

平成18年度
研究開発成果報告書

移動体向け超高速通信用衛星搭載ビーム形状
可変マルチビームアンテナ装置の研究開発

委託先： 三菱電機(株)

平成19年4月

情報通信研究機構

平成18年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「移動体向け超高速通信用衛星搭載ビーム形状可変
マルチビームアンテナ装置の研究開発の研究開発」

目次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	5
2-2	研究開発目標	7
2-2-1	最終目標	7
2-2-2	中間目標	7
2-3	研究開発の年度別計画	8
3	研究開発体制	9
3-1	研究開発実施体制	9
4	研究開発実施状況	
4-1	光信号処理回路(光波面生成技術)の研究開発	10
4-1-1	はじめに	10
4-1-2	光波面生成部	10
4-1-3	位相センサ&位相回復アルゴリズム	16
4-1-4	マルチビーム形成	26
4-1-5	まとめ	27
4-2	光信号処理回路(O/E, E/O変換技術)の研究開発	28
4-2-1	はじめに	28
4-2-2	E/O, O/Eコンバータ	28
4-2-3	高出力O/E変換器	33
4-2-4	まとめ	38
4-3	指向性合成技術の研究開発	39
4-2-1	はじめに	39
4-2-2	指向性合成シミュレーションツール	39
4-2-3	低サイドローブ化技術	40
4-2-4	校正技術	42
4-2-5	まとめ	46
4-4	総括	47
5	参考資料・参考文献	
5-1	研究発表・講演等一覧	

1 研究開発課題の背景

(社会的・経済的・技術的背景)

近年、情報通信分野の目覚ましい技術革新が進み、さらに各種規制改革の推進により事業者間の競争も進み、通信・放送の市場は大きな成長を遂げている。多様な情報通信インフラの整備により、多彩な情報通信サービスが実現している。この中でも特に顕著な成長を遂げているサービスはインターネットであり、我が国におけるインターネット利用者数は、平成 15 年末で 7730 万人(対前年比 788 万人増)、人口普及率は 60%を超えている(対前年比 6.1%増)。特に、ブロードバンド利用率が大幅に増加し、対前年比 18.2 ポイント増の 47.2%とインターネット利用者の半数近くに達しており、今後も堅調に推移すると考えられる。

このように、多様な情報通信インフラの整備・高度化が進展し、インターネットも急速に発展している状況の中で、宇宙通信についても国内・国外ともにインターネットをはじめとしたサービスの高度化・多様化が進展している。

情報通信分野は我が国経済の中で重要な位置づけにあり、平成 13 年 1 月に「高度情報通信ネットワーク社会形成基本法」が施行された。さらに、宇宙通信に関して、インターネット網を形成する情報通信インフラの一つであり、「e-Japan 重点計画-2003」では世界最高水準の高度情報通信ネットワーク形成に向けた研究開発促進の一環として、「無線超高速の固定用国際ネットワークを構築するため、2005 年までに超高速インターネット衛星を打ち上げて実証実験を行い、2010 年を目処に実用化する」旨が言及されている。

近年の技術革新や市場ニーズの変化などにより、今後計画されている衛星通信サービスでは、ブロードバンド衛星通信サービス、移動体衛星通信サービスを行うことがトレンドとなっている。また、そのサービス提供地域が、いずれも国内だけではなく、複数国をカバーする地域、又は、全世界を対象としている点も共通したトレンドである。こうした背景には、世界的なインターネット及び移動通信の爆発的普及や地上インフラの発展により、地上と衛星の競争領域の拡大が考えられる。すなわち、地上インフラと同様に、衛星によるインターネットや移動通信に対するニーズも増大している。一方、地上インフラと差別化を図る観点から、サービス地域について、広域性という衛星の強みが発揮できる地上の通信インフラが未整備な地域、上空、海上や、全世界を一度にカバーする方向にニーズがシフトしていく傾向にある。

(意義・必要性)

我が国では以前から、最先端技術の開発を目的とした宇宙開発と、新たな通信・放送サービスの実現という観点から、BS・CS の開発推進、実用化を図ってきた。それとともに衛星放送サービスを開始し、通信衛星・放送という新規市場も創出してきた。

このような衛星利用における主な特徴・メリットは以下に示す通りである。

- ・同報性： サービスエリア内のユーザに一斉に情報配信可能
- ・広域性： サービスエリアが広い
- ・移動性： アンテナの設置によりいつでもどこでも回線の設定が可能
特に、陸地から離れて長距離を移動する航空機や船舶に対するブロードバンド通信を行う手段として、現状では他に代替技術が存在しないため、衛星による航空機インターネットサービスが開始されている。
- ・広帯域性： 広帯域の伝送が可能
地上系の無線システムよりも高い周波数の使用が容易であり、広帯域の周波数割当てを活かした高速伝送、広帯域伝送が実現可能である。
通信速度の目標としては、地上の有線・無線とも 2010 年頃には 100Mbps オーダのアクセス回線が一般化すると考えられることから、衛星通信においても、同時期に小型地球局で 100Mbps オーダの通信速度を達成する必要がある。
- ・即応性： 端末さえ用意すればすぐにサービス利用可能
災害が発生した場合でも回線の確保が可能である。また、イベント、遠隔医療、遠隔教育などに有効である。

事実、衛星を利用した通信・放送サービスの需要は順次拡大してきており、今後も情報通信のトラフィック需要に整合したシステムを適宜構築することによって、十分な貢献が期待できる。しかしながら、現状のシステムを継続使用していく限りにおいては、衛星通信分野における勢いは頭打ちの状況であることは否めない。特に、今後は、移動性及び広帯域性を活かしたサービスとして、移動体を対象としたブロードバンド

衛星通信・放送サービスの実現が期待される。

このように、宇宙通信はその特徴を活かし、地上の情報通信インフラと相互に補完しつつ、全体的には経済的なネットワークを形成している場合が多い。さらに、対災害性、緊急性に対するニーズは高く、自動車のみならず、船舶、航空機などに対する広帯域の通信手段としては、他に代替器手段がないことから、単に経済的な観点からだけでなく将来的にもサービス提供が必要となる基盤的な情報通信インフラとして衛星通信は重要である。さらに、面積カバー率 100%のブロードバンド移動通信サービスを実現する唯一の手段であり、デジタル・ディバイドの是正に有効である。

「e-Japan 戦略」及びその後策定された「e-Japan 重点計画-2003」では、移動通信サービスに関し、「無線インターネット環境を実現し、シームレスな移動体通信サービスを実現する。」との目標を掲げている。また、総合科学技術会議が取りまとめた情報通信分野の重点領域においても、「いたるところにネットワークが存在する(ユビキタスなネットワーク)」を目標としており、総務省では次世代の情報通信戦略「ユビキタスネット・ジャパン(u-Japan)」構想を策定した。こうした目標をふまえ、ユーザニーズに応えるためには、ブロードバンドサービスを含めて、面積カバー率 100%(海上、上空を含む)となる、地上の移動通信サービスを補完する衛星による移動体通信サービスの実現が必要である。

(研究開発課題全体の目的)

以上のような背景から、今後、新たな衛星通信・放送技術では、以下の実現、性能向上が重要である。

(1) マルチビーム化

インターネットの爆発的なトラフィックの増大への対応を、限られた周波数資源で行うには、周波数を高めるだけでは不十分であり、周波数資源を有効に活用する技術を組み合わせる必要がある。具体的には、マルチビーム化により、周波数の空間的な再利用することで、衛星全体のスループットを大幅に向上させることが可能になる。

また、マルチビーム化には、ビームを絞ることで、衛星送受信アンテナの利得を向上させ、高速化を図ることができるメリットもある。

(2) 地上局の小型化

あらゆるところで衛星インターネット等の利用を実現するためには、地球局を、どこにでも設置可能にするために小型軽量化、低消費電力化を図る必要がある。地球局に負担をかけずに、これを実現するには、衛星側の送信電力を高めることが有効である。これには、上述のマルチビーム化、サービスエリアに合致したビームパターン化、大規模アレーアンテナが有効である。将来的には、衛星からのビームを地球局の移動に従ってトラッキングする技術も期待される。

(3) 自在なビーム制御

衛星、国際サービスを提供する場合、現状では需要の高い地域を予め固定ビームでカバーするような衛星の設計を行っているが、10～15年という衛星の運用期間中に対象地域内の各国の経済情勢や地上インフラの整備状況が変化し、当初想定していた需要と大きく異なっていくことも考えられる。このような場合に対処するためには、衛星打ち上げ後にもビームのカバレッジを変更できるようにしておくことが必要である。

(4) 柔軟な回線設定

今後の高速化には、使用可能な帯域が広い高周波数帯(たとえば Ka 帯)の利用が不可欠である。しかしながら、Ka 帯は Ku 帯などと比較して降雨減衰が大きいことから、回線の稼働率が低下しやすい。その対策として、降雨地域向けに衛星側の送信電力を増大させて、降雨減衰を補償する必要がある。特に、降雨の多いアジア・太平洋地域にはニーズが高い技術である。

こうしたビーム制御により、降雨減衰対策の他にも、例えば災害の発生によりトラフィックが大きく変動した場合等にも、需要が増加した地域への送信電力の割当てを増やすことができ、柔軟な回線設定が可能となる。

以上のような要求を実現させる手段として、フェーズドアレーアンテナ装置によるビーム形成技術は有効であり、様々な研究・開発が進められている。フェーズドアレーアンテナを用いることにより、上述のようなメリ

ットを享受することが可能となる。より高いサービスを実現するために、フェーズドアレーアンテナ装置に対して、さらなる多ビーム化、大規模アレー化、高周波数化が必要となる。その一方、衛星の搭載可能質量、容積、消費電力の制限から、装置の小型化・軽量化・低消費電力化が望まれている。

