

平成16年度
研究開発成果報告書

新世代光無線アクセスシステム技術
の研究開発

委託先：日本ビクター(株)

平成17年5月

情報通信研究機構

平成16年度 研究開発成果報告書

「新世代光無線アクセスシステム技術の研究開発」

目次

1	研究開発課題の背景	
1-1	研究開発課題の背景	2
1-2	研究開発分野の現状	3
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	4
2-2-1	最終目標	4
2-2-2	中間目標	7
2-3	研究開発の年度別計画	9
3	研究開発体制	10
3-1	研究開発実施体制	10
4	研究開発実施状況	
4-1	光無線伝送方式、光無線システムの基礎研究	12
4-1-1	光無線システムの基礎研究	12
4-1-2	Radio over Infrared Wireless システムの基礎研究	21
4-2	超高速シームレス・バリアフリー・アクセスシステムの研究開発	34
4-2-1	シームレス・バリアフリー無線通信プロトコルの研究開発	34
4-2-2	シームレス無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発	40
4-3	超小型光無線伝送方式の研究開発	46
4-3-1	超小型光無線伝送制御方式の研究開発	46
4-3-2	超小型光無線モジュールの研究開発	59
4-4	総括	64
5	参考資料・参考文献	
5-1	研究発表・講演等一覧	66

1 研究開発課題の背景

1-1 研究開発課題の背景

近年、動画を含め、双方向で多量のデジタル情報を伝達する手段への要求が高まっており、オフィスのみならず、日本中のほとんどの家庭が超高速のインターネット網で常時接続されている環境が実現すると言われている。また、日本が研究開発に力を入れている IPv6 技術により、パソコンだけではなく、多くの家電製品も情報家電として、ネットワークで繋がれるようになる。このような環境の変化は、家庭のみにとどまらず、人々が携帯端末を使って、あらゆる場所で意識せずにネットワークに接続できることが常識になり、ネットワークが、電気やガス、水道や電話などと同様に、社会のすみずみに行き渡った、生活に不可欠な「身近な生活インフラ」となる時代が到来すると予想される。

日本政府も、「高度情報通信ネットワーク社会形成基本法」を成立させ、この法律に沿って打ち出された「e-Japan 戦略」により、「日本を 5 年以内に世界最先端の IT 国家にする」目標を打ち出し、このような社会の実現に向かって、強力に動き始めている。

こうした社会の到来のためには、多岐にわたる技術革新が必要である。特に、人々があらゆる場所で、意識せずにネットワークに接続するには、携帯機器をワイヤレスで高速にネットワークと結ぶことが出来る技術の確立が必須である。

そのような技術の一つに、電波を利用した無線伝送技術がある。2.4GHz 帯を使った、伝送速度 1[Mbps]で到達距離も 10[m]と近距離ではあるが、手軽に機器をワイヤレスでつなげる方式として Bluetooth といった新しい規格も提案され、注目を集めている。高速化への研究も活発で、5.2GHz 帯を使って伝送速度が 54[Mbps]の伝送が報告されている。

しかしながら、ネットワークに繋がった機器を使うことが常識になる社会では、多数の人々が、同時に、同じ場所で、ワイヤレス機器を使用する可能性が高くなると考えられる。特に、高速なデータ伝送が必要な用途では、同時使用での電波の混信による伝送速度の低下は、致命的な問題になる可能性がある。そのことを予想させる実験も、既に行われている。

このような事態を避ける目的で、新しい電波帯域であるミリ波帯の無線通信の研究開発も行われている。特に 60GHz 帯を用いたシステムについては、家庭内の超高速無線 LAN への適用を目指して、国内で盛んな研究が行われている。同システムでは 1GHz 以上の伝送帯域確保も可能である。しかしながら、ミリ波を用いた送受信装置は小型化に限度があり、携帯機器に搭載可能な大きさに納めることは困難である。

このような状況を打破する可能性のある技術として、光を利用した無線伝送技術がある。光は、本来の特性として超高速の伝送能力があり、光ファイバを使った有線伝送の分野ではその優位性が広く認められている。また、光は空間的に分離が容易であることから、その特長を使って、多数の機器間通信を混信無く行うことができる。さらに、波長が電波と比べて格段に短いといった物理的性質から、ミリ波を利用した高

速無線技術では不可能な超小型システムが可能であるといった優れた性質がある。また、光が壁で遮断されるといった欠点が、セキュリティの観点では、室外での盗聴を不可能にするといった利点をもたらす。最近のサイバーテロ等の社会情勢を考えると、セキュリティの要求はさらに高まっていくと予想される。特に、光を拡散させずビームで通信させる場合には、光のビームが相手にしか到達しない状況が実現されるため、自由空間に設置した仮想の光ファイバを通じての通信と同じことになり、室内における盗聴の可能性をも排除でき、有線並のセキュリティが容易に得られる。

光を使ったシステムが、なぜ一部を除いて使われていないのかを考察する。現在の光を利用した無線伝送システムは、大きさやコスト、それらを満たす条件での高速性、いつでもどこでも意識せずに接続できるアクセス技術など、いくつかの技術課題をクリア出来ていないことが理由と考えられる。

そこで、本委託研究では、まず、光を使った伝送システムの理想的な方式を理論的に検討する。また、携帯機器に搭載可能な大きさで、しかも 1Gbps 級の超高速で低価格な光無線通信手段を検討し、さらにネットワークにシームレスに接続するアクセスシステムを開発する。このようにして、課題を解決する技術を開発することにより、光を使った無線伝送システムが、ネットワークがすみずみまで行き渡った社会において、超高速な無線伝送を担うことの出来る必須のシステムであることを実証する。

1-2 研究開発分野の現状

現在実用化されているワイヤレス通信手段の中で、モバイル機器に搭載した形態で用いられる方式としては、近接伝送用途の IrDA（光方式）を除けば、携帯電話の各方式あるいは Bluetooth 規格など電波を使った無線伝送システムが挙げられる。また、無線 LAN においては IEEE802.11b による通信速度 11[Mbps]のシステムが実用化され、ノートパソコン等で使われている。また、IEEE802.11a の規格で 54[Mbps]のシステムの商品化についてアナウンスがなされている。更なる高速化についても研究が進んでいるが、100Mbps 級のシステムについては、第 4 世代の携帯として研究開発が始まった段階であり、1Gbps 級の超高速通信については、提案もされていない。

一方、1Gbps 級の空間伝送が達成されているシステムとしては 60GHz 帯等のミリ波を用いたシステム、レーザビームを用いたシステム等がある。両者共にビル間の中距離伝送システムとして実用化されている。

しかしながら、いずれも大がかりなシステムであり本委託研究で実現を目指すモバイル機器に搭載出来るシステムを実現するものではない。また、この通信手段を利用した、光と電波を切り替える、あるいは電波を光に乗せ送るシームレス・バリアフリーシステムの研究も国内外で研究例は無い。

最近になって、我々の目標と同じではないが、光の高速性に着目した研究開発として、新しい構造の CMOS センサを使った室内での高速通信システムの提案もなされており、昨今電波に対する光の有用性が認識し始められており、今後この方面の研究開発が活発になっていくと思われる。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

高速ブロードバンドが普及し、家電や携帯機器を含めほとんど全ての電気機器がIPv6を備える、すなわち全ての機器がネットワークに繋がれ、大容量のデータがやりとりされる時代が迫る中、ネットワークへの簡易な接続手段としてワイヤレス伝送へ期待が寄せられている。光無線は、1Gbps級の伝送も可能等、次世代の方式として望ましい特性を有するが、現状は、大きさ、コスト、アクセス性など、いくつかの解決すべき課題がある。

本委託研究では、これらの課題を解決する技術を開発することにより、新世代に求められる高速で高信頼性を有するワイヤレス方式の確立を目指す。光無線の最大の利点としては、超高速性が挙げられるが、欠点としては遮蔽問題が有る。特に高速伝送を行う場合には伝送効率を上げる必要性からビーム伝送を採用する必要性が有り、遮蔽の問題が深刻となる。また、従来の光無線システムは、大きさ、コストの面で携帯機器等に内蔵できるレベルになく、小型でローコストに実現できる光無線方式が求められる。これら課題を解決することを目的とし、高速で高信頼性を有する光無線によるワイヤレス方式の開発を行う。そのために、以下のサブテーマの研究開発を実施する。

- 1) 光無線伝送方式、光無線システムの基礎研究
- 2) 超高速シームレス・バリアフリー・アクセスシステムの研究開発
- 3) 超小型光無線伝送方式の研究開発

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成17年3月末）

光を使った無線伝送方式が、理論解析に基づいたシステムの最適化と、携帯機器に搭載可能な大きさで、1Gbps級の超高速が可能な光無線モジュールの試作開発と、シームレス・バリアフリーを可能にするアクセスプロトコルの開発により、いつでもどこでもだれもが超高速にネットワーク接続できる技術であることを、システムの実現性の可能性を示すことにより証明することを目標とする。

以下、各サブテーマの目標について具体的に示す。

サブテーマ1：光無線伝送方式、光無線システムの基礎研究

- (1) 伝送方式の研究（光直射方式、光拡散方式、電波方式、各ハイブリッド方式）

1) 光直射方式の伝送技術

ここでは、電波と異なり空間的な広がり少なく直進性に優れた光搬送波の特徴に着目し、光直射方式において空間的に分離され互いに干渉しない複数の伝搬路を同時に確保する技術について開発する。この技術開発により、一つの伝送空間内において

400[Mbps]から 1[Gbps]の（この数値は空間的に分離された伝搬路数に依存する）大容量伝送の実現を目標とする。また、直射方式で問題となる遮蔽の影響を軽減する技術についても開発し、より信頼性の高い伝送システムの実現をめざす。

2) 光拡散方式の伝送技術

ここでは、背景光雑音の抑圧技術、マルチパス伝搬に伴う遅延波抑圧技術、多元接続方式を導入にした同一チャネル干渉の抑圧技術を導入し、一つの送受信器対において 50[Mbps]程度の伝送容量を実現する技術を開発する。

また、光直射方式と光拡散方式を融合したシステムとして、具体的には、送受信器間に見通し内伝搬路が確保できる場合は光直射方式により一送受信器対にて 100[Mbps]を超える伝送を、また、見通し内伝搬路が確保できない場合は光拡散方式により一伝送空間内において 50[Mbps]を超える伝送を可能とする。

3) 光・電波ハイブリッド方式の伝送技術

光および電波の搬送波としての伝搬性質の特徴を見極め、それぞれの長短所を相互に補完する光・電波ハイブリッドシステムを構築する。具体的には、光・電波ハイブリッドシステムでは、複数の光無線基地局を設置し、基地局と端末間に見通し内伝搬路を確保できる場合には、基地局と端末間のリンクは光搬送波を用いる光直射方式により接続し、100[Mbps]（一基地局あたり最大 400[Mbps]程度）の伝送容量を確保する。

また、基地局と端末間に遮蔽物が存在し見通し内伝搬路を確保できない場合は、基地局と端末間のリンクは 5GHz 帯などの電波を利用して接続し、最大 50[Mbps]程度の伝送速度を達成する。光・電波ハイブリッドシステムは、光搬送波のみを用いるシステムに対しては、遮蔽対策および複数の部屋から構成される屋内での無線伝送を実現するシステムとして、また、電波のみを用いるシステムに対しては、基地局と端末間が見通し内に位置する場合に光直射方式を用いることで伝送容量を向上させる高密度システムとして捕らえることができ、リンク数や端末数にも依存するが理想的には 1[Gbps]を超える伝送容量が可能となる。

(2) Radio over Infrared Wireless

1) Radio over Infrared Wireless の仮想無線自由空間化技術

光ファイバと光空間伝送路がカスケード接続された光ファイバ光無線系において様々な周波数帯の無線信号についてその光伝送方式を開発する。

カバーする無線周波数帯は、VHF 帯からミリ波帯であり、また無線信号の変調速度は、最大 150[Mbps]とする。

2) 光ファイバ光無線系における無線信号多重化方式ならびにルーティング技術

複数の無線信号を光搬送波上に多重し、光ファイバ光無線系を通して伝送する方式を開発する。5 個の無線信号を光多重化し、デジタル情報に対して復調後 BER を 10^{-6}

以下とする。

また、光搬送波上に多重された無線信号のそれぞれを所望の光無線端末にルーティングする方式を開発する。

3) 非線形抑圧技術

光コヒーレント伝送技術を含む光伝送系の非線形性に起因した相互変調歪の抑圧技術を開発する。SFDR (Spurious Free Dynamic Range) 30[dB]以上を達成する。

サブテーマ2：超高速シームレス・バリアフリー・アクセスシステムの研究開発

超高速シームレス・バリアフリー・アクセスシステムの実現を目指し、シームレス・バリアフリー無線通信プロトコルの研究開発に関しては、IPv4 と IPv6 が混在するコンピュータネットワークにおいて、携帯電話の通信ネットワーク同様、光無線基地局のハンドオーバーが発生してもサービスを提供し続けることのできるシームレスなコンピュータネットワークの実現を目指す。具体的には、IPv4 と IPv6 が混在するコンピュータネットワークにおける光無線と電波無線の切り替え動作確認のシミュレーション実験と動作確認の実証実験を行う。

シームレス・バリアフリー無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発に関しては、上記 IPv4 と IPv6 が混在するコンピュータネットワークにおける光無線と電波無線の切り替え動作確認のシミュレーション実験システムを利用して、シームレス・バリアフリーアプリケーションの基礎シミュレーション実験を行う。また、上記 IPv4 と IPv6 が混在するコンピュータネットワークにおける光無線と電波無線の切り替え動作確認の実証実験システムを利用して、光無線利用時は高画質の画像伝送（高ビットレート）、また電波無線利用時は低画質の画像伝送（低ビットレート）に切り替えるアプリケーションの実証実験を行う。

サブテーマ3：超小型光無線伝送方式の研究開発

携帯機器に搭載可能な大きさの超高速伝送方式を確立することを目標とする。そのため、通信速度 1[Gbps]以上で、大きさ 1[cm³]程度の光無線モジュールを開発する。また、この光無線モジュールを使い、10[m]程度の距離で自動的に中継器をサーチしての通信を始めるシステムが構築可能であることを実証する。

2-2-2 中間目標（平成16年2月末）

中間目標は、最終目標に至る途中経過であると考えており、その具体的目標については、サブテーマ毎に述べる。

サブテーマ1：光無線伝送方式、光無線システムの基礎研究

（1）伝送方式の研究（光直射方式、光拡散方式、電波方式、各ハイブリッド方式）

1) 光直射方式の伝送技術

光直射方式において空間的に分離され互いに干渉しない複数の伝搬路を同時に確保するためのシステム構成を具体化すると共に、所要送信光電力・ビット誤り率・遮蔽による瞬断率などの特性評価技術を確立する。また、伝送容量の改善および遮蔽対策を目的として、複数の基地局を設置するマルチサテライト構成を考え、それによる諸特性の改善効果を評価する。

2) 光拡散方式の伝送技術

拡散方式の伝送速度の向上を目的として、伝搬損失の低減技術、背景光雑音の抑圧技術、マルチパス伝搬に伴う遅延波抑圧技術として、狭指向性光源および狭視野光検波器を用いた指向制御により遅延波抑圧対策を行う手法を提案する。また、それによる所要送信光電力・ビット誤り率などの諸特性の改善効果を評価する。

3) 光・電波ハイブリッド方式の伝送技術

光・電波ハイブリッド方式は室内ならびにシステム構成を具体化すると共に、その基礎検討として、光アクセス数（基地局数）と電波アクセスチャネル数との関係が基本特性に及ぼす影響を評価する。

（2）Radio over Infrared Wireless

1) Radio over Infrared Wireless の仮想無線自由空間化技術

光源の直接光強度変調を用いた2GHz帯までの無線信号がカスケード接続された光ファイバ光無線系を伝送される方式において無線信号品質について理論的に評価する。光源に求められる所要送信電力と所要変調帯域、受光系も含めた所要線形性について明らかにする。

2) 光ファイバ光無線カスケード系における無線信号多重化ならびにルーティング技術

複数の無線信号を光ファイバ光無線を通して多重伝送する方式を開発する。無線信号周波数に対する透明性を確保した光多重化方式とルーティング方式を提案する。

3) 非線形抑圧技術

非線形に起因した歪の抑圧技術として光スイッチを用いた自然帯域標本化時分割多重化技術と光コヒーレンス多重化技術を確立する。

サブテーマ2：超高速シームレスアクセスシステムの研究開発

IPv4 を使った既存のコンピュータネットワークにおいては、IP アドレス不足を回避するために NAT が使われている。本サブテーマの中間目標としては、IPv4 単独のコンピュータネットワークにおける光無線基地局のハンドオーバーが発生してもサービスを提供し続けることのできるシームレスなコンピュータネットワークのシミュレーションシステムを構築し、その実現性を評価する。また、IPv6 に関しても、単独でその可能性を評価する。

また、電波無線が制限されている場所では、強制的に光無線に切り替える技術については、実現手法を検討し、シミュレーションによるバリアフリー通信システムの実現性を評価する。

サブテーマ3：超小型光無線伝送方式の研究開発

最終目標の中間段階として、限られた方向内での自動サーチ機能をもった、光無線モジュールを試作し、その高速通信性能（1Gbps 級）を実現する。

2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

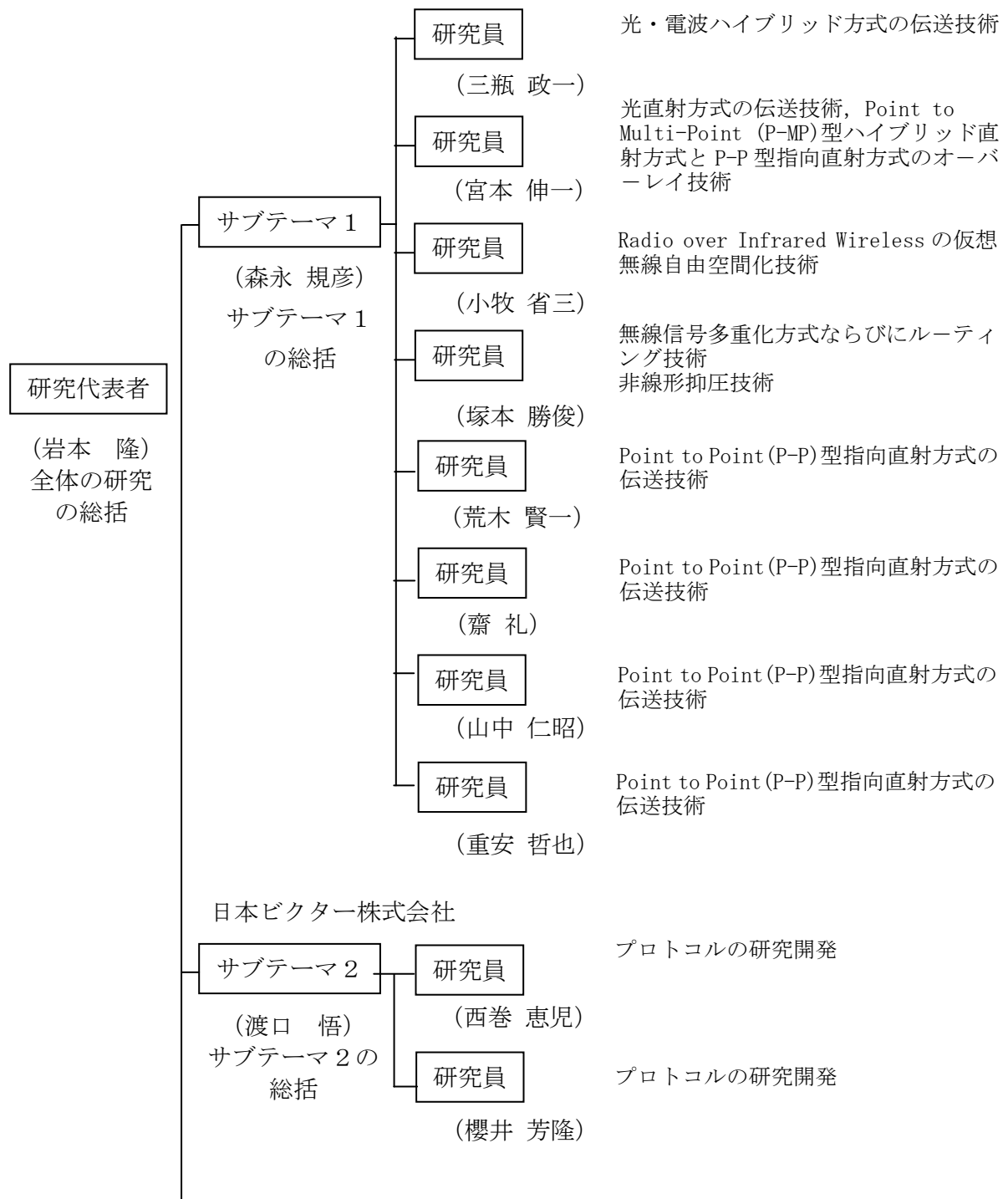
研究開発項目	H13 年度	H14 年度	H15 年度	H16 年度	計	備 考
サブテーマ 1 : 光無線伝送方式、光無線システムの 基礎研究 (再委託テーマ)	—	—	—	—	—	広島国際大学、森永研究室、大阪大学、小牧研究室、通信方式論領域に再委託する。
サブテーマ 2 : 超高速シームレス・バリアフリー・ アクセスシステムの研究開発	—	—	—	—	—	
サブテーマ 3 : 超小型光無線伝送方式の研究開発	—	—	—	—	—	
間接経費	—	—	—	—	—	H14 年以降は人件費上昇分を加味した。
合 計	—	—	—	—	—	

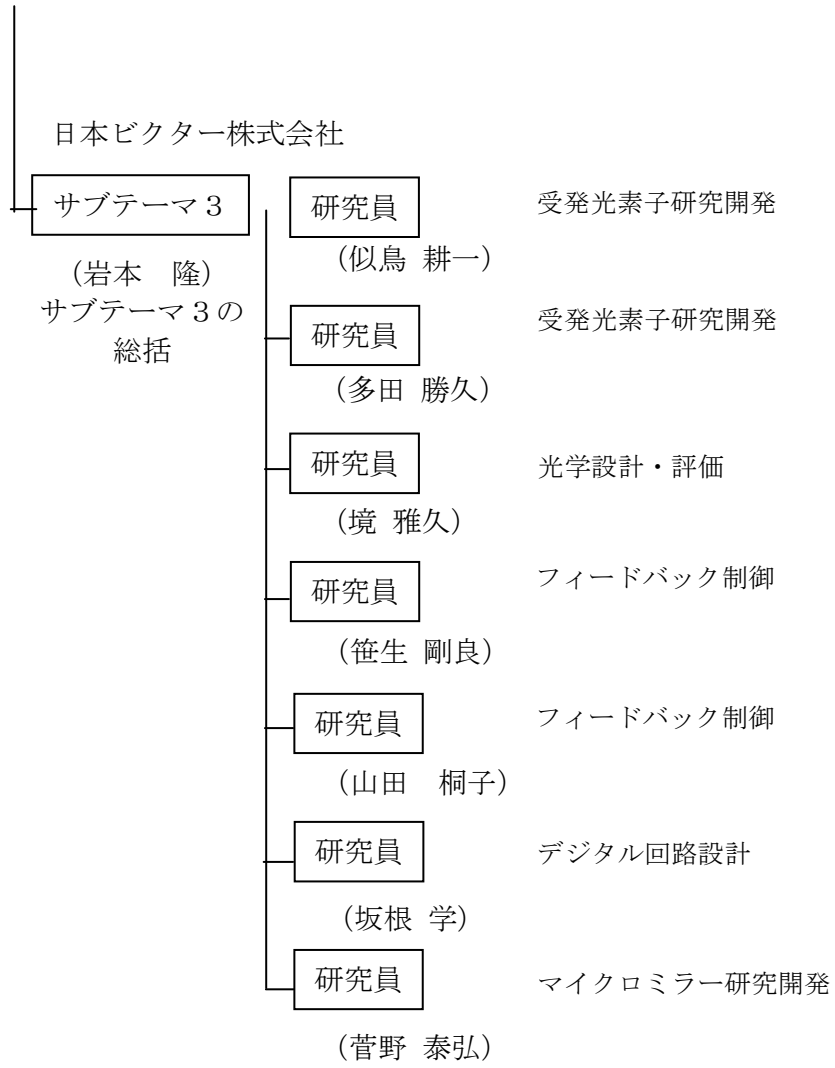
- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の 30%を上限として計上 (消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制

大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻
 広島国際大学社会環境科学部情報通信学科





4 研究開発実施状況

4-1 光無線伝送方式、光無線システムの基礎研究 【サブテーマ1】

4-1-1 光無線システムの基礎研究

4-1-1-1 序論

室内光無線伝送における伝送形態は、送受信器間での見通し内伝搬路の確保の有無によって、直射方式と拡散方式に大別できる。また、それぞれの方式において、送受信器の指向制御の有無により、指向方式、無指向方式、ハイブリッド方式に分類される。これらの形態の内、直射方式は送信器と受信器を対向させて伝送を行う方式で、伝送効率が高く、伝送帯域の確保が容易であるという特長を有する。特に、ビーム伝送の形態をとる指向直射方式では、最大限の伝送効率を得られ、1GHz を超える帯域確保が可能となる。しかしながら、指向直射方式では、送受信器間の見通し内伝搬路を常に確保する必要があるため、遮蔽に対する脆弱であるといった問題がある。また、指向直射方式では、光無線基地局が装備する送受信器を1つの端末が占有する（換言すれば1つの光無線伝搬路を1つの端末が占有する）ため、端末の増減に対して柔軟に対応できない。一方、拡散反射方式は光を広範囲に放射し、部屋の壁、天井等に散乱反射させて伝送する方式であり、送信器、受信器を対向させる必要性が無く、遮蔽耐性も高いという特長を有する。しかしながら、拡散反射方式は天井面や壁面等での反射光を利用するため、伝送効率、伝送帯域共に低下の傾向は免れない。

サブテーマ1(1)では、直射方式および拡散反射方式に関するこれらの問題への対策技術に関する研究開発を行った。サブテーマ1(1)において実施した研究開発課題を下記に示す。

- a) Point to Point(P-P)型指向直射方式の伝送技術
- b) Point to Multi-Point(P-MP)型ハイブリッド直射方式とP-P型指向直射方式のオーバーレイ技術
- c) 光拡散方式の伝送技術
- d) 光・電波ハイブリッド方式の伝送技術

以下では、上記 a)～d)の各研究開発課題について、研究開発実施状況ならびに研究開発によって得られた成果について示す。

4-1-1-2 光無線伝送方式、光無線システムの基礎研究の研究開発実施状況と成果

a) Point to Point(P-P)型指向直射方式の伝送技術

光無線基地局と端末との間をPoint to Point(P-P)型により伝送を行う指向直射方式を対象とした研究開発を行った。具体的には、電波と異なり空間的な広がり少なく直進性に優れた光搬送波の特徴に着目して、複数の光無線中継器を利用することにより、光直射方式において空間的に分離され互いに干渉しない複数の伝搬路を同時に確保する技術について開発を進めた。これにより、指向直射型室内光無線伝送において、遮蔽に対する耐性を高めると共に、互いに干渉しない光無線伝搬路を用いた伝送によ

