adjacent orbital plane, counter-rotating

図4.6 3つの軌道条件に対する、隣接衛星の相対的な指向方向変化

た。図中、アジマス(Az)角は隣接衛星の指向方向を自衛星の軌道面上に射影し、円軌道において衛星から地球中心方向を望むナディア軸からこの軌道面上の射影位置へのオフセット角として、またエレベーション(EI)角は上記軌道面上の射影位置からのオフセット角としてそれぞれ規定している。このAz-EI軸表示は一つの衛星から見た隣接衛星の指向方向を直接表しており、この図の結果はそのままLEO-SATに搭載されるISL通信装置(トランシーバ)における指向方向変化のデータとして適用できる。なお、ISLトランシーバの指向方向を示す軸の規定については、さらに装置実装化に向けての最適化の手法等も報告されている⁽⁴⁹⁾が、ここでは簡単化のため上記定義のAz-EI軸により表記する。

図4. 6(a)は同一の軌道面上の隣接衛星間の相対的な指向方向の変化を求めたものである。ここで、隣接衛星間の平均分離角(mean anomaly)は 18° とした。これは2つの衛星の周回位相が 18° ずれていることに相当する。図より、隣接衛星の方向は摂動の影響も無視でき、ほぼ一定していることがわかる。

図4. 6(b)は隣接軌道面上の同一方向に周回する、即ち並走する同旋の衛星間の相対的な指向方向の変化を示す。

LEO-SATシステムの軌道面配置では、少なくとも一組の逆方向に周回する、逆旋の隣接軌道面が生じる。図4. 6(c)に、逆旋の軌道面上の衛星間の相対的な指向方向の変化を、2つの軌道面が互いになすオフセット角をパラメータとして示す。この計算において、2つの衛星の周回位相のずれは 180° 、即ちちょうど赤道面上で2つの衛星がすれちがう値に設定した。この場合、2つの衛星の間には相手の衛星を見ることができる可視期間と見ることができない不可視期間が存在する。図中、白丸の点をつないだ部分が可視期間、細い実線部分が不可視期間である。この可視期間は2つの軌道面が相互になすオフセット角をパラメータとして決定され、例えばこのオフセット角が 18° の場合、可視期間は1周回あたり15分である。図の結果より、逆旋の軌道面上の衛星間の相対的な指向方向は広い範囲にわたって高速に変化することがわかる。

これら計算結果を元に、リンク伝送損失、同損失の変化、そして角速度の伝送リンクパラメータを以下の手順で調べる。

まず、上記軌道計算を用いて、2つの衛星間の距離(range)、他方の衛星の指向方向に沿った相対速度(V_{t_N})、そして指向方向に直交する方向に成分を持つ相対速度(V_{t_T})を求める。次に、これらパラメータを用いて次式の計算を行う。

$$\text{Loss (dB)} = 20 \log_{10} (4\pi \text{ range} / \lambda) \quad (4-8)$$

$$\text{Vloss (dB/s)} = 20 \log_{10} (1 + V_{t_N} / \text{range}) \quad (4-9)$$

$$\omega \text{ (rad/s)} = V_{t_T} / \text{range} \quad (4-10)$$

ここで、Lossは2つの衛星間での自由空間伝搬によるリンク損失、VlossはLossの変化スピード、そして ω は角速度をそれぞれ表す。上記式を用いて、軌道パラメータを元に伝送パラメータを求めることにより、伝送リンクパラメータの変化を直接調べることができる。

図4. 7に、4つの異なる軌道条件における光衛星間リンクの伝送パラメータの変化を調べた結果を示す。ここで、計算は衛星が地球を周回するのに要するより長い、95分間にわたって行った。

評価した4つの軌道条件は以下の通りである。

- (1) 隣接軌道面上の、周回位相差 0° の2衛星間 (A- 0°)
- (2) 隣接軌道面上の、周回位相差 9° の2衛星間 (A- 9°)
- (3) 隣接軌道面上の、周回位相差 18° の2衛星間 (A- 18°)
- (4) 同一軌道面上の、周回位相差 18° の2衛星間 (S- 18°)

ここで、衛星は全て同旋とし、また軌道面間のオフセット角は 18° とした。図中の軌道条件の表記は上述の定義を用いている。また、使用する光リンクの波長は $0.83 \mu\text{m}$ とした。図4. 7(a)に伝送リンク損失、(b)にリンク損失変化量、そして(c)に角速度の時間変化をそれぞれ示す。図(a)および(b)より、(A- 0°)では大きなリンク損失の減少が2回見られる。これらは2つの衛星が極上空においてすれ違う場合に生じる。図(a)および

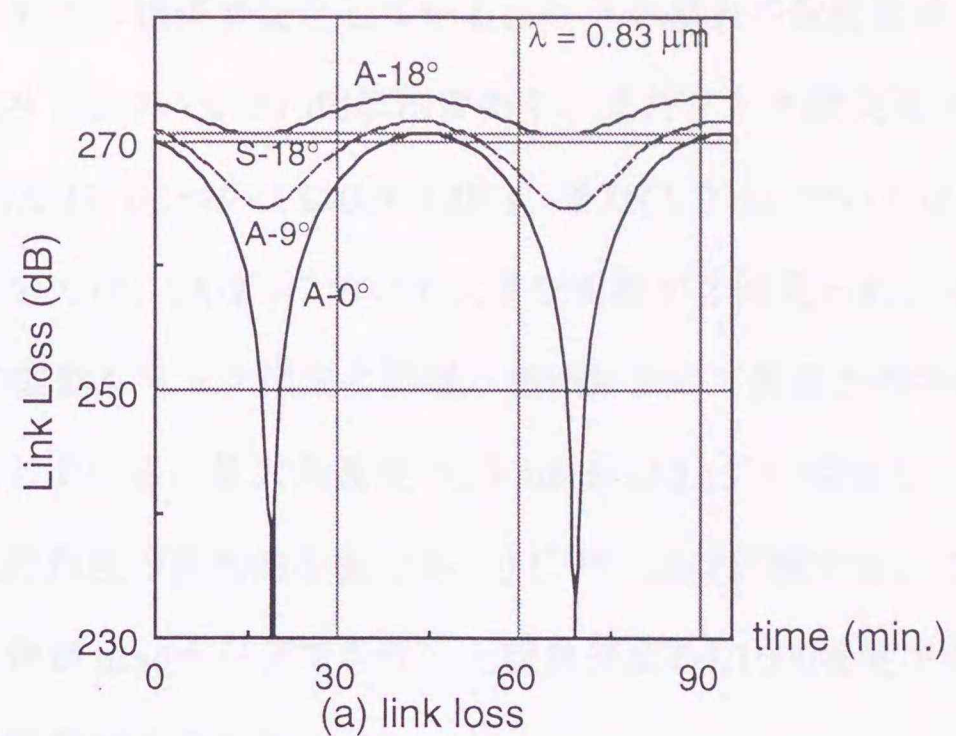
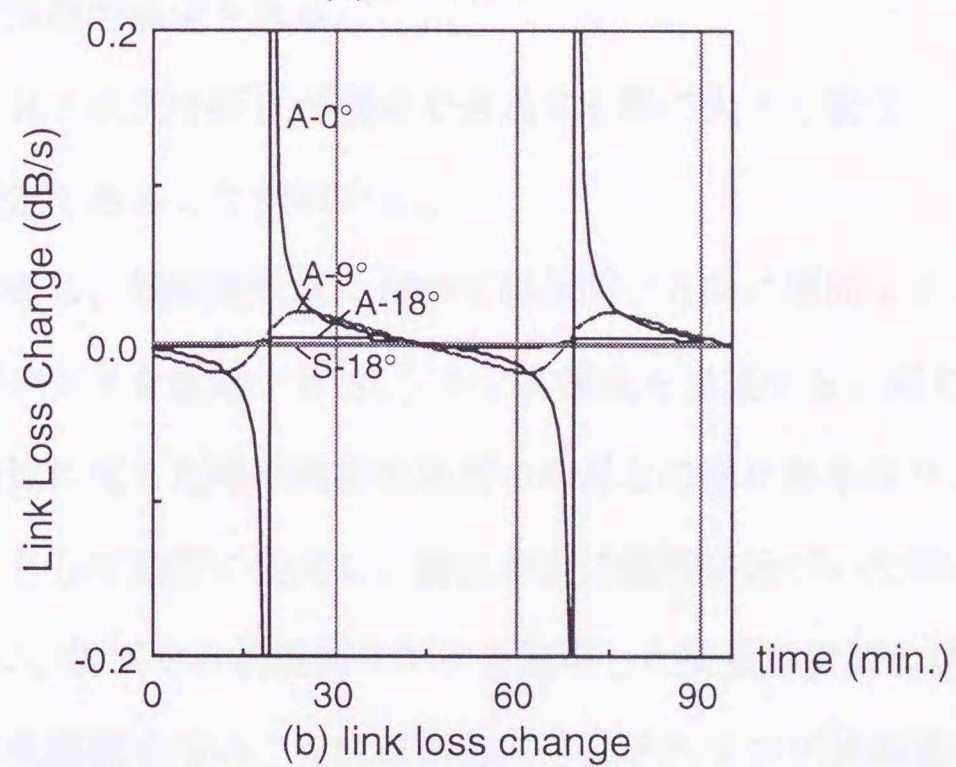
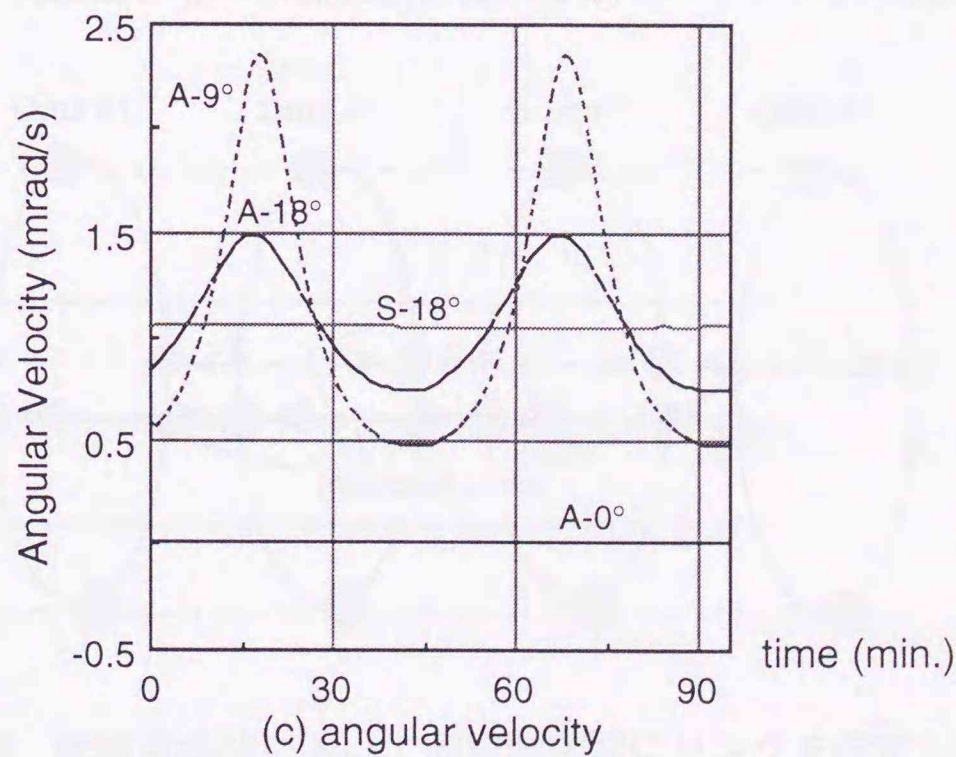


図4. 7 同旋の衛星間の光伝送リンクパラメータの変化
-75-

(b)において、この場合以外では損失が安定している。リンク損失の変動量は、 $(A-18^\circ)$ については3 dB、また $(A-9^\circ)$ については7 dB以内であり、またリンク損失変化速度の絶対値の最大値はそれぞれ $(A-18^\circ)$ については0.003 dB/s、また $(A-9^\circ)$ については0.02 dB/sである。図(c)の角速度については、 $(A-9^\circ)$ において大きな変動が2回見られ、その最大値は2.3 mrad/sである。この変動もリンク損失と同様、極域において衛星が相手衛星の周回軌道面を横切る際に生じている。最大角速度の2.3 mrad/sは 0.13° に相当し、これは衛星の初期捕捉に用いる視野角度の典型的な値である 0.1° ⁽⁵⁷⁾にほぼ匹敵する。このような状況では、ビーム拡がり角が μrad オーダーであり、上記角速度の1/1000程度である光ISLのリンクを維持するには困難が想定される。

以上図4. 7より、リンク状況は衛星が極域を通過する際に大きく変化し、一方赤道周辺の低緯度地域では安定であることがわかる。

これらリンク状況を考慮し、低緯度地域においてのみ同一方向に周回する、異なる軌道面上の衛星間に軌道間リンクを設定するISLシステム構成を提案する。即ち、衛星が極域を通過して低緯度地域に達した時に隣接軌道面の衛星との間に衛星間リンクを設定し、これを軌道間リンクとして通信に使用し、衛星が次に極域に近づいた時にこのリンクを解放する。図4. 8に、提案する軌道間リンクを適用した衛星通信網の構成を示す。図4. 8では4つの軌道面を用い、各軌道面毎にそれぞれリング状の通信網を構成

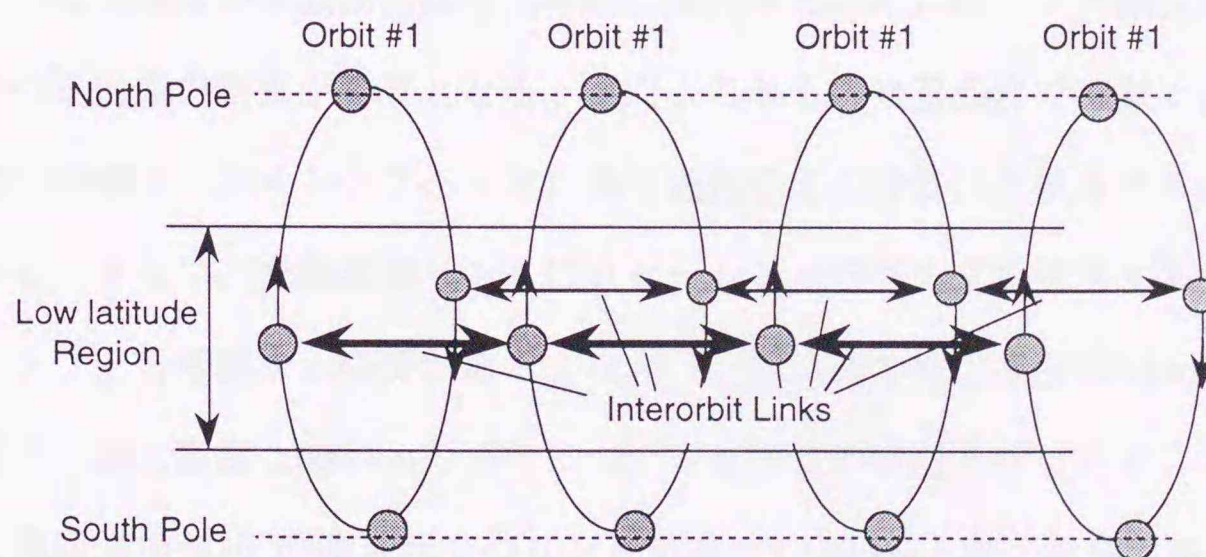
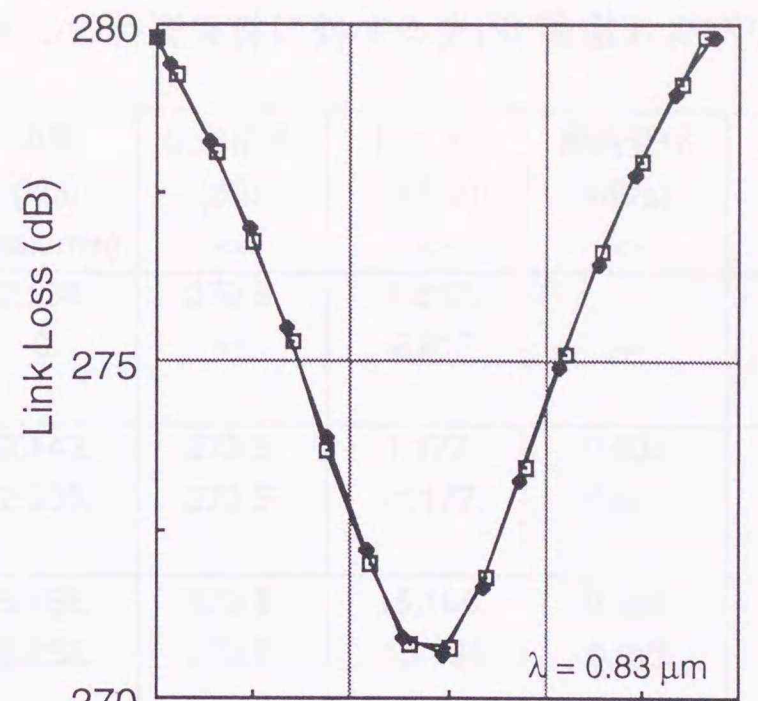