従来、フェーズドアレーアンテナへのビーム形成手段としては、アンテナ各素子、ビーム毎に、マイクロ波位相器で各アンテナ素子への給電位相を制御するビームフォーミングネットワーク (BFN)と、デジタル信号処理によりビームパターンを制御するデジタルビームフォーミング (DBF)がある。しかしながら、実用化されているものは、サイズ、消費電力などの制限により、限られた規模のものとなっている。以上のような状況を解決するブレークスルーの一つとして、本研究開発では第 3 のビーム形成手段として、光信号処理技術を用いてアレーアンテナの放射パターンを制御する、“光制御ビーム形成”(OBF: Optical Beam Forming) 技術の開発を行うことを目的とする。

参考までに、研究開発分野の現状として、図 1-1 に様々な機関から報告されている光制御型ビーム形成技術について、アンテナ素子数—周波数の関係を示すとともに、本研究開発の目標の位置づけを示す。

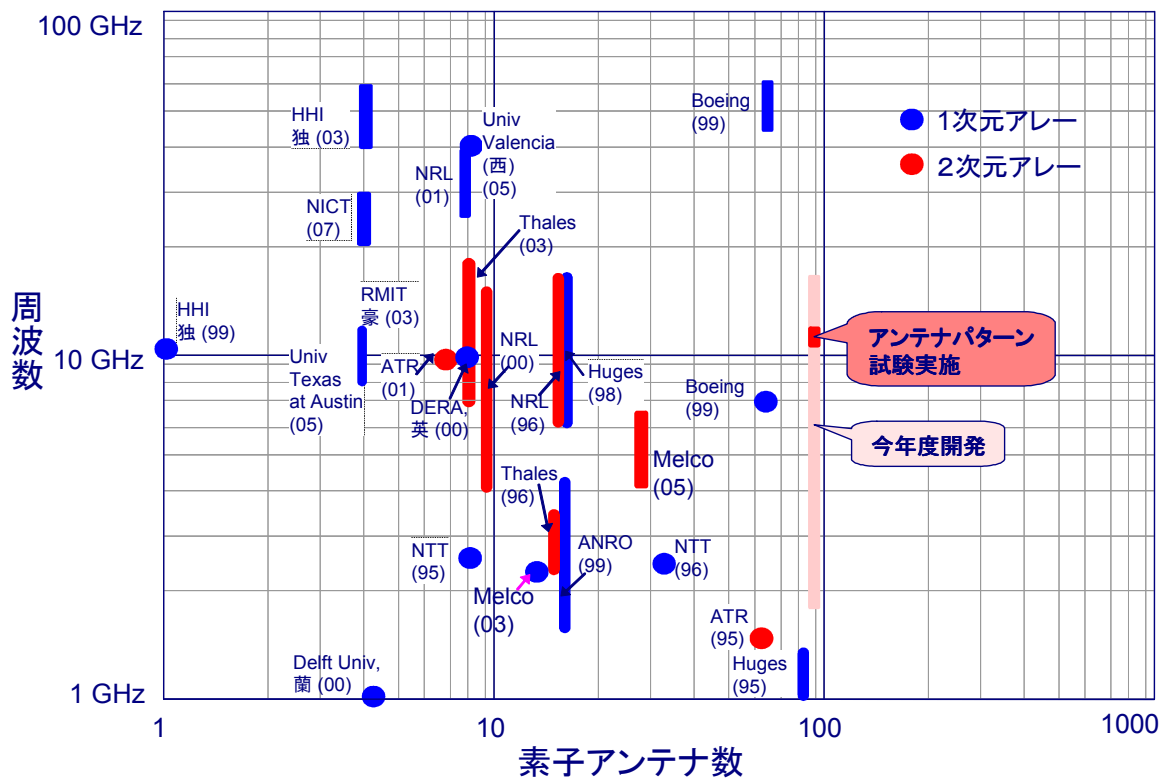


図 1-1: 開発の技術的位置付け
光制御型アレーアンテナの報告例におけるアンテナ素子数—周波数

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

最終的な衛星搭載用アンテナ装置として、アンテナ素子数 1000 素子クラス、ビーム数 50 ビーム以上、周波数 L 帯から Ka 帯の任意の帯域にて使用可能なフェーズドアレーアンテナ装置を実現するためのキー技術であるビーム形成技術の研究開発を行う。本研究では、上記性能を目指し、光信号処理を用いてアレーアンテナのビームパターン制御を行う光制御ビームフォーミング技術及の研究開発を行う。

具体的には、光学的フーリエ変換機能を利用した光信号処理回路により、アンテナ励振振幅、位相分布の演算を行う。

光技術を適用することにより、次のような効果が期待できる。

- ・ 小型・軽量化

マイクロ波位相器による BNF では、通常“アンテナ素子数”×“ビーム数”の位相器及び、制御信号用のラインが必要であり、素子数及びビーム数が増大すると、回路規模は著しく増大する一方、本方式では空間光並列信号処理により、アンテナ素子数、ビーム数に対する処理回路の依存度は小さく、多素子化、マルチビーム化に有利である。

- ・ 広帯域化、高周波数化が容易

マイクロ波のキャリア数周波数の数 GHz～数 10 GHz に対し、周波数約 190 THz(1.5 μm)の光周波数領域で処理を行うため、ビーム形成回路はマイクロ波周波数にほとんど依存しない。

さらに、伝送路に光ファイバを使用することから、耐電磁干渉、低伝送損失、フレキシブルな給電線が可能である。

本研究開発では、このような特徴を持つ光制御ビーム形成技術として、以下の技術開発を行う。

(ア) 光信号処理回路技術

任意の光の波面(振幅、位相)生成、制御を行う光信号処理回路技術の開発を主に行う。

波面生成に関しては、空間光変調器の検討、設計、製作により、任意の光波面の生成技術を確立する。波面制御技術に関しては、所望のアンテナ放射ビームに必要な、アンテナ励振信号を光信号処理により算出する技術を開発し、前記、空間光変調器への入力信号とする。

開発期間の後半では、マルチビーム化技術の開発を行う。マルチビーム化は、光の空間での波長分波、合成技術による波長多重化技術を適用した光信号処理回路技術を開発する。

その他に、基本特性として、光により形成したマイクロ波信号の位相雑音、S/N の向上化技術開発を行う。

(イ) 指向性合成技術

光制御ビーム形成回路に適した指向性合成技術の開発を行う。

光制御ビーム形成回路はまだ基礎研究段階であり、空間光変調器で形成した光の波面分布とアレーアンテナ放射ビームとの関係についての指向性合成技術は確立されていない。本研究では、光信号処理ビーム形成回路に適した解析技術の開発を行い、低サイドローブ化技術、ビーム強度分布の制御技術、キャリアブレーション技術の開発を確立する。

最後に、上記(ア)にて試作した光信号処理回路を用いて実験による検証を行う。

本目標はアンテナ励振振幅位相分布を光信号処理により生成する光制御ビーム形成回路の開発である。全体構成を図 2-1-1 に示す。

本システムは主として(1) 光信号にマイクロ波を重畳するマイクロ波-光変換器、(2) 所望の光振幅・位相分布のビームを形成する光ビーム形成回路、(3) 所望するアンテナパターン形成に必要な光ビームの振幅位相を演算する信号処理回路、(4)光制御ビーム形成回路の出力信号を光電変換し、アレーアンテナの各素子給電する光-マイクロ波変換器&アレーアンテナから構成される。

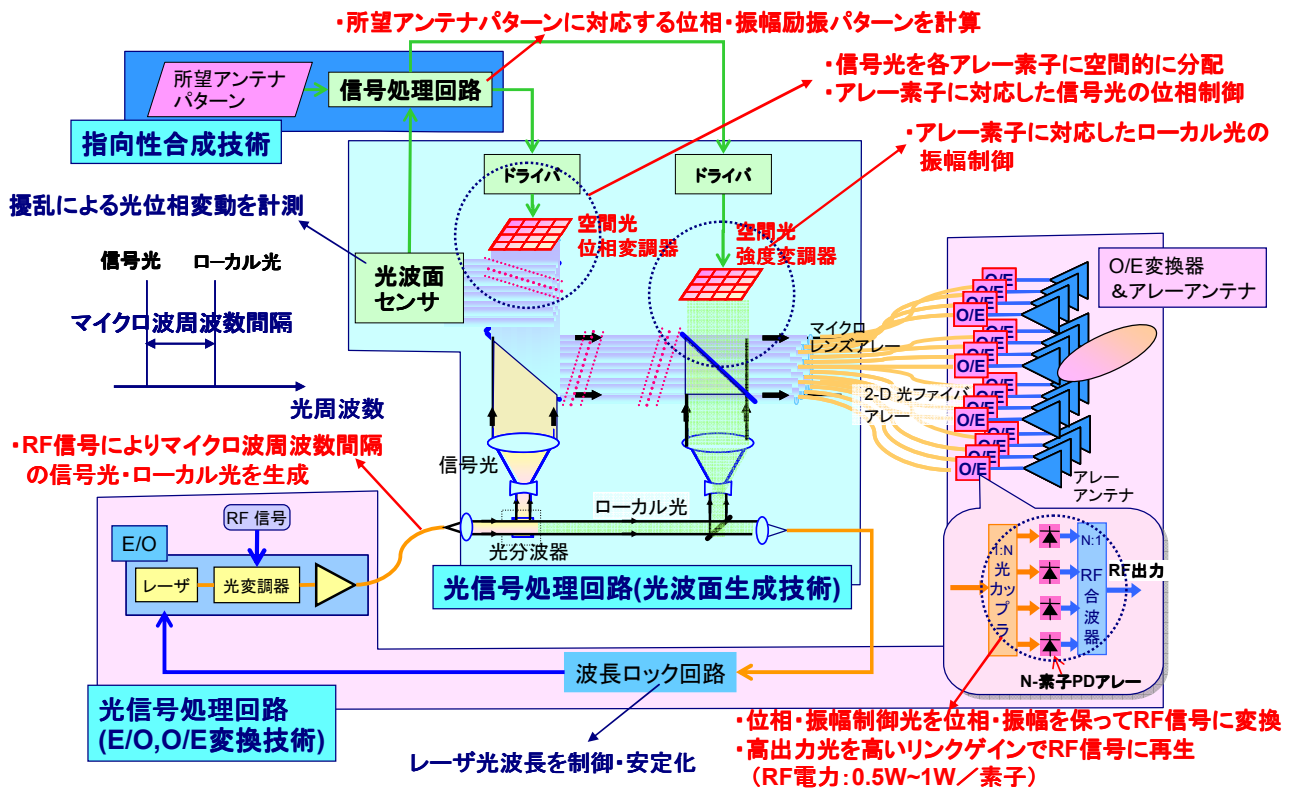


図 2-1-1 : 光制御型アレーアンテナの全体構成図

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標(平成21年3月末)

「移動体向け超高速通信衛星搭載ビーム形状可変マルチビームアンテナ装置の研究開発」
以下の性能を得るアレーアンテナ用ビーム形成回路を実現する.