り、室内において Gbps クラスの伝送容量を達成する室内無線伝送を構築することが可能となる。

ここでは、指向直射型室内光無線伝送システムにおいて1つの衛星と複数の光無線中継器を天井面に設置する光無線中継システムを提案した。なお、送受信器間での見通し内伝搬路を用いる指向直射方式での遮蔽対策としては、天井面に設置される複数の衛星を利用したサイトダイバーシチ方式や巡回発光セル方式なども提案されている。本研究開発で提案する光無線中継器を用いるシステムは、それらの方式と同様の改善を狙うものであるが、衛星と端末間リンク、中継器と端末間リンクと同様に衛星と中継器間リンクについても point to point (P-P) 型の光無線伝送を行うため、中継器の設置かつ移設が容易であるという特長を有する。

本研究開発で提案する光無線中継システムの構成ならびに室内に配置された遮蔽物の配置状況を図 4-1-1 に示す。図 4-1-1 に示すように、光無線中継システムでは、衛星を天井の中央に、また、4つの光無線中継器を部屋の各隅に設置する。衛星と各中継器は、それぞれ、衛星-中継器間リンク用の光無線インターフェースを有し、また、衛星、各中継器はそれぞれ端末とのリンク確立用の無指向性送受信器を1つと端末とのデータ伝送用の指向性送受信器を4つ装備する。衛星-端末間リンク、中継器-端末間リンクと同様に、衛星-中継器間リンクについても指向直射方式により伝送されるものとし、各中継器が最大4端末を収容することから、衛星-中継器間リンクの伝送速度は中継器-端末間リンクの伝送速度の4倍としている。また、中継器においては、波形整形、タイミング再生、識別再生、伝送速度の変換を行うものとする。以上のようなシステム構成を用いることにより衛星-中継器間および中継器-端末間における所要送信光電力の増大が考えられるものの、中継器を経由することで衛星-端末間に複数の光無線伝搬路が確保される。

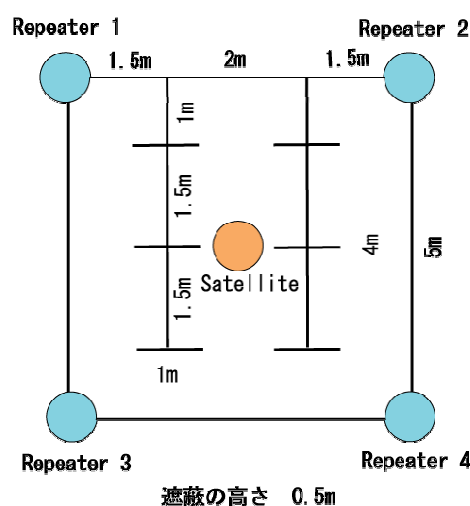


図 4-1-1 光無線中継システムのシステム構成と遮蔽物の配置状況

光無線中継システムを用いた場合の、システム内に存在する端末数と収容確率の関係を図 4-1-2 に示す。図 4-1-2 に示すように、遮蔽の存在する状況において、従来システムを用いた場合は、衛星と端末の間に形成される唯一の見通し内伝搬路が遮蔽される端末が生じるため収容確率は減少する。一方、提案システムを用いた場合には、各端末は衛星方向に加えて各中継器方向への複数の見通し内伝搬路からアクセスに利用する見通し内伝搬路を選択できるため、遮蔽の影響を受けない伝搬路を選択することによりほとんどの端末が収容されることがわかる。また、端末数が 4 端末を越える場合、従来システムでは衛星に装備される指向性送信器数が 4 つであるため、送信器数の不足により収容確率が減少していくが、提案システムでは中継器の指向性送信器を用いて端末を収容することができるため、収容確率の向上が図られることがわかる。これらの結果から、光無線中継システムは、指向直射方式において問題となる遮蔽ならびに送受信器数の不足による端末の収容確率の低減に対する対策として有効なものであるといえる。

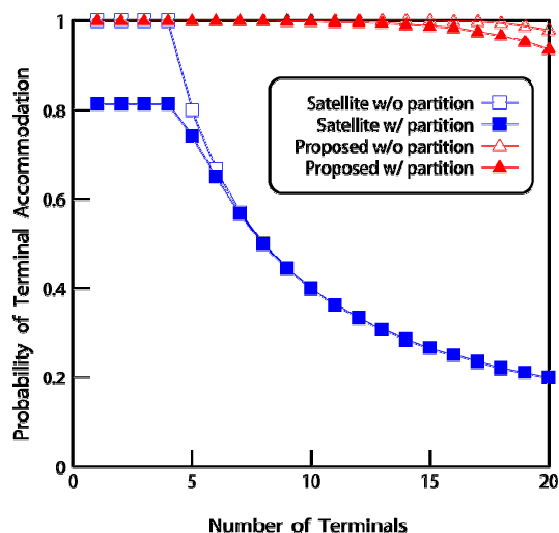


図 4-1-2 光無線中継システムを用いた場合の端末数と収容確率

b) Point to Multi-Point (P-MP) 型ハイブリッド直射方式と P-P 型指向直射方式のオーバーレイ技術

Point to Point (P-P) 型の伝送を行う指向方式は最も高速大容量な伝送を可能とするものの、光無線基地局が装備する送受信器を 1 つの端末が占有するため、端末の増減に対して柔軟に対応できない。一方、広指向の送受信器を装備した光無線基地局を用い、端末側だけで指向制御を行うハイブリッド直射方式は、指向直射方式ほどの高速伝送は期待できないものの、光無線基地局と端末との間での Point to Multi-point (P-MP) 型伝送を可能とし、端末の増減、再配置ならびに端末の移動に対して柔軟に対応することが可能となる。そこで、指向直射方式およびハイブリッド直射方式の両者を併用した直射型光無線伝送システムとして、光無線基地局と端末との間を Point to Multi-Point (P-MP) 型での伝送を行うハイブリッド直射方式と光無線基地

局と端末との間を Point to Point (P-P) 型での伝送を行う指向直射をオーバーレイさせたシステム（以下では「オーバーレイシステム」と呼ぶ）を提案し、オーバーレイシステムに関する研究開発を行った。

ここで提案する赤外線無線中継器を用いた指向直射方式とハイブリッド直射方式のオーバーレイシステムのシステムモデルを図 4-1-3 に示す。従来システムでは、端末は所要伝送速度に関わらず同じチャンネルを使い続けるのに対し、提案システムでは、ハイブリッド直射方式を用いて端末と通信を行うサテライトと指向直射方式を用いて端末と通信を行う複数の中継器を天井面に設置しチャンネルをオーバーレイさせ、時間的に変動する端末の所要伝送速度に応じて、適宜端末に対するチャンネルの割り当てを変え、所要伝送速度の高い端末が常に指向直射方式のチャンネルに收容されるように制御を行う。従来システムでは、端末は所要伝送速度に関わらず同じチャンネルを使用し続けるため、指向直射方式のチャンネルが有効に利用されていないにも関わらずハイブリッド直射方式のチャンネルの伝送容量が飽和してしまう場合が生じる。一方、提案システムでは、所要伝送速度の高い端末が指向直射方式のチャンネルに收容されるように制御を行うため、従来システムと比較して、光無線伝送路を有効に利用でき、ハイブリッド直射方式のチャンネルの飽和を防ぐことが期待される。

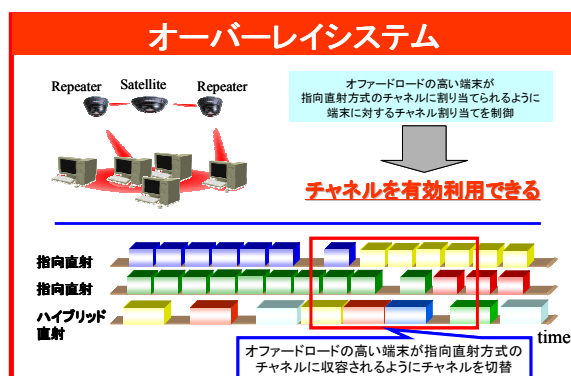


図 4-1-3 オーバーレイシステム

提案システムの有効性について検討するために、提案システムのシステム全体の平均スループットおよび端末の所要伝送速度について評価を行った。特性評価においては、アクセス方式として、一般に無線 LAN システムで用いられる CSMA/CA 方式を用いるものとした。また、伝送空間内に存在する端末は 15 端末とし、その中の一部の端末が通信を行うものとして、その通信を行う端末が 5[Mbps] もしくは 10[Mbps] のオフアードロードを等確率で選択する場合、10[Mbps] もしくは 80[Mbps] のオフアードロードを等確率で選択する場合、70[Mbps] もしくは 80[Mbps] のオフアードロードを等確率で選択する場合について評価を行った。

図 4-1-4 に通信を行う端末の数とシステム全体のスループットの関係を示す。図 4-1-4 より、端末のオフアードロードが 5[Mbps] もしくは 10[Mbps] の場合、オフアードロードが低いため、提案システムと従来システムの間にもスループット特性の差はない。

一方、オフロードロードが 10 [Mbps] もしくは 80 [Mbps] の場合、および、70 [Mbps] もしくは 80 [Mbps] の場合は、従来システムと比較して、オーバーレイシステムを用いることで大幅にスループット特性を改善できることがわかる。この結果から、従来システムと比較してオーバーレイシステムを用いることでシステム全体の平均スループット特性および端末の所要伝送速度を満たせる確率を改善でき、スループット特性の観点からオーバーレイシステムの有効性を確認することができる。

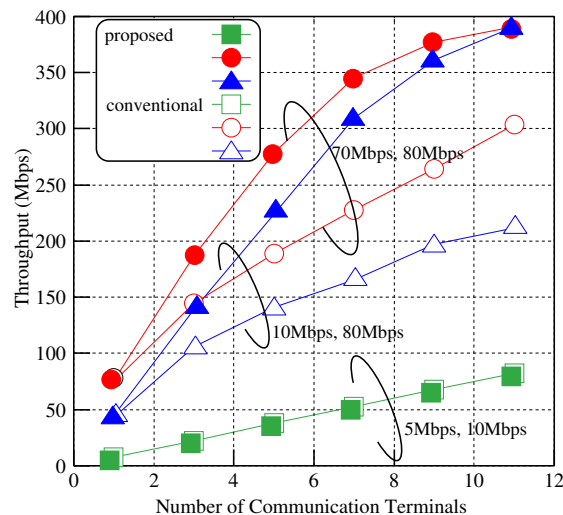


図 4-1-4 通信を行う端末の数とシステム全体のスループットの関係

c) 光拡散方式の伝送技術

天井面や壁面での反射光を利用することで、送受信器間での見通し内伝搬路の確保を必要としない拡散方式は、直射方式に比較して、遮蔽に対する耐性に優れる。しかしながら、反射光を利用して信号光を伝送するため、伝搬損失ならびに遅延広がりが大きくなる。拡散方式での伝搬損失の増大は、受信光電力の低減による通信可能領域（カバレッジ）の狭域化を招き、また、マルチパス伝搬に伴う遅延広がりの増大はシンボル間干渉による伝送速度の低下を招く。ここでは、拡散方式の伝送速度の向上を目的として、伝搬損失の低減技術、背景光雑音の抑圧技術、マルチパス伝搬に伴う遅延波抑圧技術に関する研究開発を行った。

まず、拡散方式における伝搬損失に対する対策としてマルチビーム拡散方式を導入した。単一の方向を指向する光源（シングルビーム拡散方式）では、送信器近傍では過剰な受信光電力が得られる一方で、送信器から離れるに従い受信光電力は急激に減少する。それに対し、ここで導入したマルチビーム拡散方式では、様々な方向を指向する複数の送信器を装備することで、送信器近傍での受信光電力の過剰な増加を抑制し、かつ、送信器遠方での受信光電力の向上が期待される。しかしながら、一方、遅延広がりの観点から見ると、受信器はマルチパス伝搬路を経由した信号光を受信するため、シングルビーム拡散方式よりも遅延広がりが増大を招いてしまうものと予測される。そこで、マルチビーム拡散方式における遅延広がりの増大に対する対策として、

様々な方向を指向する複数の受信光源を装備するマルチディテクタ拡散方式を併せて導入した。マルチビーム-マルチディテクタ拡散方式では、マルチビーム伝送に起因する複数の光無線伝搬路を経由して到来する信号光を、マルチディテクタにより区別して受信、合成することで遅延広がりやの抑圧が期待される。

シングルビーム-シングルディテクタ方式、マルチビーム-シングルディテクタ方式、マルチビーム-マルチディテクタ方式、それぞれについて、送信器からの距離対ビット誤り率特性を評価した結果を図 4-1-5 に示す。図 4-1-5 より、まず、シングルビーム-シングルディテクタ方式では、送信器近傍では過剰な受信光電力が得られる一方で、送信器から離れるに従い受信光電力は急激に減少するため、ビット誤り率は急速に劣化していることがわかる。また、マルチビーム-シングルディテクタ方式では、様々な方向を指向する複数の送信器を装備することで、送信器から離れた地点での受信光電力が向上するため、送信器から離れた地点では、シングルビーム-シングルディテクタ方式よりも良好な誤り率特性が得られている。しかしながら、送信器近傍（図 4-1-5 において送信器からの距離が 2~3[m]の地点）では、複数の光無線伝送路を経由する信号光を、単一のディテクタで同時に受信してしまうため、急激に特性が劣化していることがわかる。一方、マルチビーム-マルチディテクタ方式では、シングルビーム-シングルディテクタ方式、マルチビーム-シングルディテクタ方式に比べて、良好な誤り率特性が得られ、天井面や壁面での反射光を利用する光拡散方式のシステム構成としては、マルチビーム-マルチディテクタ方式が有効であるといえる。

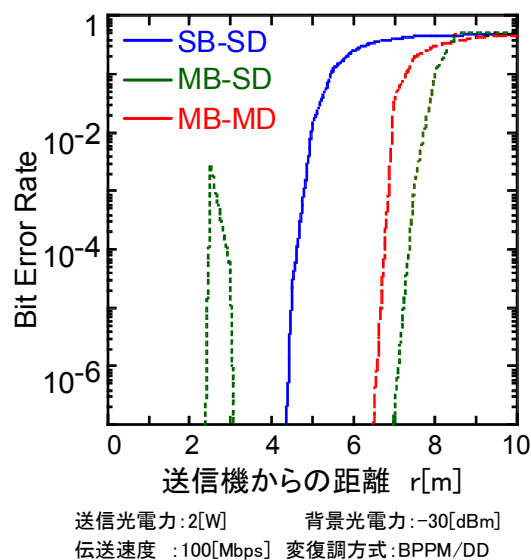


図 4-1-5 拡散方式の送信器からの距離対ビット誤り率特性の比較

d) 光・電波ハイブリッド方式の伝送技術

現在、無線 LAN システムとしては、本研究開発の主な対象である光無線伝送システム以外にも、IEEE802.11b/g 準拠の 2.4GHz 帯の電波を用いるシステム、IEEE802.11a 準拠の 5GHz 帯の電波を用いるシステムなどが実用化されている。これらのシステムは、全て、開空間を伝搬路とするという意味においては同一ではあるものの、システムに

利用される搬送波の種類や周波数帯の違いによって伝搬特性および信号処理技術が異なり、システムとしての特徴は大きく異なってくる。例えば、電波を用いるシステムは、光を用いるシステムと比較して、一般に、遮蔽に対する耐性に優れ、かつ、1つのアクセスポイントにて広範囲なカバレッジを確保できるといった特長を有する。しかしながら、伝送速度の面ではさほど高速な伝送を行うことはできず、また、広範囲な領域にわたる信号伝搬により競合する端末数が増加した場合や、同一周波数帯を利用する異種の電波無線ネットワークが隣接した場合には、スループットの低下や遅延の増大などの伝送特性の劣化が懸念される。一方、本研究開発において対象としている光搬送波を用いる無線伝送システムは、電波を用いる方式と比較して、室外輻射がないため隣接する無線ネットワークからの干渉を受けない、また干渉を与えない、秘匿性に優れる、光搬送波の有する指向性ならびに伝搬路制御の容易性を活かした高速大容量かつ高密度な通信が期待できるといった特長を有する。特に、アクセスポイントとなる衛星と端末それぞれに指向性を持たせることで Point to Point (P-P) 型伝送を行う指向直射方式では 1[Gbps]以上の高速な伝送が容易に実現できると共に、広範囲な領域に亘る信号伝搬により電波無線伝送システムでは一般に困難とされている QoS(Quality of Service)保証型の伝送も可能となる。さらに、無指向性の衛星と指向性の端末を用いて数 10~100[Mbps]程度の伝送を行うハイブリッド直射方式は、多元接続方式の導入により単一の衛星で複数端末を収容することが可能であり、指向直射方式と比較して端末の増減・再配置に対して柔軟に対応できる。しかしながら、先に述べたように、光搬送波を用いるシステムは遮蔽に対して脆弱であり、また、信号光の到達する範囲に限られるため、1つのアクセスポイントにて広範囲なカバレッジを確保することはできず、広範囲なカバレッジを確保するためには数多くのアクセスポイントを設置する必要がある。そこで、ここでは、電波を用いるシステムならびに赤外線領域の光搬送波を用いるシステム、それぞれの短所をもう一方の長所で補完する『光・電波ハイブリッド無線伝送システム』を提案し、光・電波ハイブリッド無線伝送システムに関する研究開発を行った。

リアルタイム(RT, Real Time)ストリーミングのような RT(Real-Time)トラフィックでの遮蔽対策として考案した光・電波ハイブリッドシステムのシステムモデルを図 4-1-6 に示す。床面に端末を 2 つ配置し、また、天井面に光無線中継器を 2 つ設置する。各端末は指向性の光送受信器および電波送受信器を 1 組ずつ装備する。また、各中継器は指向性の光送受信器を 2 組装備し、各送受信器をそれぞれの端末に対して指向させる。各端末は光送受信器をどちらか一方の中継器に対して指向させ、その中継器を経由して光を用いて通信を行う。利用中の通信経路において遮蔽を検知すると、各端末は光送受信器を他方の中継器の方向へ指向させる切替動作を開始し、その切替動作を行っている期間、電波を用いて通信を行う。中継器の切替動作を完了すると、各端末は新たに指向した中継器を経由して再び光を用いて通信を行う。

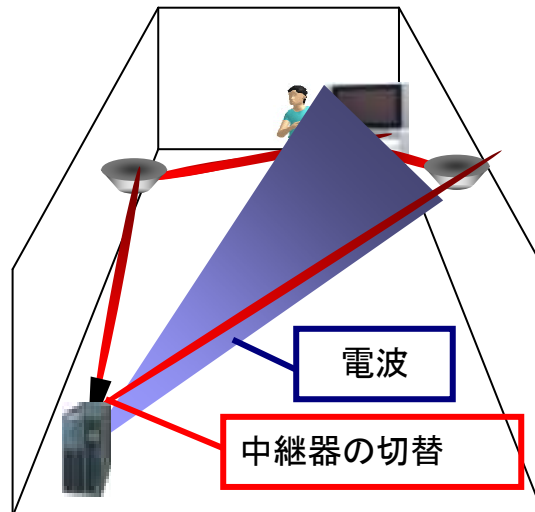


図 4-1-6 光・電波ハイブリッドシステム(RT トラヒック伝送)

まず、中継器の切替時間と許容遅延の非保証確率の関係について検討する。ここでは、遅延時間をデータパケットが発生してからそのデータに対する ACK パケットの受信完了までの時間と定義し、また、許容遅延の非保証確率を、ACK の受信が完了したパケット総数に対し、遅延時間が許容遅延を超えるパケット数の割合と定義する。RT トラヒック伝送を想定して許容遅延を 60[msec] とした場合の中継器の切替時間と許容遅延の非保証確率の関係を図 4-1-7 に示す。なお、比較対象として、中継器の切替を行わないシステムの特性的についても併せて示す。図 4-1-7 より、中継器の切替を行うシステムでは、切替時間を十分に短くすることにより低伝送速度の電波を用いる時間を短くすることができるため、許容遅延の非保証確率を 0[%] とすることが可能であることがわかる。また、中継器の切替期間中に用いる電波の伝送速度の高速化とともに電波により伝送できるパケット数が増加するため、許容遅延を保証するために要求される中継器の切替時間を緩和できることがわかる。一方、別の観点から見ると、電波を用いた場合の伝送速度は、光搬送波を用いた場合の伝送速度に近い高速性が要求され、光・電波ハイブリッドシステムにおいてリアルタイムコンテンツの伝送をするには、コンテンツそのものの圧縮技術を導入する必要があるともいえ、サブテーマ 2 の研究開発課題の 1 つである『シームレス・バリアフリー無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発』が適切な方向であると考えられる。

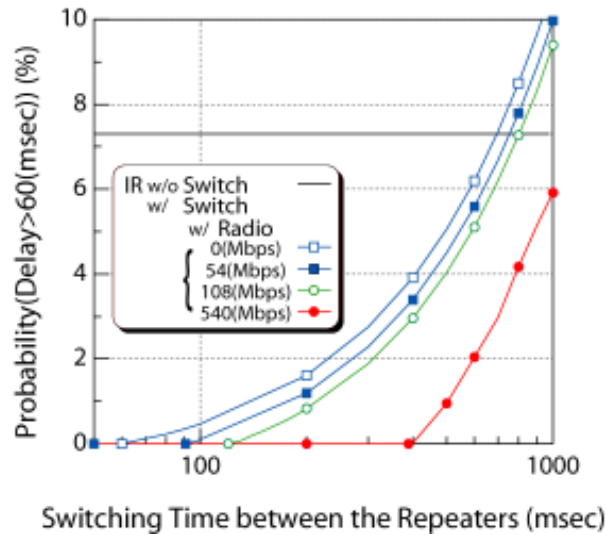


図 4-1-7 中継器の切替時間と許容遅延の非保証確率

次に、電波の実効伝送速度と許容遅延を保証するために要求される中継器の切替時間の関係について検討する。ここでは、実効伝送速度を MAC (Medium Access Control) 効率を考慮した MAC レイヤの伝送速度と定義する。RT トラフィック伝送を想定して許容遅延を 30[msec] および 60[msec] とした場合の電波の実効伝送速度と許容遅延を保証するために要求される中継器の切替時間の関係を図 4-1-8 に示す。図 4-1-8 より、許容遅延を 30[msec] および 60[msec] としたいいずれの場合においても、電波の実効伝送速度が高速であるほど中継器の切替時間が緩和されることが確認できる。また、例えば、電波の実効伝送速度が 90[Mbps] 程度のとき中継器の切替時間を数 100[msec] 以内とすれば良いことがわかる。既存の指向直射方式では、光無線中継器の切替えに数秒程度の時間を要するものの、サブテーマ 3 において研究開発されている技術を導入することにより、単方向伝送であれば数 100[msec] 程度で光無線中継器の切替えが可能であると予想されることから、RT トラフィック伝送を想定して本システムを設計することは可能であると考えられる。

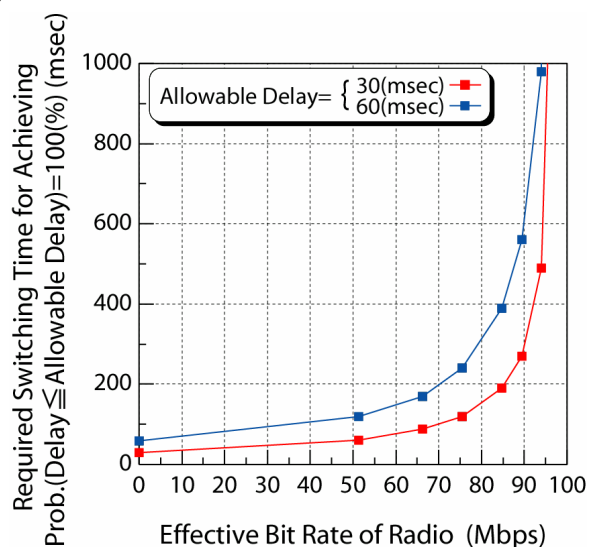


図 4-1-8 電波の伝送速度と要求される中継器切替時間の関係

4-1-1-3 まとめ

サブテーマ 1 (1)では、直射方式および拡散反射方式のそれぞれの有する問題への対策技術に関する研究開発を行った。サブテーマ 1 (1)において提案ならびに導入したシステムは、

- a) 光無線中継システム
- b) ハイブリッド直射方式と指向直射方式のオーバーレイシステム
- c) マルチビーム-マルチディテクタシステム
- d) 光・電波ハイブリッドシステム

であり、伝送特性の観点においてはどれも有効なシステムであることを明らかにした。サブテーマ 1 (1)で研究開発成果のいくつかは、サブテーマ 2 の研究開発課題の 1 つであるシームレス・バリアフリー無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発の方向性を示唆するものとなっている。今後の課題として、本サブテーマ 1 (1)で提案したシステムを実際の光無線伝送システム的设计開発への反映が挙げられる。

4-1-2 Radio over Infrared Wireless システムの基礎研究

4-1-2-1 序論

本サブテーマでは、Radio over Infrared Wireless (RoIRW) ネットワークにおいて複数の無線信号伝送に必要な仮想無線自由空間化技術、RF 無線信号の光搬送波上への多重化技術とルーティング方式、非線形抑圧技術について検討した。

本研究開発全体で、光無線方式の適用先として目標としているホームネットワークに、RoIRW ネットワークを適用した RoIRW ソフトウェアワイヤレスホームネットワークシステムを、図 4-1-9 に示す。同図では、RoIRW をエントランス部分に適用しており、様々な電波無線信号を光無線リンクに閉じこめてバックボーンネットワークから無線アクセスポイントへ転送する。従って、電波無線アクセスポイントを光/電気(O/E)あるいは電気/光変換(E/O)機能と RF 回路、アンテナだけで簡単に構成することができ、屋内の様々なところに配置し易くできる(遍在アンテナシステム)。また、電波形式をそのまま保存して転送できるので、必要な場所にだけ必要な電波を送り届けることができ、アクセス部分の電波干渉を抑圧することも可能となる。アクセス部分にエントランス光信号をそのまま送信することも可能であり、これにより光無線に電波を閉じこめて端末まで送り届けることができる。従って、すでに他端末の使用により電波チャネルが不足しているところでも既存の電波無線変復調器をもつ端末に小形で簡単な O/E 機能を具備させるだけで、電波無線を使用可能にできる。このようにアクセス部分のスループット改善、電波周波数利用効率改善に寄与するだけでなく、さらには医療機器や電磁干渉に起因して元来电波の使用が制限されているところでも電波無線サービスを使用可能とさせることが期待できる。本システムでは、RoIRW を種々の電波無線サービスの共通基盤に使用しており、それぞれの無線サービス信号はネットワーク内でルーティングされて、ソフトウェア無線モジュール(ゲートウェイ)に転送される。ソフトウェア無線モジュールは、様々な無線変復調機能をもち、IP パケットを取り出して外のインターネットにも接続するゲートウェイ機能をもつ。従って、ネットワー

ク全体がソフトウェア無線的な動作をするので、RoIRW ソフトウェアワイヤレスネットワークシステムと呼ぶことにしている。

このようなシステムの実現には、1)Radio over Infrared Wireless の仮想無線自由空間化技術が必要であり、光無線アクセス部のシャドウイング耐性向上のため複数の光無線基地局をもつシステムにおいて、各アクセスポイントから様々な周波数チャンネル電波無線信号を光無線に閉じこめて端末に送信するシステムを検討した。その1つ目の課題は光無線アクセス部での光搬送波内マクロダイバーシチ受信システムの検討であり、本システムでは、RoIRW エントランス、もしくは光ファイバを用いた RoF リンクで接続された遍在アンテナシステムの下りリンクにおいて、プレ重み付けされた同一周波数チャンネル無線信号を光無線信号に閉じこめて送信することにより端末間で受信信号の空間多重(Space Division Multiplexing: SDM)を実現する。2つ目の課題は、RoIRW エントランスネットワークの室内への適用であり、RoIRW 方式を用いて電波を無線アクセスポイントに転送する室内非再生中継システムを提案し、その有効性に理論的な検討を加えた。