図4. 8 低緯度地域において同旋軌道間にリンクを設定したISLシステム構成例

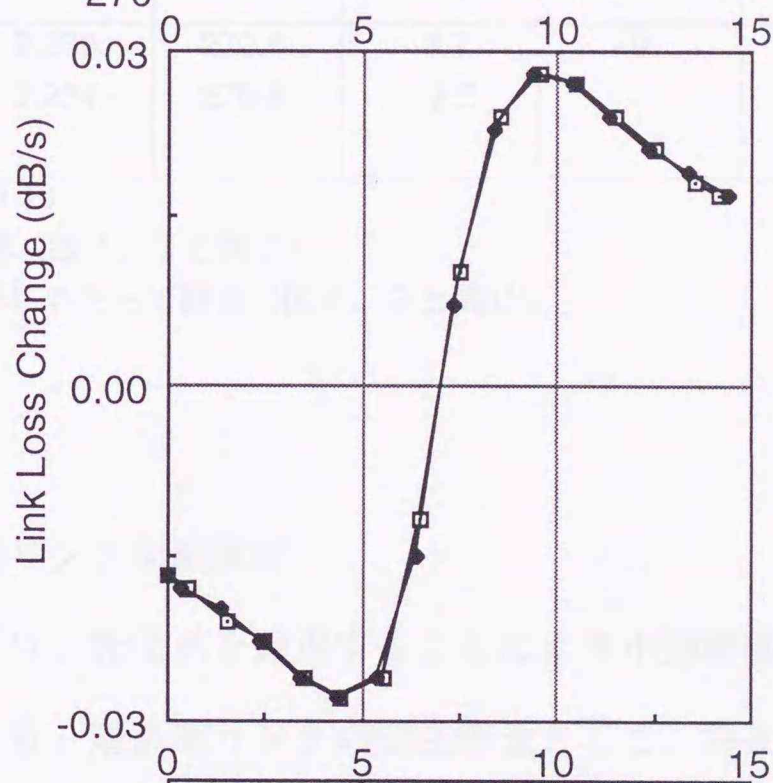
し、各軌道面はさらに低緯度地域において設定される軌道間リンクにより相互に接続される。この網構成により、全世界をカバーする国際通信網が実現される。この構成の衛星通信網を用いることにより、軌道面内および軌道面間の衛星間リンクを介して、世界各地任意の2ヶ所のユーザを接続することが可能となる。

一方、図4.9に、反対方向に周回する衛星間のリンク損失、リンク損失変化量、そして角速度の時間変化をそれぞれ示す。図の算出において、軌道面間分離角 18° 、周回位相差 180° （赤道面上で反対方向にすれ違い）、使用する光リンクの波長 $0.83\mu\text{m}$ をそれぞれ仮定した。図中のそれぞれの時間変化のトレースは、図4.6(c)の可視期間に相当するものであり、各々2回のトレース結果を重ねて表示している。図中、1回の可視期間は15分程度である。図より、リンク損失の変化は10 dB程度である。また、角速度の最大値は 6.6 mrad/s であり、これは初期捕捉用視野角のほぼ4倍である。これらの結果より、反対方向に周回する衛星間のリンクの適用は困難であると考えられる。

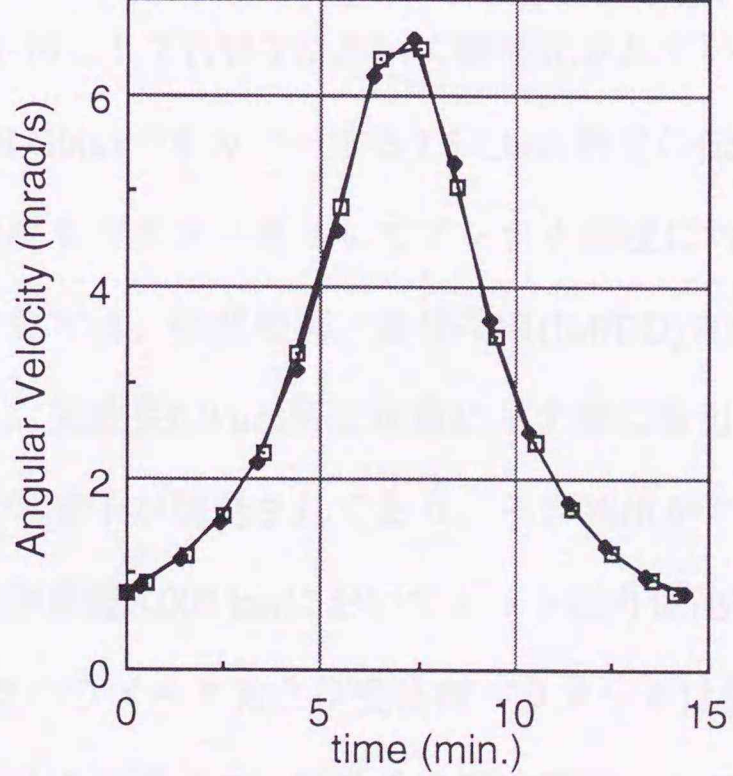
表4.1に4つの軌道条件での軌道およびリンクパラメータをまとめる。表より、まず同一の軌道上の衛星間では衛星間距離がほぼ $2,200\text{ km}$ で一定である。これより、ISLの回線設計においては $3,000\text{ km}$ 程度見込んでおけば十分である。一方、同一方向に周回する隣接軌道面の衛星間での距離は、位相差が 0° の場合には0から $2,200\text{ km}$ 、また 18° の場合には $2,200$ から $3,100\text{ km}$ の間で変化する。これらの場合には、図4.7に示したように同一の伝送速度の衛星間回線を効率的に保持するためにはリンク損失の変化を補償するための送信電力制御が必要となる。また、これらの軌道条件では数十 μrad のオーダーの光行差補正（ポイントアヘッド）角を通信装置の設計に反映させる必要があることがわかる。さらに、光衛星間リンクにコヒーレント伝送方式を適用する場合には、ドップラシフトも考慮する必要がある。なお、上記は全て地上高度 765 km の場合についてであるが、地上高度 $2,000\text{ km}$ の場合についても同様の検討を行ったところ、同一の軌道面上の周回位相差 36° の衛星間でのリンク距離が $5,180\text{ km}$ と若干数値に違いが生じたものの、変化の傾向等についてはほぼ同等の結果が得られた。



(a) link loss



(b) link loss change



(c) angular velocity

図 4. 9 逆旋の衛星間の光伝送リンクパラメータの変化

表 4. 1 4つの軌道条件に対する光ISL軌道およびリンクパラメータ

軌道条件	距離 (km) (max/min)	伝送損失 (dB) <-	ドップラ (MHz) <-	損失変化 (dB/s) <-	光行差 (μ rad) (max)	角速度 (mrad/s) <-
隣接軌道面*† 同旋 周回位相差0°	2,236. 0.	270.6 -∞	2,817. -2,817.	∞ -∞	0.	0.
隣接軌道面*† 同旋 周回位相差18°	3,143. 2,206.	273.5 270.5	1,177. -1,177.	0.003 -0.003	21.9	1.49
隣接軌道面*†† 逆旋 周回位相差180°	6,458. 2,252.	279.8 270.7	15,166. -15,164.	0.028 -0.028	98.9	6.58
同一軌道面† 同旋 周回位相差18°	2,239. 2,234.	270.6 270.6	3.7 -2.5	0	15.6	1.05

* 軌道面間分離角 18°

† 評価周期95分間 (図 4. 7 と同じ)

†† 2回の可視期間にわたって評価 (図 4. 9 と同じ)

4. 3. 2 光衛星間リンク回線設計

衛星間通信においては、光伝送を適用することにより小型軽量の通信装置で高速の伝送を行うことができる。衛星間リンクの伝送容量として、将来的なB-ISDNへの対応を考慮すると、現在SDH-16としてITU-Tにおいて標準化されている高速デジタル伝送階梯の最高速である2.488 Gbit/s⁽⁵⁸⁾をカバーする2.5 Gbit/s程度の伝送速度が要求される。

図 4. 10 に、伝送速度をパラメータとしてアンテナ直径に対する所要レーザ出力を求めた結果を示す。計算では、強度変調／直接検波(IM/DD)方式および光波長0.83 μ mをそれぞれ仮定している。光波長0.8 μ m帯は次章に示す様に高出力レーザダイオード(LD)に代表される各種光学素子が開発されており、その利用が可能である。ここで、伝送品質としては、衛星間距離3,000 kmにおいてビット誤り率(Bit Error Rate: BER) 1×10^{-9} とした。また、リンクパラメータおよび受信機パラメータは参考文献(43), (59)の例に従った。ここで、アンテナ直径についてはその開口能率として100%を仮定し、実効

開口径で表した。図より、アンテナ直径が20 cmの場合、所要レーザ出力は伝送速度700 Mbit/sに対して4 mW、2.5 Gbit/sに対して10 mWとなり、アンテナ直径が15 cmの場合には各伝送速度に対してそれぞれ13 mWおよび34 mWとなる。これら結果より、アンテナ径の小型化に対して所要レーザ出力の高出力化が要求されることから、実際に装置を設計する際にはアンテナ径およびレーザ出力の決定のためのトレードオフスタディが重要である。表4. 2に光ISL回線設計例を示す。これら結果より、ここで与えられたレー

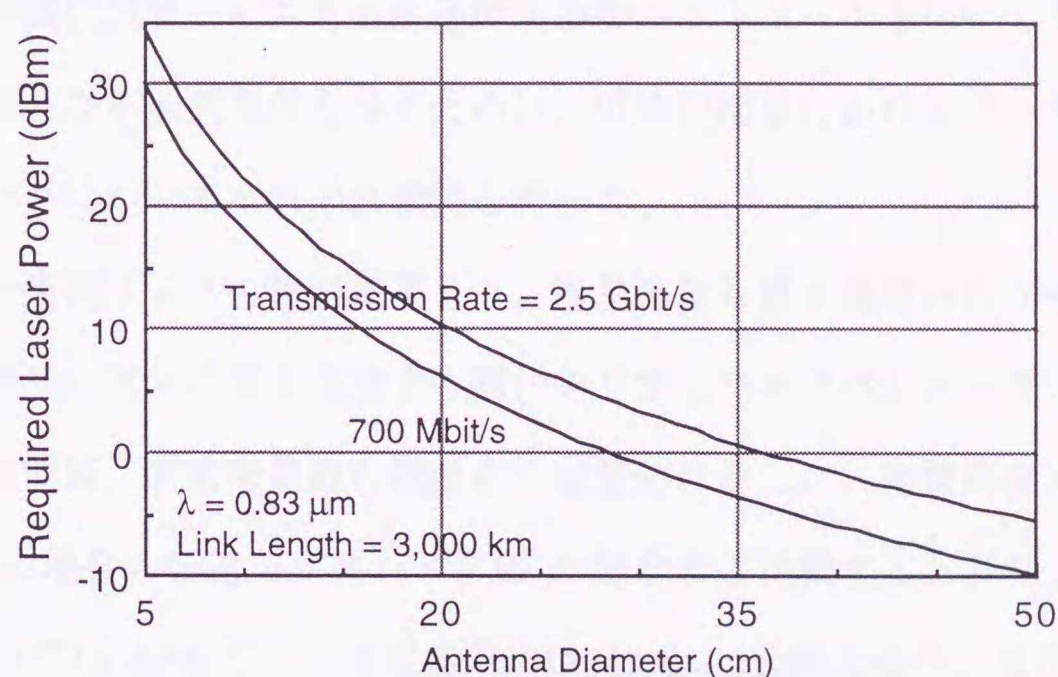


図4. 10 伝送速度をパラメータとした、アンテナ直径に対する所要レーザ出力

表4. 2 光ISL回線設計例

伝送速度	700 Mbit/s	2.5 Gbit/s
光波長	0.83 μ m	
レーザ出力	4.0 mW	10.7 mW
	6.0 dBm	103 dBm
送信系光学損失	5 dB	
送信アンテナ利得	117.6 dBi	
伝送損失	273.1 dB	
受信アンテナ利得	117.6 dBi	
受信系光学損失	5 dB	
受信電力	-41.9 dBm	-37.6 dBm
所要電力	-41.9 dBm	-37.6 dBm

*伝送品質：BER 1×10^{-9} (IM/DD方式)

*衛星間距離：3,000 km

ザ出力やアンテナ口径は現在の技術により実際に開発が可能であることがわかる⁽⁶⁰⁾。回線設計は、リンク状態の変化に対して想定される最小の受信電力を規定する。これより、リンク損失の変化量が光ISLでの受信ダイナミックレンジを規定するものとして通信装置の設計に影響する。これらより、前節に示したリンク構成の選定においても、これらリンク運用条件等を考慮することが重要である。

4. 4 結言

高速・広帯域伝送サービスを低集回衛星通信ネットワークを用いて実現するための設計の際に必要な伝送条件を得るために、低集回衛星におけるユーザ／衛星間および光衛星間リンクについてそれぞれ検討を行った。

ユーザ／衛星間リンクの検討結果より、衛星高度と最小運用仰角がそれぞれLEO-SATシステムでのサービス品質を規定する際にクリティカルなパラメータとなることをリンク損失、可視期間、所要衛星数の観点から定量的に示した。衛星高度765 kmにおいて運用仰角が30°の場合の伝送パラメータを10°の場合のと比較すると、リンク損失は周波数30 GHzにおいて8.9 dB低く、一方可視期間は5分短い5分間となり、また所要衛星数は150多い200となる。これら条件は衛星高度や最小運用仰角に対して、通信装置の実現へのインパクトや網運用の複雑さ、あるいはコスト等の観点からそれぞれ相反する要求を与える。従って、実際のシステム構築の際には各種のトレードオフスタディが必要である。

光衛星間リンク(ISL)については、極円周回軌道での数種のISL構成について評価を行った。この結果、同一軌道面を同じ方向に周回する衛星間のリンク状態はほぼ一定で安定しており、隣接衛星間のリンクは固定的なものとみなせることから、光ISLを用いた高速・広帯域回線を設定するのに適していることが判明した。一方、隣接する軌道面上の衛星間のリンク状態は広いレンジにわたって速く変化することも示された。この詳細として、同一方向に周回する衛星間のリンクパラメータの変化は主に極域で生じてお

り、一方低緯度地域においては安定である結果が示された。この結果をもとに、隣接する同一方向に周回する軌道面上の衛星間に、低緯度地域、即ちリンク状態が安定している期間だけ軌道面間リンクを設定する網構成を提案した。この軌道面間リンクを用いて軌道面毎のリンク状の網を相互に接続することにより、全世界をカバーする通信網を構築し、任意の地点の2ユーザを軌道面内および軌道面間光ISL回線を介して接続することが可能となる。

さらに光衛星間リンクについて回線設計を行い、3,000 km程度の衛星間距離を対象とした場合には現在の光学および光通信技術で十分に実現可能な伝送パラメータで回線が構成できることを示した。

今後、軌道面間リンクの最適化を進めるためには衛星間の周回位相差や軌道面間オフセット角についての検討が必要である。さらに将来の課題として、衛星軌道面の選定やリンク確立手順、そしてトラヒック制御等がシステム設計において重要である。

第5章 光衛星間通信用LD送信機の設計と特性

5.1 緒言

将来の宇宙通信を発展させる技術の一つとして、衛星間で光伝送を行いデータ中継や通信を行う光衛星間通信（Intersatellite Link: ISL）が近年注目されており、各所で研究が進められている^{(61), (62)}。この光ISLにより、小型の通信装置で高速・広帯域伝送を実現し得る。図5.1に光衛星間通信を適用した種々の宇宙通信のサービスイメージを示す。

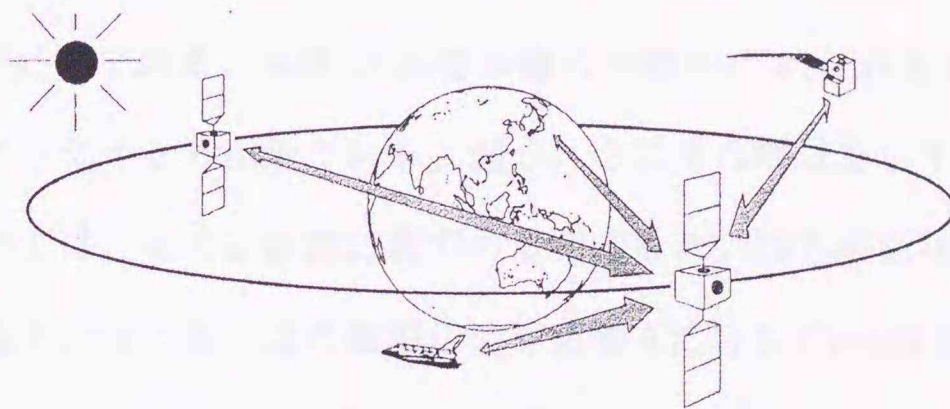


図5.1 光ISL通信システム概要

また、低周回衛星間にISLを設定し、移動体を対象に衛星通信サービスを提供する新しい通信システム構想が提案されてきている⁽⁶³⁾。さらに、地上公衆網で現在盛んに研究開発が進められているB-ISDNやHDTVに代表される高速・広帯域伝送の今後の発展⁽⁶⁴⁾を考慮すると、この低周回衛星を用いた移動体衛星通信においても、高速伝送要求への対応が必要になってくるものと考えられる。その場合ISLではB-ISDN基本回線(155 Mbit/s) 16回線分に相当する2.488 Gbit/s程度までの伝送速度が必要になってくるものと思われる^{(65), (66)}が、このような伝送速度を実現するには、第4章で示した様に光ISLの適用が有効である。