- ・アンテナ素子数：100 素子以上
- ・周波数 L~Ka 帯の任意のバンド使用可能
- ・ビーム数：10 ビーム以上，かつ各ビームを独立に制御可能

(ア) 光信号処理回路技術に関する研究開発

- ・装置の安定化を図るために，光学系の短尺化，安定技術，10 波以上の波長分波，合波技術の確立

(イ) 指向性合成技術の開発

- ・サイドローブレベル < -25 dB
- ・光領域での校正技術の確立

2-2-2 中間目標(平成 19 年 1 月末)

以下の性能を得るアレーアンテナ用ビーム形成回路を実現する.

- ・アンテナ素子数：64 素子以上
- ・周波数 L~Ku 帯の任意のバンド使用可能
- ・ビーム数 4 ビーム以上，かつ各ビームを独立に制御可能

(ア) 光信号処理回路技術に関する研究開発

- ・4 波以上の波長分波，合波技術の確立

(イ) 指向性合成技術の開発

- ・サイドローブレベル < -20 dB
- ・光領域での校正技術の実証

2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
ア. 光信号処理回路技術							
(1) 光波面生成, 制御技術 (ビーム成形)	→						
(2) マイクロ波/光, 光/マイクロ波変換技術の開発	→						
(3) 光多重化技術 (マルチビーム化)			→				
イ. 指向性合成技術							
(1) 指向性合成技術 (アンテナ放射パターン解析, 低サイドローブ化技術)	→						
(2) アンテナ校正技術		→					
間接経費							
合計							

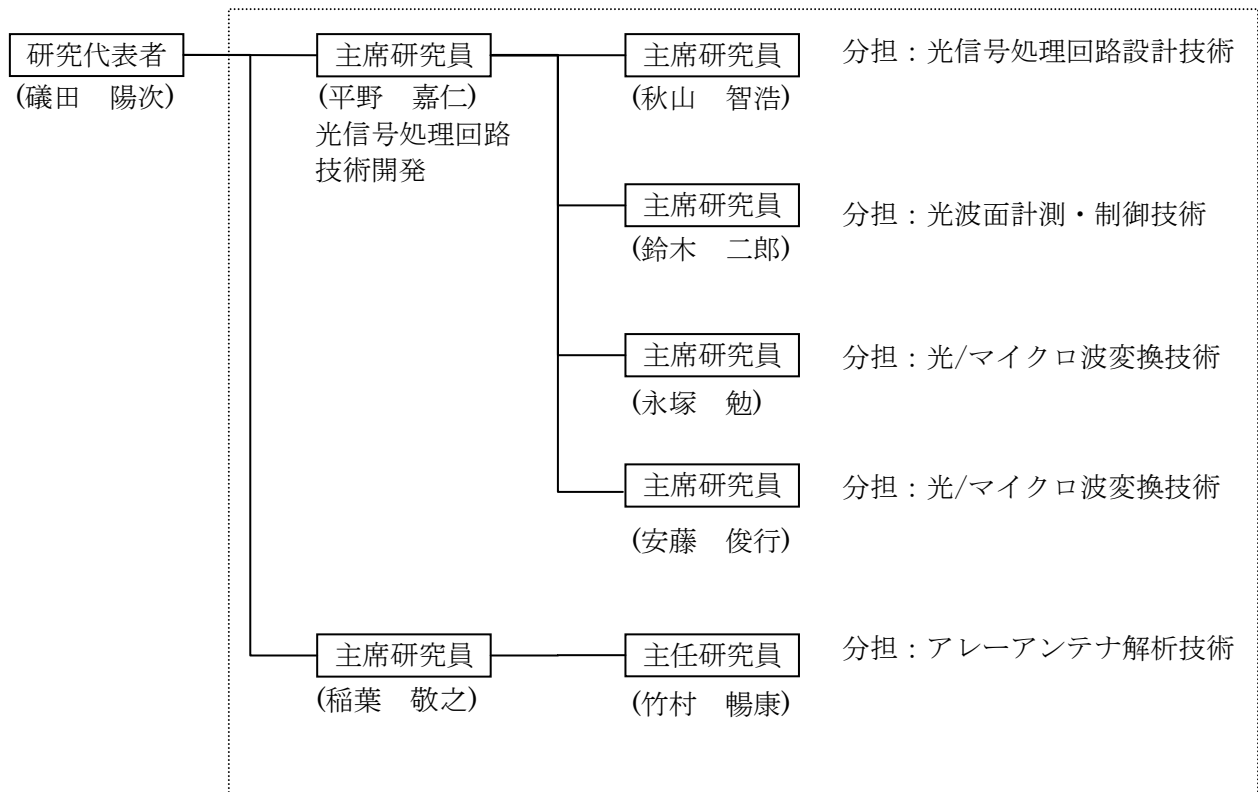
注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上. また, 間接経費は直接経費の30%を上限として計上 (消費税を含む.).

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



4 研究開発実施状況

4-1 光信号処理回路(光波面生成技術)の研究開発

4-1-1 はじめに

光技術を適用したアレーアンテナの制御技術として、様々な方式の研究開発が行われている。衛星搭載に重要な小型化、軽量化、及び低消費電力化の観点から、平成16年度に方式トレードオフを実施し、反射型の空間位相変調器を用いた光波位相制御方式を選定し、平成17年度に、反射型空間光変調器などの主要な要素デバイスの試作試験、空間光変調器で形成すべき光波面の演算技術の基本検討を実施した。本節では、光信号処理回路(光波面生成技術)に関し、光波面形成部の試作評価結果、光位相センサおよび位相回復アルゴリズムの設計、評価結果について示す。

4-1-2 光波面形成部

光波形成回路の全体構成を図4-1-1に示す。図4-1-1において、光波面ビーム形成回路に入射した光は光分波回路(1)により信号光とLO光ビームに分離する。信号光ビームは反射型空間光位相変調器(2)により、所望のアンテナ励振位相分布の位相分布光に変調される。空間光位相変調器(2)は、2次元アレー状に配した piezoアクチュエータにセグメント化されたミラーアレーを設置し、ミラー反射面の位置を機体的に制御することにより位相変調を行う。さらに、反射時の開口率を高めるために、ミラーアレーの前にはマイクロレンズアレーを設置した。

一方、LO光ビームは強度変調型の空間光変調器(3)で所望のアンテナ励振振幅分布に変調する。位相変調信号光ビームと空間的に合波した後、空間的にサンプリング(4)し光-マイクロ波変換器(O/E)に伝送する。

さらに、光ビーム形成器内の反射型空間光位相変調器(2)の位相変調特性の変動、光学系の収差などによる位相変動が、マイクロ波の励振位相変動となってあらわれるため、光空間位相検出装置(4)により光波の位相分布を常時センシングし、位相制御にフィードバックを行う。