一方、2)電波無線信号多重化方式ならびにルーティング技術は、エントランス部への適用を考え、電波無線信号多重化方式として直接光スイッチング符号分割多重方式を、ルーティング方式としては、光無線によって転送される無線信号のヘッダラベルにカオス符号を適用する方式を提案し、検討を加えた。また、このカオス符号の自己同期性の優れた性質を光無線アクセスリンクへの適用する着想に至り、カオス空間多重光無線通信システムにおける 2次元自己マッチング受信方式を提案した。本システムは、空間領域で多重化を行う光無線通信方式であり、そこに秘話性・秘匿性に優れたカオス符号を適用したものである。

また、3)非線形抑圧技術については、コヒーレント光変調方式の一つである SCM 光コヒーレント周波数変調方式において、複数次相互変調ひずみを補償するためにチャープコントローラを用いる非線形補償受信器を提案し、所要ダイナミックレンジを得るための所要値を理論的に検討した。

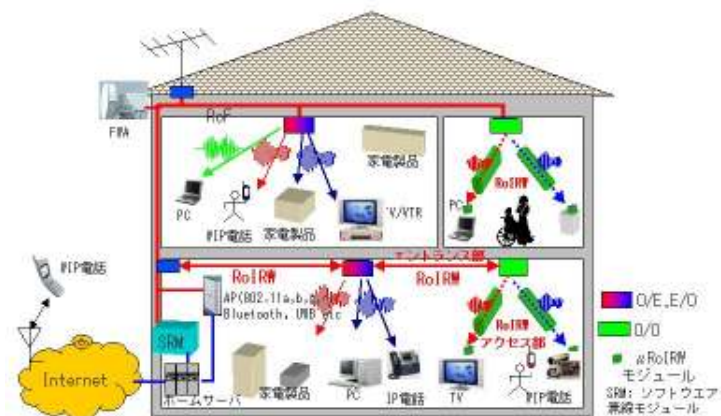


図 4-1-9 RoIRW ソフトウェアワイヤレスホームネットワークシステム

4-1-2-2 Radio over Infrared Wireless の仮想無線自由空間化技術

a) RoIRW 遍在アンテナシステム

RoF(Radio on Fiber)技術を光無線通信システムに適用した Radio over Infrared Wireless(RoIRW)システムは、光無線搬送波に電波を副搬送波として閉じ込めて無線信号を伝送する方式である。本研究では、光 SCM 変調によって RF 帯無線波が光搬送波強度に重畳される副搬送波光強度無線変調方式を対象にして、複数の光無線基地局から同時に光受信するシステム(RoIRW 遍在アンテナシステム)を提案し、光無線搬送波内での RF 帯副搬送波のダイバーシチ受信効果についての検討を行った。本システムの下りリンクでは、制御局(Central Control Station:CCS)でのプレ重み付けにより、光搬送波内の同一チャンネル副搬送波空間多重が可能であり、計算機シミュレーションによってダウンリンクにおける信号品質の評価を行った。

図 4-1-10 に RoIRW 遍在アンテナシステムの構成を示す。本システムでは、CCS でプレ重み付けされた無線信号は、光 SCM 変調により光強度に変換された後、RoF リンクを介して複数の光無線基地局に転送され、各光無線基地局から無指向直射方式で各無線端末まで伝送される。光無線基地局から端末までは無指向直射方式を用いるので、プレ重み付けに使用する伝搬路行列 H は各端末の位置情報のみから算出でき、CCS はその逆行列 H^{-1} を用いて送信信号にプレ重み付けする。各光無線基地局では、RoF リンクの光信号をそのまま空間に光無線信号として放射する。各受信端末では各基地局から送信された複数の光無線信号を受信し、O/E 変換して RF 信号に変換する。このとき各受信端末では所望無線信号に対する干渉波はプレ重み付けにより抑圧され、希望信号のみを受信することができる。また、各光無線基地局から送信される送信ビームの広がりが増えると、等価的に伝搬路特性 H が変化する。そこで、送信ビームの広がりを最適化することで、受信信号品質を劣化させることなく、低い送信電力でのシステム構築が可能となる。

サービスエリアとして縦横 5[m]、高さ 2[m]の空間を仮定し、基地局は天井面の四隅に 4 つ配置する。このとき、1 つの基地局がサービスエリア全体をカバーできるように送信器の方向を水平方向はサービスエリアの中心、垂直方向は鉛直下向きから 60[deg]の方向に固定し、表 4-1-1 に示すパラメータを用いてシミュレーションを行った。同一 RF チャンネルを利用する 4 つの受信端末がサービスエリア内に一様に存在するものと仮定した。

図 4-1-11 に送受信器間が障害物で遮蔽される頻度と、1 端末あたりの副搬送波の周波数利用効率を示す。比較のため光無線基地局を分散させない集中基地局方式、空間多重しない遍在アンテナによるマクロダイバーシチ方式と単一送信器方式を示す。変調方式は QPSK、各光基地局の送信光電力 150[mW]、送信ビーム半値角 30[deg]とした。同図より、遍在基地局は、遮蔽頻度が高くても高周波数利用効率を得られ、さらに提案方式は、遮蔽率 30%時でもマクロダイバーシチの約 3.8 倍の周波数利用効率を得られる。また、遮蔽率 0%の場合でも集中基地局が約 1.5[bps/Hz]程度の周波数利用効率に

対して、遍在アンテナの場合は周波数利用効率が約 1.9[bps/Hz]が得られ、遮蔽率が高くなるに従い、その改善度は向上することが分かった。

図 4-1-12 に送信ビーム角を適応制御したときの提案方式の送信電力とカバレッジ率 (QPSK、 10^{-6} 以下の BER が得られる確率) の関係を示す。同図より、送信ビーム角を適応制御するとカバレッジ率 99[%]となる送信光電力は、送信ビーム広がり角固定に比べて約 4[dB]低く抑えられる。

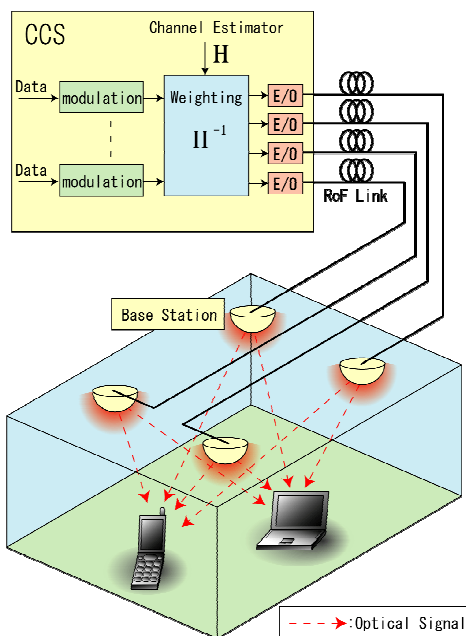


図 4-1-10 RoIRW 遍在アンテナシステムの構成

表 4-1-1 シミュレーションパラメータ

副搬送波周波数	2.4 [GHz]
帯域幅	16.6 [MHz]
変調方式	BPSK, QPSK
受信器視野角	75.0 [deg]
受光部検波面面積	1.0 [mm ²]
PD 量子効率	0.8 [A/W]
背景光電力	0.1 [mW/cm ²]
等価雑音温度	295 [K]
負荷抵抗	50 [Ω]
コンセントレータ	Hemispherical Lens
コンセントレータゲイン	$G(\psi) = n^2 = 1.4^2$ (n : レンズの屈折率)
光フィルタゲイン	$T(\psi) = 1.0$

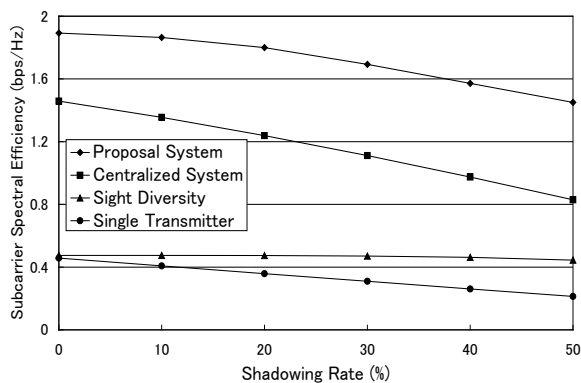


図 4-1-11 遮蔽頻度対副搬送波周波数利用効率

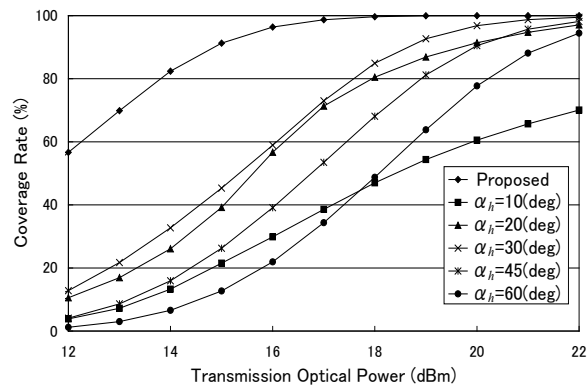


図 4-1-12 送信光電力対カバレッジ

b) RoIRW エントランスネットワークの室内への適用

ホームネットワークにおいて RoIRW 方式を用いて電波を無線アクセスポイントに転送する室内非再生中継エントランスシステムを提案した。本システムは、光無線で光非再生中継器(NRR: Non-Regenerative Repeater) を接続してエントランスネットワークを構築し、目的の無線端末が存在するエリアをカバーする NRR まで RF(Radio Frequency) 信号を閉じ込めた光信号を中継し、NRR で RF 信号に戻して無線端末に伝送する (図 4-1-13)。

端末の受信 CN 比について理論解析を行い、NRR を等間隔に配置したバス型 RoIRW エントランスネットワークで天井高 3[m]、10[m] 四方の部屋をカバーする場合を仮定し、数値計算を行った。床面に一様分布している受信端末は最も距離の近い NRR から受信するものと仮定した。数値計算では IEEE802.11a 準拠(5.2GHz)の RF 信号を仮定した。表 4-1-2 に計算で用いたパラメータを示す。

図 4-1-14 に 3 チャネルを繰り返し利用した場合の NRR 数に対する周波数利用効率の計算結果を示す。同図で送信 RF 電力が -10[dBm] の場合、NRR 数が 5 個までは NRR を増やすことによる周波数利用効率の改善効果が得られるが、NRR 数が 6 以上では、同一周波数干渉が強くなり、伝送速度が低下するため、周波数利用効率が劣化することが分かる。送信 RF 電力が -20[dBm] の場合には、NRR 数が 6 のとき周波数利用効率を最大にできる。以上のように各送信 RF 電力に対して、周波数利用効率を最大にする最適 NRR 数が分かった。

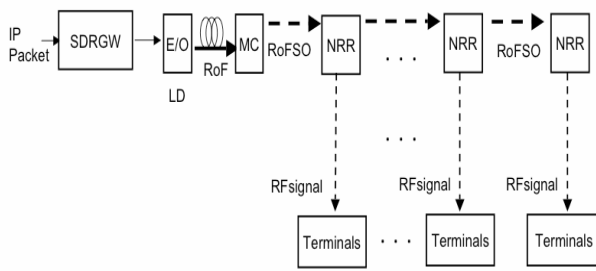


図 4-1-13 システム構成

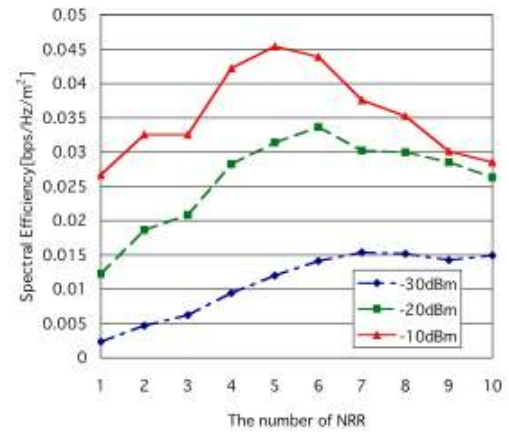


図 4-1-14 NRR 数対周波数利用効率

表 4-1-2 NRR および RoFSO リンクのパラメータ

伝送方式	指向直射方式	受信機視野角	5.0[deg]
光搬送波の波長	1.55[μ m]	負荷抵抗	50[Ω]
送信光電力	10.0[dBm]	受信機雑音温度	300[K]
光源半値角	0.5[deg]	PD 検波効率	0.8[A/w]
LD の変調効率	0.25[w/A]	光フィルタゲイン	1.0
相対強度雑音	-130[dB/Hz]		
背景光電力	-40.0[dBm]	受信機レンズ屈折率	1.4

4-1-2-3 電波無線信号多重化方式ならびにルーティング技術

a) 直接光スイッチング符号分割多重方式

RoIRW ネットワークでの複数の無線信号伝送に必要となる RF 無線信号の光搬送波上への多重化技術として、直接光スイッチング(DOS:Direct Optical Switching)CDMA 方式について検討を行った。本方式では、受信器に光反転相関受信器(OPRC)を用いることにより、通常無線通信で使用される両極性拡散符号を光 CDMA 方式でも使用できるようになり、多重数と干渉信号抑圧特性の改善が期待される。図 4-1-15 に DOS-CDMA 方式の実験構成を示す。送信器では、RF 信号で LD を変調後、光信号を光スイッチ (LN 強度変調器) でオンオフエンコードする。受信器では、受信信号光を 2 つの枝に分岐した後、互いに相反する符号で 2 つの光スイッチにより相関をとり、光バランス検波と BPF により RF 信号を再生する。

送受信器に同一の符号を用いて希望波電力を測定し、異符号を用いて干渉波電力を測定し、CI 比を評価した。拡散符号には符号長が 15 から 2047 の M 系列を用い、拡散符号周期 0.1[msec] で無変調搬送波を送信した場合の拡散符号長対受信電力の測定結果を図 4-1-16 に示す。同図から符号長を拡大した場合、希望波 RF 電力が一定であるのに対し、干渉波 RF 電力が抑圧されており、符号長が 255 では雑音電力以下に抑圧されることが分かった。

さて本方式では、チップレートを維持したまま帯域標本化周期内の拡散符号長を時間領域で拡大して処理利得を増大し、信号対干渉雑音電力比を改善することが原理的に可能である。しかしそのためには無線帯域内に干渉雑音として残留するスペクトルエリアシング歪を除去する必要がある。そこで、本検討では、受信器側に特別な信号処理を施すことなくこのエリアシング歪を抑圧可能な拡散符号の新しい構成法を提案し、実験的にその効果を確認した。さて、拡散符号長を延ばしたとき無線信号帯域内で自己干渉雑音となって CI 比を劣化させるスペクトルエリアシング歪は、その位相特性が、拡散符号系列内の各光パルスの時間位置によって決まることに着目して、エリアシング歪を抑圧できる符号系列を提案した。これは、ロジスティック写像から得られる符号系列であり、その歪抑圧効果を実験により確認した。図 4-1-17 に受信光電力対シンボル誤り率(SER)特性の実験結果を示す。無線信号として $\pi/4$ シフト DQSK 方式を用いて PHS 波（無線周波数：1.9GHz、帯域幅：300KHz）を伝送し、拡散符号周波数 75KHz、拡散符号長 63 の用いた場合の結果である。比較のために M 系列を使用した場合の SER 特性も併せて示している。M 系列を使用すると、受信光電力が大きくなるとスペクトルエリアシング歪に支配され、SER 特性にフロアが生じるのに対して、提案符号を用いればフロアは生じず、歪電力が抑圧されることが確認できた。

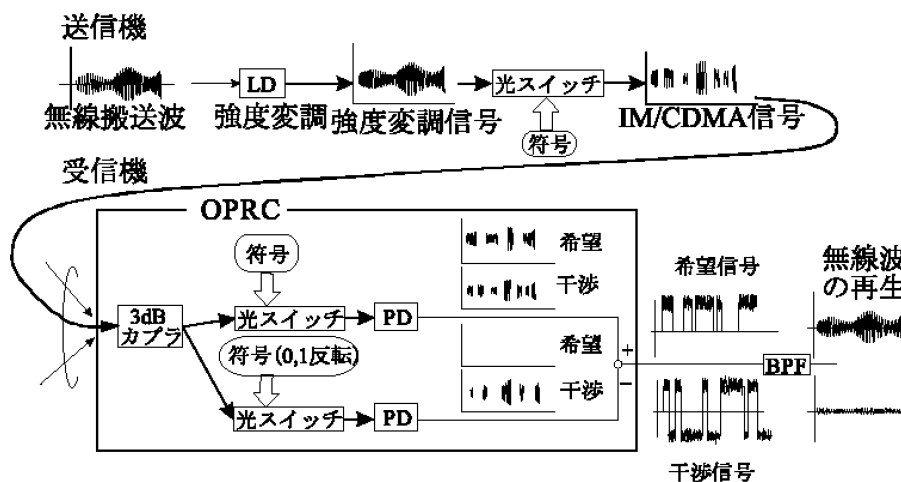


図 4-1-15

直接光スイッチング(DOS:Direct Optical Switching)CDMA 方式の実験系構成

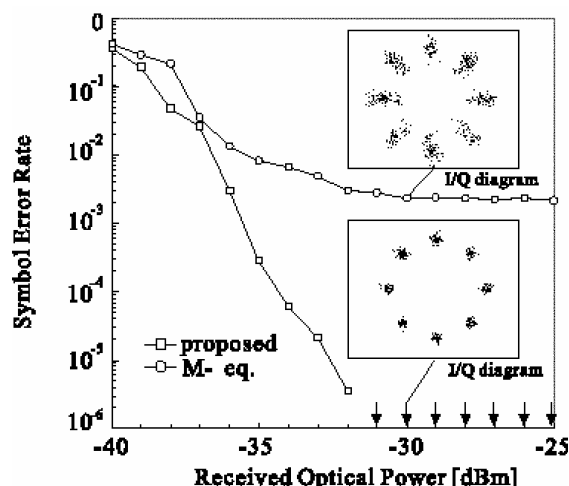
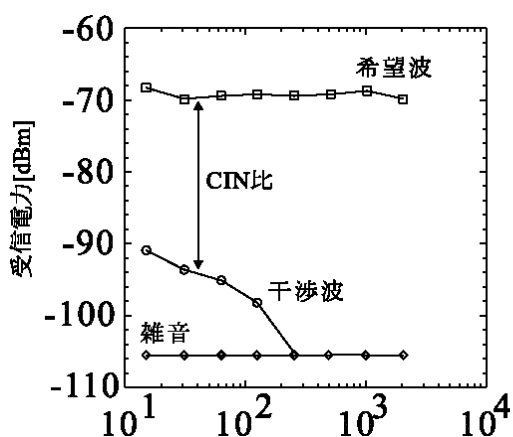


図 4-1-16 拡散符号長対受信電力特性 図 4-1-17 受信光電力対 SER の実験結果

b) カオスラベルルーティング方式

本研究では RoF や RoIRW を用いたエントランスネットワークにおいて種々の電波無線波のルーティング方式として、パケット化した無線波の先頭に CDM(Code Division Multiplexing) ラベルを付加して光フレームとして転送する方式に着目した。ラベルの拡散符号には、自己同期の性質によって同期捕捉とプリアンプルを不要にできるカオス符号を用い、カオスラベルルーティング方式を提案した。

図 4-1-18 に無線基地局 (Radio Base Station:RBS) の構成を示す。受信した無線波は、そのままパケット化されデータ部となる。カオス発生器は、カオス発生関数により転送先のカオスラベルを発生し、無線パケットデータ部の先頭位置に付加し、光フレームにして RoF や RoIRW リンクに送出する。ルーティングノード (図 4-1-19) では、カオスラベルを取り出し、カオス同期を達成して、転送先を識別し、パケット化された無線波が重畳した光信号が転送先へ伝送されるようにゲート信号を生成し、ゲートを制御する。

カオス同期による非同期ルーティングの実現をシミュレーションにより検証した。図 4-1-20 にカオスラベルの時系列 (ラベル多重数: $M=3$ 、ラベル長: $L=100$) に対する任意時刻の相関器出力を示す。同図より、任意時刻からの相関検波が可能であることが確認できた。図 4-1-21 にカオスラベルの識別ビット誤り率を 10^{-3} 以下とするために必要なラベル多重数とラベル長の関係を示す。多重数の増大に伴う所要ラベル長の増大が確認できる。多重数が 3 の場合、ラベル長は 5、多重数が 19 の場合、ラベル長が 285 必要となることが分かった。

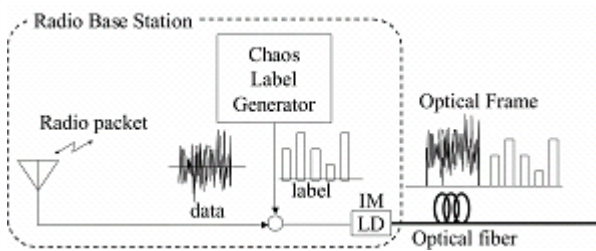


図 4-1-18 無線基地局の構成

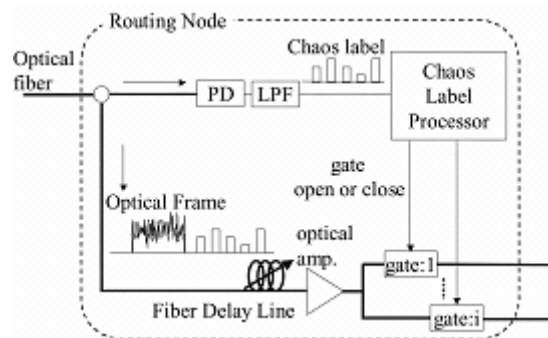


図 4-1-19 ルーティングノード

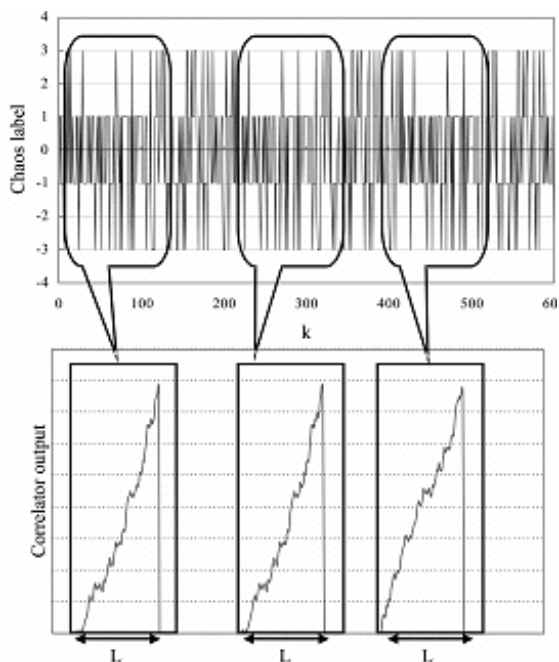


図 4-1-20 カオスラベルに対する相関器出力
(ラベルの多重数:M=3、ラベル長:L=100)

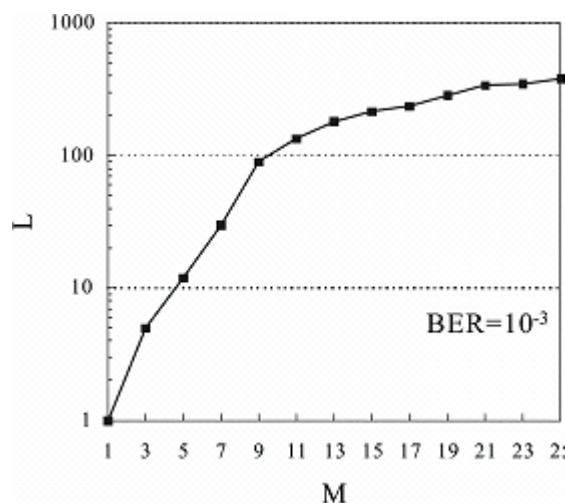


図 4-1-21 多重数と所要ラベル長

c) カオス空間多重光無線通信システムの検討

4-1-2-3 b) で述べたカオス同期の性質を光空間多重化システムに適用すれば、送信された空間放射パターン的一部分を受信するだけで多重信号から希望信号を復調可能という 2次元自己マッチング受信という着想に至り、カオス符号を適用した空間多重光無線通信システムを提案した。図 4-1-22 に提案システムの構成を示す。送信器となるマスターシステムでは、各ユーザ固有のカオス発生関数から 2次元の状態変数が生成され、それにより送信光の空間放射パターンが決定される。すなわち、2次元送信カオスパターンをもつ空間フィルタにより送信光を空間変調し、これを床面に向けて放射し、床面に 2次元のカオスパターンを生成する。受信器では、このパターンの一部をアレーPDで受信する。受信器であるスレーブシステムは、マスターシステムと同じカオス発生関数をもつが、このときカオス同期により、受信器は位置によらず受光している画素パターンを生成することができ、それを参照信号として利用できる。受信

光とその参照信号を空間相関器で相関処理し、その出力の正負により、判定器で送信ビットが復調される。

シミュレーションにより、送受信器の 2次元カオス同期の動作原理と信号対干渉電力比(SIR)を求めた。図 4-1-23 に受信画素数と SIR の関係を示す。光変調方式に OOK を用いると多重ユーザ間の 2次元カオスパターンの相互相関値が 1/2 となるため画素数によらず SIR は 6dB に制限されるが、情報ビットによりカオスパター画素のオンオフを切り替える SIK(Sequence Inversion Keing)を用いると 2次元カオスパターンの部分相関が一部劣化するものの、数万画素で約 50[dB]の SIR が得られることが明らかとなった。