この光ISL用通信装置の実現に際して、送信系では高出力光源の開発が重要である。上記2.5 Gbit/sの伝送速度を達成するために必要となる光ISLの所要LDピーク出力は、伝送パラメータとしてIM/DD方式を用いてビット誤り率 1×10^{-9} を得るための所要受信電力を -37.6 dBm、衛星間距離 3,000 km、アンテナ開口効率 70%、送受信光学系損失 10 dB をそれぞれ仮定すると、直径 20 cm のアンテナを用いた場合に 22 mW、直径 15 cm では 70 mW と

なる⁽⁶⁵⁾。また、アンテナ開口効率100 %では、第4章に示した通り直径20 cmでは10 mW、15 cmでは34 mWとなる。

光ISL用光源としてはこれまで高出力レーザダイオード(LD)が種々開発されている0.8 μm 帯の適用が検討されてきており、出力100 mW程度のLDを対象としたLD送信機の開発が進められてきている^{(67), (68)}。しかしながら上記程度の高出力LDを高速で駆動するには大電流・高速応答のLDドライバの開発が必要となり、これまで高速化を目指したものとしては、文献⁽⁶⁷⁾に動作速度650 Mbit/sが報告されている。

また、LDからの出力ビームを平行にし、効率良く伝送するには、良好な波面精度のコリメータ光学系が必要である。光ISL用通信装置の送信系では、LD送信機出力はリレー光学系を経て、光アンテナから出射される。図5. 2にその構成を示す。ここで光アンテナからの出力については、その出射開口面での位相の乱れ、即ち波面精度の劣化によって光アンテナ利得の低下が生じる。この影響は使用波長 λ に対してrms波面精度が $\lambda/15$ で0.76 dB、 $\lambda/10$ で1.7 dB、 $\lambda/5$ で6.9 dB⁽⁶⁹⁾と波面精度が悪くなると回線設計上無視し得なくなってくる。これより、光アンテナ出射端での波面精度はできるだけ良好であること、即ちLD送信機、リレー光学系そして光アンテナそれぞれが優れた特性を有することが要求される。

この様な要求に対し、一般にLDからの出力ビーム形状はだ円で、その長軸/短軸方向の焦点位置のLD出射端面からの奥行きが異なる非点隔差を有しており、このビーム拡がり角や非点隔差量はLDによって異なることから、光ISL用LD送信機の開発では適当なLDの選定、使用波長の決定と共に、LD種別ごとに専用のコリメータが必要となる。このコ

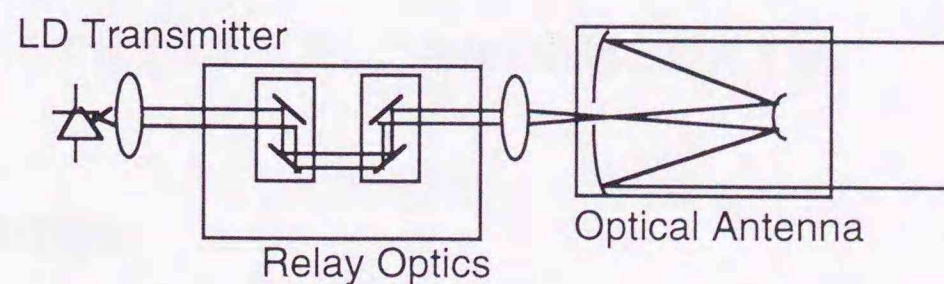


図5. 2 光ISL通信装置送信系構成

リメータ光学系はこれまでにいくつか報告されており^{(70),(71)}、文献(70)では8枚のレンズを用いて波長帯域100 nmにわたって波面精度 $\lambda/40$ を、また文献(71)では波長860 nmにおいてレンズ4枚のコリメータと2枚のプリズムペアを組合せた構成で波面精度 $\lambda/26$ を達成した例がそれぞれ報告されている。しかしながら、一般的に研磨により製作した球面レンズを複数組合せる構成ではレンズの製作および調整が非常に複雑になる。またレンズ枚数が増えると、透過効率の劣化や反射が増加し得るので、個々のレンズへの無反射コーティング等の要求が厳しくなる。

今回、上記検討を踏まえて、衛星間距離3,000 kmの低周回衛星間での使用を想定して、ピーク出力22 mW以上、伝送速度2.5 Gbit/s、直径5 mmのコリメート出力でかつ良好な波面精度を実現することを目的として、波長830 nmのLDを対象にLDコリメータ光学系およびLDドライバを設計・試作し、それらを組合せてLD送信機を実現した。LDコリメータの設計に際しては、装置の小型・簡素化を進めるために所要レンズ枚数の低減を図った。なお、LD送信機からの出力ビーム開口直径は文献(72)に示されているリレー光学系の最適ビーム範囲より5 mmとした。また、波面精度についてはLD送信機単体での利得劣化量を1 dB以内に抑さえる、即ち波面収差 $\lambda/15$ 以下を目指した。

この結果、非球面レンズの適用によってレンズ3枚のコリメータ構成を得、またLD送信機からの直径5 mmのコリメート光出力として出力60 mW、伝送速度2.5 Gbit/s、波面精度 $\lambda/16$ を達成した。この伝送速度は光ISL用LD送信機でのこれまでの最高速である。

本論文ではこのLD送信機の設計・試作評価結果について報告する。5.2ではLDコリメータおよびLDドライバの設計について、5.3では5.2の設計に基づいて試作した結果を示す。5.4ではこの送信機と組合せて伝送系を実現するためのSi-APD受信機の試作結果を示す。5.5ではまとめと共に、今後の課題を整理する。

5.2 LD送信機の設計

5.1に示したシステム要求に対してLD送信機の設計を行った。表5.1に今回の検討対象としたLDの主要諸元を示す(Spectra Diode Laboratories社: SDL5411相当)⁽⁷³⁾。こ

のLDは最大光出力100 mWで低しきい値および高効率電流／光出力特性を有しており、また、その小信号利得帯域幅は、出力70 mW時に光3 dB帯域で3.6 GHzとなっている。今回、使用波長は 830 ± 5 nmとした。LDマウントは、装置化および取扱いの容易さの観点からモニタPD付き3端子、気密封止型とした。

以下、このLDに対するLDコリメータおよびドライバの設計結果を示す。

表 5. 1 LD主要諸元*

LD出力	100 mW
使用波長	830 ± 5 nm (シングルモード)
ビーム拡がり (半値全幅)	シングルモード $30^\circ(\perp) \times 10^\circ(\parallel)$
偏波	直線
非点隔差	5 μ m以内
発振しきい値	35 mA
最大動作電流	170 mA

* Spectra Diode Labs., SDL5411

5. 2. 1 LDコリメータ

LDコリメータの設計目標は、小型軽量、少い枚数のレンズ構成で、高波面精度、即ち波面収差の小さい、円形コリメート光出力を得ることにある。

LD出力は一般にビーム拡がり角、即ち開口数(Numerical Aperture: NA)が大きく、表5. 1の例ではLD活性層に対して垂直方向のビーム拡がり角が 30° 、NAで0.26となっている。

この様にNAの大きな拡散光をコリメートするには、放物面に高次補正項を加えた面形状を有する非球面レンズの使用が、短い距離で小さい収差が得られることから有効である。一方、従来の球面レンズでは、同等の特性を得るには収差を抑えるために複数のレンズの組合せが必要となる。即ち、非球面レンズを用いることにより、レンズ構成枚数を低減することができる。

一方、レンズ製造の観点からは、球面レンズでは研磨により面精度の優れたレンズを実現し得るのに対して、非球面レンズはガラスモールド法により製作するのが一般的で研磨による精度向上が難しいため、ガラスモールド用の金型加工精度および金型組合せ精度によって得られるレンズの面精度が決定してしまう。このため、光ISL用LD送信機への適用はまだ図られていない。今回の検討では、装置の小型化を図るため、非球面レンズを用いることとし、併せて高精度波面の実現を目指す。

LDのビーム拡がり角 θ とレンズを透過した後の所望の平行光のビーム幅 W に対して、レンズ焦点距離 f は次式で表される。

$$f = W / \{2 \sin(\theta/2)\} \quad (5-1)$$

今回は $W = 5 \text{ mm}$ 、 $\theta_{\perp} = 30^{\circ}$ 、 $\theta_{\parallel} = 10^{\circ}$ であるので、LD活性層に対して垂直、水平それぞれの方向の焦点距離は、 $f_{\perp} = 9.66 \text{ mm}$ 、 $f_{\parallel} = 28.68 \text{ mm}$ となる。

この結果より、LD出力を円形にするために、垂直／水平方向で焦点距離の異なる偏倍光学系を用いることにした。また、偏倍光学系を用いることにより、垂直／水平各面の焦点位置を個別に調整できることから、非点隔差の補正も可能となる。

これらを実現するためのレンズ設計のアプローチとして、非球面回転対称コリメートレンズに偏倍光学系を組合せた構成を検討した。

設計では、光線追跡による縮小評価法⁽⁷⁴⁾を用いて、その波面収差が最小となるようにレンズ表面形状の最適化を行った。なお、設計ではLD出射窓のカバーガラス（サファイア製、厚さ 0.25 mm ）も考慮した。

図5. 3にコリメータ設計結果を示す。図5. 3の結果は回転対称非球面コリメートレンズ＋球面シリンダーレンズ2枚を用いた偏倍光学系の3枚構成となっており、LD出射端面からビーム出射面までの長さは約 50 mm である。図中の線は垂直面／水平面においてそれぞれ光線追跡した結果を示しており、LDからの出射ビームがまずコリメートレンズでだ円にコリメートされ、次に偏倍光学系で真円化されている様子がわかる。非点隔差は2枚の偏倍光学系の前後移動の調整で補正される。表5. 2に波面精度の設計結果を示す。表5. 2に示す通り、光軸上の波面精度として $6\lambda/1000$ が得られた。また、表5. 2

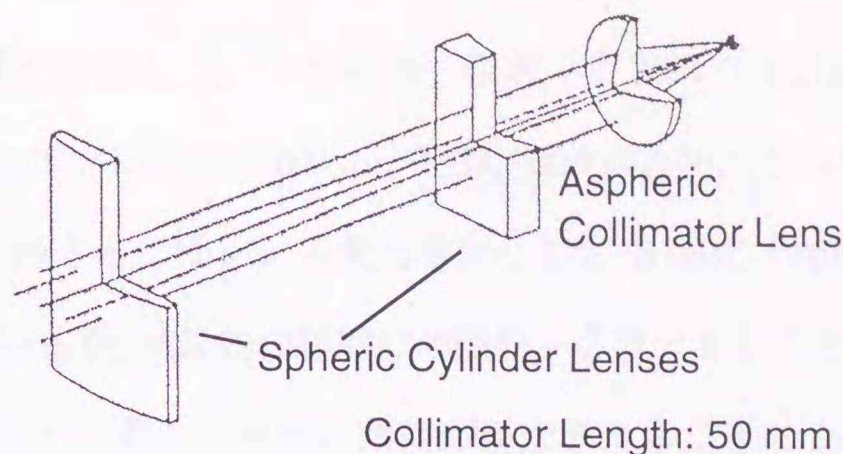


図5. 3 LDコリメータレンズ設計結果

表5. 2 波面精度設計結果

波面精度(RMS, $\lambda/1000$)		
軸上	1°(⊥)	1°(//)
6	7	27

には垂直／水平各方向に1°の軸外れを与えた場合の結果も示す。軸外れについては、LDからのビーム拡がり角が狭い水平方向についてより厳しくなっていることがわかる。なお、今回の設計では偏倍光学系にシリンダーレンズを用いて出射ビームとLD出力とを同軸にした。この配置により光学系の設置調整が容易になる。

図5. 3の非球面回転対称コリメータレンズでは、ビーム入出力両面とも非球面形状としている。ここでこの非球面形状としては、球面項と非球面項の第10次までの高次偶数項を考慮した多項式を用い、その係数の最適化を図った。非球面形状の表現式を以下に示す。

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + a_4h^4 + a_6h^6 + a_8h^8 + a_{10}h^{10} \quad (5-2)$$

ここで、 z は光軸方向に対して垂直に定める参照面からの深さを表す面サグ量、 h は光軸中心からの距離、 c は近軸曲率($=1/R$ 、 R は近軸半径)、 k は円錐定数、 a_4 、 a_6 、 a_8 、 a_{10} はそれぞれ4、6、8、10次の非球面係数である⁽⁷⁵⁾。最適化の結果、コリメータレンズのLD側は小さな曲率で深い双曲面、出射側は大きな曲率で緩い双曲面となった。

LDコリメータの製作では、レンズ面精度の他、レンズ位置精度も問題となり得る。そ

こで図 5. 3 の構成において、球面シリンダーレンズ間距離が設計値(33.6 mm)からずれた場合の波面収差劣化量を評価した。この結果、距離のずれによる波面収差劣化量はずれ量10 μm で $2\lambda/1000$ 、50 μm で $14\lambda/1000$ 、100 μm で $33\lambda/1000$ であり、その値をLDコリメータの設計値($6\lambda/1000$)以下に抑えるにはレンズ間隔精度として10 μm 以内が必要であることがわかった。非点隔差の補正も数 μm 以内の範囲での調整が必要であることから、シリンダーレンズの位置合わせは μm オーダーより細かい精度が要求されることになる。

表 5. 3 に今回設計したレンズの諸元を示す。表中、レンズおよびレンズ面の番号はLDコリメータの外側から、すなわちLDビーム出射方向の反対側からの順となっている。

表 5. 3 LDコリメータレンズ諸元

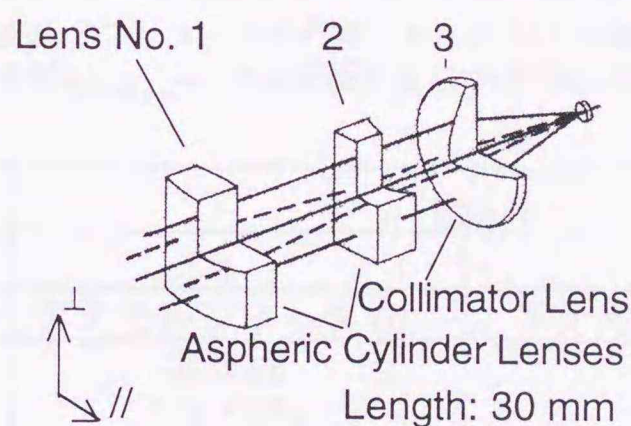
レンズ種別	シリンダーレンズ 平凸 (球面)	同左 平凹 (球面)	コリメータ 両非球面	LDカバーガラス 平板
$f_{\lambda=830}$ (mm)	50.6	-18.2	9.66	∞
肉厚 (mm)	1.5	2	2.15	0.25
硝種	BSC7	BSC7	LaF81	サファイア
$n_{\lambda=830}$	1.51020	1.51020	1.71709	1.75942

5. 2. 1. 1 LDコリメータの小型化

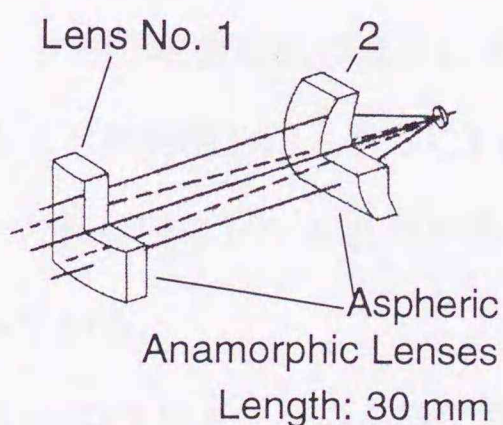
上記設計ではLDコリメータのレンズ種別として、5. 3 に述べる試作に向けて現在の技術で実現可能な回転対称非球面コリメートレンズと球面シリンダーレンズ2枚の組合せについて検討した。一方、非球面形状を回転対称系以外にも適用することにより、さらにLDコリメータの小型化を図ることが考えられる。そこで本節では非球面レンズを発展的に適用した場合のLDコリメータの一層の小型化の可能性を検討する。なお、解析手法については前述の光線追跡を用いたビーム縮小法を用い、また非球面形状の表現も式(5-2)に従う。

設計に際しては、前述の回転対称非球面コリメートレンズを用い、偏倍光学系に非球面シリンダーレンズを組合せて用いる構成と、非球面アナモルフィックレンズを組合せて用いる構成の2つを検討の対象とした。