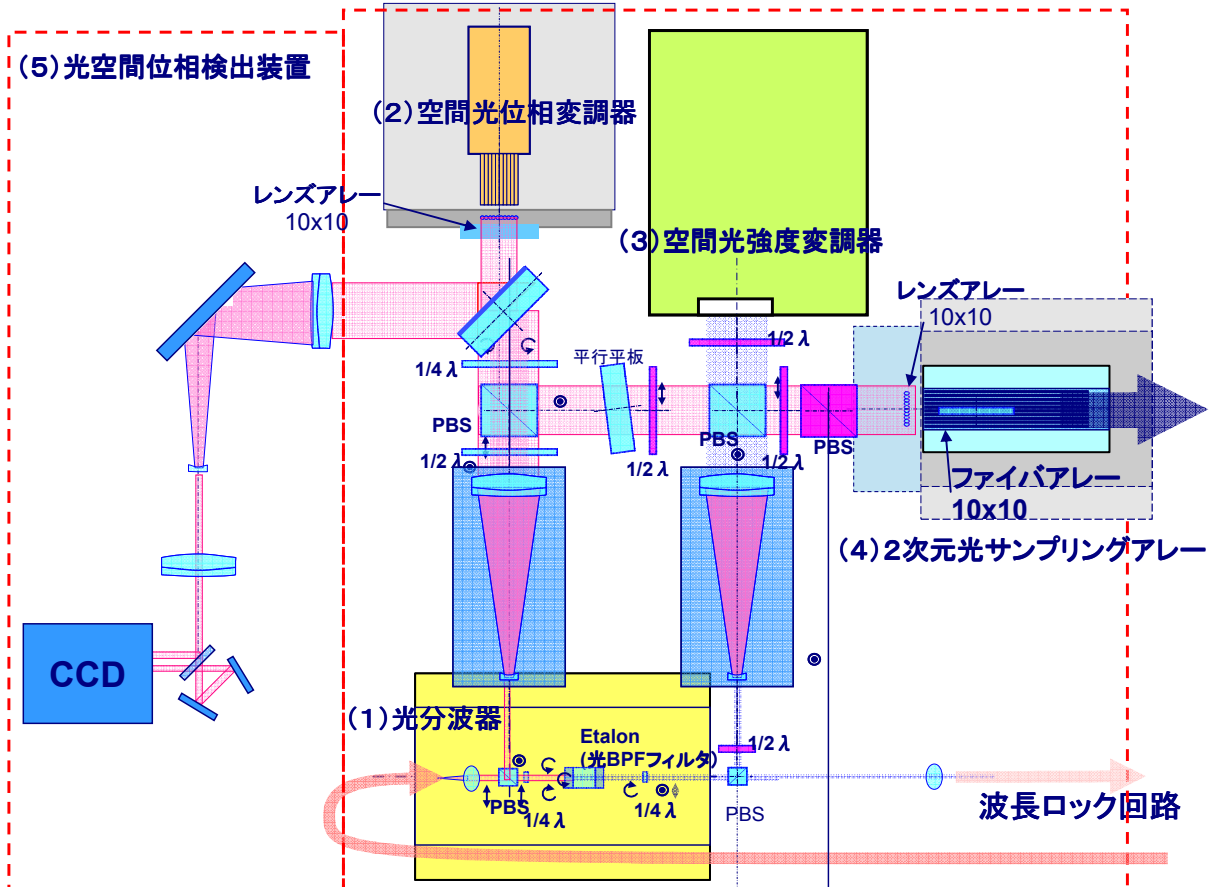


図 4-1-1： 光波面形成回路の全体構成

以下に、主要構成要素の開発状況を示す。本節では(1)光分波器～(4)2次元光サンプリングアレーの各構成要素について説明し、次節で(5)光位相分布モニタ回路の詳細を示す。

(1) 光分波器

図 4-1-2(a)に光分波回路の構成を、図 4-1-2 (b)に試作部品の概観写真を示す。図 4-1-3 に分光透過率・反射率の設計値、図 4-1-4 に分光透過率の実測結果を示す。

主要要素であるエタロンフィルタは、温度安定性が良いエアギャップタイプを採用した。また、L~Ku 帯へ適用するために、FSR : 25GHz, Finesse: 77, FWHM:325MHz とした。図 4-1-3 より、信号光の抑圧比は、ローカル光からオフセット周波数 1GHz (L 帯)で-15dB,2GHz 以上(S 帯)で-20dB, 4-6GHz(C 帯)で-25dB, 12-14GHz(Ku 帯)で-30dB 以上の消光比が得られる。以上より L~Ku 帯の変調波の分離が可能となる。図 4-1-4 より、試作モジュールは設計通りの分光特性が得られた。

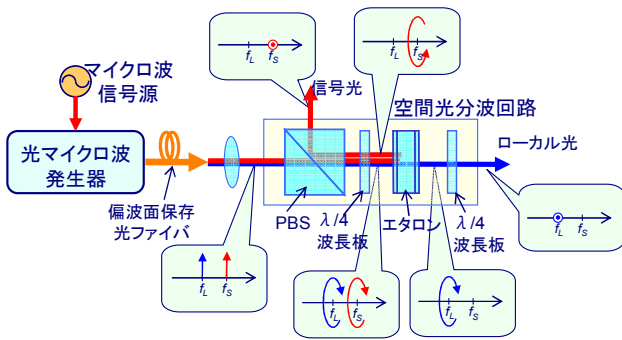


図 4-1-2(a): 光分波器の構成

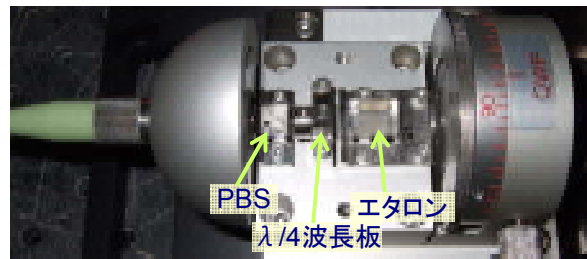


図 4-1-2(b) : 試作モジュールの写真

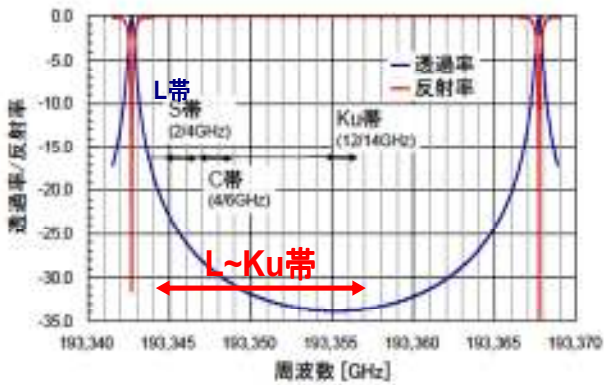


図 4-1-3: 光分波回路の分光透過率/反射率の設計値

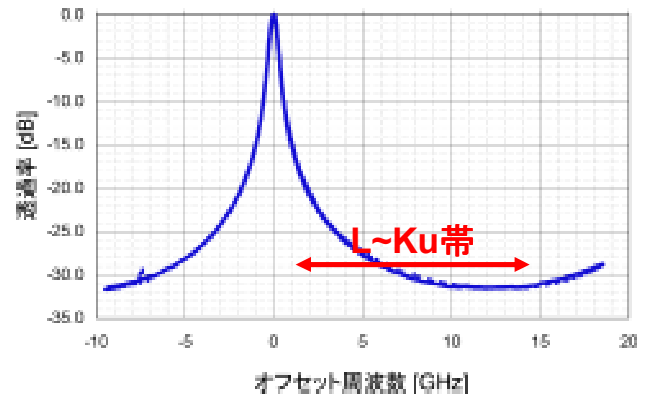


図 4-1-4: 試作光分波回路の分光透過率の実測値

(2) 空間光位相変調器

これまでに光ビーム形成回路のキーコンポーネントである空間光変調器に対し、各種方式のトレードオフを行い、セグメントミラーと PZT アクチュエータを用いた方式を選定した。セグメントミラーの試作を行い、PZT アクチュエータアレイと組み合わせることにより、10×10 アレイの変調器の試作を完了した。

試作素子の外観を図 4-1-5 に、主要諸元を表 4-1-1 に示す。図 4-1-6 に印加電圧に対する各ミラーの移動量の測定結果を示す。16 μm 以上(10 λ 以上@1.5 μm)の駆動ストロークが得られた。図 4-1-7 は幾つかの素子に対する、位相変調特性の測定値である。波長 1.5 μm で約 12V で 2π の位相変調可能なことが分かる。

以上より、10x10 アレイで所望の位相変調が可能であることを確認した。さらに、開口率向上及び、ミラー面の傾きによる反射ビームのティルト低減のため、セグメントミラー直前に図 4-1-8 のように、マイクロレンズアレイを設けている。

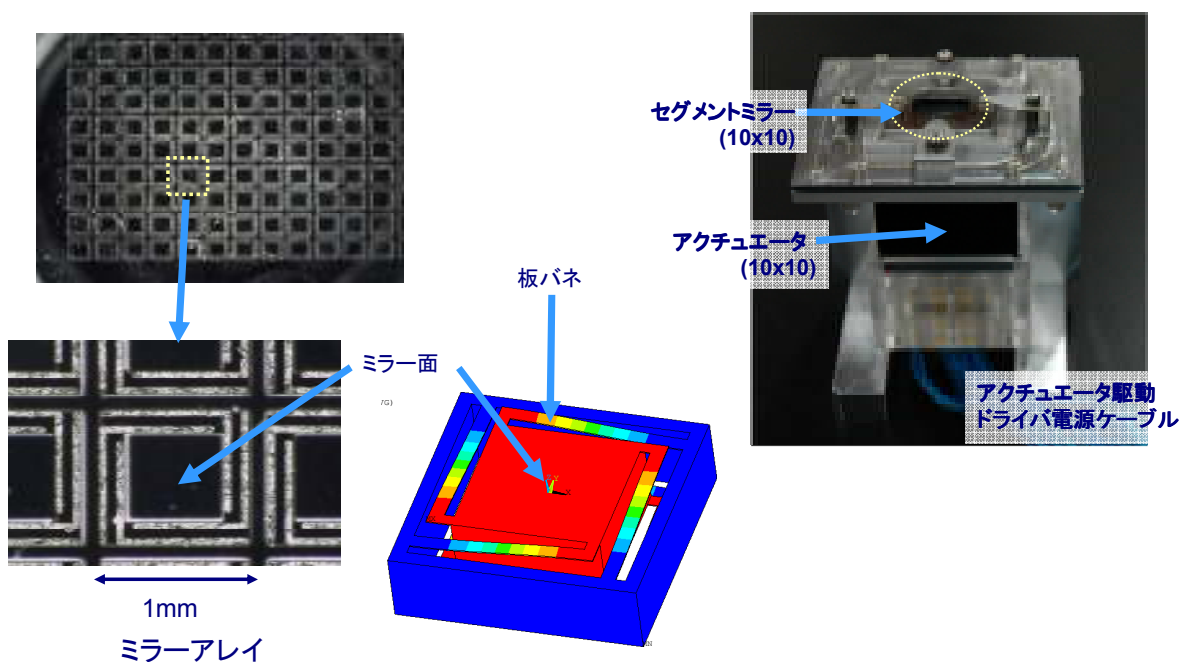


図 4-1-5 反射型空間光位相変調器の外観

表 4-1-1: 反射型空間光位相変調器の概略仕様

ミラー素子数	100 (10×10)
ミラー素材	Si+Au
駆動方式	PZT
素子ピッチ	1mm×1mm
鏡面の傾き	<0.1mrad
固有振動数	>1kHz
ストローク	5 μm P-V
駆動分解能	0.07 μm
耐レーザーパワー	>25W