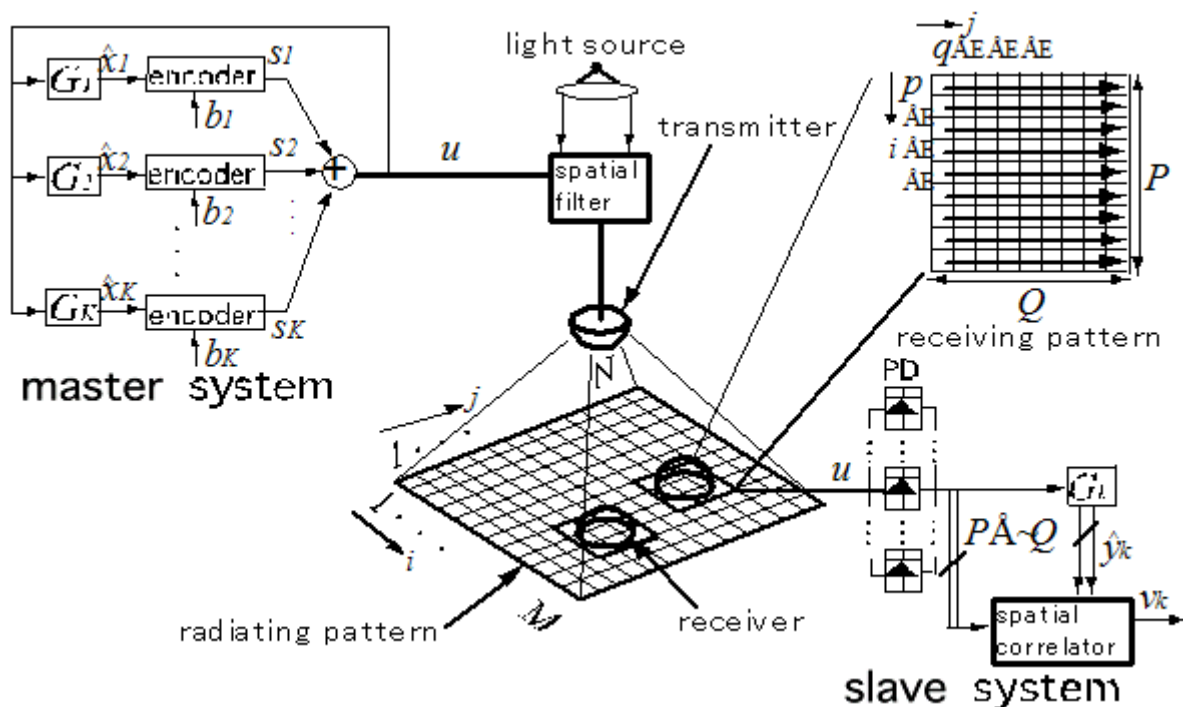


図 4-1-22 提案システムの構成

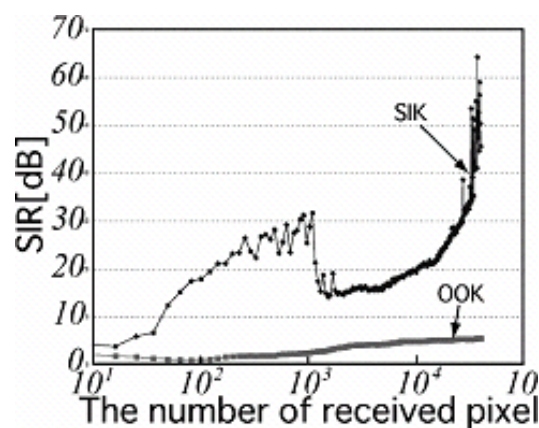


図 4-1-23 受信画素数と SIR の関係

4-1-2-4 非線形抑圧技術

RoIWR、RoF リンクで用いられる SCM 強度変調/直接検波方式では LD のクリッピングや非線形性により相互変調歪が発生し、ダイナミックレンジが低下する。ダイナミックレンジの向上には、光源の非線形に起因した相互変調歪を抑圧する必要がある。そこでクリッピング歪に強く広帯域利得である光周波数変調方式の適用を検討してきた。しかし、光 FM 方式においても LD と光周波数弁別器の非線形性により相互変調歪が発生する。従来検討を行ってきた光周波数弁別器の非線形性を利用した補償方式（位相シフト非線形補償方式）では、3 次相互変調歪を効果的に抑圧できるが、それと同時に高次相互変調歪を抑圧するのが困難という課題が残されていた。そこで本研究では、高次相互変調歪も同時に抑圧する非線形補償受信器を提案した。

図 4-1-24 に提案する非線形補償受信器の構成を示す。MZI 型光周波数弁別器の入力段に置くチャープコントローラで光 FM 信号の周波数チャープを変化させた後、MZI 型光周波数弁別器で光強度変調信号に変換し、バランスドミキシング検波により無線信号に変換する。復調された無線信号の相互変調歪成分を検出し、それが最小になるようにチャープコントローラのチャープ特性をフィードバック制御する。図 4-1-25 にグレーティング素子と光周波数シフタで構成されるチャープコントローラを示す。グレーティング素子の波長分散特性を利用し、空間に光 FM 信号を分散させ、各周波数成分に光周波数シフタで周波数シフトする。周波数シフトされた信号はスラブ導波路で集光され、チャープコントロールされた光 FM 信号が出力される。

図 4-1-26 に非線形補償受信器の入力 SCM 信号電力に対する出力 SCM 信号電力及び雑音電力、3 次相互変調歪電力、クリッピング歪電力特性を示す。表 4-1-3 に数値計算に用いたパラメータを示す。同図より、位相シフト非線形補償方式を用いると、3 次及び 5 次相互変調歪の合成電力が抑圧され SFDR は 40[dB] であり、非線形補償しない場合と比べて 4[dB] 改善されるのに対して、提案方式では、挿入損失によって副搬送波電力が劣化するものの、非線形補償による SFDR の改善効果が大きく、挿入損失が低い場合には更に良好な SFDR を得ることができる。特に挿入損失がない場合では SFDR は 45[dB] であり、非線形補償しない場合と比べて 9[dB] 改善されることが分かる。

図 4-1-27 にチャープコントローラの周波数分解能が低い場合に問題となる量子化誤差電力と周波数分解能の関係を示す。同図より、周波数分解能を 100[MHz] 以下とすれば雑音電力以下に量子化誤差電力を抑えられることが分かった。

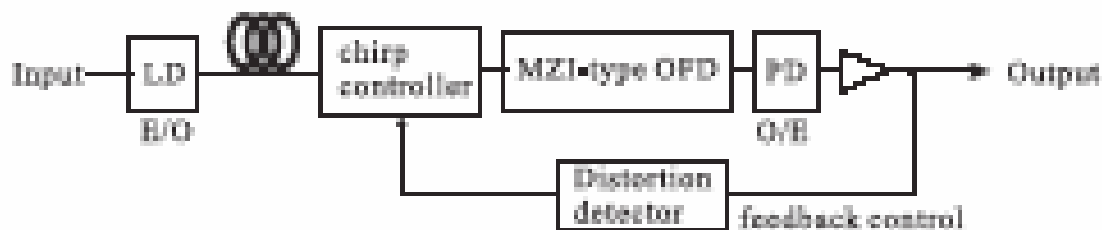


図 4-1-24 提案する非線形補償受信器の構成

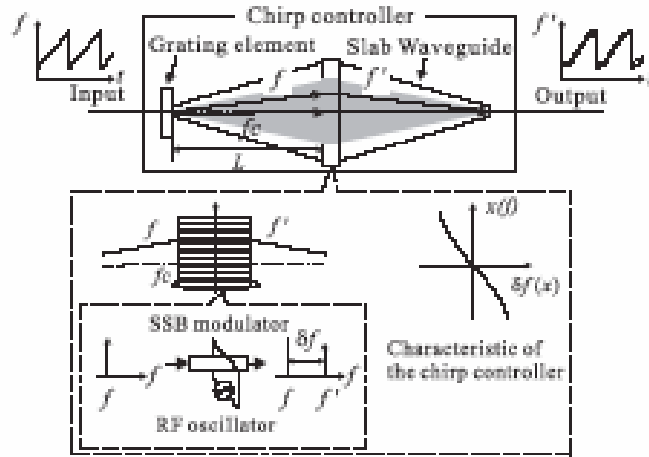


図 4-1-25 チャープコントローラの構成

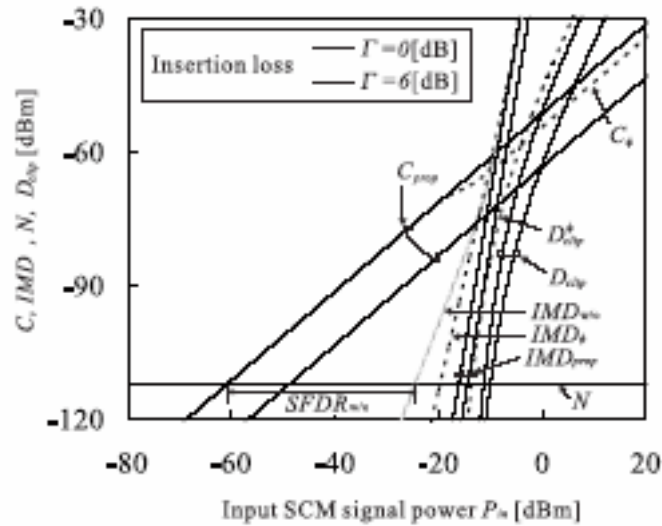


図 4-1-26 入力 SCM 信号電力に対する副搬送波/雑音/IM3/クリッピング歪電力

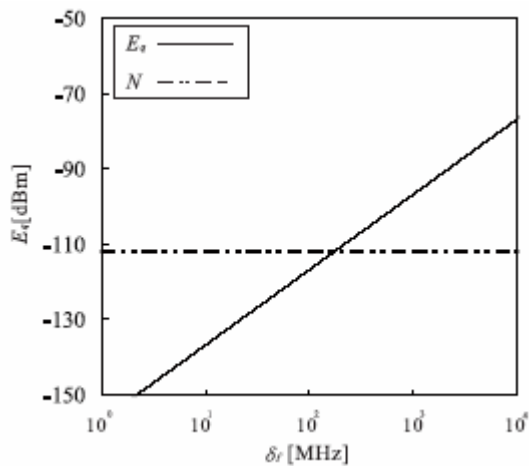


図 4-1-27 チャープコントローラの周波数分解能と量子化誤差電力の関係

表 4-1-3 数値計算に用いたパラメータ

P_r [dBm]	-10	L_{loss} [dB]	5
η_{rx} [W/A]	0.02	r [A/W]	0.8
R_{in} [Ω]	50	R_{out} [Ω]	50
B [MHz]	16.6	T [K]	300
FSR [GHz]	50.0	キャリア数	10
$\Delta\nu$ [MHz]	5.0	f_{RFc} [GHz]	2.4
p [mm/GHz]	1.0	b_1	0
α [GHz/mA]	10	β [1/mA ¹]	0.01
γ [1/mA ²]	0.001	-	-

4-1-2-5 まとめ

サブテーマ1(2)では、Radio over Infrared Wireless の仮想無線自由空間化技術として、種々の電波無線信号を RoIRW により端末に高品質に届ける RoIRW 遍在アンテナシステムを提案し、その無線信号の伝送品質改善と多重数改善のためにプレ重み付けによる光搬送波内の同一チャネル副搬送波空間多重方式を提案した。無線 LAN の電波信号を仮定したシミュレーションによりダウンリンクにおける信号品質の改善効果を明らかにした。また、無線基地局への種々の無線波転送に使用できる室内 RoIRW エントランスネットワークを検討し、電波無線アクセス側の周波数利用効率の改善効果を理論的に明らかにした。

また、電波無線信号多重化方式・ルーティング技術では、直接光スイッチング符号分割多重方式について理論的・実験的検討を行い、拡散利得拡大とエリアシング抑圧を可能な符号構成を提案した。また、RoF/RoIRW エントランスネットワークにおけるカオスラベルルーティング方式を提案し、ルーティングノードの構成を検討すると共に、非同期ルーティング性能についてシミュレーションにより評価した。さらにカオス自己同期性に着目して、これを光無線アクセス系に適用したカオス空間多重光無線通信システムと2次元自己マッチング方式の提案を行い、方式原理の確認と基本性能のシミュレーションによる評価を行った。

一方、RoF/RoIRW エントランスネットワークの非線形抑圧技術として光チャープコントローラを用いた光 FM 非線形補償受信器を提案し、そのダイナミックレンジ改善効果を理論的に評価した。その結果、クリッピング歪、3次ならびに高次相互変調歪を同時に抑圧でき、キャリア数10波を多重した場合に45[dB]のSFDRが得られることが分かった。

以上の研究開発は、RoIRW の種々の電波形式に対する汎用性を分散する、種々のワイヤレスサービスのための汎用プラットフォームに用いる、RoIRW ソフトウェアワイヤレスホームネットワークシステムの要素技術開発として行ったものであり、理論解析やシミュレーションによる原理的な確認、基本性能の評価を行うことができた。今後は、実際の適用に使用するデバイスの検討や実用化に向けた課題解決を今後の課題として考えている。

4-2 超高速シームレス・バリアフリー・アクセスシステムの研究開発【サブテーマ2】

4-2-1 シームレス・バリアフリー無線通信プロトコルの研究開発

4-2-1-1 序論

本シームレス・バリアフリー無線通信プロトコルの研究開発において、通信中の光無線基地局が途中で他の光無線基地局に切替わっても接続が継続される、例えば、鑑賞中の映画や転送中のファイルが途中で中断されない通信プロトコルの検討を行い、利用者に基地局の切り替わりを意識させないシームレスな光無線、電波無線利用の移動体通信ネットワークの実現を目標とした。

以前の報告書に、IPv4 環境内で複数サブネット間を電波無線にてローミングが可能なプロトコルや、IPv4 環境内で複数サブネット間を移動でき、光無線と電波無線を切替え可能なプロトコルの開発に関する研究報告を行った。

本報告では、IPv6/IPv4 混在環境内で IPv4 サブネット間を移動でき、光無線と電波無線を切替え可能なプロトコルを開発したので詳細に述べる。

4-2-1-2 概略

本シームレス・バリアフリー無線通信プロトコルの研究開発では、異種ワイヤレス LAN インターフェースの切替手法、及び異種 IP バージョン環境での IP 層における移動透過性確保の検証により、移動してもサービスを継続可能なシームレス通信方式の基礎検討を行った。具体的には、異種ワイヤレス LAN インターフェースの切替手法として、光無線と既存 IEEE802.11b/g 電波無線の両インターフェースを備えた移動端末において、スループットの高い光無線を優先的に使用し、光無線伝送路の光遮蔽が生じた際に電波無線へ切替える。光無線を使用中、通信待機状態の電波無線は、電波無線強度の高いアクセスポイントを検索し DHCP クライアントによりネットワーク設定を事前に行い、インターフェースの切替えに備える。また、異種 IP バージョン環境での IP 層における移動透過性に関しては、複数のサブネットでの移動端末の IPv4 アドレスが変更しても IPv4 サーバ並びに IPv6 サーバとの通信を継続することを目的とした。

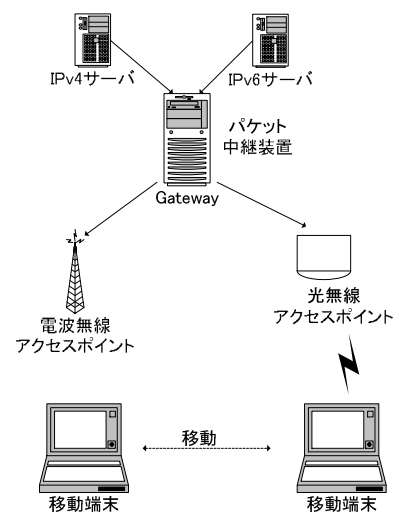


図 4-2-1 概略構成図

4-2-1-3 シームレス通信プロトコルの特長

移動端末とゲートウェイ間でのパケット中継転送におけるプロトコル、並びに移動端末のインターフェース切替手法を開発した。図 4-2-1 に示す概略システム構成図において、移動端末はパケット中継するゲートウェイに対し移動先 IPv4 アドレスを通知した後、IPv4 サーバと IPv6 サーバとの通信を継続する。その特長として、下記の点が挙げられる。

1) ワイヤレス LAN インターフェースの切替手法

光無線と電波無線のインターフェースの切替えは、移動端末における IPv4 経路表制御により、論理的にデータパケットフローを切替えることで実現した。

2) 異種 IP バージョンの対応

IPv4 環境のサブネット変更に伴い、移動端末の IPv4 アドレスが変化しても、IPv4 サーバと IPv6 サーバとの通信を継続する。なお、移動端末と IPv4 サーバとの通信には IP in IP トンネルを使用し、IPv6 サーバとの通信には IPv6 in IPv4 トンネルを使用する。

以降では、具体的なシステム構成を基に通信プロトコルを説明した後、移動端末の実装に関し詳細に述べる。

4-2-1-4 プロトコル

図 4-2-2 は、IPv6/IPv4 デュアルスタック移動端末が、IPv4 環境内で移動した場合を想定した実験システム構成図である。移動端末は、光無線インターフェースと IEEE802.11b/g 電波無線を搭載した Linux ノートパソコンである。移動後においても、通信中の CN1 (IPv6 サーバ)、並びに CN2 (IPv4 サーバ) との通信を継続する。そのため、移動端末の移動先へパケットを中継するゲートウェイを図の様に設置した。

IPv4 ネットワークは、複数ルータによりサブネットを区切り、サブネット内に電波無線アクセスポイントや光無線アクセスポイントを設置した。

通常このような環境では、サブネット毎に移動端末の IPv4 アドレスを取得しないとサーバ間通信が途切れる。そのため、通信インターフェースにおいて、各サブネットを利用可能な「気付け IP アドレス (CoA: Care of Address)」を DHCP で取得し、ゲートウェイへ登録する。なお、DHCP サーバ機能は図 4-2-2 中の各ルータ内にある。

図 4-2-3 は、図 4-2-2 の環境下におけるシームレス通信プロトコルを説明するデータフロー図である。図 4-2-3 の各ステップを以下で説明する。

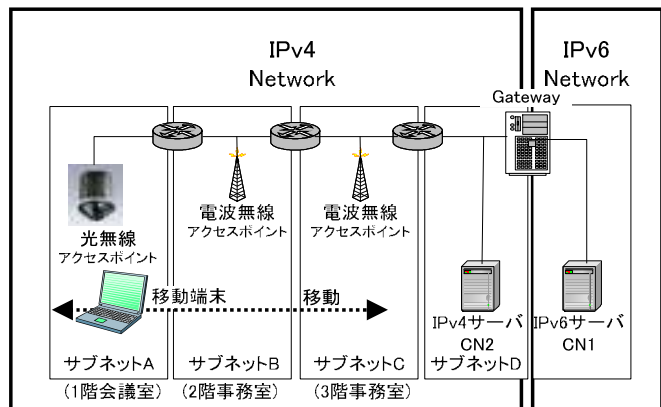


図 4-2-2 実験システム

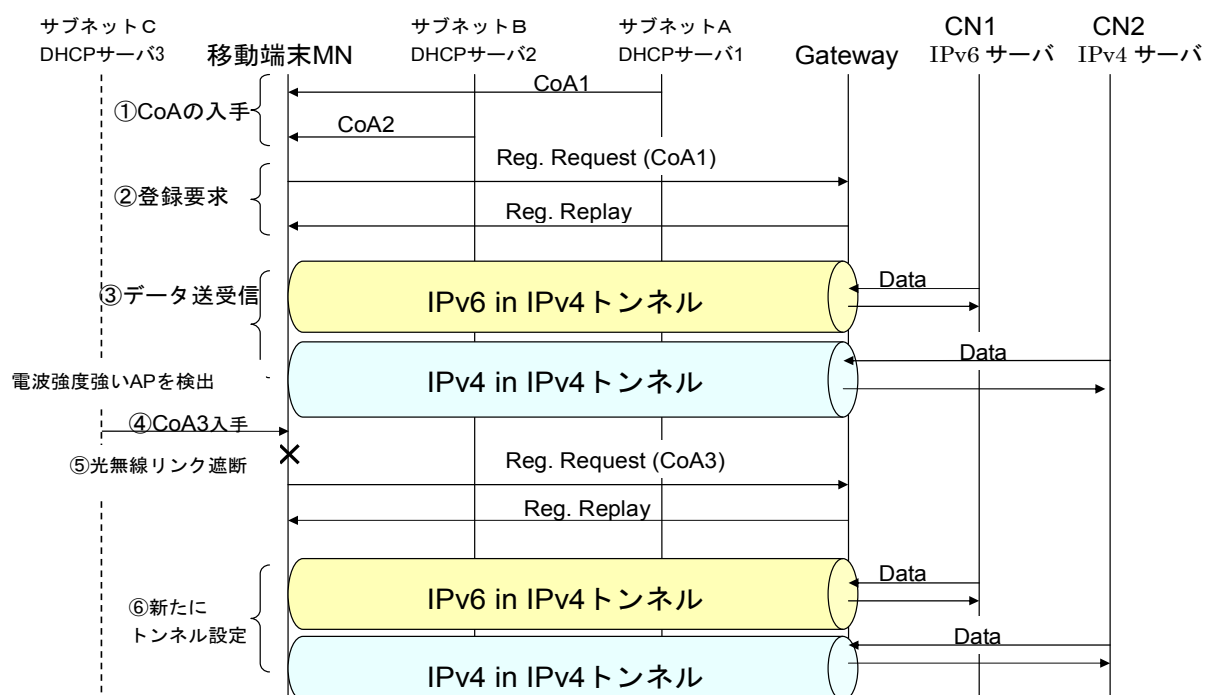


図 4-2-3 データフロー

- ① 移動端末 MN は、通信可能な各インターフェースで DHCP クライアントを起動し CoA を入手する。例えば、光無線インターフェースでは CoA1 並びに電波無線インターフェースでは CoA2 を入手する。
- ② MN は、光無線インターフェースが使用可能状態であれば、CoA1 をゲートウェイへ通知し登録要求を通知する。ゲートウェイは、MN の認証を行った後、MN へ登録応答を送信する。
- ③ MN とゲートウェイ間で登録要求/応答が正しく受信された場合、2 種類のトンネルを作成（修正）する。以降、MN と CN1 の通信は IPv6 in IPv4 トンネルを使用し、MN と CN2 の通信は IP in IP トンネル経由にて行う。
- ④ 通信待機状態になった電波無線インターフェースにおいて、電波強度の高い電波無線アクセスポイントを検出すると、そのサブネットから新たに CoA3 を入手する。
- ⑤ 仮に光無線リンクの遮断が起きた場合、直前に入手した CoA3 を使用することをゲートウェイへ通知する。
- ⑥ MN とゲートウェイ間で登録要求/応答が正しく受信された場合、電波無線インターフェースへ切替え、新たに CoA3 をトンネルへ設定する。以降、MN は新たなトンネル設定で CN1 と CN2 の通信を行う。

4-2-1-5 移動端末

一般的に、IP 層での移動管理方式に Mobile IP^{[1], [2]}がある。本方式は、Mobile IPv4 と互換を保つため、①IP in IP トンネルの使用 (RFC2003)、②ゲートウェイに対する登録要求の発行、登録応答の解釈 (RFC2002) は共通化している。

移動端末における実装概念図を図 4-2-4 に示す。

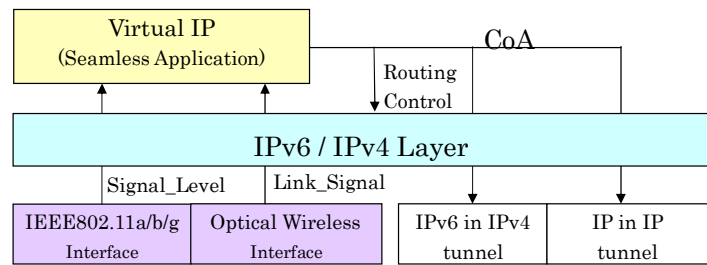


図 4-2-4 移動端末実装概念図

図 4-2-4 において、メイン制御は新たに提案する Virtual IP (Seamless Application) ブロックで実行され、物理通信デバイスの監視、IPv6 並びに IPv4 経路表制御、2 種類のトンネル制御を行う。実際の通信には、移動先のネットワーク環境で DHCP により取得した CoA を使用するが、上位層のアプリケーションレイヤには IP アドレスの変更を隠蔽し、固定 IP アドレスで常に通信を行うよう制御する。

Virtual IP における主な機能を列挙する。

1) 事前コンフィグレーション機能

通信待機中のインターフェースは、インターフェースの切替えに備え、DHCP を起動し CoA を予め入手する。

2) L2 シグナル監視機能

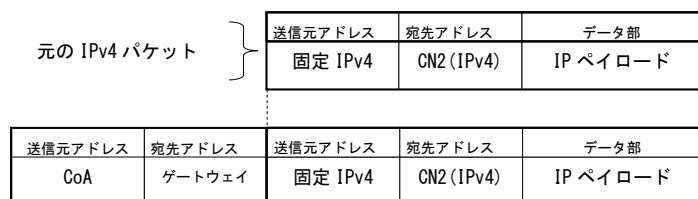
光無線インターフェースのリンク信号の On/Off を監視する機能、並びに電波無線強度の高いアクセスポイントの MAC アドレスを取得する機能がある。

3) トンネル制御機能

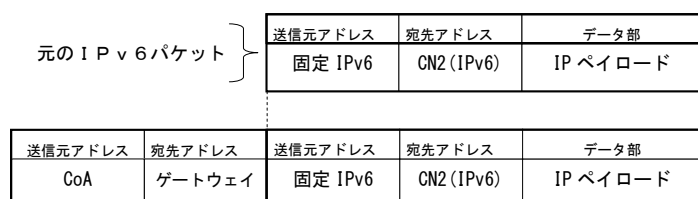
IP in IP トンネルと IPv6 in IPv4 トンネル後の IP パケットを図 4-2-5 に示す。トンネル後の IP パケットは、トンネルデバイスに指定した送信元アドレスと宛先アドレスを IP ヘッダとし、元の IP パケットを新たな IP パケットのデータ部へ収納 (カプセル化) し送受信する。

4) 経路表制御機能

移動処理の際、経路表を操作し IP パケットのルーティング制御と、実通信インターフェースの切替指定 (光無線か電波無線の指定) を行う。例えば、図 4-2-6 の番号 1 のように、ゲートウェイ宛 (192.168.10.230) へのインターフェース設定を実通信インターフェース (Eth0 : 光無線) へ指定する。切替える際には、Eth0 を Eth1 : 電波無線等へと変更する。



(a) IP in IP トンネル後



(b) IPv6 in IPv4 トンネル後

図 4-2-5 トンネル後の IP パケット

また、図中番号 4 にて、アプリケーションが送信するパケットはトンネルデバイス (tun1) を経由するようデフォルト設定する。

番号	Destination	Default Router	Genmask	Interface
1	192.168.10.230	192.168.20.254	255.255.255.255	Eth0
2	192.168.20.0	0.0.0.0	255.255.255.0	Eth0
3	127.0.0.0	0.0.0.0	255.0.0.0	Lo
4	0.0.0.0	192.168.10.230	0.0.0.0	tun1

図 4-2-6 IPv4 経路表修正

番号	Destination	Next HOP	Interface
1	::1/128	::	lo
2	2000::/3	::	sit1
3	::/0	::	sit1

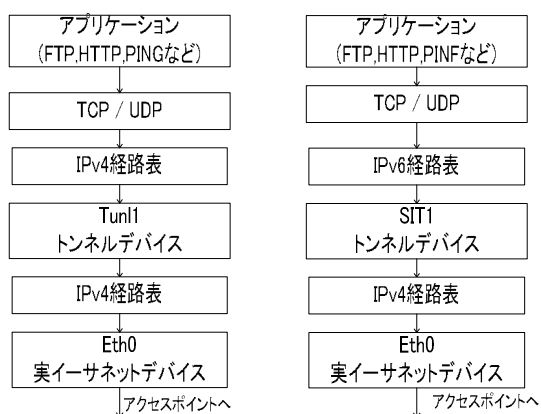
図 4-2-7 IPv6 経路表修正

図 4-2-7 の IPv6 経路表において、IPv6 パケットは番号 2 及び 3 が参照され、全パケットはトンネルデバイス sit1 を介し通信する。

アプリケーションレイヤからの IPv4 並びに IPv6 パケットフローを図 4-2-8 に示す。

図 4-2-8(a)において、IPv4 サーバへ Ping 要求パケットが送信された場合、まず IPv4 経路表が参照される。IPv4 経路表には、図 4-2-6 のようにトンネルデバイス tun1 を指定するため、宛先アドレスをゲートウェイへとカプセル化する。ゲートウェイ宛になった Ping 要求パケットは、IPv4 経路表が再度参照され、実通信デバイス Eth0(光無線)にて送信される。

図 4-2-8(b)の IPv6 パケットの例では、IPv6 サーバ宛の Ping 要求コマンドは、IPv6 in IPv4 トンネルデバイスへ転送するよう IPv6 経路表に指定する。そのため、IPv6 パケットはトンネルデバイス sit1 へ転送され、宛先アドレスがゲートウェイ (IPv4 アドレス) 宛にカプセル化される。従って、カプセル化した後のデータパケットは IPv4 経路表が参照され、IPv4 経路表に指定されている実通信デバイス Eth0 (光無線) を使用して、パケットデータが送信される。



(a) IPv4 パケット (b) IPv6 パケット

図 4-2-8 パケットフロー

4-2-1-6 ゲートウェイ

移動端末の移動先 IP アドレス (CoA) の管理とパケット転送を行う。MN の固定 IP アドレスを予め登録し、登録要求の認証時に参照する。移動処理に関するゲートウェイの概略フローを示す。