図5. 4に2つの構成それぞれについてのコリメータ設計結果を示す。図5. 4(a)の構成（以下、Type Iと記す）はコリメートレンズと、ビーム水平方向の成分のみを拡大する非球面シリンダーレンズからなる。また図5. 4(b)の構成（以下、Type IIと記す）は非球面アナモルフィックレンズペアからなる。どちらの構成においても、LD端面からビーム出射端となるレンズ第1面までの長さは30 mmとなり、図5. 3の50 mmより20 mm短い結果が得られた。これら構成において、Type Iではレンズの第1、4、5そして6面が、またType IIでは全ての面が非球面形状となっている。なお、図中にビーム水平面(//)および垂直面($\perp$)の定義を併せて示している。表5. 4に、それぞれの波面精度を示す。これら結果より、波面精度 $\lambda/100$ 以下と、表5. 2とほぼ同等の特性が得られていることがわかる。表5. 5にLDコリメータレンズ設計結果の主要諸元をType IおよびIIそれぞれについて示す。



(a) 非球面レンズ＋非球面シリンダーレンズペア (Type I)



(b) 非球面アナモルフィックレンズペア (Type II)

図5. 4 小型化を図ったLDコリメータレンズ設計結果

表5. 4 小型化を図ったコリメータの波面精度設計結果

構成	波面精度(RMS, $\lambda/1000$)		
	軸上	1°(⊥)	1°(//)
Type I	3	6	51
Type II	4	4.9	4.1

表5. 5 小型化を図ったLDコリメータのレンズ諸元

構成	Type I		
レンズ番号	1	2	3
レンズ種別	シリンダ (//)	シリンダ (//)	円形
面形状 ^{a)}	非球面(凸) /平面	平面/ 非球面(凹)	非球面(凸) (両面共)
$n_{\lambda=0.83\mu\text{m}}$	1.49	1.49	1.72

a: レンズ番号、面形状はLDコリメータの外側、すなわちLD出射方向の逆順で示してある。

注: 厚さ0.25 mm、屈折率 $n_{\lambda=0.83\mu\text{m}}=1.76$ の平板窓をLD出射端に用いている。

構成	Type II	
レンズ番号	1	2
レンズ種別	アナモルフィック (//)	アナモルフィック (⊥)
面形状 ^{a)}	非球面 (凸/凹)	非球面 (凸/凹)
$n_{\lambda=0.83\mu\text{m}}$	1.49	1.49

a: レンズ番号、面形状はLDコリメータの外側、すなわちLD出射方向の逆順で示してある。

注: 厚さ0.25 mm、屈折率 $n_{\lambda=0.83\mu\text{m}}=1.76$ の平板窓をLD出射端に用いている。

これら結果より、LDコリメータを非球面形状の適用により前述のものと同等の波面精度において、より小型化できることが判明した。さらにType IIでは所要レンズ数も3枚から2枚へと削減されており、これは円形ビーム出力を得るLDコリメータの設計においてはこれまでの最小枚数となっている。

以上より、非球面形状の適用がLDコリメータの小型化およびレンズ枚数の低減に効果的であることが示された。今後の課題としては、今回の設計で用いた回転対象系でない非球面レンズを実際に製作するための製造技術の確立が必要である。これについては現在開

発が進められている微細加工技術の進展に期待するものである。

5. 2. 2 LDドライバ

LDドライバは大電流駆動と高速応答を同時に実現させるためにLD高速駆動用GaAs-IC（富士通FMM311CG⁽⁷⁶⁾）を2つ並列に動作させる構成とした。このICは2.7 Gbit/sまでのLD駆動用で、ECL入力インタフェースを持ち、最大ピークおよびバイアス電流はそれぞれ80 mAとなっている。また20-80%パルス立上り時間（10 Ω終端時）は100 psである。これを10-90%立上り時間に線形外挿し、 $(\text{周波数帯域幅}) = 350 / (10\text{-}90\% \text{パルス立上り時間 (ps)}) (\text{GHz})$ の式で周波数帯域換算するとその帯域は3 GHzとなる。図5. 5にLDドライバのIC配置を示す。図に示す通り、今回は対象LDの駆動電流が135 mAとIC単体の容量を超えているため、2つのICからの出力を合成する構成とした。図5. 5において、送信データはECL入力端からバッファ用GaAs-ICを介し、遅延線で同期をとってそれぞれの駆動用ICに入力され、ICからの出力は電流合成されてLDに供給される。IC合成出力は、LDへの配線がLD背面で最短となるようにLD端子に接続されている。

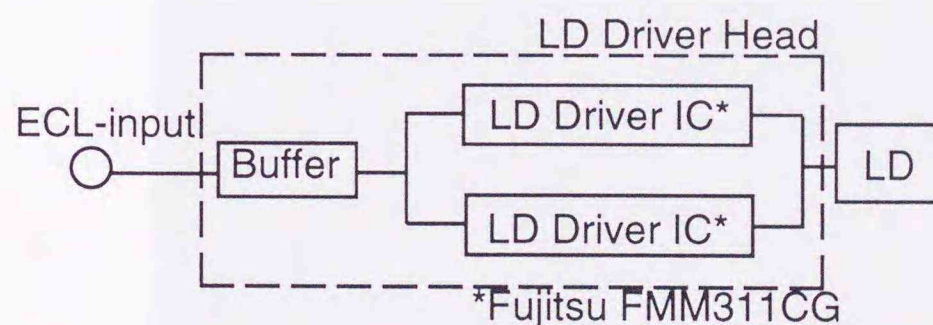


図5. 5 LDドライバIC配置図

このドライバは最大バイアス電流 150 mA、最大駆動ピーク電流 300 mAまで設定可能である。また動作安定化のためにICに対して定電流制御を行っている。また、PDモニタ出力を用いた定出力制御も可能である。

5. 3 LD送信機の試作評価

5. 2で示した設計結果を基に、LDコリメータおよびLDドライバをそれぞれ試作し、それらを組合せてLD送信機を構成し、その特性を評価した。以下にその特性評価結果について述べる。

5. 3. 1 LDコリメータ

表5. 3に示したレンズの諸元に基づき、LDコリメータを試作した。回転対称非球面コリメートレンズについては、ガラスモールド法により製作した。

このLDコリメータからの出射ビームを、マッハツェンダ干渉型波面測定器(Wyko社LADITEシステム、測定精度 $\lambda/50$)により評価した。図5. 6にLDにCW電流50 mAを入力した際のコリメータ出力光の干渉縞パターンを示す。また図5. 7にその波面位相分布を示す。図5. 6よりビーム直径が5 mmとなっていることがわかる。図5. 7より、このビームの波面精度は図5. 6のビーム全体に対して最大位相差(Peak to Valley: P-V値)で 0.602λ 、rms値で 0.062λ 、即ち $\lambda/16.129$ であった。今回、LD出力に非球面コリメートレンズ



図5. 6 LDコリメータ出射ビーム干渉縞パターン

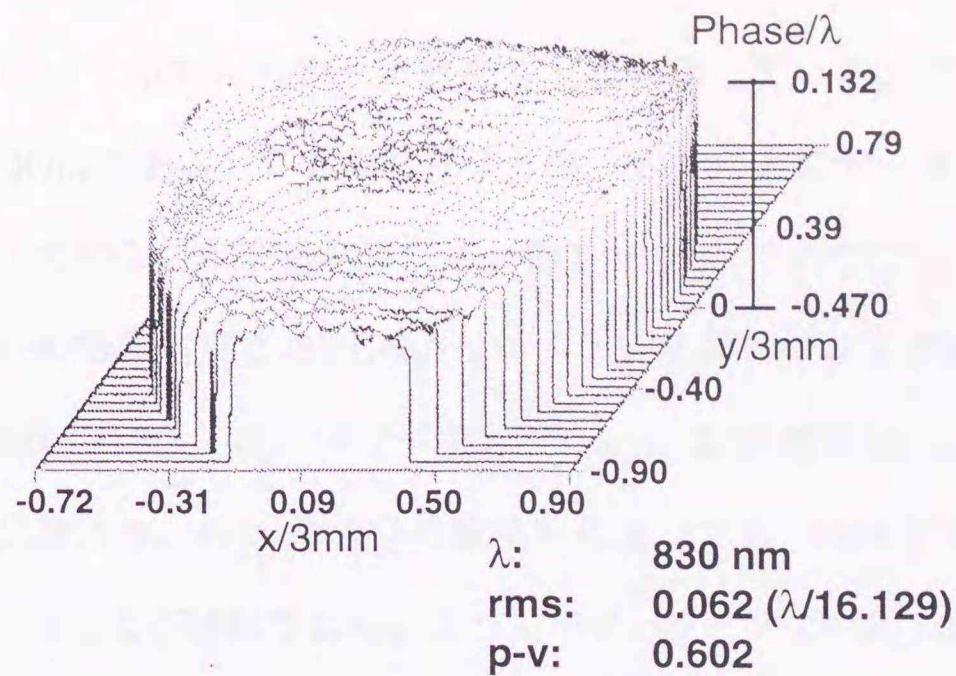


図5. 7 LDコリメータ出射ビーム波面位相分布

を組合せた時の出力ビームの波面精度が $\lambda/30$ より良好であったことから、この結果はシリ
ンダーレンズによって制限されており、従ってその見直しによってさらに波面精度を改善
させることができるものと考えられる。また、開口絞り径を4.5 mmと小さくした際の波面
精度が p-v値で 0.342λ 、rms値で 0.055λ 、即ち $\lambda/18.182$ といずれも良くなっていた。これ
より、現状では周辺部の光線が収差劣化に寄与していること、即ち波面収差の改善にはレ
ンズ外側部の面精度の向上が必要であることがわかる。なお、最近ガラスモールド法の製
作精度向上も図られており、金型加工については $0.01\mu\text{m}$ の精度が得られるようになってき
ていることから、これによっても今後の波面精度の改善が期待される。また、今回はビー
ム幅として半値全幅(Full Width Half Maximum: FWHM)を用いた。これより、LD出力から
の透過効率が制限されており、透過効率は直径 5 mmの開口出力で60%であった。

5. 3. 2 LDドライバ

LDドライバを図5. 5の構成に基づき作成した。LDドライバは実際には図5. 5に対
応するLDドライバヘッド基板、電源を供給し、また出力制御を行うコントローラ、そし
てコントローラおよび信号源とヘッド基板との間のインタフェースの3つから構成されて
いる。図5. 8にバイアス電流41 mA、駆動電流120 mA (LDからの光ピーク出力約100

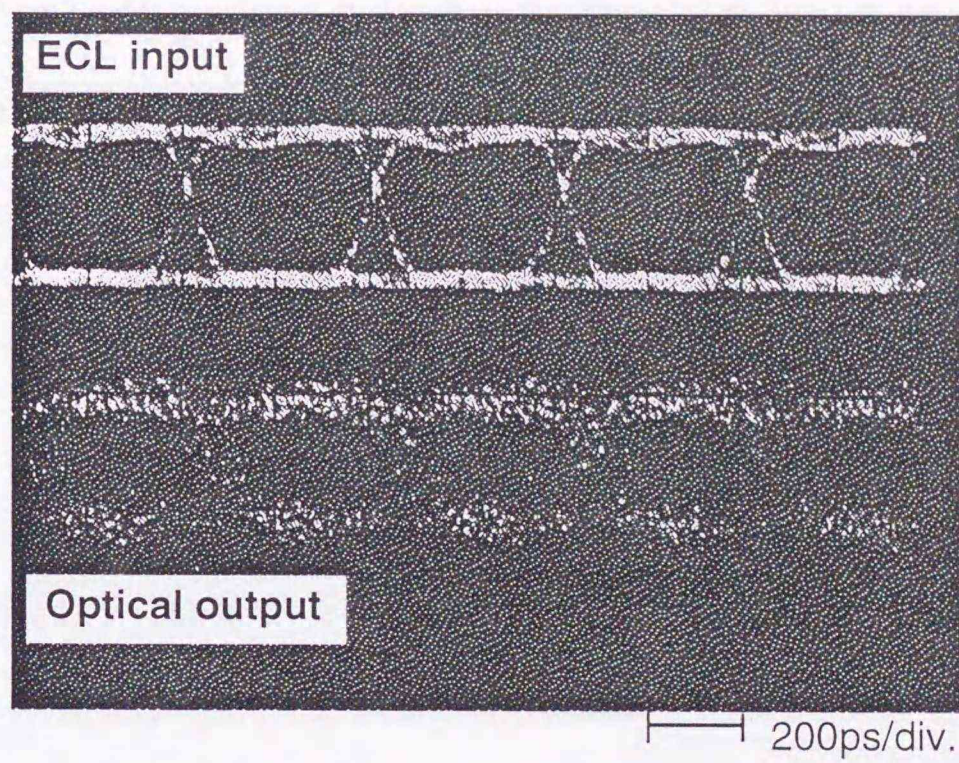
mW相当)とした場合のLD出力波形をAPDで受光し、オシロスコープでモニタした測定波形を示す。図では併せてECL入力データ波形も上部に示している。伝送速度は(a)2.488 Gbit/sおよび(b)1.0 Gbit/sである。これら結果より(a)、(b)共に入力データに対応した良好なアイパターンが開いていることが確認される。図5.9に、LDの代わりに10 Ω のダミーロードで終端した際の伝送速度2.488 Gbit/sに対する電気信号モニタ波形を、(a)バイアス電流30 mA、駆動電流100 mA、(b)バイアス電流150 mA、駆動電流300 mAに対してそれぞれ示す。これらの比較より、(b)の最大定格電流時においても、(a)と同等の良好なアイパターンが得られていることが確認される。これらアイパターンでの20-80%パルス立上り時間は120 psとなっており、これより5.2.2と同様の議論より周波数帯域は2.5 GHzと、ドライバとLDを組合せた構成においても2.488 Gbit/s伝送に十分な帯域を有してことが確認された。なお、図5.9ではLDの最大入力を超えた駆動電流での特性を調べるためダミーロードを用いて測定したが、この値は対象としているLDのインピーダンス(4 Ω)に近い値で、かつ最大電流供給時の破損を避けるために10 Ω とした。また、この20-80%パルス立上り時間については、IC単体で100 psのものが総合で120 psと劣化している。これは2つのICからの出力合成の際のタイミングずれによるものと思われる。

今回のドライバ試作ではLD高速駆動用ICを用いることにより、LDドライバヘッドをIC 3個、100 mm x 55 mmの大きさの基板と簡単かつ小型な構成で実現した。今後はさらに1つのICで駆動できるような、より高性能のICの開発が望まれる。

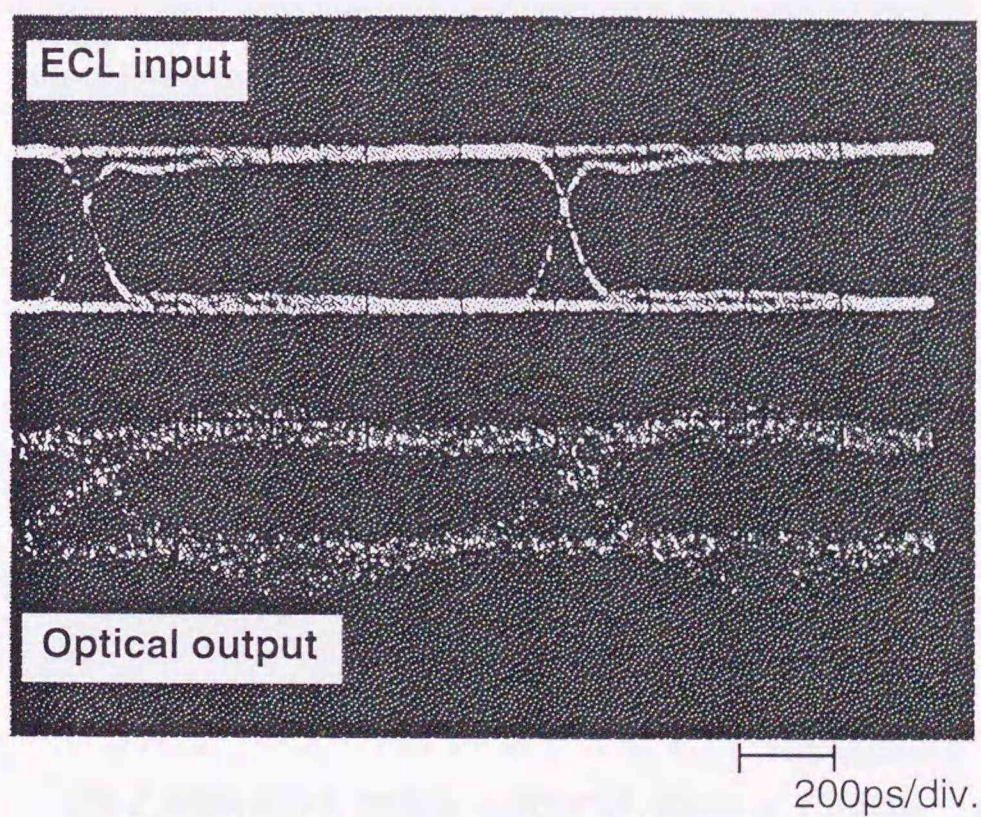
5.3.3 LD送信機

図5.10にLDコリメータとドライバを組合せて構成したLD送信機の外観写真を示す。LDと非球面コリメートレンズは写真中央部のマコール製ホルダに、2つのシリンダーレンズはインバー製のホルダにそれぞれマウントされている。また、ビーム出射側に直径5 mmの口径を規定するための絞り(Aperture Stop)が設けられており、コリメート光は写真右手方向に出力される。