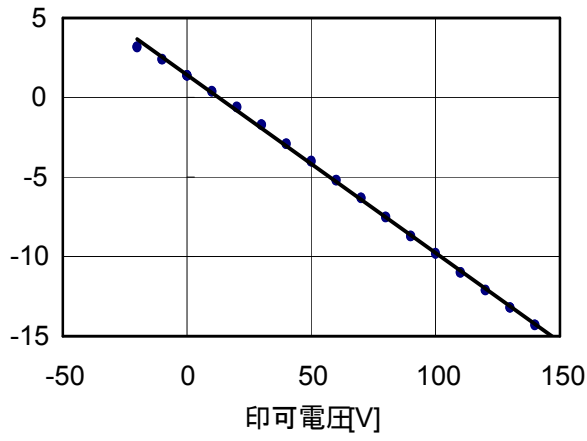


図 4-1-6: 反射型空間位相変調器の入出力特性 (印可電圧—ミラー移動量)

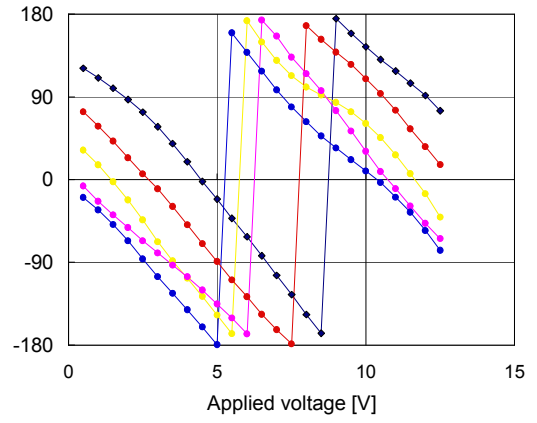


図 4-1-7: 反射型空間位相変調器の入出力特性 (印可電圧—位相変調量)

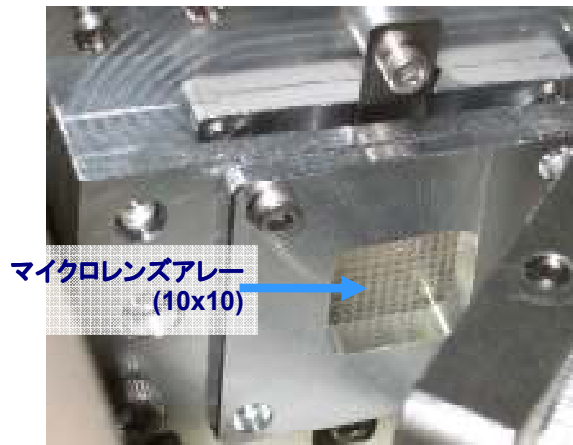


図 4-1-8: 反射型空間位相変調器の外観図 (マイクロレンズアレー装着時)

(3) 空間光強度変調器

図4-1-9に空間光強度変調器の構成, 図4-1-10に変調特性の例を示す. 位相変調器により構成している. 図4-1-10よりダイナミックレンジは20dB以上が得られていることが分かる.

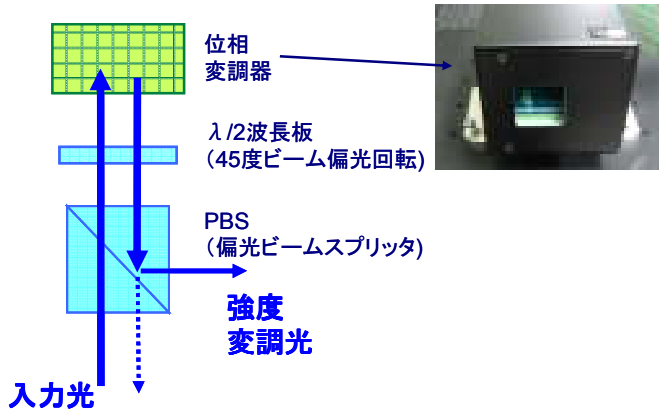


図4-1-9: 空間光強度変調器の構成

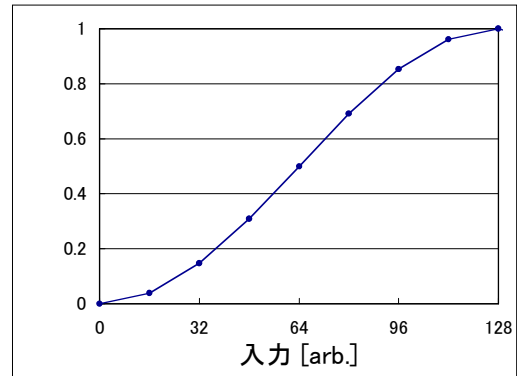


図4-1-10: 空間光強度変調器の変調特性

(4) 2次元光サンプリングアレー

前記, 反射型空間光変調器にて位相変調されたビーム光を光ファイバアレーにより空間的にサンプリングする. 光ファイバには, 広帯域信号を伝送するためにシングルモードファイバの使用が望ましいが, シングルモード光ファイバはコア径(モードフィールド径)が約 $10\mu\text{m}$ と小さく, また, 前述の反射型空間光変調器の画素ピッチは $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ であるため, 空間光変調器で変調されたビーム光を効率よく光ファイバに結合させるために, 各ファイバにビーム結合用にマイクロレンズアレーを装着した構成のモジュールとした. 図4-1-11に試作モジュールの外観を示す.

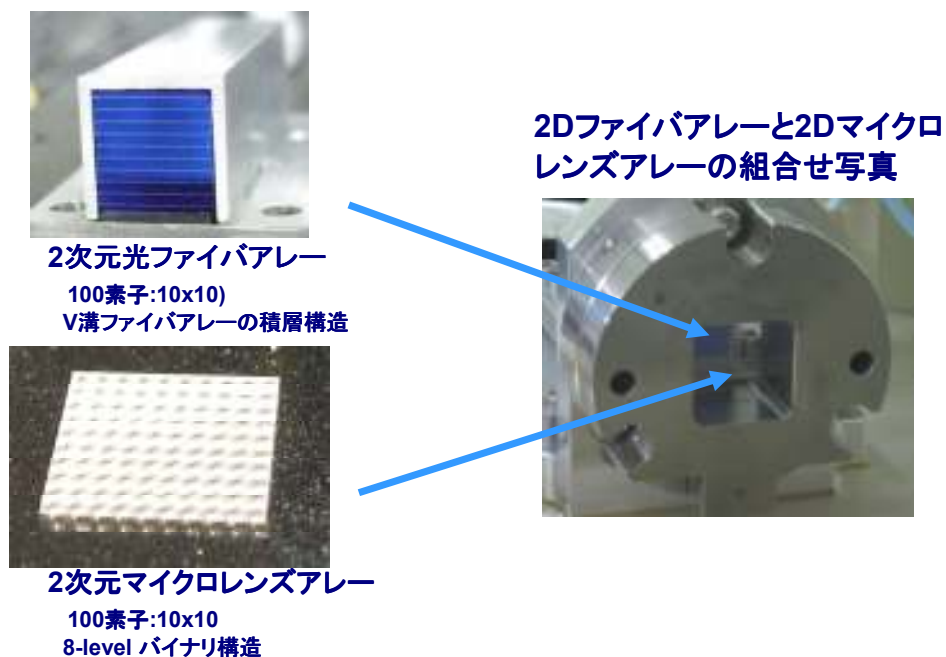


図4-1-11 :2次元光サンプリングアレーの外観写真

・全体写真

図 4-1-12 に光波面形成装置の外観写真を示す. なお光位相分布モニタ回路については次項で示す.