トンネル制御に関しては、移動端末と同様に、移動処理内で IP in IP トンネルと IPv6 in IPv4 トンネルを修正する。宛先アドレスを「CoA」、及び送信元アドレスを「ゲートウェイ」アドレスとし、各々カプセル化する。

経路表制御は、IPv4/IPv6 両経路表とも、移動端末の固定 IPv4/IPv6 アドレス宛へのパケットは、トンネルを使用するよう設定する。

なお、ゲートウェイは、IPv4 ルータと IPv6 ルータとしても機能し、Router Advertisement を定期的に出力する。

4-2-1-7 結果

表 4-2-1 に示す光無線部 (100Mbps 試作機) を備えた移動端末において、光遮蔽に伴うインターフェース切替時間を測定した。図 4-2-10 の様な移動端末において、光無線伝送路内に遮蔽物を置き強制的に通信遮断を行った。

表 4-2-1 光無線部仕様

項目	仕様
通信距離	50 [cm]
LED 波長	850 [nm]
通信速度	125 [Mbps]
I/F	100Base-Tx

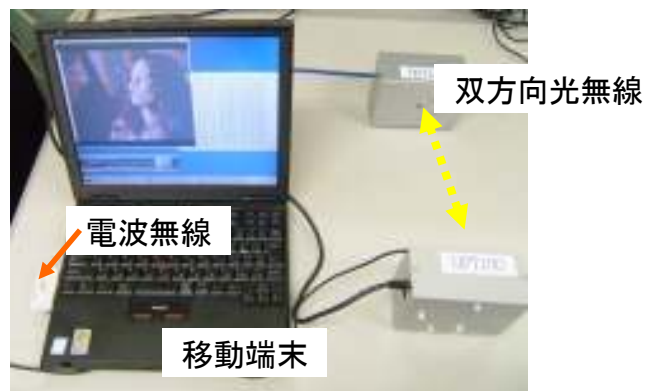


図 4-2-10 移動端末

本方式を用いた通信インターフェースの切替時間を測定した結果を図 4-2-11 に示す。縦軸は光無線リンクの遮蔽 (On/Off) を試行した回数、横軸は切替えに要した時間を示している。電波無線から光無線への切替えには平均約 2.4 [sec]、光無線から電波無線では平均約 3.8 [sec] を要し、従来方式における平均約 6 [sec] と比較して、約 2~3 [sec] 程度の改善が図られている。

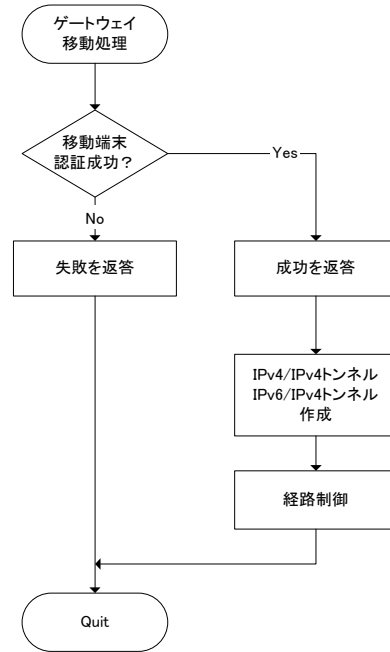


図 4-2-9 ゲートウェイの移動処理

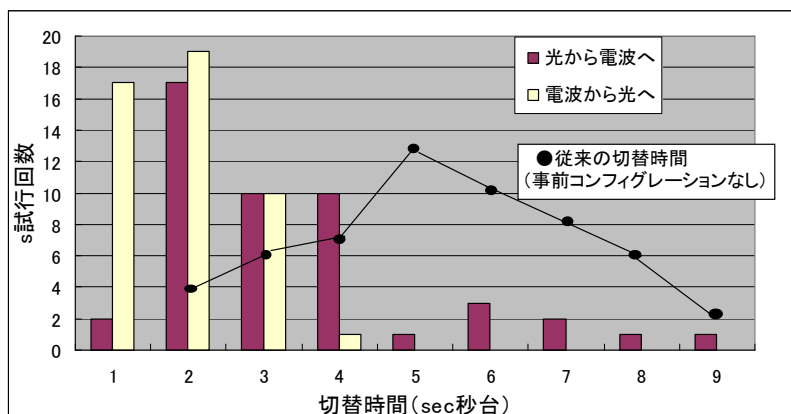


図 4-2-11 切替時間

しかしながら、DHCP 起動中に光遮蔽が生じた場合、5[sec]以上の切替時間を必要とする場合もあり、この切替時間の短縮が今後の課題である。この切替時間中、通信上の UDP パケットは損失する可能性が高いため、後述のシームレス・バリアフリー通信アプリケーションには、UDP パケットの損失を十分配慮した設計が要求される。

また、本シームレス・バリアフリー通信プロトコルには、

- 1) 光無線アクセスポイント間のローミング手法の確立
- 2) Mobile IPv6 を含めた制御手法の確立

といった検討を含め、汎用性の高いシームレス通信方式の実現が望まれる。

4-2-2 シームレス無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発

4-2-2-1 序論

シームレス無線通信プロトコルの実装実験の結果を踏まえ、同プロトコルの特徴を活かすアプリケーションの立案及び試作を行った。

シームレス無線通信プロトコルを実装したネットワークでは、光無線から電波無線あるいは電波無線から光無線のように伝送帯域が大きく変化する特徴がある。この特徴を生かしきれないアプリケーションの一つとして、ストリーミングアプリケーションがある。ストリーミングアプリケーションは、あらかじめ設定された帯域を目安に伝送量を決定する方法が一般的で、シームレスプロトコルのように動的に大きく切り替わる帯域に対応することができない。そこでストリーミングアプリケーションをシームレスプロトコルに対応する試みを行った。目標は、図 4-2-12 に示すようにシームレス無線通信プロトコルが選択した通信媒体に合わせて、映像の解像度、圧縮率などの映像パラメータをダイナ

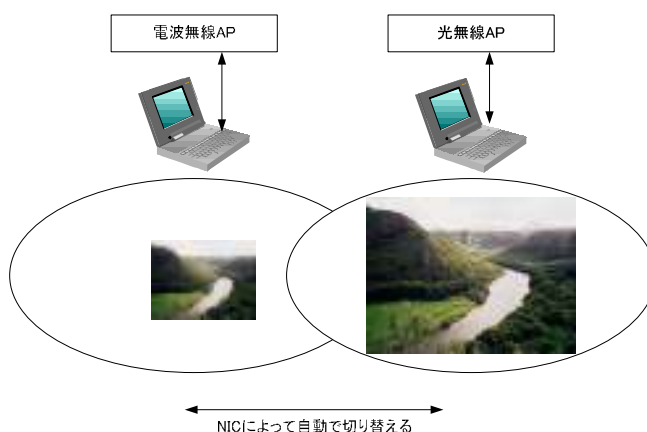


図 4-2-12 アプリケーションイメージ

ミックに変更し、伝送を継続することである。

研究開発にあたり、まず実現方式の検討を行い、検討結果を踏まえて試作を行った。これらについて報告した後、シームレス通信技術を商品に活用し、光無線通信の利便性向上にも寄与できるアプリケーションの試作を行った。以下、詳細を報告する。

4-2-2-2 仕様策定

本アプリケーションの最も重要な要素は、通信路の帯域に追従する機能である。。このため、既存の帯域追従方式を調査し、新案として表 4-2-2 に示す 3 つの手法を立案し検討した。

表 4-2-2 切り替え方式比較

名称	内容
a) ファイル切り替え方式	2 つの伝送帯域（圧縮率）の異なるファイルを用意し、適宜切り替えて送信する方式。
b) トランスコード方式	オリジナルの映像を出力する時点でビットレート（圧縮率）を変更する方式
c) デュアルコーデック方式	2 つのエンコード機能を設け、適宜切り替えて送信する方式

これらの方式のうち、まず、VTR 機器への適用性が高く今後の業務展開への反映が容易なファイル切り替え方式に着目し開発を行うこととした。試作を完了し、評価を行った後、更に映像ソースをリアルタイム入力に対応することも目的とし、b) トランスコード方式の実装も試みた。それぞれの試作概要、結果について次項以降で説明する。

4-2-2-3 MPEG4 によるファイル切り替えアプリケーション

本試作では、低域から高域まで幅広くサポートできる MPEG4 を圧縮方式として用いて試作を行った。

クライアントは、まず使用中の通信インターフェースの種別を判定する。判定結果に従い、光無線用通信インターフェースが選択されれば高帯域の映像を、電波無線用通信インターフェースが選択されれば低帯域の映像をサーバに要求する。サーバは電波無線用低帯域映像ファイルと光無線用高帯域映像ファイルを持ち、クライアントの要求に従いどちらかのファイルから映像データを読み出し、クライアントに送信する。クライアントは、得られた映像データを復号し、画面表示を行う。

ここで MPEG4 は、図 4-2-13 に示すように基準画像フレーム(I ピクチャ)を先頭とし、過去のフレームから一方向のフレーム間予測を行い、差分を符号化した P ピクチャと



図 4-2-13 MPEG4 フレーム

過去と未来のフレームから二方向のフレーム間予測を行い、差分を符号化した B ピクチャを連続配置することで圧縮率を向上する圧縮方式である。

通信インターフェースの切り替えは任意の時点で発生するが、切り替え時の送信フレームによっては、映像の切り替えを行えない場合がある。例えば、I ピクチャの直前で通信インターフェースが切り替わった場合、切り替え直後は I ピクチャから再生することにより連続した映像フレームを送信することが可能である。一方、P ピクチャや B ピクチャの位置で通信インターフェースが切り替わると、最も近い時間に読み込んだ I ピクチャまで戻らなければフレームの復元ができない。ここでは、図 4-2-14 に示すように、通信インターフェースが切り替わった時点以降の I ピクチャの位置に同期して映像データへ切り替える方法を採用し検証することとした。

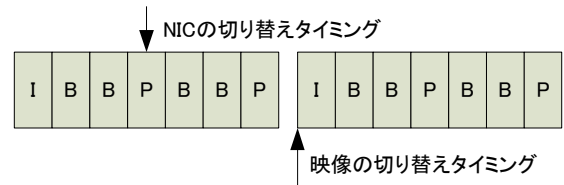


図 4-2-14 切り替えタイミング

また、主観評価を容易にするため、帯域の変化によって解像度が変化する仕様とした。



図 4-2-15 低帯域画面

低ビットレートの場合の画面を図 4-2-15 に、高ビットレートの場合の画面を図 4-2-16 にそれぞれ示す。

本試作は、当初の目的通り、通信インターフェースによって解像度の異なる同一内容の映像が表示できることを確認した。しかし、切り替え動作が I ピクチャを待ってから行われるため、1~2[sec]程度ディレイが発生する課題が残った。



図 4-2-16 高帯域画面

4-2-2-4 JPEG によるトランスコードアプリケーション

MPEG4 を用いた試作の課題であった切り替えのディレイは、圧縮方式に MPEG4 を用いたことに起因する回避困難な課題である。そこで本試作は、圧縮方式を JPEG に変更し試作を行うこととした。JPEG は、前後フレームの相関関係に関する圧縮を行わないため、フレーム毎に切り替えタイミングを設けることが可能になる。また、セキュリティ市場におけるネットワーク監視カメラでは、圧縮方式に JPEG を採用するケースが圧倒的に多く、本試作を生かす機会を得やすいと考えられる。更に本試作ではサーバに DVC を接続し、リアルタイム映像をソースとしたアプリケーションとして動作する試みも行った。

ソフトウェアのブロック構成を図 4-2-17 に示す。図 4-2-17 において、クライアントはサーバに対してデータ要求を送信する。このとき、JPEG の品質を表す Q 値を同時にサーバに伝送し、サーバはまず Q 値を保存する。その後映像ソースである DVC から DV データを受信し、DV デコーダを用いて RGB データに変換する。次に JPEG エンコー

ダを用いて先に保存した Q 値に従い RGB データをエンコードする。次にエンコードされた JPEG データを UDP パケットに分割してクライアントに送信する。一方、クライアントは、分割されたデータを揃え、1 枚の JPEG フレームの作成を試みる。これが成功した場合は、デコード後、画面に表示し、再びサーバにデータ要求パケットを送信する。このとき同時に送信する Q 値を前回のものより多少高い値を指定する。逆に失敗した場合、次回の Q 値を低く設定する。これにより帯域に余裕があれば Q 値を向上し続けるため画質は向上するが、帯域に余裕がなくなると Q 値を下げ、帯域確保を試みる。換言すれば光無線を用いれば高画質の映像が、電波無線を用いれば低画質の映像が得られ、通信が途切れることがない。更に電波無線を用いた場合、他の機器との干渉が発生し、帯域が一定に保たれないことが知られているが、本試作ソフトウェアは、フレーム毎に画質変更を図るため、電波伝送路上の帯域の揺らぎにも追従することが可能となった。

今回は方式検討のため、PC を用いて実験を行った。このため、サーバで行う JPEG エンコードの負荷が極めて高く、送信できる映像は毎秒 15 フレーム程度であった。商品化の検討に当たっては JPEG エンコードを DSP や専用ハードウェアを用いて高速化する手法の検討が必要である。

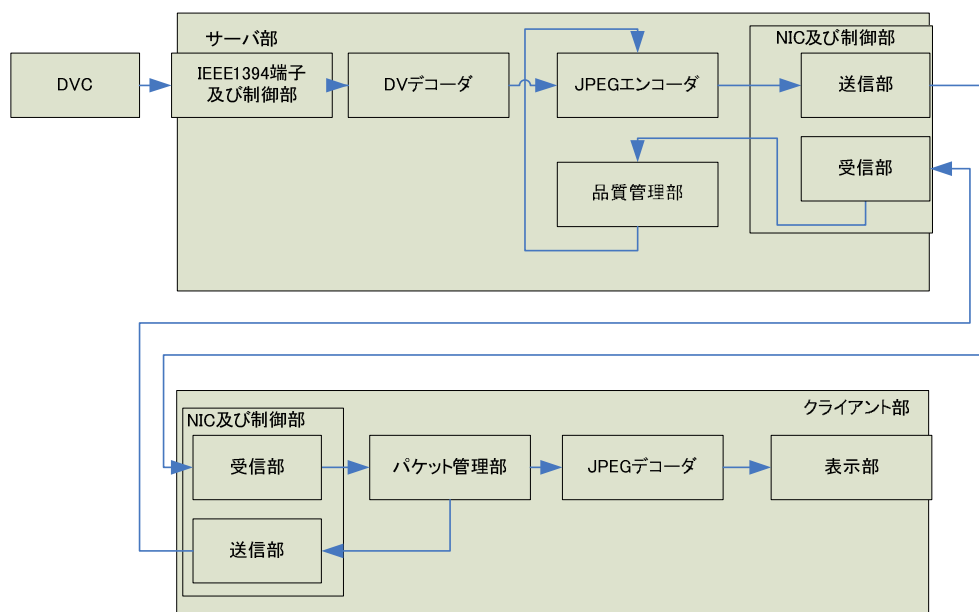


図 4-2-17 高ビットレート画面

4-2-2-5 光無線アプリケーション

前項までで MPEG4 及び JPEG を用いたシームレスアプリケーションの検討結果について述べてきた。検討結果を踏まえ、今後商品化を目指す場合、更にユーザメリットの明確化、GUI の整備が必要である。そこでこれらの課題に関して、本委託研究テーマの成果を応用した解決手段について検討を行い、有効な手法について試作を行った。

以下にユーザメリット向上に寄与する DVC アプリケーション及び操作性向上に寄与するリモコンへの応用について説明する。

a) DVC アプリケーション

本アプリケーションは、家庭内等において、DVC 所有ユーザが撮影した映像を TV 上で表示する時の操作性を向上するアプリケーションである。

光無線を用いれば DVC のように高い帯域を必要とするデータ伝送の無線化が可能である。既存の商品では、DVC で撮影した映像を TV で再生する場合、DVC と TV を IEEE1394 ケーブルで接続、TV の入力を切り替える、DVC の再生を開始する、と言った手順を踏む必要がある。また、DVC を切断した場合にも、元の TV 映像を見るため、ユーザは TV の入力切り替えを行う必要があり、煩雑さを伴う。DVC 及び TV に光無線送受信機を設置することでケーブル接続する必要はなくなるが、入力切り替え等の操作は必要である。

そこで PC を TV の代用とし、この煩雑な操作を排除し、ユーザの利便性を考慮したアプリケーションを試作した。

アプリケーションは定常状態として TV 番組を表示する。表示する番組は、本アプリケーションのデモンストレーションを行う場合に備え、内蔵の映像ファイルを再生することで代用した。アプリケーションは同時に光無線送受信機を監視する。光無線送受信機の接続を検出した場合、光無線伝送路にて DVC 内の映像データの伝送を開始し、画面上に映像データを表示する。逆に切断を検出した場合、接続前に表示していた映像データの表示に切り替える。

上記アプリケーションを試作した結果、光無線接続の有無によって表示される映像情報が切り替わった。本アプリケーションを DVC 及び TV に搭載すれば、操作性の向上が図れることを確認した。図 4-2-18 にアプリケーション画面を示す。

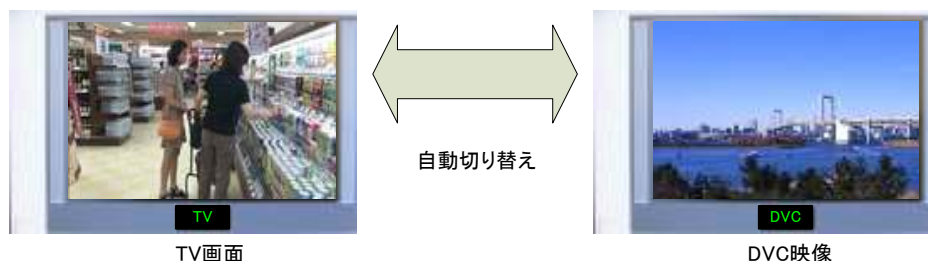


図 4-2-18 DVC アプリケーションイメージ

b) リモコンへの応用

後述のサブテーマ 3 において、全方位サーチに用いるための画素は少ないが、高速に画像を取得できるローコストの CMOS センサの検討を行っている。同センサは、撮像結果から基準発光源の映像のみを抽出する機能と抽出した基準光源映像の撮像範囲内における位置情報を取得する機能を有している。この機能を連続して動作することで基準発光源の位置情報を連続取得、すなわち基準発光源の移動の軌跡を取得することが可能である。これを応用して、基準発光源の移動情報を用いて DVC を制御するアプリケーションを試作した。システム概要を図 4-2-19 に示す。

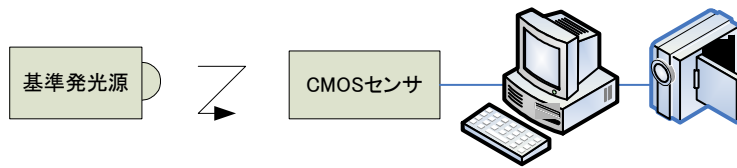


図 4-2-19 CMOS センサアプリケーションシステム構成

ユーザは、発光中の基準光源を CMOS センサの撮像範囲内で移動する。基準光源が発した光無線信号は、CMOS センサによって撮像され、2 次元の基準光源の位置情報に変換される。PC は、この位置情報を連続取得し、基準光源の移動軌跡として蓄積する。更に PC 上で軌跡情報を予め規定したベクトル情報で近似し、これを接続した DVC に制御コマンドに関連づける。今回、近似方式を上下左右のいずれか 1 方向のみを検出するアルゴリズムとした。PC は近似後のベクトル情報をそれぞれ上方向は再生、下方向を停止、左方向を巻き戻し、右方向を早送りのように AV コマンドへ変換し DVC に送信する。これによりユーザは CMOS センサの撮像範囲において基準発光源を上下左右に振るというジェスチャを行うだけで DVC を制御することが可能となった。すなわち、指先が不自由なユーザでも容易に操作が可能なりモコン、あるいは真っ暗な部屋でボタンの配置の確認が困難な状況であっても容易に操作が行えるリモコンの可能性が見出せた。試作アプリケーションの画面を図 4-2-20 に示す。



図 4-2-20 アプリケーションイメージ

4-2-2-6 まとめ

MPEG4 を用いたファイル切り替え方式は、フレーム間の相関性に対して圧縮を施すため、切り替えタイミングの自由度は損なわれるが、MPEG4 の特徴である低帯域から広帯域までサポート可能な自由度の高さが生かされ、電波無線を用いた場合はでも比較的高い画質を確保でき、光無線を用いた場合はより優れた画質を表示することが可能であった。一方 JPEG を用いたトランスコード方式は、MPEG4 に比べると画質が多少劣るが、フレーム毎に切り替えが可能であるため、切り替えの自由度を高めることが可能となった。更に切り替えの自由度を活かし、電波無線の帯域の揺れに追従することも確認できた。

また、DVC アプリケーション及びリモコンへの応用を試作したことにより、操作性向上が図れることを確認した。

シームレスアプリケーションだけでなく、DVC アプリケーションやリモコンを併設すれば、操作性向上に止まらず、光無線の適用分野の拡大も図ることが可能であると考えられる。

4-3 超小型光無線伝送方式の研究開発【サブテーマ3】

4-3-1 超小型光無線伝送制御方式の研究開発

サブテーマ3では、携帯機器搭載可能な超小型システムが構築可能であることを実証する目的で、各要素開発を平行して実施した。本研究では、ビーム光をミラーアクチュエータにより空間走査する事により、装置の小型化、高速化を目指した。最終目標実現のために、以下の3項目について平行して研究・開発を行った。

- ・システム構成、光軸制御方式の確立

- ▶本研究では、広い空間を走査するために、限られたエリアを高精度に光軸の制御を行うミラーと広い範囲を高速に駆動する二段アクチュエータ構造を採用した。ビーム光をミラーアクチュエータにより空間走査を可能とするシステムの実現、ビーム光を正確に通信相手に制御する方式の開発、2台の光通信器がお互いにビーム光にて光軸をあわせる方式の開発などを、検討目的にあわせたシステムを構築して研究・開発を行った。1.25[Gbps]のデータ伝送、光軸制御の実証をそれぞれ行った。

- ・広範囲を高速にサーチする方式の確立

- ▶広視野角レンズ付新機能CMOSセンサによる、高精度・広範囲な通信相手を探すアルゴリズムの研究・開発、広い範囲を高速に駆動する二段目のアクチュエータ構造の開発を行った。上期開発した基本アルゴリズムによって駆動系を動かすことにより、950[nm]のパイロット光に対し、150[deg]の全方位にわたり、2端末間における相互サーチ及び遮断時の親機切り替えを検討し、最長でも0.8[sec]での切り替えが可能であることを実証した。

- ・超小型光無線モジュールの実現

- ▶携帯機器搭載の可能性検証のため、超小型光無線モジュールを開発した。また、独自のレンズ、プリズムアライメント手法により、アクチュエータを含まないモジュールサイズとして、16×16×11[mm]の大きさを実現した。

上記の開発技術により、最終目標である1Gbps級の伝送速度、10[m]の伝送距離、1[cm³]のサイズについての実現が可能であることを示した。

4-3-1-1 光軸制御方式の検討

a) 制御方式概要

本システムでは光をビームにして通信を行うため、ビームの方向を制御することが重要な開発要素である。ビーム方向の制御方式として発光素子から出た光をレンズでビームにし、ミラーアクチュエータに反射させ、そのミラーの方向を制御することで出射する光の方向を制御するものとした。

ビーム方向を制御するためのサーボ方式としては、通信相手装置の送信光位置を自装置で検出し、ビーム光を検出した方向に向ける開ループ方式と、通信相手装置からのビームずれ情報（位置ずれ情報）をフィードバックし、ビーム方向制御を行う閉ループ方式がある。

前者の開ループ方式は、簡易なシステム構成で実現可能であるが、構造的に高い精度の機構系が求められ、しかも、移動した場合に追従が出来ない。一方、後者の閉ループ方式は、高速な信号伝送と同時にビーム位置制御のフィードバック信号伝送も行う必要があるが、ビーム光が相手装置に照射されていることを常に確認でき、移動した場合でも追従が可能である。更に、閉ループ方式には、相手装置から送信される位置ずれに関するコマンド化された情報を受信することによって、位置ずれを検出する方法1)と、相手装置から照射される光の受光レベルの変化を検出し、位置ずれを演算する方法2)がある。前者のコマンドによる方法では、コマンドの間隔によってサンプリング周波数が制限される。後者の受光レベルによる方法では、サンプリング周波数は、A/D・D/A変換部のサンプリング速度にのみ依存し、数100[kHz]程度まで高速化することが可能である。

本研究では、移動しながらの通信も視野に入れているため、応答速度が高速である受光レベルによる閉ループでのサーボ方式を採用した。

図4-3-1に光無線モジュールの制御ブロックの回路構成を示す。制御フィルタはDSP内部にソフトウェアサーボとして実装した。

光軸調整用に4分割PD (4chPD)を用い、集光レンズにより形成されたパイロット光のスポットが中心に位置するように、ミラーアクチュエータを制御する。

4chPDにて得られた受光信号は、受光アンプにて増幅される。通信相手からのパイロット信号は外来光の影響を低減するため特定周波数にて変調されており、受光アンプではその周波数にて高S/Nの受信ができる設計となっている。また、検波回路部ではパイロット信号を抽出し、その受光レベルを出力する回路構成となっている。4チャンネル分の検波回路によって4chPDの個々のPDの受光レベルが検出され、その検波出力をA/D変換 (16bit) し、DSP内部での制御演算により制御出力を算出し、D/A変換 (16bit) によりミラーアクチュエータ2軸分の制御信号が生成される。この制御信号に基づき定電流駆動回路にてミラーアクチュエータを駆動している。ミラーアクチュエータのインダクタンス成分の影響を除去するために、定電流駆動回路を採用し高速応答を実現している。

これらの回路において、集光レンズにより形成された4chPD面上でのパイロット光のスポットと検波回路部の出力の関係を図4-3-2に示す。4chPDの各素子とスポットのサイズは概ね図のような関係となっている。