送信データはECL信号インタフェース部(ECL-input I/F)に入力され、LD背面のドライバ

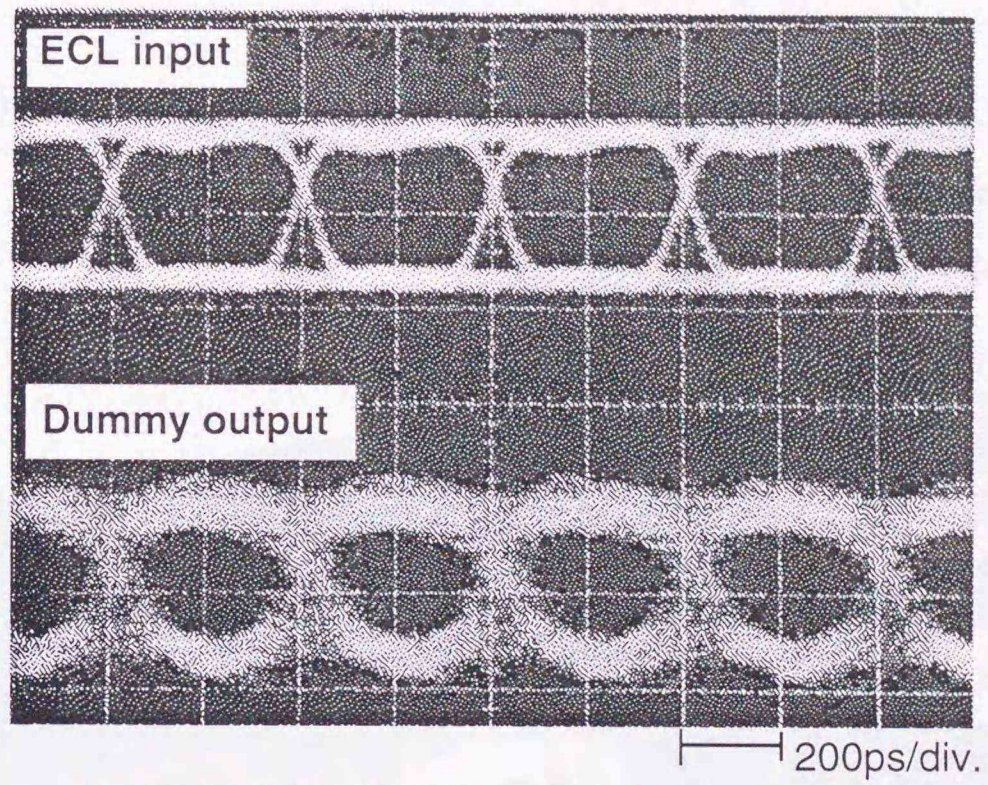


(a) 2.488Gbit/s, $I_{\text{mark}} = 120\text{mA}$, $I_{\text{bias}} = 41\text{mA}$

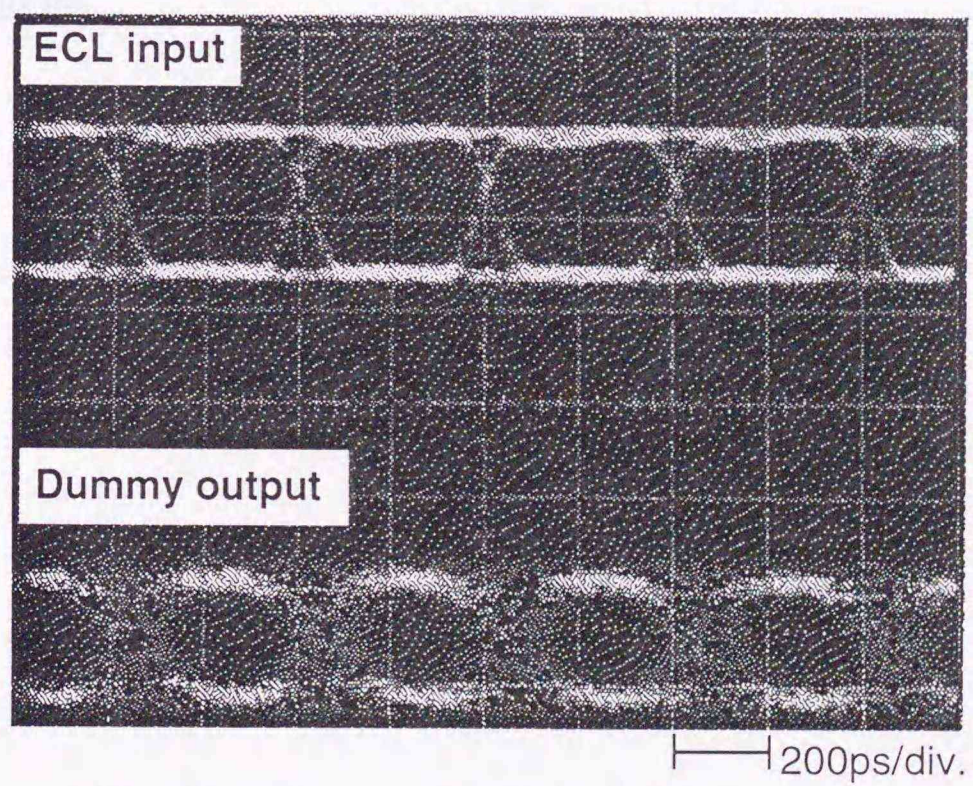


(b) 1.0Gbit/s, $I_{\text{mark}} = 120\text{mA}$, $I_{\text{bias}} = 41\text{mA}$

図 5. 8 LDドライバ光出力波形応答



(a) 2.488Gbit/s, $I_{\text{mark}} = 100\text{mA}$, $I_{\text{bias}} = 30\text{mA}$



(b) 2.488Gbit/s, $I_{\text{mark}} = 300\text{mA}$, $I_{\text{bias}} = 150\text{mA}$

図5.9 LDドライバ電気波形応答（抵抗終端時）

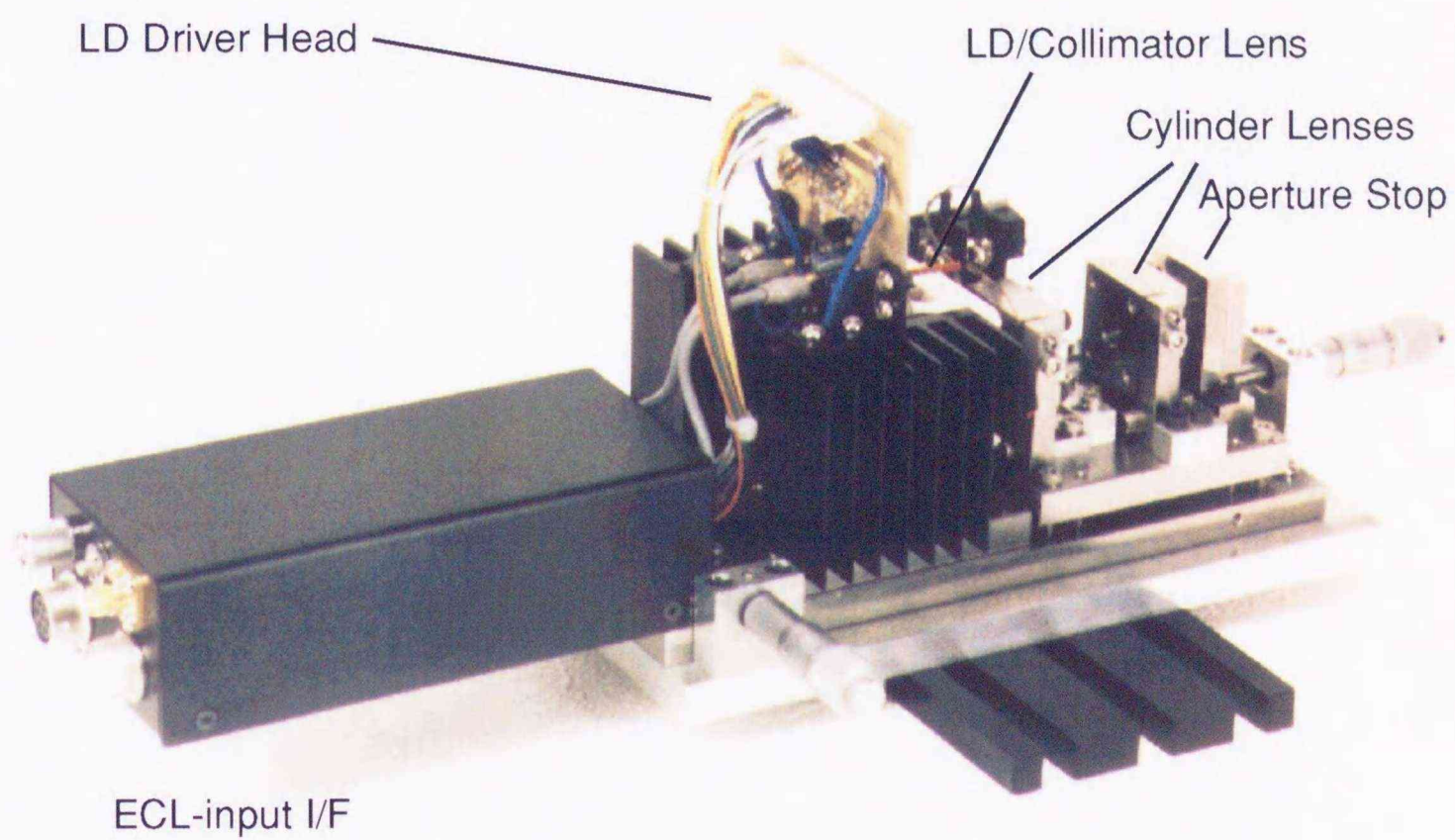


図 5 . 1 0 試作したLD送信機外観

ヘッドからLDに供給される。ECL信号I/F部は送信データおよびLD駆動/温度制御用電流のI/Fであり、実質的な送信機部はこれを除いた放熱フィンから右側となる。その大きさは概ね長さ150 mm x 幅100 mm x 高さ100 mmである。今回の装置では動作の安定化のためにLDについてはペルチェ電子冷却/放熱フィンによる空冷を、またLDドライバについては基板に取付けた放熱フィンからの自然空冷を個別に行っている。LD動作温度の設定は、室温環境で室温程度の設定温度に対して0.1°C以内の精度とした。今後さらに放熱部の小型化を図るにはLDとLDドライバの吸熱回路の共通/小型化や放熱方法の検討が必要である。

以上、今回の試作で得られたLD送信機の主要諸元を表5. 6にまとめる。

表5. 6 LD送信機主要諸元

LDドライバ	
伝送速度	2.5 Gbit/s
信号 I/F	ECL
最大バイアス電流	150 mA
最大ピーク駆動電流	300 mA
パルス立上り時間	120 ps
LDコリメータ	
波長	830 ± 5 nm
コリメータ出力	60 mW
出力ビーム形状	円形、直径 5 mm
波面精度	$\lambda/16.129$

5. 4 Si-APD受信機の開発

高速・高出力のLD送信機の開発と並行して、これに対応する光受信機の開発もまた光衛星間通信実現の重要な課題である。この受信機は高感度かつ高速応答性に優れたものであることが望まれる。これまでにいくつかの高感度光受信機の開発が報告されている^{(77), (78)}が、前節で示した0.8 μm 帯における2.5 Gbit/s伝送に適用可能なものはまだ報告されていない。そこで本節では、シリコン(Si)アバランシェフォトダイオード(Avalanche Photo Diode: APD)を用いた0.8 μm 帯用2.5 Gbit/s光受信機の開発結果について示す。

5. 4. 1 Si-APD受信機的设计

今回の光受信機的设计では、システムパラメータとして伝送速度 2.5 Gbit/s、伝送方式としてデジタル信号をノンリターンゼロ(Non-Return to Zero: NRZ)方式で符号化した強度変調/直接検波(Intensity Modulation/Direct Detection: IM/DD)方式、データインタフェースとしてエミッタ結合ロジック(Emitter Coupled Logic: ECL)を用いた。これらパラメータは、前節に示したLD送信機のパラメータに対応したものである。受信機の光受信信号レベルのダイナミックレンジとして、光アンテナにおける指向追尾誤差を吸収するために 15 dBとした。

図 5. 1 1 に設計したSi-APD受信機の機能ブロックダイヤグラムを示す。ここで、Si-APD素子として、周波数応答帯域2 GHz、最大GB積 200 GHzの典型的な特性を有するデバイス(三菱電機PD1004相当)⁽⁷⁹⁾のものを用いた。図 5. 1 2 に、Si-APD素子をGaAsプリアンプと共に実装したセラミックハイブリッドチップの写真を示す。ここで、写真中央左側の円形のSi-APD素子はそのディテクタ直径が200 μm であり、回路上の寄生容量を最小とするためにプリアンプと並べてその線路が最短となるように配置してある。プリアンプはその等価入力インピーダンスが高ければ回路の低雑音化を、一方低ければ広帯域化を行えることからトレードオフスタディが必要となる。ここではプリアンプをトランスインピーダンス型で構成し、そのトランスインピーダンスを実験的に280 Ω として回路を作製した。

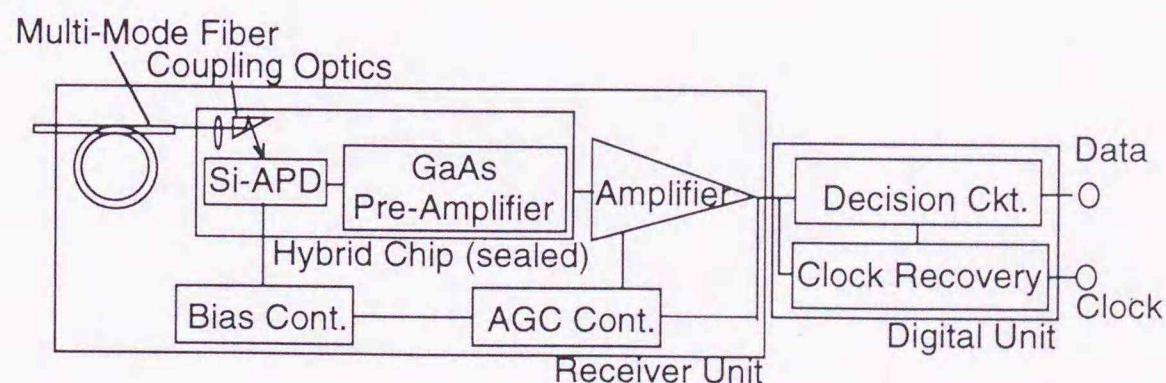


図 5. 1 1 Si-APD受信機機能ブロックダイヤグラム

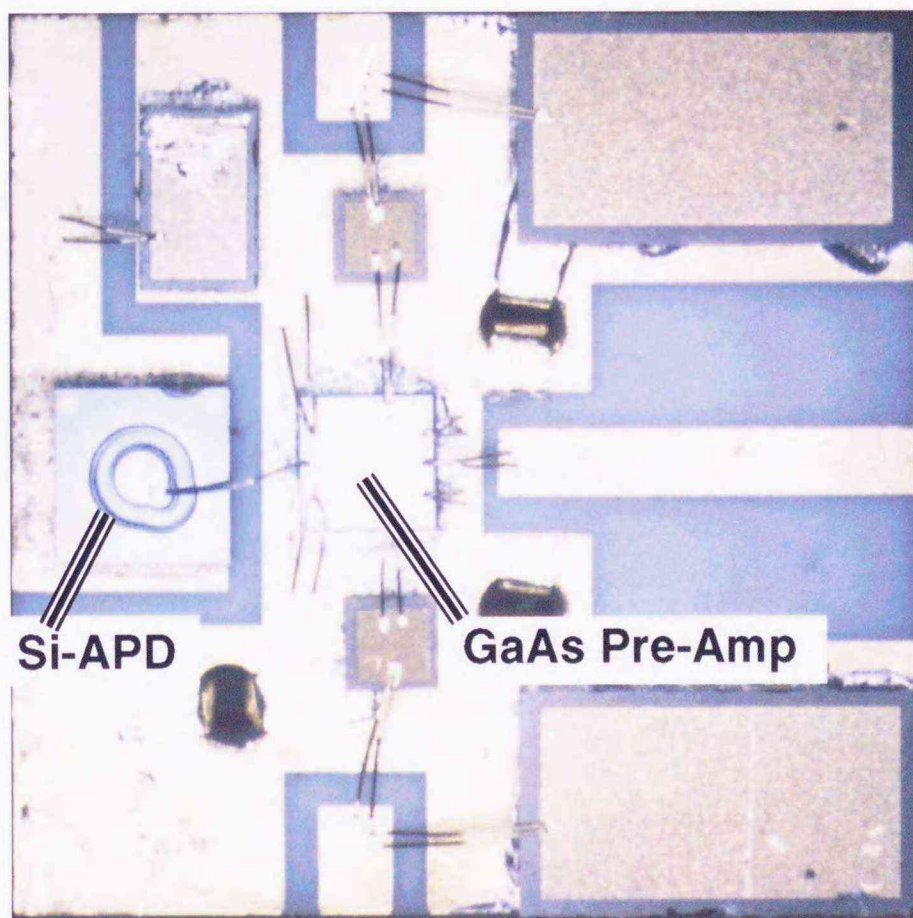


図 5. 1 2 Si-APD受信機受光部ハイブリッドチップ外観写真

5. 4. 2 Si-APD受信機の特性

試作したSi-APD受信機の特性を測定した。まず、光コンポーネントアナライザ(HP8702A)を用いて、光ビームを空間的にAPDディテクタ端面上に直接集光する構成で光受信機の周波数応答を求めた。この結果、受信光ビーム径を $60\text{ }\mu\text{m}$ 、APDバイアス電圧を 146 V としたときの 3 dB 帯域幅として 1.3 GHz を得た。これは 2.5 Gbit/s IM/DD-NRZ伝送で要求される伝送速度の $1/2$ 以上の帯域幅を満たしている。