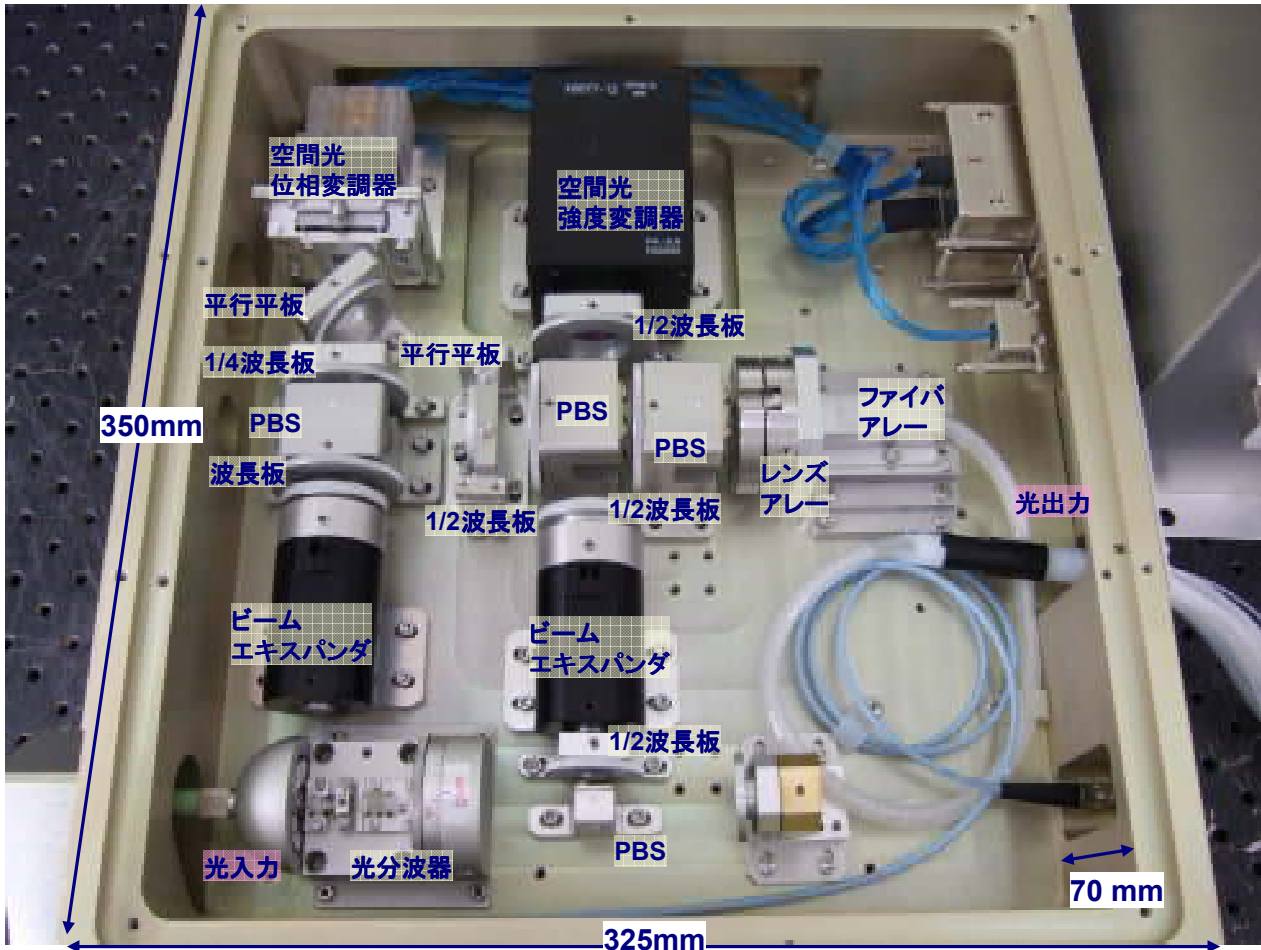


図 4-1-12: 光波面生成回路の外観写真

4-1-3 位相センサ & 位相回復アルゴリズム

A. 目的

本研究開発における光制御型ビーム形成回路では、フーリエ変換光学系型と、空間位相制御型とのトレードオフを行い、空間位相制御型を選定した¹。この空間位相変調型においては、空間位相変調器が変換する光波の位相変換量を、アンテナ開口における個々の素子アンテナの形成すべき電界位相に一致させればよく、従って一般のアレイアンテナにおいて大型の移相器によって行っていた素子アンテナの位相制御をそのまま適用できる利点がある。しかし、アンテナビームの放射強度分布を所望のパターンに制御するためには、空間位相変調器による位相変換精度を波長の 1/10 以下とする必要がある。衛星搭載のためには、宇宙空間における過酷な温度変化や、姿勢制御動作時の振動などで生じる位相擾乱を抑圧するフィードバック制御回路が必須と考える。ここでは、フィードバック制御装置に制御指令を与える光空間位相検出装置(以下本装置という)の設計結果、および本装置のベンチトップ試験結果について説明する。

B. 方式検討

本装置に要求される技術要件を以下に示す。

(1)寸法

本装置は衛星搭載を考慮し開発した光制御型ビーム形成回路(以下本体という)に組み込む光学センサであり、本体同様小型軽量である必要がある。本体寸法 425×360×100mm の3分の1程度を目標とする。

(2)空間位相パターン

本体の空間位相変調器により形成される空間位相分布は、1セグメントが 1×1mm、セグメント数 10×10 の離散化されたパターンとなる。本装置は、これを検出できる必要があり、従って、Shack-Hartmann 方式などの波面傾斜分布を測定する手法は適用除外となる。

(3)計測レート

本装置は光空間位相分布を検出するので、どの方式を採用するとしても CCD のような2次元検出器を用いる必要がある。また、本装置がフィードバック補正を行う対象の擾乱時定数は未知であるが、少なくとも数 Hz 以上の制御帯域は必要と考える。以上から、CCD のフレームレートと同等の 30Hz 以上を目標とする。

以上述べた要件から、Phase-Diversity センサ方式が良いと考える。Phase-Diversity センサ方式の概念を図 4-1-13 に示す。複素振幅分布のフーリエ変換像の強度分布から、フーリエ変換前の複素振幅分布を数値演算により推定する位相回復法アルゴリズムが一般に知られている。Phase-Diversity センサは、フーリエ変換像を Fraunhofer 回折像から取得し、位相回復法アルゴリズムにより空間位相分布を演算出力するものである。Phase-Diversity 方式を選定した理由を以下に述べる。

- 一般的な2光束干渉計測方式は干渉光路を形成するため、小型化が困難である。
- Fraunhofer 回折像はフーリエ変換レンズを用いることで近距離に形成でき、小型化に適している。
- ピストン位相パターンを検出することができる。

¹平成 16 年度 研究開発成果報告書「移動体向け超高速通信用衛星搭載ビーム形状可変マルチビームアンテナ装置の研究開発」

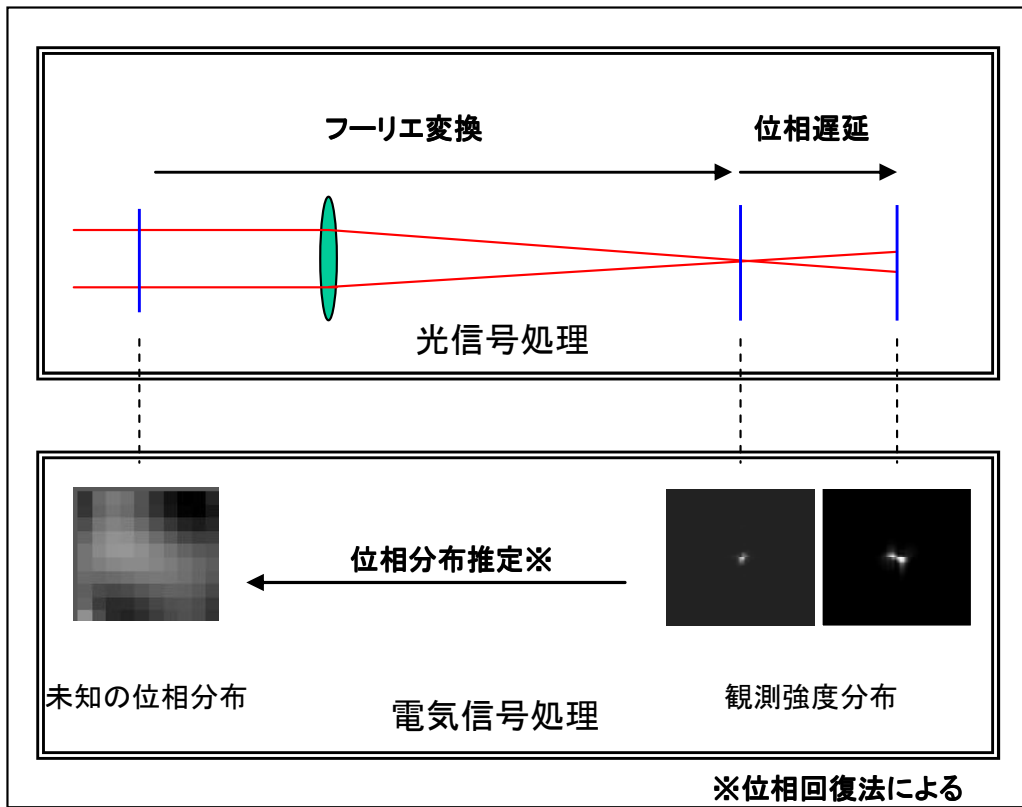


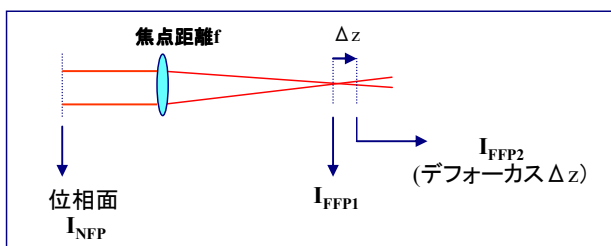
図 4-1-13. Phase-Diversity センサ方式の概念

C. シミュレーション検討

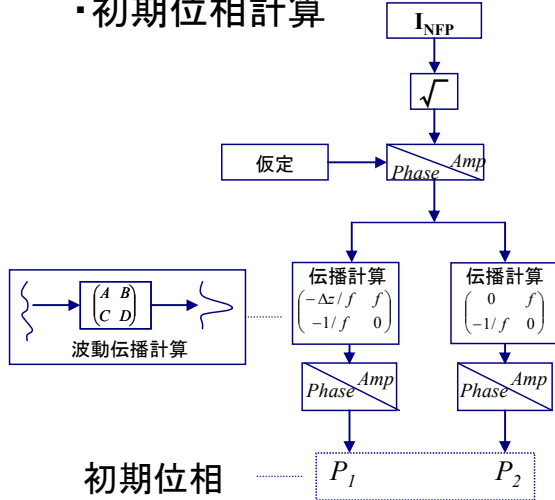
本装置において、Phase-Diversity 方式が有効であることを、計算機シミュレーションによって検証した。ここで用いた位相回復法のアルゴリズムを図 4-1-14 に示す。まず、フーリエ変換レンズの焦点、及び焦点はずれ位置で計測した強度分布(以下 Phase-Diversity 像という)から得られる振幅から、波動伝播計算により開口面での2通りの複素振幅を計算する。次に、これらを平均した複素振幅を波動伝播計算によって Phase-Diversity 像位置での複素振幅を計算し、振幅のみを Phase-Diversity 像から得られる複素振幅に置き換える。以上を反復計算することで、開口面での位相分布が回復される。