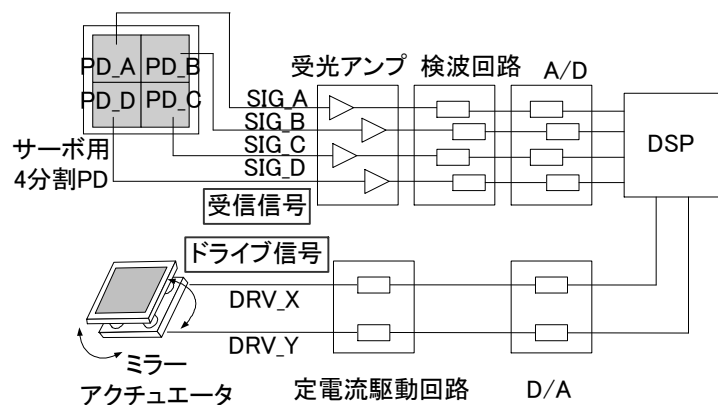


図 4-3-1 制御ブロック回路構成

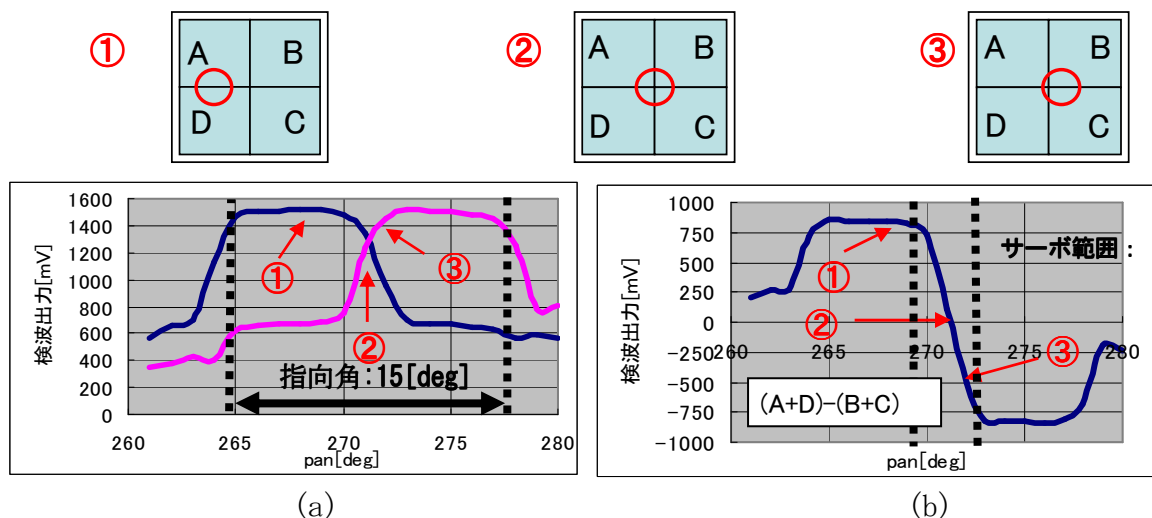


図 4-3-2 4chPD受光特性

① 光のスポットが左半面にある。

スポットが左反面にあり、素子サイズよりもスポット径が小さいため、図の近傍では、(A+D)の出力値は変わらず、(B+C)の出力値はノイズフロアとなる。

② 光のスポットが中央にある。

スポットが中央にあり、①の状態よりも左半面の素子への光量が減るため、(A+D)の出力値も減少し、(B+C)の出力値と同一となる。

③ 光のスポットがわずかに左反面にかかっている。

さらに、(A+D)の受光信号レベルは減少し、(B+C)の受光信号レベルが増大する。

前記のような状況において、(A+D)-(B+C)の演算をすることにより、図4-3-2(b)のような特性を得ることができる。この特性は一般的にSカーブと呼ばれ、図中央部の直線性の良い部分を用いて制御を行っている。

b) ミラーアクチュエータ

ミラーの駆動方式として、複数の方式を検討し、電磁コイルアクチュエータを採用した。電磁コイルアクチュエータは、±15[deg]程度のミラー偏向角（反射によりビーム偏向角±30[deg]程度）を得ることができるが、X・Yの2軸を駆動するためには、比較的大きな駆動電流を流す必要がある。携帯機器への組み込みなどのアプリケーションを考えた際は消費電流が問題になると予想される。本研究では、電磁コイルアクチュエータを採用すると共に、低消費電流化に取り組んだ。

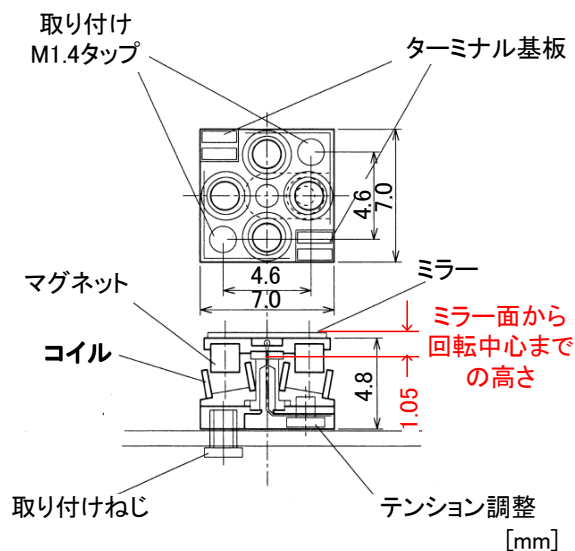


図 4-3-3 ミラーアクチュエータ

ミラーアクチュエータの構成図を図4-3-3に示す。ミラー傾斜板の中央を糸で引っ張り、支点となるシリコンゴムに軽く押し付ける構成になっており、4つのコイルーマグネット間に作用する吸引、反発力によりミラー傾斜板を2次元に偏向制御を行うものである。シリコンゴムのダンパー効果により良好な周波数特性が得られるという特徴があるが、一方、ばねに抗して傾斜させるため、傾斜維持のためには電流を連続して通電させる必要がある。この消費電力を低減させるために、シリコンゴム形状を $\phi 1.2 \times t 0.5$ [mm]から $\phi 0.6 \times t 0.5$ [mm]に変更し、さらに押し付け圧を低くしてバネ定数を低下させ、最終的に約3倍の感度向上が達成されている。消費電力としては約1/9の低下となる。この際の共振周波数変化は、177 [Hz]→101 [Hz]であり、Q値、2次共振周波数に大きな変化はなく、良好な周波数特性を示す。シリコンゴム押し付け圧を変化させ、1次共振周波数 (f_0) を変化させた時の駆動電流 0.7 [mA_{0-p}]でのゲイン周波数特性を図4-3-4に示す。1次共振周波数 (f_0) の低下とともに、低域のゲインが高くなり、感度が向上している。

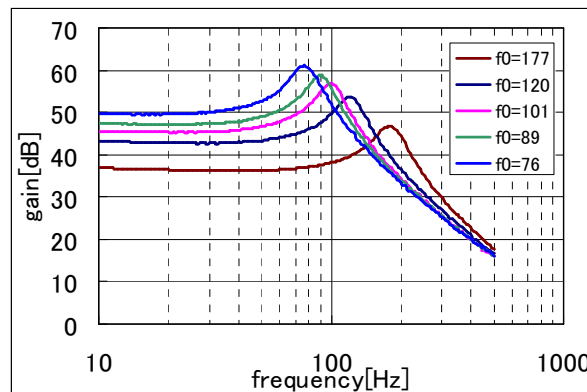


図 4-3-4 ゲイン周波数特性

このアクチュエータの周波数特性より、アクチュエータを一次共振点が約 100 [Hz]の二次系としてモデル化し、このモデルを用いてサーボフィルタを設計した。設計値はゲイン交点：260 [Hz]、位相余裕：40 [deg]とする。設計したフィルタの一巡伝達関数を図4-3-5に示す。

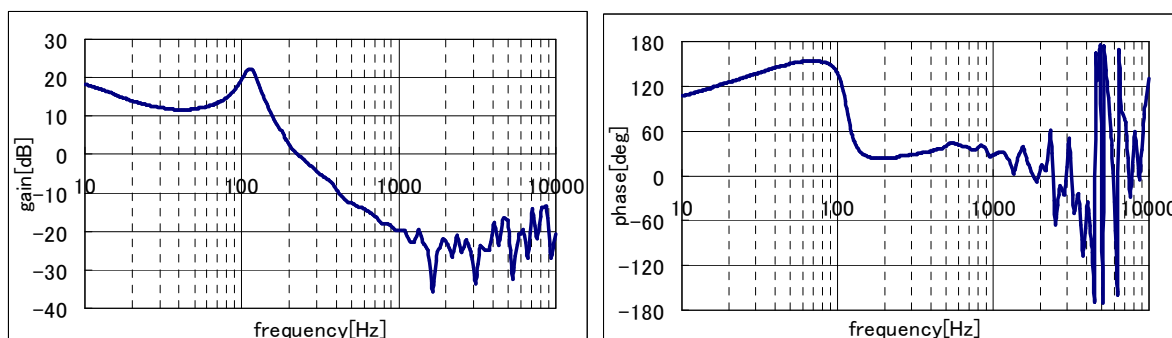


図 4-3-5 一巡伝達関数

ゲイン交点での実測値の誤差はゲイン約-2 [dB]、位相約14 [deg]となった。これは、特性のモデル化誤差（ゲイン約0.5 [dB]、位相約6.5 [deg]）に加え、検波回路部、及びA/D・D/A変換部での位相遅れが原因であると考えられる。

c) 基礎検証モデルによる検討

本研究では小型化のために、ビームスプリッタを用いて送信光と受信光の光軸を同軸とし、光軸をミラーアクチュエータによって制御する仮想同軸構造を採用した。光学部の基本的な構成、光学部品の配置は図 4-3-6 となっている。この構成、配置を基本として、様々な課題、開発項目を検討するために、検討目的別に片方向基礎検証モデルと双方向基礎検証モデルの 2 種類を開発し、システム検討を行った。以下、それぞれの基礎検証モデルについて詳細を述べる。

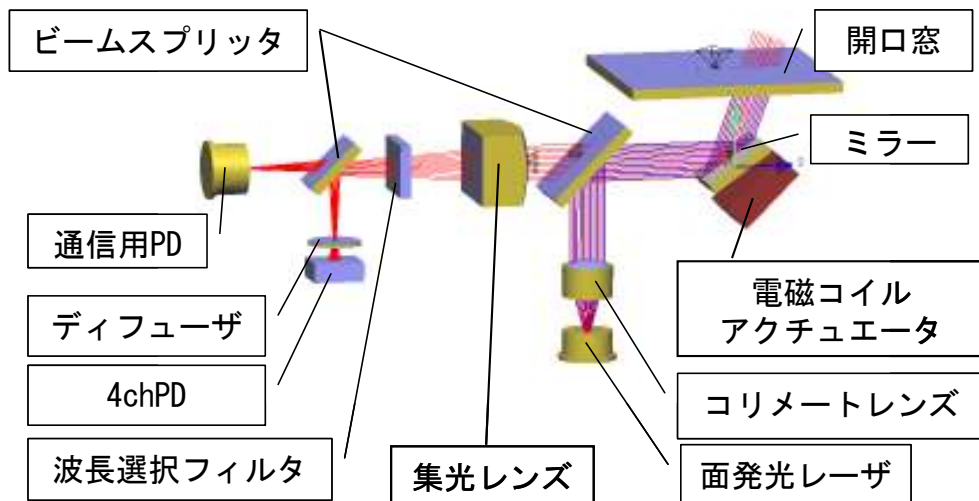


図 4-3-6 同軸構造の基本構成

① 片方向基礎検証モデル

仮想同軸構造の実証確認、ミラー制御方式の検討、信号処理を含むシステム動作の確認を目的として、片方向基礎検証モデルを開発した。図 4-3-6 における基本構成において通信用 PD を搭載しない構成がデータ送信器となる (図 4-3-7 参照)。受信器としては、データ受光部及びパイロット光源によって構成される。

本構成による光学的構造、信号処理を含むシステムにより、受信器に対する送信器の追従・通信性能を評価し、仮想同軸構造とミラー制御による光軸制御が実現可能であることを実証した。

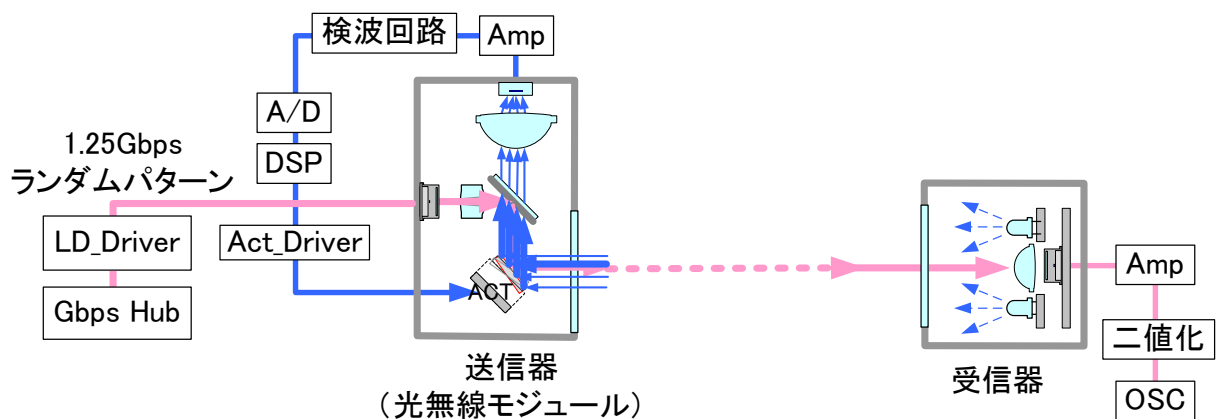


図 4-3-7 片方向基礎検証モデル

片方向基礎検証モデルを用いて、開発技術の有効性、将来の事業性を検討すべく、光ハイビジョン伝送システムへの応用を検討し、実証を行った（図 4-3-8 参照）。その結果、伝送性能は現行商品と同等ながら、体積比で 1/10 以下、光軸調整の時間が 1[sec] 以下と大幅な改善が可能となることを実証した。特に、1[sec]以下の光軸調整時間は利用者に光軸調整を行っていることを感じさせないレベルにあることが確認された。

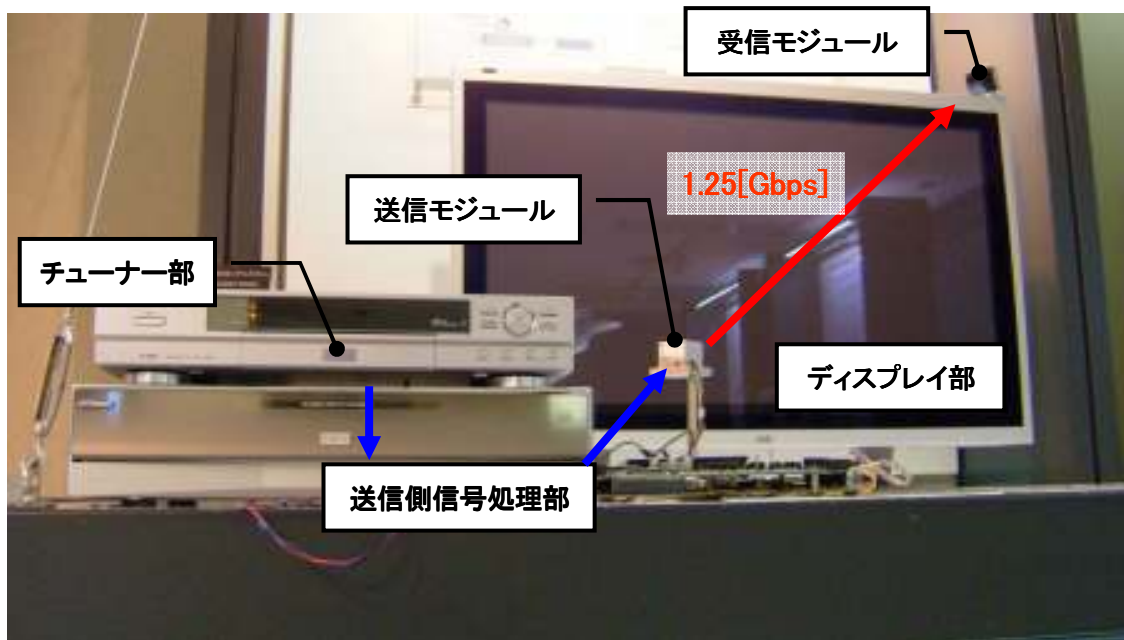


図 4-3-8 光ハイビジョン伝送システムへの応用例

② 双方向基礎検証モデル

一対の仮想同軸構造の通信器による、ビーム光対ビーム光の光軸制御方式の検討、光軸制御用信号とデータ伝送信号の送信方式検討、全二重動作（送受光同時動作）時の相互干渉などの確認を目的として双方向基礎検証モデルを開発した。図 4-3-6 における、基本構成を実機にした形態となる。

4chPD の直前に実装されるディフューザと集光レンズにより構成される斜入射検出光学系は、ビーム対ビームの光軸制御を可能とするためには必要不可欠な要素技術である。本システムのように、入射ビームが狭指向性を有する場合には、入射位置が水平シフトした際に 4chPD 上のビームスポットは中心位置からシフトし、通信相手と光軸が合致しているにもかかわらず、電磁アクチュエータの偏向動作を行ってしまうことから、サーボ動作が不安定となってしまう。この課題を解決する斜入射検出光学系を新規開発し、同光学系を搭載した双方向基礎検証モデルにより、双方向のビーム光軸制御が可能であることを実証した。

斜入射検出光学系の概略を以下に示す。

図 4-3-9 に示すように、従来の方向制御光学系では、ビームスポットを集光レンズのデフォーカスによって形成する。そのため入射ビームの強度に偏りがある場合や、通信相手の動きにより入射ビームが軸外に水平移動した場合、4chPD 上のビームスポッ

トは中心位置からシフトし、通信相手との光軸が合致した垂直入射状態であるにもかかわらず位置ずれ信号を発生してしまう。

一方、開発した斜入射検出光学系では、図 4-3-10 に示すように、集光レンズの焦点位置に 4chPD を配置し、集光レンズと 4chPD の間にディフューザを挿入する。これにより、斜入射検出光学系に垂直入射したビームは、入射位置や強度分布にかかわらず、すべての光が集光レンズで 4chPD の中心方向に収束した後、ディフューザで拡散し、一定のスポットサイズで 4chPD 中心にスポットを形成する。そのため、4chPD は位置ずれ信号を発生することなく、自身の光軸を維持することが可能となった。

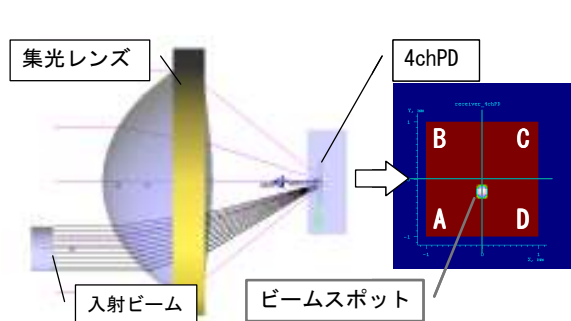


図 4-3-9 従来の方向制御光学系

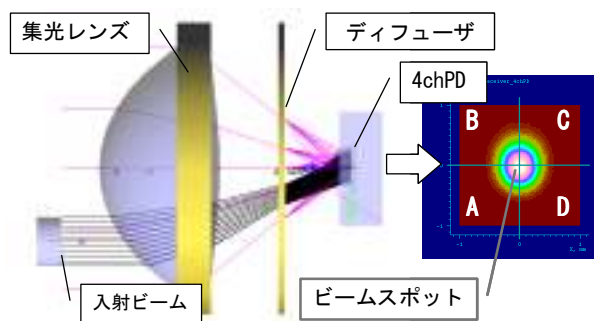


図 4-3-10 斜入射検出光学系

さらに、双方向基礎検証モデルでは、同一の光軸において全二重の通信が可能な設計となっており、発光デバイスである面発光レーザの発光波長を 780[nm]と 850[nm]の 2 波長とし、通信相手の波長と異なる波長とすることにより光学的アイソレーションの確保を行っている（詳細は次項にて記載）。1.25[Gbps]のデータ伝送としては 4.6[m]でのエラーフリー伝送を確認した。システム設計値の 10[m]に対して不十分な結果であるが、解析の結果、送信光軸と受信光軸とのズレが本システムの伝送性能に大きく影響を与えており、双方向基礎検証モデルでは光軸調整精度の限界から性能向上が図れず、より高精度な光軸調整を可能としたミニモジュールにより詳細な評価を行うこととした。

全二重伝送を達成するために必要な受発光の干渉を低減することも達成しており、伝送性能への影響を考慮しなくても良いレベルであることが確認された。また、1.25[Gbps]の高速データ信号より光軸制御用の信号を検出する必要があるが、高速データ信号上に、低周波の制御用パイロット信号を重畳することにより実現できることを確認した。

d) ミニモジュールによる検討

基礎検証モデルの基本構成（図 4-3-6 参照）をもとに、ギガビット級の双方向ビーム対ビーム通信を実現する双方向通信モデルを試作した。

表 4-3-1 に基本仕様を、図 4-3-11 に試作モデルをそれぞれ示す。

表 4-3-1 双方向通信モデルの基本仕様

伝送速度	1.25[Gbps]
伝送距離	10[m]
通信範囲	±30[deg]以内
波長	850[nm]/780[nm]のいずれか一波長
放射パワー	0.5[mW]以下(レーザ安全基準-1 Class1)
放射角	1.5[mrad](約0.1[deg]) at $2\theta \cdot 1/2^*$
受光指向角	12.2[mrad](約0.7[deg]) at $2\theta \cdot 1/2^*$
ミラー可動範囲	±15[deg]

*光量 50%の広がり角

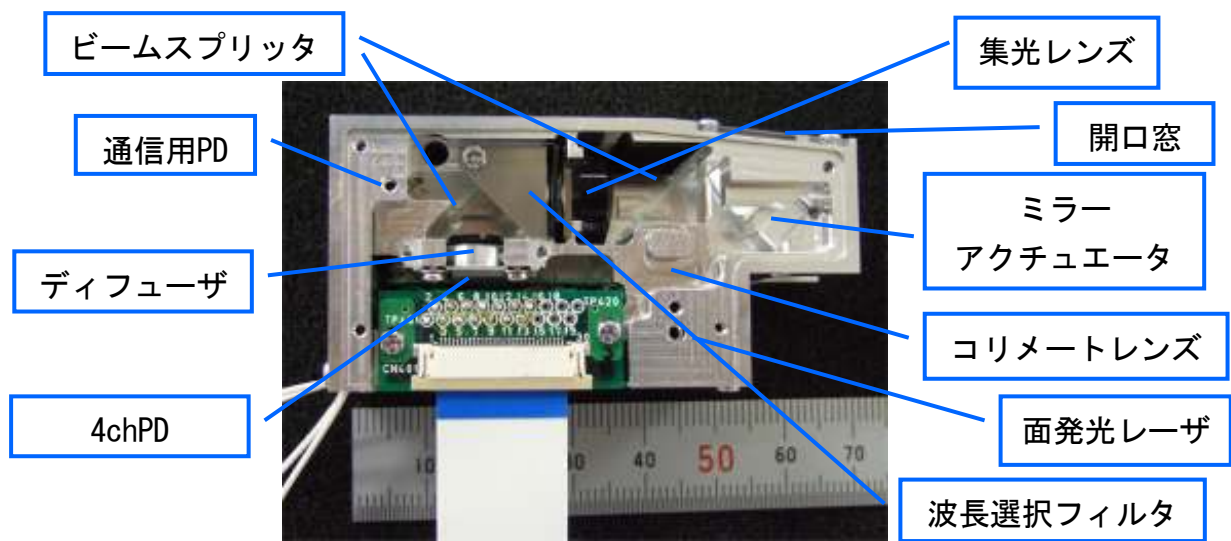


図 4-3-11 双方向通信モデル

① 電氣的・光学的アイソレーションの検証

双方向通信を行う試作モデルでは、送受信間の電氣的・光学的干渉の影響を排除し、純粋な双方向通信性能を検証するために、面発光レーザと通信用PDを離して配置するとともに、各部品を固定する光学ベースの隔壁によって電氣的・光学的に分離した。

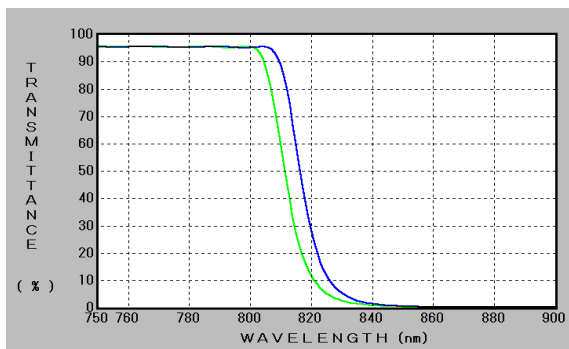


図 4-3-12 850[nm]帯阻止フィルタ

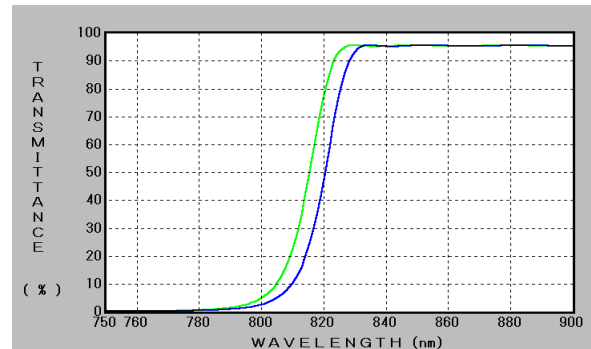


図 4-3-13 780[nm]帯阻止フィルタ

また、面発光レーザの発光波長を、自身と通信相手に異なる 780[nm]と 850[nm]の 2 波長とし、4chPD と通信用 PD の前段に設けた波長選択フィルタで自身の戻り光を遮断し、光学的アイソレーションを確保した。図 4-3-12、4-3-13 に、850[nm]/780[nm]帯 阻止の波長選択フィルタの分光特性をそれぞれ示す。

② 高精度な調整組立手法の検討

試作した双方通信モデルは、表 4-3-1 の基本仕様を示すように送信光の放射角が 1.5[mrad] (約 0.1[deg])と非常に狭いため、双方向通信を確立するためには、送信光と受信光と、方向制御を行う 4chPD への入射光の 3 軸を高精度に合わせる必要がある。

そこで、本試作モデルは、光ピックアップの高精度加工・調整・組立技術を用い、光学ベースや各光学部品を高精度に製作・組立・固定するとともに、各受発光素子の位置を微調整可能な XY2 軸の小型調整機構内蔵し、3 軸の高精度な光軸調整を実現した。

この高精度な 3 軸調整機構は、双方向通信を実現するとともに、量産組立時の光軸調整マージンの試算や、環境変化による光軸ずれの補正方法の検討など、各種量産課題の検証を可能とする。

③ 追従性能

双方向通信モデルの追従性能としてサーボ動作について評価した。図 4-3-14 に入射ビームの傾きに対する S カーブ特性を示す。

本試作では、ミラーアクチュエータの可動範囲を±15[deg] (ビーム偏向範囲：±30[deg])とした。

評価の結果、距離 10[m]まではビーム偏向範囲±30[deg]で入射ビーム光に対して追従可能であることを確認した。

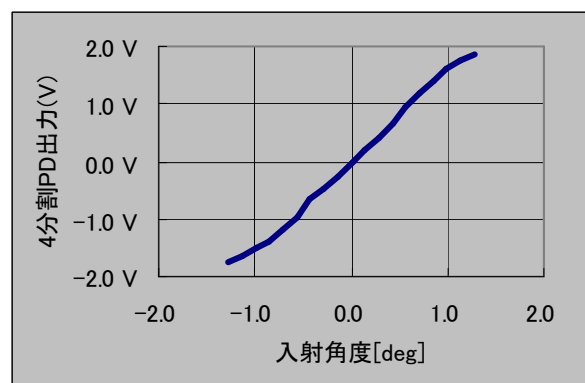


図 4-3-14 双方向通信モデルの S カーブ特性

④ 伝送性能

試作した双方向通信モデルを用いて、1.25[Gbps]の疑似ランダム信号によるデータ伝送を行った。

結果、図 4-3-15 に示すように十分な開口をもつ良好な受信信号のアイパターンを得た。

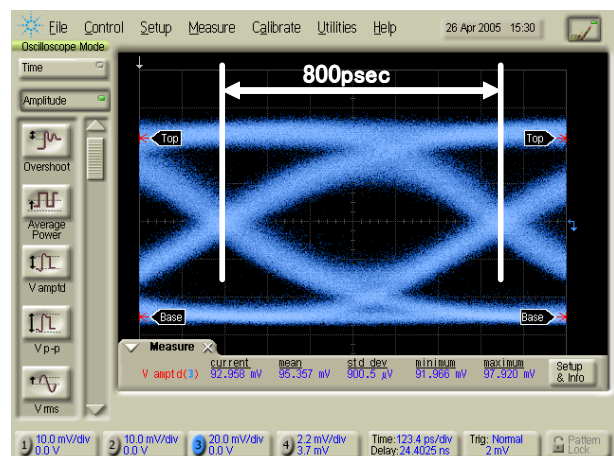


図 4-3-15 1.25[Gbps]アイパターン

4-3-1-2 広範囲自動サーチ方式の検討

a) パイロット光抽出手法

広範囲（±75[deg]円錐）において通信相手の位置（方向）を高速に特定し、互いにビームを向けるための機能（広範囲自動サーチ機能）、さらに図4-3-16に示すように、光路遮蔽や通信端末移動による親機の高速切り替えを実現するため、2次元撮像素子（CMOSセンサ）を用いた手法の検討を進めてきた。