また、雑音電流密度の周波数応答についても測定した。この結果、APDの増倍率を 123 としたとき、受信回路の等価入力雑音電流密度は 1 GHz において $16.6\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、周波数が高くなるにつれて雑音電流密度も高くなる傾向を得た。この結果、トランスインピーダンス $280\text{ }\Omega$ 、回路容量 1.8 pF の回路パラメータを得た。ここでトランスインピーダンスアンプにおける開放利得は 5 とした。

今回の試作装置では、大気中での素子の特性劣化を避けるため、受光素子のハイブリッドチップに対してハーメチックシールを施し、受光部にはグレーデッドインデックス型のマルチモード光ファイバを用いた。光ファイバと受光素子端面との間の結合光学系としては、ファイバ端面からの光ビームが受光素子端面上で直径 $50\text{ }\mu\text{m}$ のスポットに集光され、かつ受光モジュールを小型化するために光ファイバをハイブリッドチップと平行に配置するためにプリズム型レンズを用いた⁽⁸⁰⁾。

今回の試作では受光素子との結合系に光ファイバを用いたが、実際の光ISLでは光学系を用いて受光素子端面上に受信光ビームを直接集光させる構成での利用がまず考えられる。この場合、光アンテナの動的な追尾誤差により、集光させた受信光ビームのスポット位置が受光素子端面上を移動することになる。そこで、上記ハーメチックシールを行う前に、受信光ビームのスポット位置のずれが受信機の特性に及ぼす影響を実験的に調べた。この結果、半径 $100\text{ }\mu\text{m}$ の受光素子に対して、直径 20 および $60\text{ }\mu\text{m}$ のスポット直径を有する光ビームを照射した場合、受光素子の中心部から $\pm 70\text{ }\mu\text{m}$ 程度のオフセット範囲では受信機の 3 dB 帯域幅の変動がほとんど無いことを確認した。

光ISLでは、送信側でのアンテナの動的な指向誤差により、受信光電力が変動する特徴を有している。この受信レベル変動の影響を補償するために、受信機には自動利得制御 (Automatic Gain Control: AGC)回路を用いる必要がある。今回の試作では、最低受信レベルから5 dBの範囲ではAPDバイアス電圧を、また次の10 dBの範囲ではAGCアンプ利得をそれぞれ制御する2段階のAGCを適用することにより、15 dBの受信レベル制御範囲を得ることを目指した。ここで、制御応答速度はそれぞれ20 msとした。制御対象としては、APD受光部からの出力信号を参照するにした。これにより、Si-APDのバイアス電圧を制御対象とする場合と比べて厳密な温度やバイアス電圧の制御を不要とした。実際に受信機を試作、評価したところ、その制御範囲として -32から -10 dBmを得た。この制御範囲は22 dBであり、当初の目標より大きめの結果が得られた。

図5. 13に試作した受信機の、平均受信光電力レベルに対するビット誤り率(Bit Error Rate: BER)特性を温度をパラメータとして測定した結果を示す。この測定では中心波長0.849 μm 、消光比10 dB、空間マルチモード発振のレーザダイオードを光源として用いた。図の結果より、平均受信光レベル-28 dBmでBER 1×10^{-9} が得られることがわかる。また、併せて受信機受光部からの出力電気信号のアイパターンをモニタしたところ、節の中心部において大きくクリアに開いていることを確認した。図の結果から得られる光/電流変換効率は0.22 A/Wであった。今回用いたSi-APDは本来0.8 μm 帯において0.4 A/Wの変換効率を有している。ここで生じた効率の劣化2.6 dBは、光ファイバから受光素子端面へ光ビームを導くプリズムレンズでの損失によるものである。このプリズムレンズは長波長帯用に作製されたものを流用したため、0.8 μm 帯で無反射コーティング等が最適なものとなっておらず、この結果上記損失が生じたものと思われる。従って、ここで生じている損失はレンズの置き換えにより除くことができる見込みである。この2.6 dBを除くと、今回試作した受信機でBER 1×10^{-9} を得るのに必要な受信レベルは-30.6 dBとなる。一方、前節に示したピーク電力60 mW、平均出力30 mW(14.8 dBm)の光送信機を、直径20 cmのアンテナ、伝送距離3,000 kmを想定した伝送損失37.9 dBのリンクに適用した場合、受信光レベルは-23.1 dBmとなり、リンクマージン7.5 dBが得られる。これらより、今回開発した光送

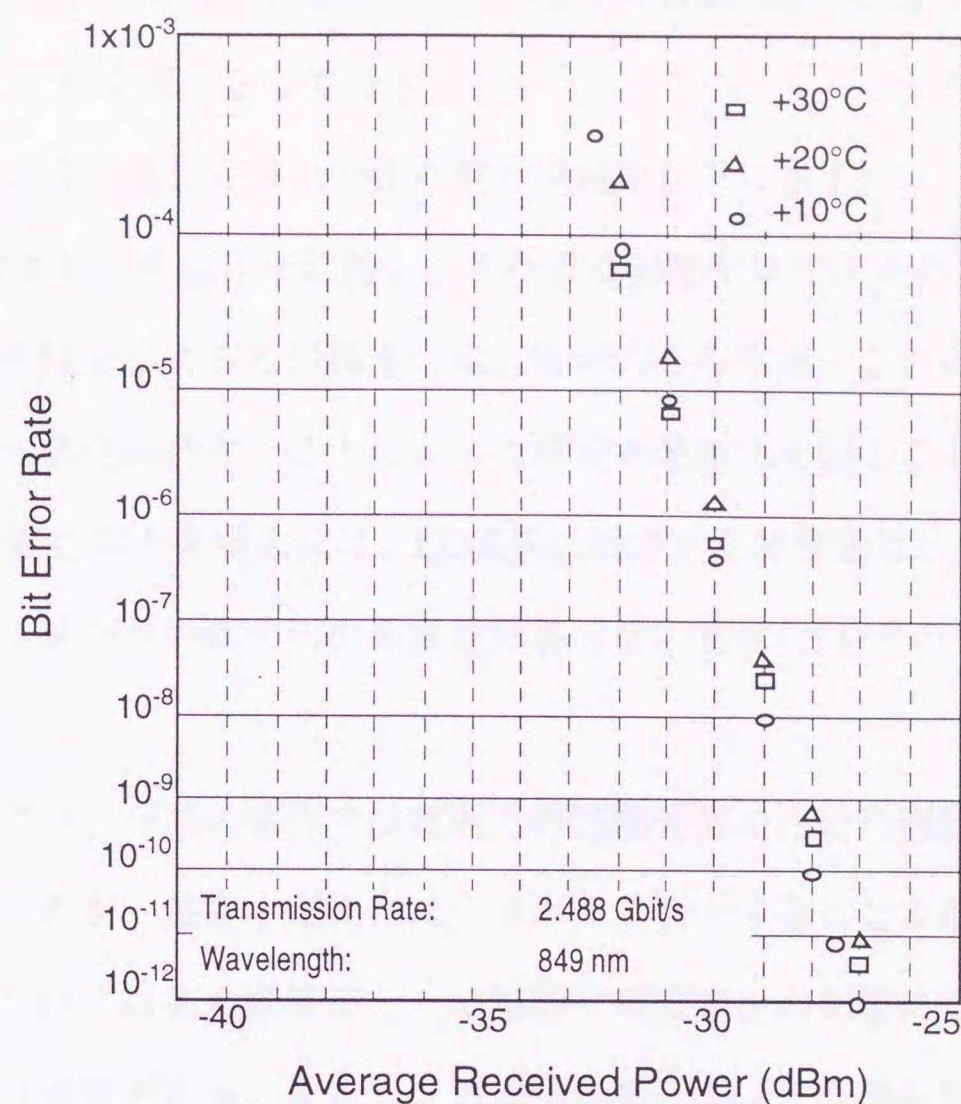


図 5. 1 3 温度をパラメータとした、平均受信光電力
レベルに対するビット誤り率

受信機で得られた伝送特性により、距離3,000 kmでの伝送速度2.5 Gbit/sの光衛星間通信がほぼ実現可能であることが示された。

5. 5 結言

光ISL用通信装置への適用を目指して、LD送信機的设计および試作評価を行った。その結果、波長 830 nmのLDを対象にコリメータ出力 60 mW、伝送速度 2.5 Gbit/s、波面精度 $\lambda/16$ で直径5 mmの円形コリメート光出力を得た。この結果は第4章で示した低周回衛星間光ISLに十分適用可能である。コリメータについては非球面レンズの適用により3枚のレンズ構成で上記特性を得た。非球面レンズの重量は1枚 0.3 g以下であり、小型・軽量で簡単な構成を達成した。さらに非球面レンズを回転対称系以外の光学系にも適用することにより、一層の小型化と所要レンズ数の低減が図れることを示した。またドライバで実

現した最大駆動電流300 mA、最大バイアス電流150 mAの値は今回対象とした100 mW出力のLDの駆動に十分な値となっている。

一方、今回の試作を通じて得た今後の検討課題を以下に示す。

LDに関してはさらに高速化を目指し、また温度制御やコリメータとの位置合わせの効率化、そして窓の除去による波面精度の向上等が考えられる。これらはLDチップとドライバや光学系を一体化設計することによって構成の最適化を図ることができる。即ち、さらにLD送信機の実特性向上を図るには、LD実装の段階から装置設計を行うことが重要である。また、ビーム拡がりの真円化や周波数応答特性に優れたLDそのものの開発も課題となる。

光学系に関しては、今回の試作では室内での実験評価のために微調整機構を設けたレンズマウントを用いたが、装置小型化には一体ホルダ型とすることが最も効果的である。さらに、実用化に向けては衛星搭載用として振動や温度変化の影響についても定量的な評価とその対策を行う必要がある。またレンズ本体に関しては、今後の精密微細加工技術の発達に伴って、量産性に優れたガラスモールド法によっても研磨によるものと遜色ないものが実現されよう。

さらに、今後のLD送信機の検討に際しては、リレー光学系や光アンテナを含めた送信系全体として、透過効率の向上や装置の小型・軽量・簡単化を目指した検討が必要である。

関連して、このLD送信機に対応した0.83 μm 帯での2.5 Gbit/s受信機を開発を行った。この結果、Si-APDを用いて2.5 Gbit/sの受信が可能であることを初めて実証した。また、測定結果でBER 1×10^{-9} を得るための平均受信レベル-28 dBmを得、送信機と組合せて使用することにより距離3,000 kmでの衛星間リンクが実現可能であることを示した。今後さらに特性の改善を図るには、光アンテナの追尾誤差によるスポットビームダンシングを吸収し得る範囲でSi-APDの受光面積を減らし、受光面積に比例する素子容量を低減し、この容量低下分を回路の等価入力インピーダンスの増加に振り向け、これにより回路雑音を低減することが有効であると思われる。

これらLD送信機およびSi-APD受信機は、ATR光電波通信研究所において、自由空間レーザ伝送シミュレータを用いた通信実験および遠方界におけるビーム指向追尾制御実験に活用されている⁽⁸¹⁾。

これら 0.8 μm 帯での送受信機の開発は光ISLへの適用のために検討されたものである。しかしながら、この技術は光空間伝送を用いた構内無線通信等へも適用可能であり、光ファイバ通信とは異なった領域での新たな通信手段の開発や需要の喚起、そして新たな通信デバイスの開発へと議論が発展することを希望する。

第6章 結論

本論文は、小型地球局からなるユーザが直接衛星にアクセスする形態の国際衛星通信システムにおいて、ユーザの伝送要求に応じつつ衛星資源の活用を図るための通信システム設計およびその要素技術の試作評価に関する一連の研究成果をまとめたものである。その主な目的は、より小型のユーザに対して、より簡便でかつ適切な通信手段を提供することにある。さらにこの通信システムは多様なデジタルサービスの利用を目指す将来的なユーザの指向に即したものでなければならない。

本研究では、まず現状の衛星通信に即したシステム構成について、次いで衛星構成まで含めた将来的なものについて段階的に検討を行った。以下、各章毎にその結果をまとめる。

第2章では現在の代表的な衛星としてインテルサット衛星を想定し、周波数帯域として小型地球局の利用を容易にするKu帯(14/11, 12 GHz帯)を中心に、ユーザを直接収容する国際ビジネス衛星通信サービスを効率良く運用するための網構成、デマンド割当て方式および伝送方式について具体的な設計を行った。この結果、衛星資源の一元的な管理とユーザ情報の分散的な管理を同時に効率良く行うために集中制御と分散制御を併用する階層的な網構成を提案した。衛星回線に関しては、呼制御情報を伝送する制御回線とトラヒック・データを伝送するトラヒック回線を個別に設け、制御回線は固定接続とし、トラヒック回線は呼の発生毎に所要の回線を適宜設定するデマンド割当て運用を採用した。伝送方式としてはTDMA回線を用い、回線種別ごとのダイナミックな容量割当ておよび衛星リソースの有効利用を図ると共に、各種地球局を統合的に包括したIBSシステムを構築した。

これら設計に基づき実験システムを開発した。この実験システムを用いて衛星実験を行った結果、伝送特性についてはC/N対BER特性の理論値からの劣化が1 dB以内、呼接続遅延特性については回線設定所要時間が10秒以内、UPC制御特性については制御誤差が3 dB以内と、それぞれ所望の特性が得られることを確認した。

第3章では、多数の受信専用ユーザ局を対象として同報モード衛星回線を用いてデータ配信を行うシステムに階層的な制御網を適用する構成を提案した。このシステムではユーザ局の他に衛星を介したデータ配信を行う1つの中央局と、ユーザごとの受信確認を行う複数の副制御局を設ける構成を採用した。この階層的な網構成において、中央局－副制御局間と副制御局－ユーザ局間の処理時間の比をパラメータとしてポーリングによる受信状態応答処理時間を最小にする最適な副制御局数があること、ユーザ局の通信コストをパラメータとして階層化制御網構成のほうが従来の集中網構成よりシステムコストを低減し得ることを明らかにした。またこの網構成をもとにG3ファクシミリ同報配信システムの試作を行い、その動作を確認した。

第4章では、複数の低周回軌道衛星を用い、光衛星間リンクにより広帯域衛星間通信を実現する構成を提案し、ユーザ／衛星間および衛星間リンクの伝送パラメータを解析した。この結果、ユーザ／衛星間リンクでは衛星地上高度とユーザからの最小運用仰角がサービス品質要求および装置実現の観点から重要なパラメータとなることを示した。具体的には伝送損失、衛星可視期間そして所要衛星数について調べ、各要素ごとへの衛星高度と最小運用仰角の最適値が異なってくること、従って衛星パラメータを決定する際には何らかのトレードオフスタディが必要となることを示した。

衛星間リンクについては、衛星の軌道解析により2衛星間の伝送パラメータの変化について調べた。その結果、同一軌道面上の隣接衛星間ではその相対的な位置がほぼ固定されることから光衛星間通信を用いた広帯域リンクの設定に適していること、および隣接軌道面上を同一方向に周回する衛星間では極域において大きく変化することを明らかにした。この結果をもとに、隣接する軌道面上の同一方向に周回する衛星間に、低緯度地域のリンク状態が安定している期間のみ軌道面間リンクを設定する網構成を提案した。この網構成により、任意の2地点のユーザ間を衛星リンクで接続し、全世界をカバーする通信網を構築することができる。

さらに、光衛星間リンクについて回線設計を行い、低周回衛星間では3,000 km程度の

距離を見込めば良く、この程度の衛星間距離を対象とした場合の伝送パラメータが現在の光学および光通信技術で実現可能であることを示した。

第5章では、第4章に示した広帯域光衛星間リンクを実現するための核となる半導体レーザ送信機の実現性を実証するため同装置の設計および試作評価を行った。その結果、0.8ミクロン帯のLDを対象に出力 60 mW、伝送速度 2.5 Gbit/s、波面精度 $\lambda/16$ で直径 5 mm の円形コリメート光出力を得た。この試作において、コリメータは非球面レンズの適用により全長 50 mm、3 枚のレンズ構成で上記特性を達成した。これにより小型・軽量で特性の優れたLDコリメータを実現できる見通しを得た。併せて、非球面シリンドーレンズにより全長 30 mm、2 枚のレンズ構成で同等の特性が得られる設計結果を示した。また、実際の通信装置を構成する際に必要となるシリコン・アバランシェフォトダイオードを用いた光受信機も開発した。この受信機はカプリング光学系の損失を除いた平均光受信レベル -30.6 dBm でビット誤り率 1×10^{-9} を達成し、0.8 ミクロン帯での 2.5 Gbit/s 伝送が可能であることを示した。また今後の課題として、これら伝送装置の衛星間通信以外の分野への適用が考えられることを示した。