計算機シミュレーション結果を図 4-1-15 に示す。4セグメントのピストン位相、及び10セグメントのピストン位相(空間位相変調器を想定)を仮定し、Phase-Diversity 像を波動伝播計算により求めた。次に前記アルゴリズムにより、空間位相の推定精度を検証した。どちらの例でも 10 回以下の反復回数で、十分良い精度で元の位相を回復できている。

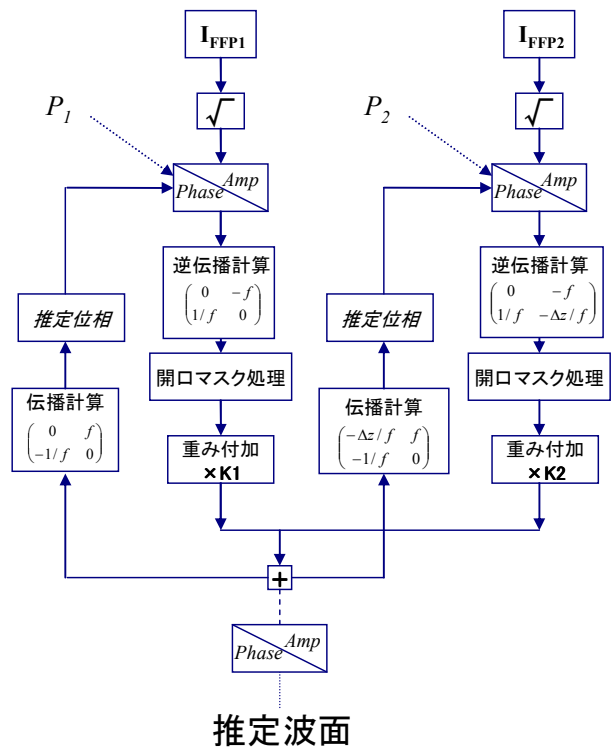
Gerchberg-Saxtonアルゴリズム※



・初期位相計算

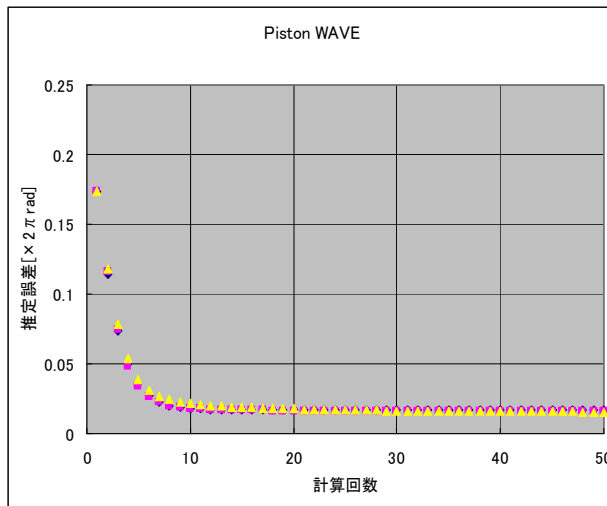


・位相回復計算



※R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, OPTIK, 35, 234-246 (1972).

図 4-1-14 位相回復アルゴリズム

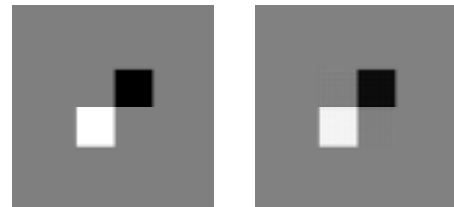


ピストン波面に対する反復計算回数と回復波面推定誤差

(a) 4セグメントピストン

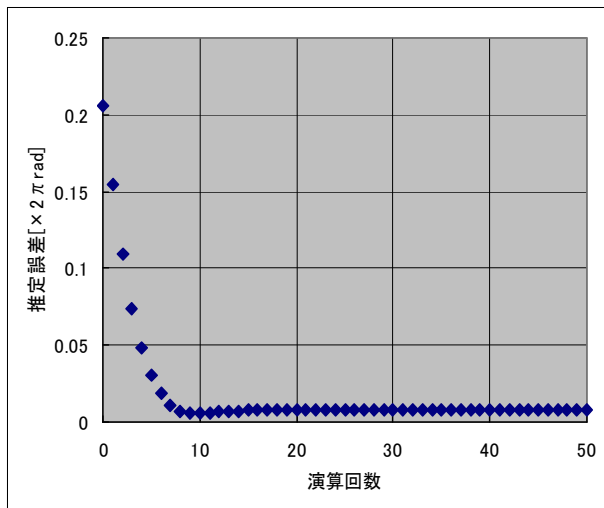


Phase-Diversity 像



正しい位相

推定位相



ピストン波面に対する反復計算回数と回復波面推定誤差

(b) 10セグメントピストン位相



Phase-Diversity 像



正しい位相

推定位相

図 4-1-15: シミュレーションによるピストン位相推定結果

D. 構成と仕様

設計製作した光空間位相検出装置の構成を図 4-1-16 に、仕様を表 4-1-2 に示す。本装置は、フーリエ変換レンズ、光路2分岐光学系、及び CCD カメラから構成される。以下、それぞれの設計要点を説明する。

(1) フーリエ変換レンズ

Phase-Diversity 像を CCD で十分な解像度で検出するためには、F 値が大きく、従って焦点距離の長いフーリエ変換レンズが必要である。後に述べる CCD カメラの画素ピッチは $30\mu\text{m}$ であり、この10倍以上の回折限界像を形成することを条件とすると、焦点距離は約 1500mm 必要である。以上から、焦点距離に対し全長を短尺化する方法を検討し、3群からなるレンズ系とすることで 340mm とすることができた。

(2) 2分岐光学系

Phase-Diversity 像を1フレーム時間で取得するためには、フーリエ変換レンズからの光束を2分岐し、複数台の CCD カメラで撮像することが考えられる。しかし小型軽量の観点から CCD カメラの台数は少ないほうが良い。これから、ビームスプリッタの反射ビームと、透過ビームを並列に1台の CCD カメラに入射させるレイアウトを考案した。

(3) CCD カメラ

本体のレーザービームは $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の波長であり、この波長を高い輝度分解で計測できる CCD カメラが必要であり、InGaAs 検出器を使用し、12bit のデジタル画像出力が可能である Flir Systems 社の Alpha-NIR を用いた。

表 4-1-2: 光空間位相検出装置の仕様

項目	仕様	
全体	外形寸法	290(D)×110(W)×100(H)
	波長	$1540\pm 20\text{nm}$
	計測範囲	矩形開口 $10\times 10\text{mm}$
	ダイナミックレンジ	$\pm \pi/2\ \text{rad}$
FTレンズ	焦点距離	1500mm
	全長	340mm
	有効開口径	20mm
2分岐光学系	デフォーカス距離	80mm
CCDカメラ	型式	Alpha-Nir
	検出素子	InGaAs
	画素ピッチ	$30\mu\text{m}$
	画素数	$320(\text{H})\times 256(\text{V})$
	フレームレート	30Hz

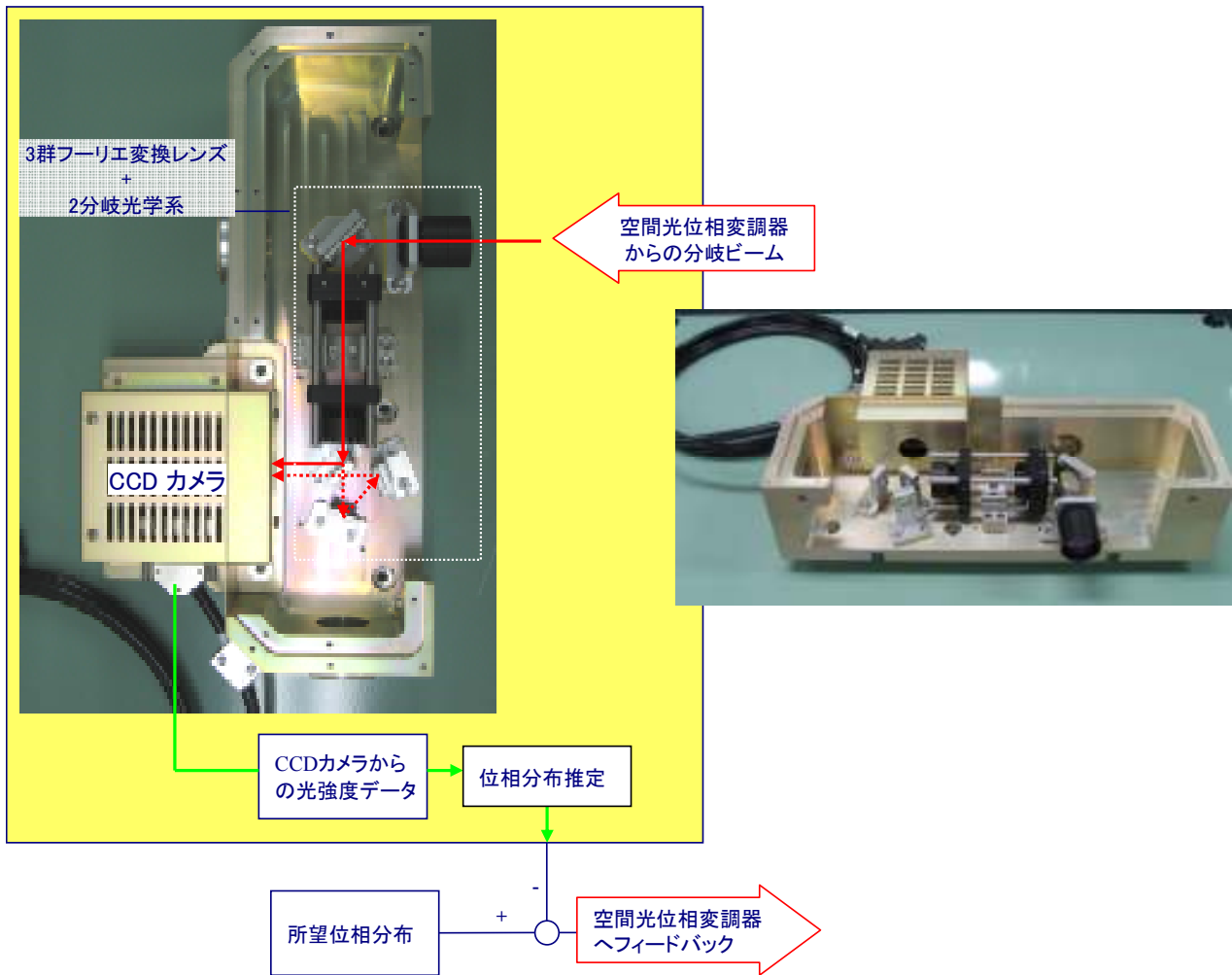


図 4-1-16: 光空間位相検出装置の構成

E 評価試験

ベンチトップ実験により本装置の評価を行なった。評価方法を図 4-1-17 に示す。ピストン位相が検出できることを確認するため、測定対象の空間位相分布はガラス板の透過で生じる位相遅延により階段状の位相分布（以下ステップ位相という）を発生させた。ステップ位相の幅は、本体の空間位相変調器の1セグメントが1mmであることから、1mmピッチで変化させた。