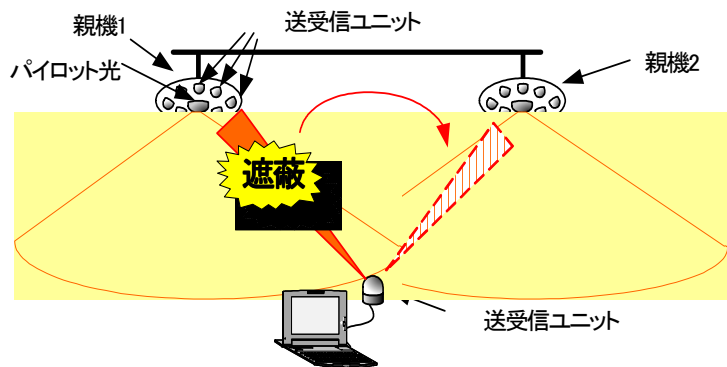


図 4-3-16 広範囲サーチ機能イメージ図

具体的には、図4-3-17に示すように、通信相手からはパイロット光を任意の周波数で点滅させ、そのON/OFFタイミングで撮像後、両フレームの差分データをとることでパイロット光のみを抽出し、方向を特定する。本方式を用いることで、画像中の不要なDCノイズ成分を除去し、方向特定のアルゴリズムを比較的容易にすることが可能となるが、

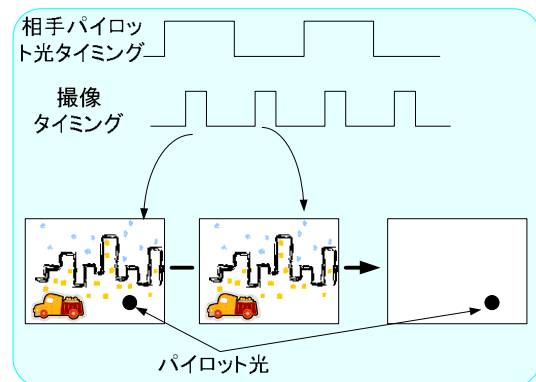


図 4-3-17 抽出手法

- ① 太陽光、蛍光灯の影響対策
- ② 広視野角（150[deg]）レンズの開発が課題としてあげられる。

① 太陽光、蛍光灯の影響対策

ノイズ成分の1つである太陽光はCMOSセンサの「画素PD飽和」の要因となる。本方式では、「地表に到達する太陽光は大気中のH₂Oの影響により950[nm]近辺の強度が小さい」（図4-3-18参照）ことに着目し、パイロット光には950[nm]のLDを使用し、光学フィルタにて不要波長成分を除去することで、太陽光の影響を大幅に軽減させる。また、電源周波数に同期して点滅を繰り返す蛍光灯に関しては、同周波数（50または60[Hz]）でCMOSセンサを露光させることにより、見かけ上DC成分ノイズとして扱う。

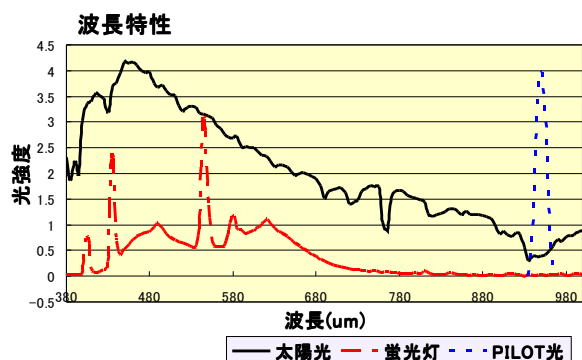


図 4-3-18 太陽光波長特性

しかし、汎用CMOSセンサは長波長感度に配慮されていないため検証が困難であり、

新たに長波長高感度CMOSセンサの試作をした。新規CMOSセンサの特徴を以下に示す。

- 1) Pixel数 : 136×136 [pixels]
- Pixel Clock : 20 [MHz] (max.)
- Pixel Size : □20[μm /pixel]

特定すべくパイロット光の位置精度に直接影響する画素数はより多いことが望ましい。しかし画素数の増加は、PD面積の減少による受光感度の低下、チップ面積の増加、画像データ量の増加による演算量増加、取り込み速度の低下等デメリットもあり、最大Frame Rate 1000[fps]（露光時間は含まず）を目標に決定した。

2) 波長 (950[nm]) 感度の向上

長波長側の光をより多く電気信号として取り込む為にはPD部の接合において電圧を印加した際、Si内により深く空乏層が広がる必要がある。そこで接合部下の状態を標準CMOSプロセス (GAMF) とP不純物の濃度を減らした状態 (PWL)、さらに濃度を減らした状態 (SUB) で分光感度シミュレーションを行い (図4-3-19参照)、その結果から (SUB) 状態を今回の試作に適用した。

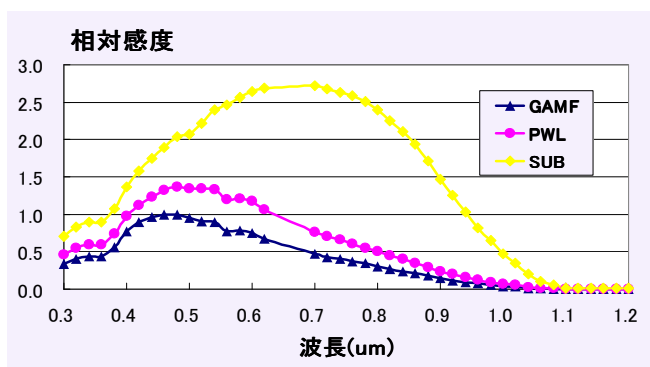


図 4-3-19 CMOS 感度-波長特性

3) 外部トリガによる露光タイミング及び全画素同時露光機能

パイロット光の点滅周波数にあわせた撮像、高速化を実現するためには、外部トリガによる露光が不可欠となる。また、光の点滅を撮像するためCMOSセンサで一般的に使用される順次露光 (ローリングシャッタ) 方式ではなく、全画素を同時に露光するグローバルシャッタ方式を採用する。

4) フレーム差分出力機能

各画素に2つの蓄積部を設け、センサ内部で画素単位のフレーム差分処理を行うことにより、周辺回路を減らせるだけでなく、後段に設けられるADCのダイナミックレンジを有効に使うことができる。

② 広視野角 (150[deg]) レンズの開発

図 4-3-20 に広視野角レンズを示す。本レンズの入射角に対する結像位置特性は線形性が保たれ、さらに入射開口が最小となる $\pm 75[\text{deg}]$ の広角入射に対しても、入射光をセンサ上に効率的に結像するように設計されている。

しかし、レンズとセンサ素子面の間隔に高

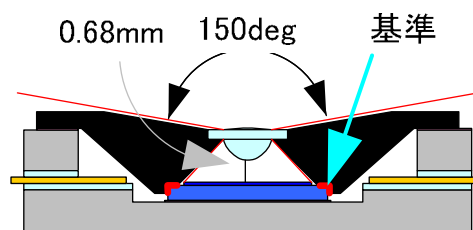


図 4-3-20 広視野角レンズ

精度が要求されるという課題がある。具体的にパッケージ底面を基準にレンズを取り付けた場合に生じる最大公差を $\pm 0.2[\text{mm}]$ と見積もりシミュレーションをした結果では、受光レベルが3分の1以下になる。そこで誤差を最小に抑えるため、レンズ取り付けの基準を素子面に設ける(図4-3-20)ことで、計算上 $\pm 0.06[\text{mm}]$ の取り付け公差を目標とし、検証を行った。本来正確な距離を実測することが望ましいが、今回は入射角特性実測値とシミュレーション値との比較で推測することとする。

図4-3-21では75[deg]方向からの入射光結像分布のシミュレーション値および実測値を示す。各データより、素子面基準では $-0.06[\text{mm}]$ 程度、パッケージ底面基準では $0.2[\text{mm}]$ 以上の誤差が生じていると推測される。

本結果を基に、後述する実証機ではベアのCMOSセンサのチップ面基準にレンズを取り付けることで小型化、高さ方向の高精度化を実現する。また、水平方向の誤差は結像位置のずれになるため、CMOSセンサの有効画素にオフセットを設けることで補正をかける。

($136 \times 136[\text{pixels}]$ 中、 $128 \times 128[\text{pixels}]$ を有効画素とする。)

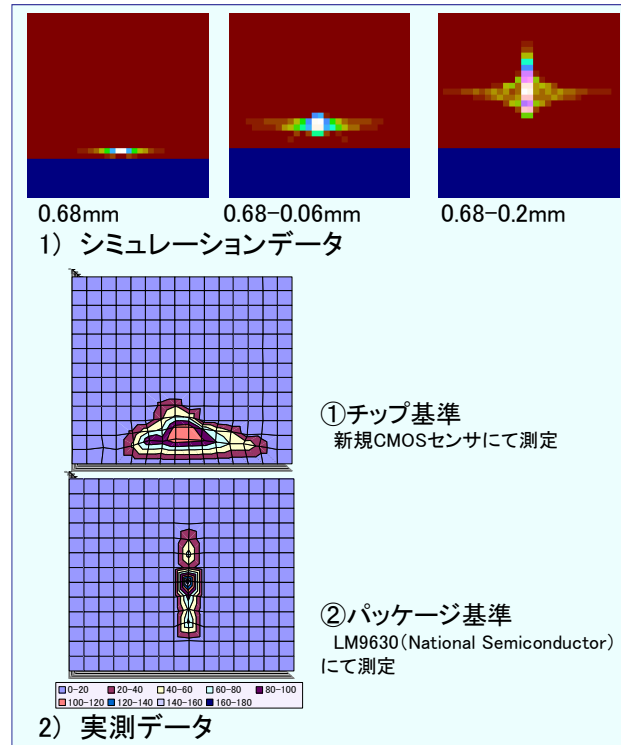


図4-3-21 スポット結像例 (75[deg])

b) サーチアルゴリズム

図4-3-X1に示すように、本研究では端末側通信装置(子機) - 天井中継器(親機)間での高速光無線通信の実現を目指す。子機構成は、光送受信部、CMOSセンサ、指向角10[deg]のパイロット光発光部および駆動系からなる。(詳細は次項)親機構成は子機同様の光ユニットを複数個と全方位に照射可能なパイロット光発光部からなる。以下、図4-3-22に従って、光軸調整手順を示す。

① 親機待機

親機は複数の光ユニットの中で、待機中のユニットがある限り、通信エリア(150[deg])に広角パイロット光を照射している。

② 子機粗サーチ

子機では設置時および通信切断時CMOSセンサにて親機広角パイロット光を検出し、撮像データを元に親機方向を特定、ユニットを向けた後、パイロット光を発光する。子機パイロット光は10[deg]の幅を有しているため、子機は親機方向に対して $\pm 5[\text{deg}]$

の精度を実現することで、確実に親機にパイロット光を照射することができ
る。

③ 親機粗サーチ

親機では、子機パイロット光が照射されるため、待機中の光ユニットがCMOSセンサにより子機方向を特定し、子機の方
向に向く。

④ 相互微調整サーチ

その後、親機子機互いにユニット内4分割PDにて微調整サーチを行う。親機に複数の待機光ユニットが存在する場合、子機が特定の親機光ユニットとサーボ状態になることで、他の親機光ユニットはタイムアウト後待機状態に戻るこ
ととなる。また、全ての親機光ユニットが子機と通信確立している場合、パイロット光の発光を停止することで、省電力化をする。

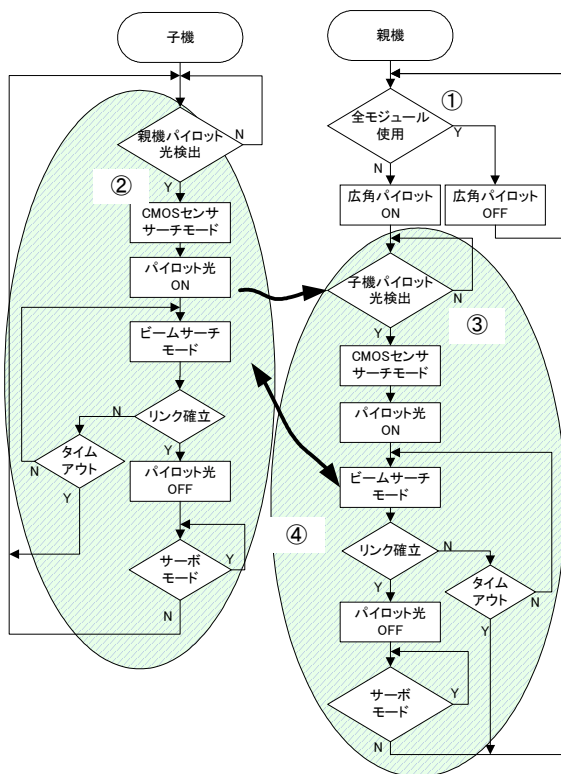


図 4-3-22 サーチアルゴリズム

本アルゴリズムでは、図4-3-22に示すよう、親機、子機ともに同じアルゴリズムにて双方向サーチを実現できるため、商品化において子機ユニットをそのまま親機ユニットとして利用できる。

c) 広範囲駆動方式の検討

16年度までに、ミラーアクチュエータと超小型光無線モジュールを粗動専用アクチュエータで広範囲に駆動させ、ビーム光軸制御は電磁ミラーアクチュエータで行うという全体駆動方式を検討した結果、サイズ、消費電力の面から、図4-3-23に示す構成を採用した。具体的にはCMOSセンサおよびパイロット発光部、パン方向駆動用超音波モータ(0~380[deg])、ミラーアクチュエータ、後述する超小型光無線モジュール(現実証機は発光部のみ)からなる。

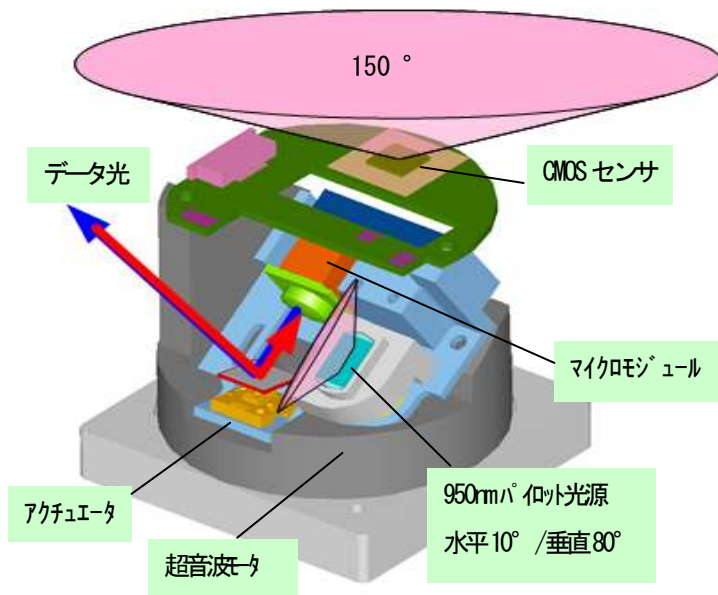


図 4-3-23 広範囲全体駆動実証機

ミラーアクチュエータはチルト方向 (0~75[deg]) 制御とサーボ制御を兼ねている。150[deg] 全方位に対応するためには、チルト方向のミラー傾斜角は最低でも 18.75[deg] 必要であり、そのためにアクチュエータの機構系の改良も行った。また、パイロット光源は指向角をパン方向10[deg]、チルト方向80[deg]に効率良く絞り、パン方向を通信相手に向けることにより確実に相手に照射可能となっている。

従来、パン回転の位置制御のためには、高精度を実現できる光学式ロータリーエンコーダを使用していたが、さらなる小型化のために、超音波モータの位置センサとして小型かつ薄型のポテンショメータを使用した。位相が180[deg]ずれた2つの出力を有するもので、360[deg]以上の範囲で位置検出を可能としている。制御マイコンにポテンショメータの2出力を取込むことで、パンの回転位置を検出する。一方、超音波モータの駆動はPWM制御により加減速制御を行っていたが、パルス駆動時に超音波モータが発する小さな音が筐体に共鳴し、駆動時の騒音が大きくなる問題から、より駆動音の小さい正弦波駆動とした。しかし、この方法では加減速制御ができないため、停止命令後の慣性によるオーバーランが生じる。今回は、ポテンショメータ出力を用いた補正動作により目標位置で停止させることで現状精度を実現した。

実証機では、距離4[m]において粗サーチ動作 (± 5 [deg]) を0.8[sec]以内にて完了することを確認したが、精度向上 (± 3 [deg]) を目指した場合、2[sec]程度を要している。今後、商品化を目指すには、パイロット光発光特性、駆動制御方式の見直し、および、量産化に向けた構造の再設計が必要である。

4-3-2 超小型光無線モジュールの研究開発

4-3-2-1 超小型光無線モジュールの構成

a) 基本構造の検討

これまで開発してきた基礎検証モデル、双方向通信モデルをもとに、受発光デバイスのベアチップ実装と光学部品の積層化を行い、超小型光無線モジュールを開発した。表 4-3-2に基本仕様を、図4-3-24に基本構成を、図4-3-25に試作モデルをそれぞれ示す。

表 4-3-2 超小型光無線モジュールの基本仕様

伝送速度	1.25[Gbps]
伝送距離	10[m]
通信範囲	± 30 [deg]以内
波長	850[nm]
放射パワー	0.5[mW]以下 (レーザ安全基準-1 Class1)
放射角	1.5[mrad] (約0.1[deg]) at $2\theta \cdot 1/2^*$
受光指向角	12.2[mrad] (約0.7[deg]) at $2\theta \cdot 1/2^*$

*光量 50[%]の広がり角

図4-3-24に示すように、受発光デバイスは、組立性と高精度実装を考慮し、同一基板上にベアチップで実装した。面発光レーザと通信用PDは、電気的アイソレーション確保の目的で基板両端に配置した。また面発光レーザを、メインレンズの直下とし、自身の放射光の受光系への回り込みを低減する。

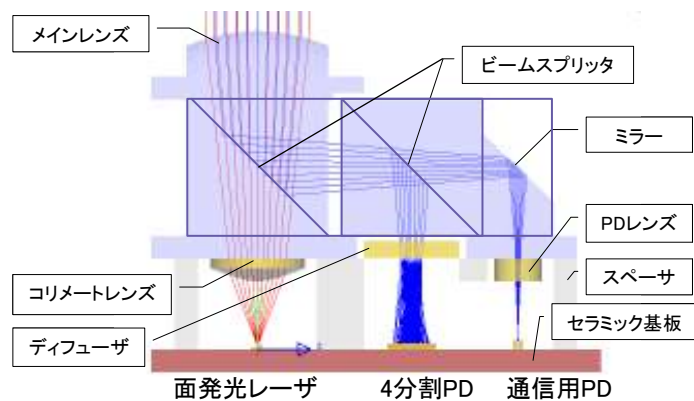


図 4-3-24 超小型光無線モジュールの基本構成

メインレンズの焦点は、4分割PD受光面とし、4分割PD上のスポットサイズはディフューザの拡散性により決定する。面発光レーザのコリメートと通信用PDへの集光は、それぞれ専用にしたレンズとメインレンズで行う。試作モデルでは、各レンズはプラスチック切削により製作したが、商品化の際には、回折素子などで構成し、ディフューザとの一体成形により組立性向上とコストダウンを計る。また、基板としての平面性が重要なため、セラミック基板を採用した。

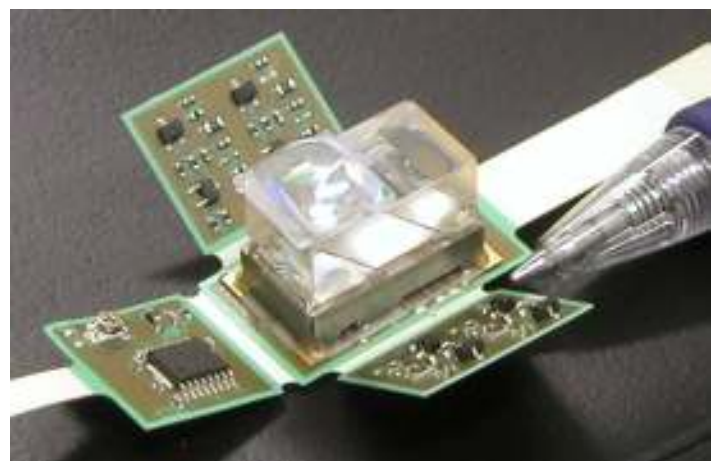


図 4-3-25 超小型光無線モジュールの試作モデル

試作した超小型光無線モジュールは、図4-3-24に示す構成においてD12×W19×H14[mm]、電磁コイルアクチュエータを含めてD19.3×W26.2×H33[mm]のサイズを実現する。

b) 高精度光集積技術の開発

開発した超小型光無線モジュールは、表4-3-2に示すようにビーム放射角が1.5[mrad] (約0.1[deg])と非常に狭いため、受発光素子および各光学部品を高精度に組立配置する必要がある。

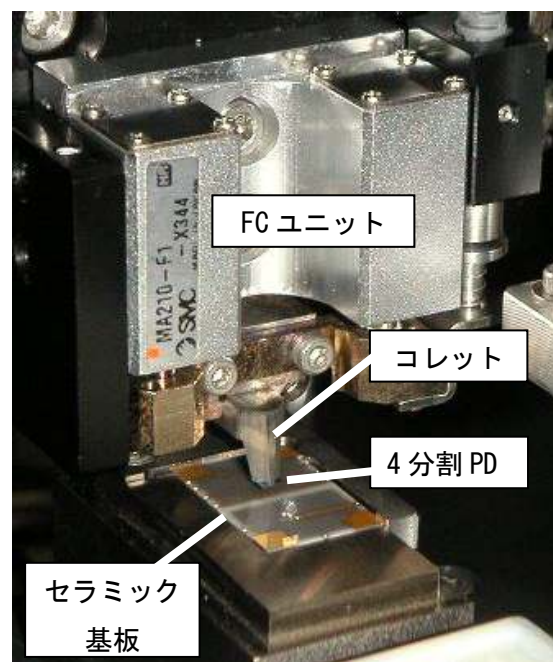


図 4-3-26 マウント装置実装部

① パッシブアライメント技術

セラミック基板への受発光素子の搭載は、素子を機能させながら位置合わせを行うアクティブアライメントが出来ないため、画像認識によるパッシブアライメントを用

いた。組立に使用したマウント装置は、部品を真空チャックする吸着コレットとアライメント用の高精度の4軸ステージ、高精度 CCD カメラ、画像認識から構成される。図4-3-26にマウント装置の実装部を示す。図に示すフォースコントロール (FC) ユニットにより、搭載時の部品への加圧力を最適調整する。また画像認識は、素子の特徴的な部分やマーキングパターンを予めプログラム学習させ、CCD カメラの視野内でパターンマッチングを行う。これにより正確な位置決めを行うことが可能となる。

またレンズ、プリズム搭載も受発光素子と同様に画像認識によるパッシブアライメントを適用した。レンズのアライメントは、CCD 画像からレンズ中心を検出し、VCSEL、PD 受発光中心と一致するよう位置合わせを行い、UV 接着で固定する。プリズムとアライメントは、プリズム接合面 (線) と4分割PDの平行出しにより正確な角度での搭載を実現した。

② 無加重 AuSn 共晶半田接着技術

受発光素子とセラミック基板の半田接着は、半田溶接時の位置ずれを防ぐ為、AuSn 半田薄膜パッドをセラミック基板上に形成した。リフロー処理は、Sn 膜の酸化を抑えるため、N₂雰囲気中で加熱処理した。これにより十分な接着強度が得られる AuSn 共晶接着を実現した。さらに半田熔融時に素子の位置ずれが殆ど生じないことが確認された。

c) キガビット対応高周波技術と送受アイソレーション対策

ギガビット級の超広帯域伝送を実現するためには、次のような高周波対応を行った。

- ① セラミック基板パターンのインピーダンス最適化設計
- ② 受信用PDアンプICのPD近接実装
- ③ 超小型光無線モジュールの高密度実装を可能とする、高周波対応液晶ポリマー4層フレキシブルドライ基板の開発 (図4-3-25参照)

また電氣的・光学的な送受信間での干渉を防ぐ為、次のようなアイソレーション対策を行った。

- ① VCSELとPDの最適配置設計
- ② 送受回路グラウンドの完全分離
- ③ 光学部材の反射防止膜などによる迷光対策
- ④ スペーサによるシールド効果

d) 伝送性能

超小型光無線モジュールの試作モデルを用いて、1.25[Gbps]の疑似ランダム信号によるデータ伝送を行った。結果、図4-3-27に示すように十分な開口をもつ良好なアイパターンを得るとともに、伝送距離7[m]においてエラーフリー (ビットエラーレート 10⁻⁹以下) となる高周波伝送特性を確認した。伝送距離の目標仕様である10[m]は、各部の性能改善により実現可能である。

また自発光（送信状態）による受信側への電氣的、光学的飛び込みを測定した。図4-3-28に送信データをON/OFFした際の自身の受信信号を示す。同図からわかるように、データONの状態でも受信信号の変化は微小であり、自発光による飛び込みの影響は非常に小さく、全二重双方向通信が十分可能であることを確認した。