今後さらにユーザ局の小型化を図るには、静止軌道衛星の一層の大型化や高機能化、そして周回衛星の実現が重要である。この中で光衛星間通信は周回衛星間をリンクし、その通信網構成を拡張するのに有効であるが、これを実現するには光通信用素子レベルでの開発も必要である。また地上の固定網やセルラ網も今後一層充実していくことから、これらの多様な伝送メディアの中での衛星通信の適応領域を考慮し、衛星通信システムの最適化を図る必要がある。

ユーザ局においても、衛星通信のみならず上記地上固定網やセルラ網等の多様な伝送メディアを統合的に活用し、所望のデジタル伝送サービスを効率的に実現し、運用するための検討がますます重要になってくるものと思われる。

本論文では、上記のようにユーザを直接対象にした衛星通信システムにつき、具体的なシステム設計およびユーザ局構成例を示した。これら検討結果が、衛星を活用した統合的なデジタル通信システムの発展的な検討の一助になれば幸いである。

謝 辞

本論文をまとめるに当りご指導、ご鞭撻頂いた北海道大学電子科学研究所 永井信夫教授に深謝申し上げます。同じくご指導、ご助言を頂いた北海道大学工学部 伊藤精彦教授、小柴正則教授、小川恭孝教授に深謝申し上げます。

本論文は、著者が国際電信電話株式会社(KDD)研究所において、また株式会社エイ・ティ・アール(ATR)光電波通信研究所出向中に行ってきた研究成果をまとめたものである。この間KDD研究所にて本研究の機会を与えて頂き、ご指導頂いた浦野義頼博士(同所所長)、伊藤泰彦博士(同所前次長、現KDD移動通信室審議役)、村上仁己博士(同所次長)に感謝申し上げます。また、ATR光電波通信研究所にてご指導頂いた葉原耕平博士(同社会長)、古濱洋治博士(同社前社長、現郵政省通信総合研究所所長)に感謝申し上げます。

本研究の成果は多くの関係各位のご助力の賜物である。特に国際ビジネス衛星通信に関する研究ならびに筆者の衛星通信研究の端緒において当時のKDD研究所衛星通信研究室にてご指導、ご助言頂いた平田康夫博士(現KDD取締役)、古賀敬一郎氏(同所画像通信グループリーダー)、高畑文雄博士(現早稲田大学教授)、またATR光電波通信研究所無線通信第一研究室にて光衛星間通信に関する研究においてご指導頂いた安川交二博士(現KDDグローバルマルチメディア推進室担当次長)、藤瀬雅行博士(現KDD研究所主幹研究員)、KDD復帰後の同報システムを始めとする研究においてご指導頂いたKDD研究所主幹研究員 佐藤軍吉博士および同所無線通信グループリーダー 小林英雄博士に深謝申し上げます。また本研究における各種通信装置試作にご協力頂いた三菱電機、オーエスアイ・プラス、HOYA、旭データシステムズ関係各位、そして研究遂行にご助力頂いた有本好徳氏および稲垣恵三氏を始めとするATR光電波通信研究所各位、KDD研究所無線通信グループおよび関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

第1章

- (1) 宮憲一監修: "改訂 衛星通信技術", pp. 1-31, 電子情報通信学会, 東京 (1985-02).
- (2) 荒井, 西田, 味寺: "インテルサットVII号衛星の概要", 国際通信の研究, No. 143, pp. 94-106 (1990-01).
- (3) 下世古, 飯田: "世界の非静止衛星通信", pp. 27-58, 電波新聞社, 東京 (1994-05).
- (4) 郵政省通信政策局監修: "平成5年版衛星通信年報", 国際衛星通信協会, 東京 (1993-11).
- (5) 佐藤敏雄: "海事衛星通信入門", pp. 14-32, 電子情報通信学会, 東京 (1986-07).
- (6) 大山, 桑原監修: "光海底ケーブル通信", pp. 5-6, KEC, 東京 (1991-12).
- (7) 立川, 石川編, 秋山監修: "B-ISDN絵とき読本", オーム社, 東京 (1993-01).

第2章

- (8) Hall R.: "SBS -enabling technology," 5th ICCO (Oct. 1983).
- (9) Goode B.: "Demand assignment as part of the SBS TDMA satellite communications system," 335, EASCON '78 (Sep. 1978).
- (10) Guenin J. et al.: "Towards the integrated services digital network: TELECOM I," 5th ICDSC, pp. 209-215 (March 1981).
- (11) Lombard D., Rancy F.: "TDMA demand assignment operation in TELECOM I business service network," G2.2, NTC '81 (Nov. 1981).
- (12) 宮内, 野坂: "デジタル衛星通信", pp. 101-195, 産業図書, 東京 (1985-08).
- (13) Lee J. et al.: "INTELSAT Business Services," 6th ICDSC, pp. III-1-11 (Sept. 1983).
- (14) 高畑, 野原: "国際ビジネス衛星通信システムにおけるトラフィック需要に関する考察", 信学技報, SAT84-3 (1984-05).
- (15) CCITT(ITU-T)勧告: "Integrated Services Digital Network (ISDN)", Rec. Iシリーズ, ITU, Geneva (1985).
- (16) 高畑, 野原: "国際ビジネス衛星通信システムにおけるデマンドアサインメント制御に関する考察", 信学技報, CS84-55 (1984-07).
- (17) 平田, 高畑, 安永, 安田: "国際ビジネス衛星通信用TDMAシステムに関する考察 -誤り訂正方式の効果的適用法-", 信学技報, SAT84-4 (1984-05).
- (18) 安田, 平田, 小川: "ヴィタビ復号の容易な高符号化率たたみ込み符号とその諸特性", 信学論(B), J64-B, 7, pp. 573-580 (1981-07).
- (19) CCITT(ITU-T)勧告: "Specifications of Signalling System No. 7", Rec. Qシリーズ, ITU, Geneva (1985).
- (20) 藤野, 梅田: "サイクルスリップ発生確率の過渡特性", 信学論(B), J64-B, 6, pp. 554-555 (1981-06).

- (21) Bhargava V. K. et al.(塚本他訳): "最新デジタル衛星通信 -実用化技術と最新動向-", pp. 108-125, 日本技術経済センター, 東京 (1983-04).
- (22) 梅比良, 加藤: "搭載バースト復調器用搬送波再生回路の検討", 信学技報, SAT85-11 (1985-07).
- (23) 小川, 村谷, 大川, 野坂: "衛星通信TDMA用4相PSK変復調装置の設計", 信学論(B), 55-B, 12, p. 675 (1972-12).
- (24) 山崎, 野原, 高畑: "TDMA運用に基づく国際ビジネス衛星通信システムにおけるフレーム同期に関する検討", 信学技報, CS85-89 (1985-10).
- (25) 野原, 高畑: "異なるFEC符号化率の混在する衛星通信システムにおける回線割当て方式", 昭60信学総全大, 2475 (1985-03).
- (26) 野原, 高畑: "異なるFEC符号化率の混在するデマンド割当てTDMA衛星通信システムにおけるバースト長の選定", 昭60信学総全大, 2474 (1985-03).
- (27) CCITT(ITU-T)勧告: "Signalling Performance in the Telephone Application," Rec. Q.725, ITU, Geneva (1985).
- (28) 武内, 野原, 高畑: "デマンド割当て/国際ビジネス衛星通信用制御回線のフレーム構成について", 昭61信学総全大, 2454 (1986-03).
- (29) Watanabe Y. and Ikeda Y.: "Traffic Characteristics of PCR Method for CCITT Signalling System No. 7," 10th ITC (June 1983).
- (30) Nohara M., Takeuchi Y. and Takahata F. : An Uplink-Power Control for Demand Assignment International Business Satellite Communications Network, n4-2, 16th ISTS (May 1988).
- (31) Nohara M., Takeuchi Y., Takahata F., Hirata Y. and Yamazaki Y. : Development of a Demand Assignment/TDMA System for International Business Satellite Communications, 10.4, GLOBECOM '87 (Nov. 1987).
- (32) Murakami K., Miyake M., Fuji T., Moritani Y., Fujino, T Ito, H. and Takahata F. : FEC Combined Burst-Modem for Business Satellite Communications Use, 8.2, GLOBECOM '87 (Nov. 1987).
- (33) Nohara M., Takeuchi Y., Takahata F. and Hirata Y. : A Demand Assignment/TDMA Communications : Implementation and Performance, 359-365, 8th ICDSC (Apr. 1989).
- (34) 遠藤, 平田, 稲垣, 高畑: "国際ビジネス衛星通信用実験地球局の開発", 信学技報, SAT86-9 (1986-07).
- (35) 武内, 高畑: "デジタル衛星回線における不稼働率の推定法", 信学論, Vol. J71-B, No. 5, pp. 640-649 (1988-05).

第3章

- (36) 野田, 石井, 畑山, 石川, 山本佳代子: "FAX秘匿装置の製品紹介", MSS技報, 三菱スペースソフトウェア, Vol. 7, pp. 33-37 (1993-10).
- (37) Hashimoto K. and Nishikida G.: "JCSAT Satellite and Receivers for CS Broadcasting Ser-

vices," MWE '93 Microwave Workshop Digest, pp. 291-295 (Sept. 1993).

- (38) 藤本, 長石, 餅田, 西村, 油井, 橋間: "衛星通信 Mデータ多重システム", National Technical Report, Vol. 39, No. 3, pp. 316-323 (1993-06).
- (39) 富田, 石田, 高橋, 原田, 馬場: "マルチメディア衛星通信へのアプローチ", 1995信学総合大会, SB-3-4 (1995-03).
- (40) KDD編: "国際公衆データ伝送サービスのインタフェース (BSC及びHDLC一般端末編)", 日本データ通信協会, 東京, pp. 77-148 (1986-10).

第4章

- (41) Leopold R. K.: "Low-earth orbit global cellular communications network," Mobile Satellite Communication System Conference, Adelaide, Australia (Aug. 1990).
- (42) Wiedeman R. A., Salmasi A. B. and Rouffet D.: "Globalstar: mobile communications where ever you are," Collection of Tech. Papers, AIAA 14th Int. Com. Sat. Sys. Conf., pp. 772-786 (Mar. 1992).
- (43) Summers R. A. and Lepkowski R. J.: "ARIES: global communication through a constellation of low earth orbit," Collection of Tech. Papers, AIAA 14th Int. Com. Sat. Sys. Conf., pp. 628-638 (Mar. 1992).
- (44) Castiel D.: "The Ellipso system: elloptical low orbits for mobile communications and other optimum system elements," Collection of Tech. Papers, AIAA 14th Int. Com. Sat. Sys. Conf., pp. 642-649 (Mar. 1992).
- (45) Kaniyil J., Takei J., Shimamoto S., Onozato Y., Usui T., Oka I. and Kawabata T.: "Preliminary aspects of a global message network employing low earth-orbiting satellites," Collection of Tech. Papers, AIAA 14th Int. Com. Sat. Sys. Conf., pp. 876-884 (Mar. 1992).
- (46) Hashimoto Y., Suzuki R., Miura R. and Kondo K.: "A study on a simple communication network by microsats," Collection of Tech. Papers, AIAA 14th Int. Com. Sat. Sys. Conf., pp. 896-902 (Mar. 1992).
- (47) 横川, 原, 片山, 森永: "低軌道集回衛星を用いた通信システムの周波数利用効率", 信学技報, SAT92-25 (1992-06).
- (48) 片山, 森永: "非静止衛星を用いた通信システムの可能性に関する一考察", 1990信学秋季全大, SB-2-2 (1990-09).
- (49) 長谷川, 小川: "周回衛星システムにおける衛星間中継に関する一検討", 1990信学秋季全大, SB-3-8 (1990-09).
- (50) 寺田: "B-ISDNの展望", NTT R&D, Vol. 40, No. 1, pp. 1-8 (1991-01).
- (51) 梅比良, 是永, 皆本, 中島, 中島: "ISDN中継系・加入者系統合衛星通信方式-DYANET II-", 信学技報, SAT92-23 (1992-06).
- (52) 太田, 岡田, 下川: "ATMセルの衛星TDMA回線収容方式の検討", 信学技報, SAT91-85 (1991-10).
- (53) 藤瀬, 上原, 野原, 中條: "低高度集回衛星間光通信を用いた広帯域移動体通信システ

- ムの検討", 信学技報, OCS91-57 (1991-11).
- (54) 唐沢, 安永, 山田: "衛星通信における降雨減衰推定法の提案", 信学技報, AP86-47 (1986-07).
 - (55) Morgan W. L. and Gordon G. D: "Communications Satellite Handbook," p. 783, John Wiley and Sons, New York (1989).
 - (56) 有本: "衛星間光通信における軌道パラメータ評価", 信学技報, SANE91-36(1991-10).
 - (57) Araki K., Inagaki K. and Yasukawa K.: "Design of compact transceiver optical systems for optical intersatellite links," Proc. SPIE, Vol. 1218, pp. 169-177 (Jan. 1990).
 - (58) ITU-T勧告: "Synchronous digital hierarchy bit rates," Rec. G. 707, ITU, Geneva (1992).
 - (59) 大越, 菊地: "光コヒーレント通信", pp. 23-28, オーム社, 東京 (1989-06).
 - (60) 野原, 稲垣, 石灰, 佐藤: "光ISL用LD送信機の開発" 1992信学秋季大会, B-685 (1992-09).

第5章

- (61) 野原, 稲垣: "光宇宙通信に関する国際会議報告 - IWOSC '90およびOE/LASE '91 -", 信学技報, SANE91-6 (1991-04).
- (62) 野原, 荒木, 稲垣, 藤瀬, 古濱, 鹿谷: "内外における最近の光ISL研究開発動向", 信学技報, SANE90-11 (1990-05).
- (63) Leopold R. L.: "Low-earth orbit global cellular communications network", Mobile Satellite Communication System Conference (Aug. 1990).
- (64) 寺田: "B-ISDNの展望", NTT R&D, Vol. 40, No. 1, pp. 182 - 199 (1991-01).
- (65) Fujise M., Nohara M., Arimoto Y. and Chujo W.: "A study of a broadband mobile satellite communications system by LEO-SAT and optical ISL," 18th International Symposium on Space Technology and Science (18th ISTS), m-6-2 (May 1992).
- (66) Fujise M., Nohara M., Uehara K. and Chujo W.: "Broadband mobile satellite communication system by LEO-SATs and optical ISLs," GLOBECOM '92, pp. 437-442 (Dec. 1992).
- (67) Hayden W. L., Fitzmaurice M. W., Nace D. A., Lokerson D. C., Minott P. O. and Chapman W. W.: "NASA's flight-technology development program: a 650 Mbps laser communications testbed," Free-Space Laser Communication Technologies III, Proc. SPIE Vol. 1417, pp. 182 - 199 (Jan. 1991).
- (68) Yasukawa K., Goto K., Kashiki K., Araki K., Nagai M. and Shimizu M.: "Configuration and Performance of Optical Modulator/Demodulator for Optical Intersatellite Communications," Free-Space Laser Communication Technologies II, Proc. SPIE Vol. 1218, pp. 348 - 354 (Jan. 1990).
- (69) Katzman M., editor: "Laser Satellite Communications," p. 182, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1987).
- (70) Hildebrand U., Hildebrand K., Ohm G., Voit E. and Wiesmann Th.: "A high performance laser diode transmitter for optical free space communication," Free-Space Laser Communi-

- cation Technologies II, Proc. SPIE Vol. 1218, pp. 216 - 227 (Jan. 1990).
- (71) McDonough D. F., Taylor J. A., Pillsbury A. D., Verly D. P., Kintzer E. S. and Garcia J. G.: "A space-qualified transmitter system for heterodyne optical communications," The Lincoln Laboratory Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 245 - 272 (1990).
 - (72) Araki K., Inagaki K. and Yasukawa K.: "Design of compact transceiver optical system for optical intersatellite links," Free-Space Laser Communication Technologies II, Proc. SPIE Vol. 1218, pp. 169 - 177 (Jan. 1990).
 - (73) "1992 Product Catalog", pp. 30 - 34, Spectra Diode Laboratories, San Jose, CA (1992).
 - (74) ニューガラスハンドブック編集委員会編: "ニューガラスハンドブック", p. 109, 丸善, 東京 (1991-06).
 - (75) 石灰: "非球面レンズと型技術の今後の動向", O plus E, No. 108, pp. 113 - 118 (1988-11).
 - (76) "富士通半導体デバイスデータシート: 光半導体関連GaAs-ICレーザドライバFMM311CG", DS02-31102-1, 富士通, 東京 (1989-11).
 - (77) MacGregor A., Dion B., Naeldeke C. and Duchmann O.: "39 photons/bit direct detection receiver at 810 nm, BER = 1×10^{-6} , 60 Mb/s QPPM," Proc. SPIE, Vol. 1417, pp. 374-380 (Jan. 1991).
 - (78) Hayden W. L., Fitzmaurice M. W., Nace D. A., Lockerson D. C., Minott P. O. and Chapman W. W.: "NASA's flight-technology development program: a 650 Mbps laser communications testbed," Proc. SPIE, Vol. 1417, pp. 182-199 (Jan. 1991).
 - (79) "1991三菱電機半導体デバイスデータブック", pp. 4.5-4.8, 三菱電機, 東京 (1991).
 - (80) 足立, 山下, 笠原, 本島, 石村, 宮下: "2回反射プリズム結合器を用いた薄型・高速光受信モジュール", 1992信学春大, C-265 (1992-03).
 - (81) Miyazaki T., Inagaki K. and Fujise M.: "Multigigabit optical transmission experiment through a free-space simulator," Proc. SPIE, Vol. 2123, pp. 56-65 (Jan. 1994).