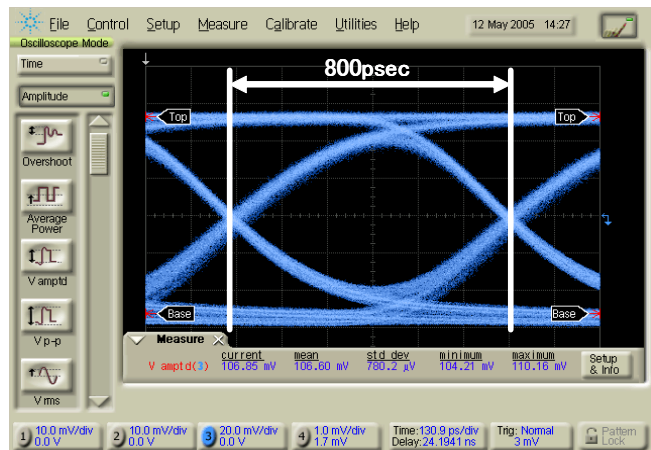


図 4-3-27 伝送速度 1.25[Gbps] アイパターン

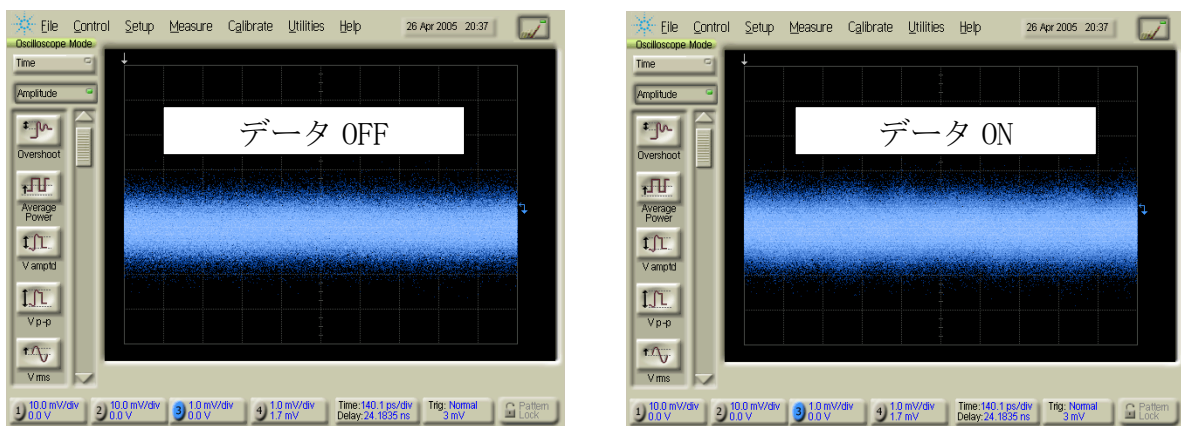


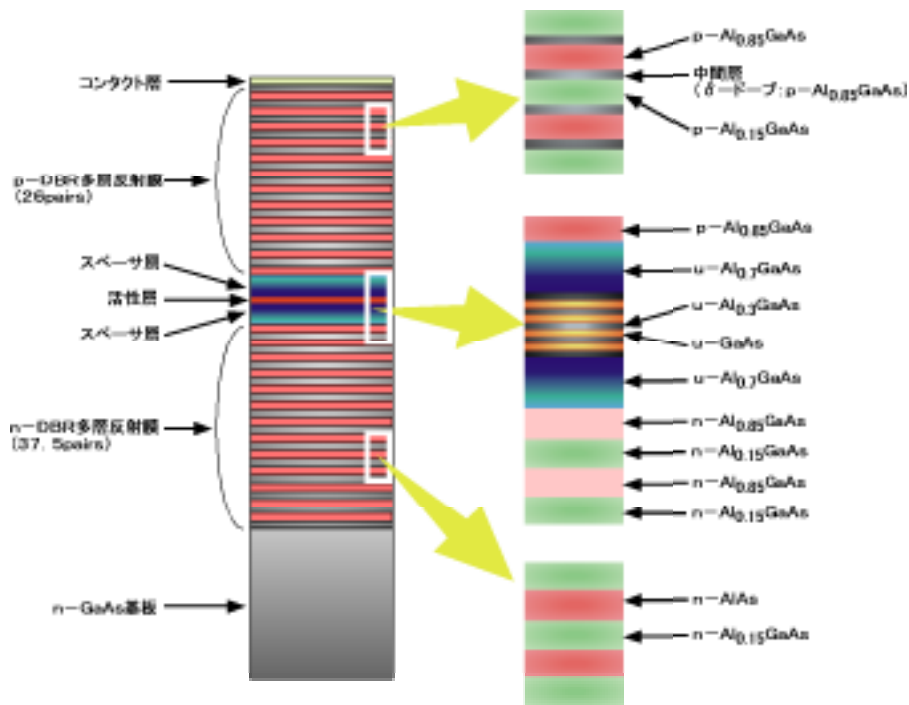
図 4-3-28 超小型光無線モジュールにおける送受干渉(受信信号)

以上、携帯機器に搭載可能な超小型化光無線モジュールを開発し、1.25[Gbps]の光無線伝送を確認した。開発した超小型光無線モジュールは、ミラーアクチュエータを用いたビーム光軸制御技術、広範囲自動サーチおよび広範囲駆動技術と組み合わせることで、最終目標を実現する。

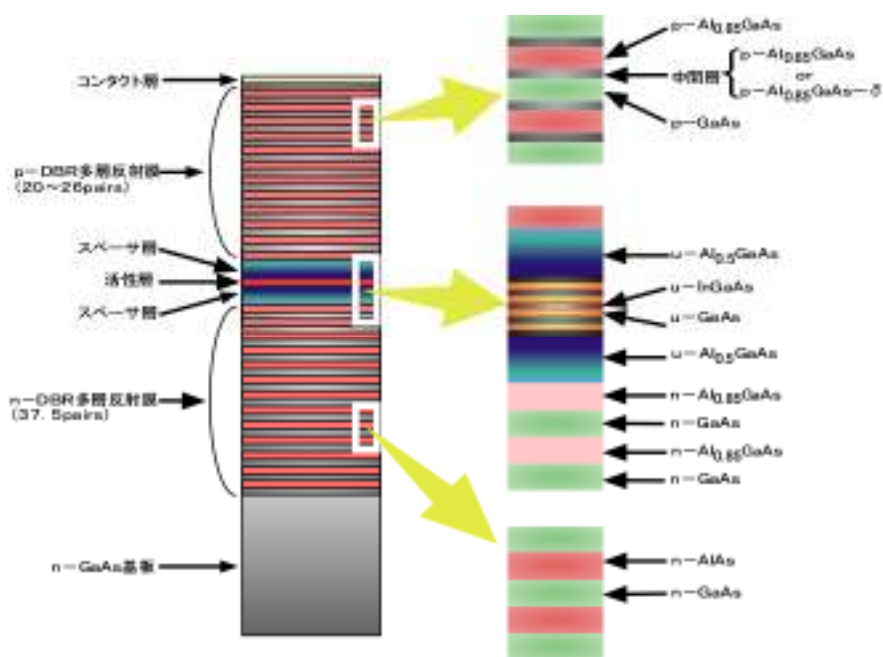
4-3-2-2 光無線モジュール用面発光レーザの検討

本委託研究では、1[Gbps]を超える高速応答性が可能で、面上に発光パターンを自由にレイアウトして、放射特性をシステムの要求に合わせることを出来る特徴をもつ発光素子として、面発光レーザの開発を進めてきた。今年度は、面発光レーザ開発は、パイロット光用として太陽光の影響の少ない950[nm]帯で発光する素子を検討した。また、超小型光無線モジュール組み立てにおいて、高精度組み立てのための特別なチップ仕様が必要であることが判り、850[nm]面レーザの開発も併せて実施した。

図4-3-29は、その基本設計図である。950[nm]用と850[nm]用では、基本的な構成はかわらず、波長の違いによる結晶の組成と膜厚だけが異なる。



a) 950[nm]用



b) 850[nm]用

図 4-3-29 面発光レーザエピ基本設計

パイロット光用の光源である 950[nm]用では発光パワーが必要になるため、通常の面発光レーザではなく、発光点が複数ある、マルチドット面発光レーザを検討した。

図 4-3-30 は、同じパターンで作製した 850[nm]用マルチドット面発光レーザの表面パターンと特性である。950[nm]用のマルチドット面発光レーザは、試作の失敗により発光しなかった。

上記特性は、同時に作製した 850[nm]の面発光レーザであるが、100[mW]以上の発光出力が観察されており、同様の構造である 950[nm]用のマルチドット面発光レーザでも同等の特性が期待できるため、パイロット光用の光源としての可能性が示された。

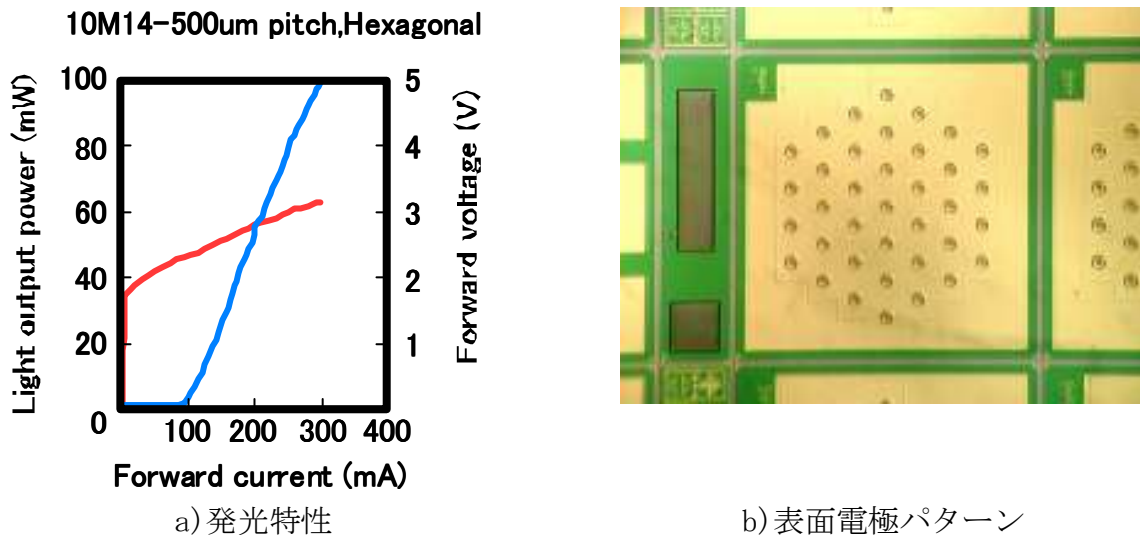


図 4-3-30 マルチドット面発光レーザ

4-4 総括

サブテーマ 1 では、光無線システムの基礎研究と Radio over Infrared Wireless (RoIRW) システムの基礎研究を平行してすすめた。

光無線システムの基礎研究では、直射方式および拡散反射方式のそれぞれの有する問題への対策技術に関する研究開発を行い、各 3 種類の方式を提案し、また、光と電波のハイブリッドシステムについても理論的検討を行った。

その結果、伝送特性の観点においてはどれも有効なシステムであることを明らかにした。

これらの研究開発成果のいくつかは、サブテーマ 2 の研究開発課題の 1 つであるシームレス・バリアフリー無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発の方向性を示唆するものとなっている。

RoIRW システムの基礎研究では、仮想無線自由空間化技術として、種々の電波無線信号を RoIRW により端末に高品質に届ける RoIRW 遍在アンテナシステムを提案し、その改善効果を理論的に示した。また、電波無線信号多重化方式・ルーティング技術では、カオスラベルルーティング方式の提案、カオス特性の応用としてのカオス空間多重光無線通信システムと 2 次元自己マッチング方式の提案、非線形抑圧技術として光チャープコントローラを用いた光 FM 非線形補償受信器を提案し、その有効性を示した。

以上の検討は、RoIRW ソフトウェアワイヤレスホームネットワークシステムの要素技術開発として行ったものであるが、実際の適用に使用するデバイスの検討や実用化に向けた課題解決が出来れば、実用化につながる技術となる。

サブテーマ 2 では、本シームレス・バリアフリー無線通信プロトコルの研究開発に

において、通信中の光無線基地局が途中で他の光無線基地局に切替わっても接続が継続される、例えば、鑑賞中の映画や転送中のファイルが途中で中断されない通信プロトコルの検討を行い、利用者に基地局の切り替わりを意識させないシームレスな光無線、電波無線利用の移動体通信ネットワークの実現を目標とした。

本委託研究の前半は、IPv4 環境内で複数サブネット間を電波無線にてローミングが可能なプロトコルや、IPv4 環境内で複数サブネット間を移動でき、光無線と電波無線を切替え可能なプロトコルの開発に関する研究を行い、アプリケーションに依存しない電波無線と光無線間のシームレスな通信システムの実現性を明らかにした。また、後半では、IPv6/IPv4 混在環境内で IPv4 サブネット間を移動でき、光無線と電波無線を切替え可能なプロトコルの開発を行い、IPv6/IPv4 混在する環境においても、アプリケーションに依存しない電波無線と光無線間のシームレスな通信システムの実現性を明らかにした。

また、サブテーマ1の理論解析から、電波を用いた場合の伝送速度は、光搬送波を用いた場合の伝送速度に近い高速性が要求され、光・電波ハイブリッドシステムにおいてリアルタイムコンテンツの伝送をするには、コンテンツそのものの圧縮技術を導入する必要があるともいえ、サブテーマ2の研究開発課題の1つである『シームレス・バリアフリー無線通信アプリケーションソフトウェアの研究開発』が適切な方向であると理論付けされた。

サブテーマ3では、超小型光無線モジュールの伝送制御方式の研究開発及び超小型光無線モジュールの研究開発において、要素技術の研究開発を平行して進めた。その結果、携帯機器にのる理想の大きさである1cm³程度よりは大きいもののその他の特性（伝送スピード、伝送距離）については目標を達成した。大きさについても最終目標にかなり近づいたレベルであり、周辺ICのカスタム化、光学設計の最適化によって更なる小型化が可能である。

以上まとめると、本委託研究における最終目標は、ほぼ達成したと考えられる。

今後は、以上の成果をさらに洗練させて、本技術を使った光無線アクセスシステムの実用化を目指したい。

5 参考資料・参考文献

参考資料、参考文献

- [1]David B. Johnson, et al. “Mobility Support in IPv6” ,
Draft-ietf-mobileip-ipv6-24.txt, June 2003.
- [2]R. Koodli., draft-ietf-mipshop-fast-mipv6-01.txt 30 January 2004
- [3]Hesham Soliman, Flarion draft-ietf-mipshop-hmipv6-01.txt February 2004
- [4]阿相, 上, 三田, 荒牧: “高速ハンドオーバーのシグナリング軽減手法の提案” 信学総会 2004, B-06-049
- [5]吉武, 大西, 小川, 水戸: “FMIP における AP 切替方法に関する一考察” 信学総会 2004, B-06-048
- [6]渡辺, 西山, 服部, 小野, 越塚, 坂村: “既存ルータ混在環境におけるモバイル IP ハンドオーバーの高速・高信頼化の提案” 情報処理学会 全国大会 2004, 1H-2

(1)<http://dynamics.sourceforge.net/>

(2)<http://mpeg4ip.sourceforge.net/>

(3)<http://webdav.org/>

5-1 研究発表・講演等一覧

平成 13 年度 なし

平成 14 年度

サブテーマ 1

学会発表 (査読なし)

1. 宮岡克也, 宮本伸一, 森永規彦: “赤外線無線中継器を用いた指向直射室内赤外線無線 LAN システムに関する一検討”, 第 4 回 YRP 産学官交流シンポジウム, pp. 130-131, (July 2002).
2. 小林淳一, 宮本伸一, 森永規彦: “室内赤外線無線通信システムにおける指向直射方式とハイブリッド直射方式のオーバーレイ構成に関する検討”, 電子情報通信学会技術報告 CS2002-53, pp. 41-46, (August 2002).
3. 宮岡克也, 宮本伸一, 森永規彦: “赤外線無線中継器を用いた指向直射室内赤外線無線 LAN システムの提案”, 電子情報通信学会技術報告 OCS2002-72, pp. 61-66, (October 2002).
4. 中西隆, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: “直接光スイッチング CDM RoF システムの CIR 改善手法”, 2003 年電子情報通信学会総合大会.
5. 中川純, 宮本伸一, 森永規彦: “室内赤外線無線通信システムにおける赤外線無線中継器を用いた直射方式のオーバーレイ構成に関する一検討”, 2003 年電子情報

通信学会総合大会 (2003 年 3 月) .

6. 宮岡克也, 宮本伸一, 森永規彦: “赤外線無線中継器を用いた指向直射室内赤外線無線 LAN システムのカバレッジに関する一検討”, 2003 年電子情報通信学会総合大会 (2003 年 3 月) .
7. 河内功, 宮本伸一, 森永規彦: “電波・赤外線ハイブリッド室内無線 LAN システムに関する一検討”, 2003 年電子情報通信学会総合大会 (2003 年 3 月) .

学会発表 (査読あり)

1. 塚本勝俊: “光ファイバ無線 (RoF) とその応用”, 電子情報通信学会技術報告 OCS2002-65, pp. 23-28, (October. 2002).
2. Takashi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “Experimental study of received signal performance in Direct Optical Switching CDMA RoF system”, Proceeding of Microwave Photonics (MWP2002), Vol. 1, No. 1, pp. 233-236, (November. 2002).
3. Akihiko Murakoshi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “High order intermodulation distortion Analysis with consideration of nonlinear compensation in Direct Optical FM RoF System”, Proceeding of Microwave Photonics (MWP2002), Vol. 1, No. 1, pp. 229-232, (November. 2002).
4. Takeshi Higashino, Takashi Nakanishi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “CIR improvement method in Direct Optical Switching CDM RoF network”, Proceeding of the 4th Korea-Japan Joint Workshop on Microwave and Millimeter-Wave Photonics, Vol. 1, No. 1, pp. 25-28, (January. 2003).
5. Takeshi Higashino, Takashi Nakanishi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “An Experimental Investigation of Interference Suppression in Direct Optical Switching CDM Radio on Fiber System”, IEICE Trans on Elec. (Conditional Accepted)
6. Akihiko Murakoshi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “Theoretical Consideration on Nonlinear Compensation Method for Minimizing High Order Intermodulation Distortion Nonlinear Compensation in Direct Optical FM RoF System”, IEICE Trans on Elec. (Accepted)63

サブテーマ 2、サブテーマ 3

学会発表 (査読なし)

1. 荘曜暢, 菅野泰弘: “周回アーム型 2 次元偏向圧電ミラー (Piezoelectric mirror actuated two-dimensionally by orbital arm)”, 第 63 回応用物理学会学術講演会 (2002 年 9 月 24 日)

平成 15 年度

サブテーマ 1

学会発表（査読なし）

1. 山中仁昭, 三瓶政一, 森永規彦: “伝搬経路制御方式にもとづく隣接セル/セクタへの干渉抑圧に関する検討”, 電子情報通信学会技術報告, RCS2003-72 (July. 2003).
2. 重安哲也, 松野浩嗣, 森永規彦: “IEEE802.11マルチホップ環境下におけるAck運用の改良とその効果”, 平成15年度電気・情報関連学会中国支部第54回連合大会講演論文集, pp. 251-252 (Aug. 2003).
3. 平川忠之, 重安哲也, 松野浩嗣, 森永規彦: “IEEE802.11DCFのRTS/CTS機構におけるNAVタイマ短縮とACKパケット省略の効果”, 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS-115), pp. 1-6 (Nov. 2003).
4. 山中仁昭, 三瓶政一, 森永規彦: “伝搬経路制御方式にもとづく異なる伝搬環境での干渉抑圧に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2003-196 (Oct. 2003).
5. 中川純, 宮本伸一, 森永規彦: “室内赤外線無線通信システムにおけるCSMA/CAを用いた直射方式のオーバーレイ構成に関する一検討”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 28, No. 14, pp. 9-12 (Feb. 2004).
6. 宮岡克弥, 宮本伸一, 森永規彦: “指向直射室内赤外線無線通信システムにおける赤外線無線中継器を用いた遮蔽対策に関する検討”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 28, No. 14, pp. 13-16 (Feb. 2004).
7. 原田諭, 宮本伸一: “デュアルバンド無線LANシステムにおけるチャネル選択方式に関する一検討”, 2004年電子情報通信学会総合大会, B-5-234 (Mar. 2004).
8. 谷尾卓俊, 宮本伸一: “室内赤外線無線通信システムにおけるマルチビームハイブリッド直射方式の送信光電力制御に関する一検討”, 2004年電子情報通信学会総合大会, C-14-14 (Mar. 2004).
9. 中西隆, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: “バイポーラ符号を用いる光 CDMA-RoF ネットワークシステムの一提案”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. MWP03, No. 7, pp. 37-42, (October 2003).
10. 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: “直接光スイッチング CDMA RoF システムに適した拡散符号構成法”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 103, No. 231, pp. 13-18, (July. 2003).
11. 福本直紀, 村越昭彦, 塚本勝俊, 小牧省三: “Radio over Infrared Wireless を用いた空間多重無線方式の提案”, 信学総大会, C-14-15, p. 388 (March. 2004).

学会発表（査読あり）

1. Masaaki YAMANAKA, Seiichi SAMPEI, Norihiko MORINAGA: “A study on Interference Suppression to Adjacent Cells/Sectors Using Adaptive Multipath Control

- Technique” , Proc. of IEEE WPMC’ 03, Vol. 3, pp.237-241(Oct. 2003).
2. 重安哲也, 松野浩嗣, 森永規彦: “競合方式 MAC プロトコルにおける送信端末から 2 ホップ先の端末の影響” , 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-B, No. 1, pp.93-97 (Jan. 2004).
 3. Tetsuya Shigeyasu, Tadayuki Hirakawa, Hiroshi Matsuno, Norihiko Morinaga: “Two simple modifications for improving IEEE802.11 DCF throughput performance” , IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2004, in CD-ROM(Mar. 2004).
 4. Katsutoshi Tsukamoto, Takeshi Higashino, Takashi Nakanishi, and Shozo Komaki: “Direct Optical Switching Code Division Multiple Access System for Fiber-Optic Radio Highway Networks” , IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 21, No. 12, pp. 3209-3220(December. 2003).
 5. Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “An Experimental Investigation of Interference Suppression in Direct Optical Switching CDM Radio-on-fiber System” , IEICE Transactions on Electronics, Vol. E86-C, No. 7, pp. 1158-1166(July. 2003).
 6. Akihiko Murakoshi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “Theoretical Consideration on Nonlinear Compensation Method for Minimizing High Order Intermodulation Distortion Nonlinear Compensation in Direct Optical FM RoF System” , IEICE Transactions on Electronics, Vol. 86, No. 7, pp. 1167-1174(July. 2003).
 7. Akihiko Murakoshi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “Proposal of a Nonlinear Compensation Scheme Using a Chirp Controller in FM Radio on Fiber System” , The 5th Japan-Korea Joint Workshop on Microwave and Millimeter-wave Photonics Technical Digest, Vol. 1, No. F1-3, pp. 127-130(January. 2004).
 8. Takashi Nakanishi, Takeshi Higashino, Katsutoshi Tsukamoto, Shozo Komaki: “Ladder Configuration for Coding/Decoding Optical CDMA-RoF Network System Using Bipolar Spreading Code” , Proceedings of The 5th Japan-Korea Joint Workshop on Microwave and Millimeter-Wave Photonics, Vol. 1, No. 1, pp. 167-170 (January. 2004).
 9. Takeshi Higashino, Hajime Yamasaki, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “Proposal of Direct Optical Switching CDM Radio-on-Fiber Link with Chaotic Synchronization” , Proceedings of The 5th Japan-Korea Joint Workshop on Microwave and Millimeter-Wave Photonics, Vol. 1, No. 1, pp. 111-114(January. 2004).
 10. Takeshi Higashino, Takashi Nakanishi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “A New Spreading Code Generation Method for DOS CDMA RoF System and Its Experimental Investigation” , Proceedings of the International Topical

Meeting on Microwave Photonics 2003, Vol.1, No.1, pp.291-294(September. 2003).

サブテーマ2、サブテーマ3

学会発表（査読なし）

櫻井芳隆, 渡口悟, 西巻恵児, 坂根学: “A Study of Seamless Communication method with the adequate switching between Optical and RF Wireless LAN”, The International Conference on Consumer Electronics 2003(ICCE 2003) Los Angeles(June. 2003)

論文発表 なし

平成 16 年度

サブテーマ1

学会発表（査読なし）

1. 浅原誠之, 宮本伸一: “室内赤外線無線通信システムにおけるリアルタイムトラフィック伝送時の遮蔽対策に関する一検討”, 2005年電子情報通信学会総合大会, B-5-171(2005年3月).
2. Phuc Khanh Kieu, 宮本伸一: “人工雑音環境下における HCCA 方式を用いた 2.4GHz 帯無線 LAN システムの伝送特性に関する一検討”, 2005年電子情報通信学会総合大会, B-5-214(2005年3月).
3. 原田諭, 宮本伸一: “適応チャネル選択方式を用いたデュアルバンド無線 LAN システムの伝送特性に関する一検討”, 2005年電子情報通信学会総合大会, B-5-217(2005年3月).
4. 田村尚志, 宮本伸一, “マルチホップ無線ネットワークにおける室内空間の電力分布制御と伝送特性に関する一検討”, 2005年電子情報通信学会総合大会, B-5-230(2005年3月).
5. 汐月昭彦, 宮本伸一, 森永規彦: “人工雑音環境下における IEEE 802.11g 準拠無線 LAN システムの伝送特性に関する一検討”, 電子情報通信学会技術報告, EMCJ2004-69(2004年10月).
6. 山中仁昭, 三瓶政一, 森永規彦: “伝搬経路制御方式に基づく Window 制御を用いた干渉抑圧特性に関する検討”, 電子情報通信学会技術報告, RCS2004-119(2004年7月).
7. 村越昭彦, 塚本勝俊, 小牧省三: “光ファイバ無線アクセスネットワークにおける非線形補償方式を用いた SCM/OFM 方式の提案”, 電子情報通信学会研究報告, Vol.104, No.208, pp.87-92(July. 2004).

8. 福本直紀, 村越昭彦, 塚本勝俊, 小牧省三: “Radio on Free Space Optics システムにおける同一チャネル副搬送波干渉キャンセラと空間多重の最適化に関する一検討”, 電子情報通信学会技術報告, Vol.MWP2004, No.10, 49-52 (October. 2004).
9. 山崎創, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: “無線ハイウェイにおけるカオスラベルルーティング方式の検討”, 電子情報通信学会技術報告, Vol.MWP2004, No.8, pp.41-44 (October. 2004).
10. 塚本勝俊: “光電波融合技術のワイヤレス通信ネットワークへの応用”, 2005年電子情報通信学会総合大会, Vol.1, No.BP-1-1 (March. 2005).
11. 竹田晋也, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: “カオス空間多重光無線通信システムにおける2次元自己マッチング受信方式の提案”, 2005年電子情報通信学会総合大会, Vol.1, No.C-14-6, P.351 (March. 2005).

学会発表 (査読あり)

1. Jun Nakagawa, Shinichi Miyamoto, Norihiko Morinaga: “A Proposal of Indoor Infrared Wireless Communication System with Overlay Construction of Line-of-Sight System using CSMA/CA”, Technical Digest of 9th Optoelectronics and Communications Conference / 3rd International Conference on Optical Internet (OECC/COIN 2004), 16C3-5 (July. 2004).
2. Tetsuya Sigeyasu, Tadayuki Hirakawa, Hiroshi Matsuno, and Norihiko Morinaga: “Two simple modifications for improving IEEE802.11DCF throughput performance”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2004, (in CD-ROM, 6pages) (Mar. 2004).
3. Satoru Harada, Shinichi Miyamoto: “Dynamic Band Selection Tehcnique for Dual-band Wireless LAN System”, 2004 Korea-Japan Joint Conference on AP/EMC/EMT, pp.175-178 (Nov. 2004).
4. Tomoko Sakai, Shinichi Miyamoto, Norihiko Morinaga: “Adaptive Packet Transmission Technique for 2.4GHz-band Wireless LAN System under Bluetooth Interference Coexistence Environment”, 2004 Korea-Japan Joint Conference on AP/EMC/EMT, pp.317-320 (Nov. 2004).
5. 重安哲也, 松野浩嗣, 森永規彦: “無線LAN各規格の概要とプロトコル”, 情報処理, Vol.45, No.8, pp.793-800 (2004年8月).
6. Akihiko Murakoshi, Katsutoshi Tsukamoto, and Shozo Komaki: “Proposal of SCM Optical FM Method with Nonlinear Compensation Technique in Radio on Fiber Link”, 2004 IEEE Intenational Topical Meeting on Microwave Photonics, Vol.1, No.1, pp.237-240 (October 2004).

サブテーマ2、サブテーマ3

学会発表（査読なし）

1. 山田桐子，境雅久，笹生剛良：“狭指向ビームを用いた光無線システムの検討”，2005年電子情報通信学会総合大会，Vol. 1，No. B-5-166，P. 615 (March. 2005).
2. 西巻恵児，櫻井芳隆，渡口悟：“IPv6/IPv4 混在環境下におけるシームレス通信方式の検討”，2005年電子情報通信学会総合大会，Vol. 1，No. B-6-26，P. 26 (March. 2005).