発表論文

1. 論文 (学位論文関係)

- (1) 野原光夫、武内良男、山崎智弘、高畑文雄、平田康夫: "デマンド割当て/国際ビジネス衛星通信システムの設計", 電子通信学会論文誌, Vol. J69-B, No. 11, pp. 1219 - 1230 (1986).
- (2) 野原光夫、武内良男、高畑文雄、平田康夫、山崎吉晴: "Development of a demand assignment/TDMA system for international business satellite communications," Conference Record of IEEE GLOBECOM '87, pp. 365 - 372, Tokyo (1987).
- (3) 野原光夫、有本好徳、中條渉、藤瀬雅行: "A Link Study of a Low-earth Orbit Satellite Communications System Using Optical Intersatellite Links," IEICE Trans. Commun., Vol. E76-B, No. 5, pp. 536 - 543 (1993).
- (4) 野原光夫、稲垣恵三、藤瀬雅行: "光衛星間通信用LD送信機の設計と特性", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-B-II, No. 5, pp. 399 - 406 (1993).
- (5) 野原光夫、稲垣恵三、小柳秀昭、石灰勲夫: "Aspheric Lens Laser Diode Collimator Design for Optical Intersatellite Communications," (Short Note) Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 33, Part 1, No. 3A, pp. 1363-1364 (1994).
- (6) 野原光夫、佐藤軍吉: "衛星同報システムにおける階層化分散制御網の設計", レター, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J78-B-II, No. 4, pp. 257-261 (1995).

2. 論文 (その他)

- (1) 野原光夫、武内良男: "A network architecture for a demand assignment IBS system for a spot beam environment," IEEE Denshi-Tokyo, IEEE Tokyo Section, No. 28, pp. 62 - 65 (1989).
- (2) 野原光夫、武内良男: "IBS実験用デマンド割当て/TDMA通信システムの開発", 国際通信の研究, KDD, No. 143, pp. 35 - 45 (1990).
- (3) 千葉健一郎、高畑文雄、野原光夫: "Theory and performance of frequency assignment schemes for carriers with different bandwidths under demand assignment SCPC/FDMA operation, IEICE Trans. Commun. Vol. E75-B, No. 6, pp. 476 - 486 (1992).
- (4) 野原光夫、佐藤軍吉、井上隆、原重弘: "受信確認機能付き衛星FAX同報システムの開発", 国際通信の研究, KDD, No. 154, pp. 15 - 22, (1995).

3. 講演 (学位論文関係)

3.1 国際学会

- (1) 野原光夫、武内良男、高畑文雄、平田康夫: "A demand assignment control in international business satellite communications network," 7th International Conference on Digital Satellite Communications (ICDSC-7), pp. 215 - 222, Munich (1986).
- (2) 野原光夫、武内良男、高畑文雄: "An up-link power control for demand assignment international business satellite communications network," 16th International Symposium on Space Technologies and Science (16th ISTS), n4-2, Sapporo (1988).
- (3) 野原光夫、武内良男、高畑文雄、平田康夫: "A demand assignment/TDMA communications system for international business satellite communications: implementation and performance," 8th ICDSC, pp. 395 - 365, Guadeloupe, Antilles Francaises (1989).
- (4) 野原光夫、稲垣恵三、小柳秀昭、石灰勲夫: "An aspheric lens LD collimator for an optical intersatellite link," Optical Fabrication '92, Proc. SPIE 1720, 1720-82 (1992).

- (5) 野原光夫、井上隆、佐藤軍吉、原重弘: "Satellite-Based Data Distribution System with Receipt Acknowledgment," 1995 Asia-Pacific Conference on Communications (APCC '95), pp. 593 - 597, Osaka (1995).
- (6) その他、IBSシステムに関連した論文 3 件、光衛星間通信に関連した論文 5 件.

3.2 研究会

- (1) 野原光夫、武内良男、高畑文雄、平田康夫、山崎吉晴: "IBS実験用デマンド割当て／TDMAシステムの開発 (1) - システム構成 -", 電子情報通信学会 (信学) 技術報告 (技報) SAT87-65 (1988).
- (2) 野原光夫、武内良男、高畑文雄、本田茂、上野栄子: "IBS実験用デマンド割当て／TDMAシステムの開発 (2) - デマンド割当て系 -", 信学技報SAT87-66 (1988).
- (3) 野原光夫、武内良男、森谷陽一、伊藤久明、藤野忠: "IBS実験用デマンド割当て／TDMAシステムの開発 (3) - TDMA伝送系 -", 信学技報SAT87-67 (1988).
- (4) 野原光夫、武内良男: "IBS実験用DA／TDMAシステムの通信特性 - 衛星実験結果 -", 信学技報SAT88-40 (1988).
- (5) 野原光夫、佐藤軍吉: "衛星同報システムにおける階層化分散制御", 信学技報SAT94-34 (1994).
- (6) その他、IBSシステムに関連した論文 5 件、光衛星間通信に関連した論文 5 件.

3.3 全国大会等

- (1) 野原光夫、安永正幸、高畑文雄: "デマンドアサイメント衛星通信システムにおける即時式回線割当て方式の比較", 昭和59年度信学通信部門全国大会(全大), 686 (1984).
- (2) 野原光夫、高畑文雄: "異なるFEC符号化率の混在するデマンド割当てTDMA衛星通信システムにおけるバースト長の選定", 昭和60年度信学総合全国大会(総全大), 2474 (1985).
- (3) 野原光夫、高畑文雄: "異なるFEC符号化率の混在する衛星通信システムにおける回線割当て方式", 昭和60年度信学総全大, 2475 (1985).
- (4) 野原光夫、高畑文雄、平田康夫: "国際ビジネス衛星通信(IBS)システムの網構成について", 昭和61年度信学総全大, 2452 (1986).
- (5) 野原光夫、高畑文雄、本田茂: "デマンド割当て／国際ビジネス衛星通信用回線制御プロトコルについて", 昭和61年度信学総全大, 2453 (1986).
- (6) 野原光夫、高畑文雄: "デマンド割当て衛星通信システム用TDMA回線割当て方式", 昭和61年度信学通信、光・電波部門全大, 492 (1986).
- (7) 野原光夫、武内良男、高畑文雄、平田康夫、山崎吉晴: "国際ビジネス衛星通信用デマンド割当て／TDMA通信システムの開発", 昭和62年度信学情報・通信システム部門全大, 361 (1987).
- (8) 野原光夫、武内良男、高畑文雄: "IBS実験用デマンド割当て／TDMA通信システムにおける呼接続遅延特性", 昭和63年度信学春季全大, B-242 (1988).
- (9) 野原光夫、武内良男: "IBS実験用DA/TDMAシステムの衛星実験結果", 1989年信学春季全大, SB-3-5 (1989).
- (10) 野原光夫、稲垣恵三、小柳秀昭、石灰勲夫: "光ISL用高精度LDコリメータの設計", 1992信学春季大会(春大), C-255 (1992).
- (11) 野原光夫、稲垣恵三、石灰勲夫、佐藤安史: "光ISL用LD送信機の開発", 1992信学秋季大会(秋大), B-685 (1992).
- (12) 野原光夫、宮崎哲弥、藤瀬雅行、北島忠善: "光ISL用2.5Gbit/s Si-APDレシーバの試作評価", 1993信学秋大, B-890 (1993).
- (13) 野原光夫、井上隆、佐藤軍吉、原重弘: "受信確認機能付き衛星FAX同報システム", 1994信学秋大, B-203 (1994).

4. 講演 (その他)

4.1 国際学会

- (1) 野原光夫、原田卓、藤瀬雅行: "An optical ISL transmitter design which uses a high power LD amplifier," Free-space Laser Comm. Tech. III, Proc. SPIE 1417, pp. 338-345 (1991).
- (2) 野原光夫、藤瀬雅行: "A high-power optical intersatellite link transmitter using a broad-area semiconductor amplifier," Optical Amplifiers and their Applications 3rd Topical Meeting (OAA '92), FA5 (1992).
- (3) 野原光夫、有本好徳、藤瀬雅行: "A coherent transceiver design for optical intersatellite link communications," 4th Optoelectronics Conference (OEC '92), 16D2-8 (1992).
- (4) 井上隆、野原光夫、佐藤軍吉: "A Study of International Digital SNG Transmission System," 19th ISTS, i-02, Yokohama (1994).
- (5) 井上隆、野原光夫、佐藤軍吉: "An International Digital SNG Transmission System with Variable Information/FEC Coding Rates Control," IEEE GLOBECOM '94, pp. 93-99, San Francisco (1994).
- (6) その他、IBSシステムに関連した論文 3 件、光衛星間通信に関連した論文 5 件.

4.2 研究会

- (1) 野原光夫、高畑文雄: "デマンド割当て/FDMA運用にもとづく国際ビジネス衛星通信システムにおけるキャリア割当て方式に関する検討", 信学技報CS85-88 (1985).
- (2) 野原光夫、飯作俊一、水野俊夫、伊藤泰彦: "国際VSAT網における高度サービスの提供", 信学技報SAT89-12 (1989).
- (3) 野原光夫、荒木賢一、稲垣恵三、藤瀬雅行、古濱洋治、鹿谷元一: "内外における最近の光ISL研究開発動向", 信学技報SANE90-11 (1990).
- (4) 野原光夫、稲垣恵三: "光宇宙通信に関する国際会議報告 - IWOSC '90 および OE/LASE '91 -", 信学技報SANE91-6 (1991).
- (5) 野原光夫、稲垣恵三、下津臣一: "アレイ状導波路を用いた光ビーム追尾センサ", 信学技報OQE92-85 (1992).
- (6) その他、IBSシステムに関連した論文 3 件、光衛星間通信に関連した論文 2 件、その他 4 件.

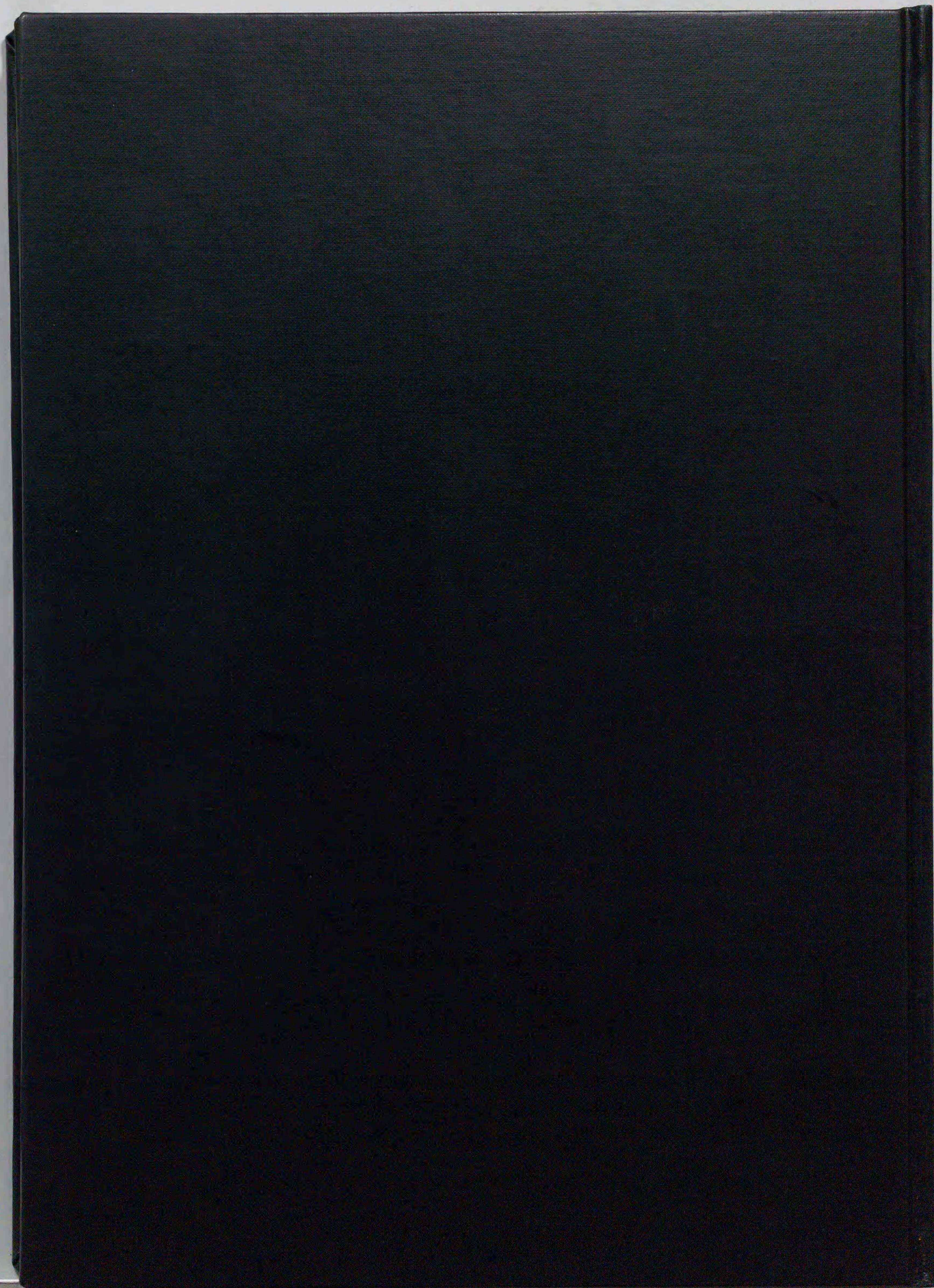
4.3 全国大会等

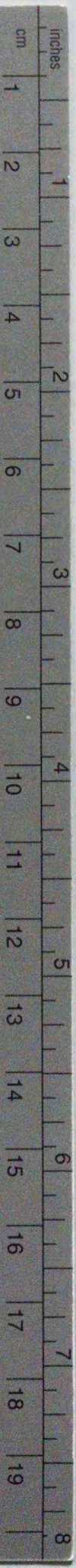
- (1) 野原光夫、井上隆、佐藤軍吉: "国際衛星TV伝送システムに関する一検討", 1993信学秋大, B-192 (1993).
- (2) 野原光夫、篠澤政宏、佐藤軍吉: "光位相誤差の光制御アレーアンテナ指向特性への影響", 1994信学秋大, B-46 (1994).
- (3) 野原光夫、山崎克之、大黒雅史、山口治志: "45 Mbit/s衛星ATM伝送装置(ATM-Star)の開発", 1995信学春季総合大会, B-254 (1995).
- (4) その他、IBSシステムに関連した論文 7 件、光衛星間通信に関連した論文 14 件、その他 6 件.

5. 特許

本論文に関係した特許 3 件

以 上

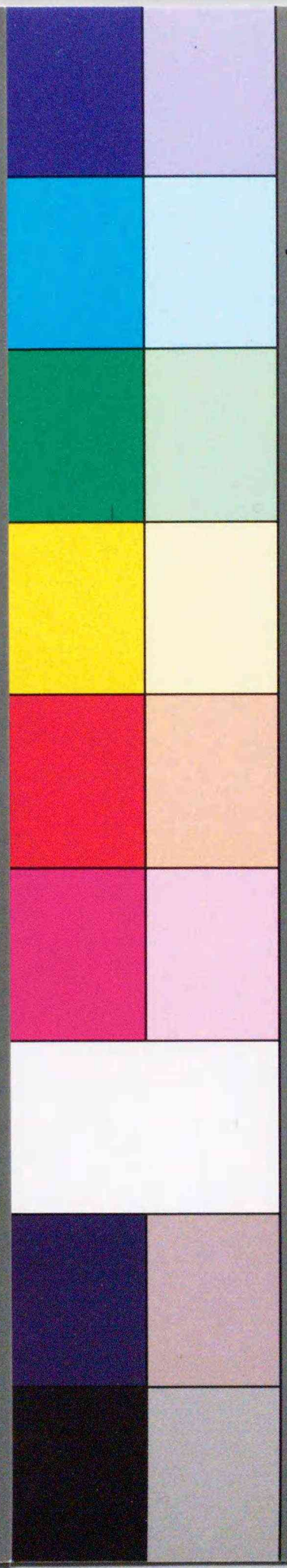




Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