測定の前に行なった校正を以下に示す。

- ・ウェッジプリズムの透過で生じる Phase-Diversity 像の変位から、フーリエ変換レンズの焦点距離を校正
- ・ Phase-Diversity 像の片方のピーク強度が最大となるようにフーリエ変換レンズのフォーカスを調整
- ・光源の波面曲率を変化させ、本装置の位相推定出力が反応することを確認

測定した Phase-Diversity 像と、シミュレーション計算による Phase-Diversity 像との比較を図 4-1-18～19 に示す。シミュレーションと測定結果とがよく一致していることがわかる。次に図 4-1-18～19の測定した Phase-Diversity 像から推定した空間位相分布をグレイスケールマップで示した結果を図 4-1-20 に示す。クリア開口においてはほぼフラットであり、ステップ位相の幅に応じた位相のとびが、推定されていることがわかる。以上より、本装置がピストン位相を計測可能であることを試験により確認した。

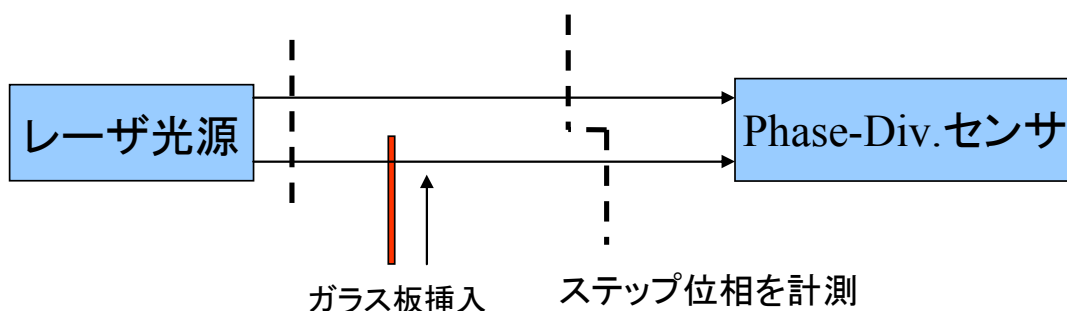
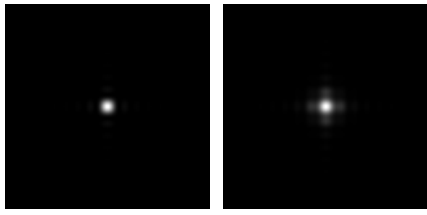


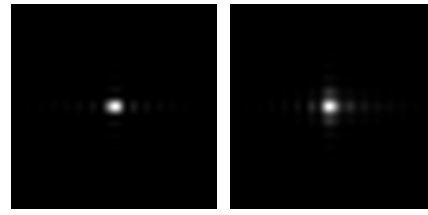
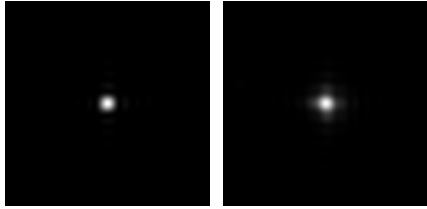
図 4-1-17: 位相検出試験

F まとめ

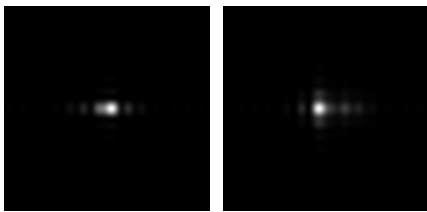
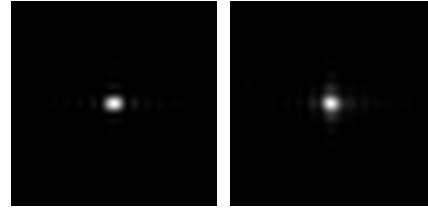
光制御型ビーム形成回路における、擾乱抑圧のために用いる小型軽量な、光空間位相検出装置を設計製作した。高速化のため、1フレームで Phase-Diversity 像を撮像でき、かつ装置寸法の制約からコンパクトな光学系により、光制御型ビーム形成回路本体に組み込むため十分小さい寸法を実現した。さらにベンチトップ試験により、位相検出評価を行なった。今後、信号処理速度の向上に関する開発、及びフィードバックループ試験を行なう予定である。



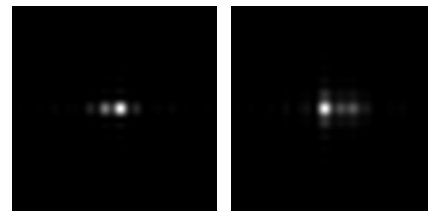
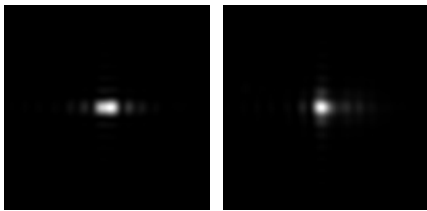
(1)クリア開口



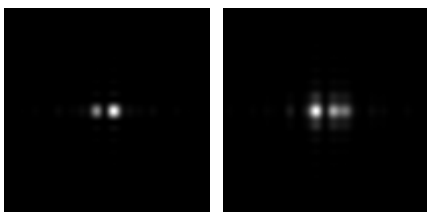
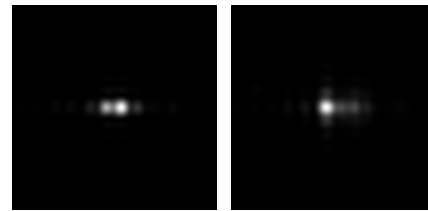
(2)ステップ位相幅 1mm



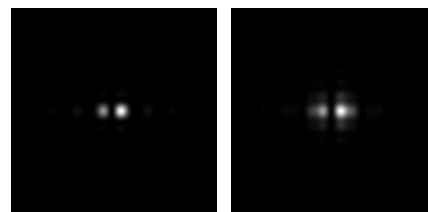
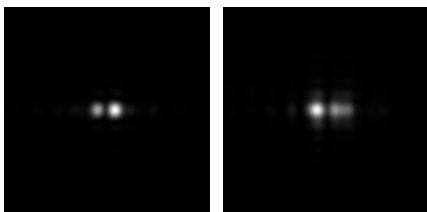
(3) ステップ位相幅 2mm



(4)ステップ位相幅 3mm



(5) ステップ位相幅 4mm



(6)ステップ位相幅 5mm

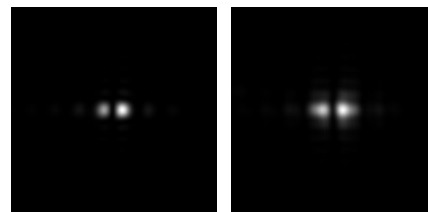
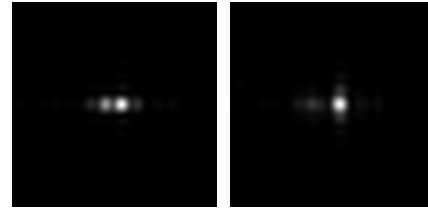
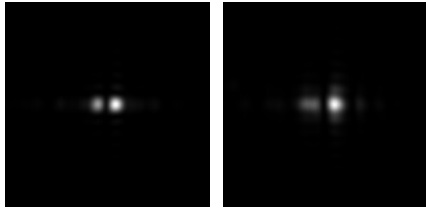
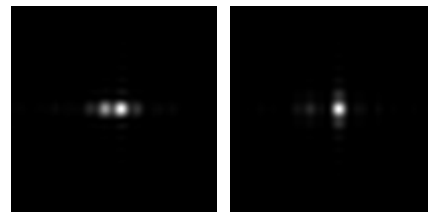
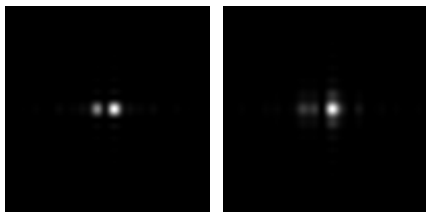
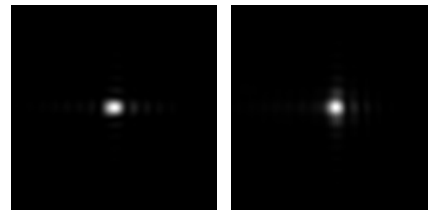
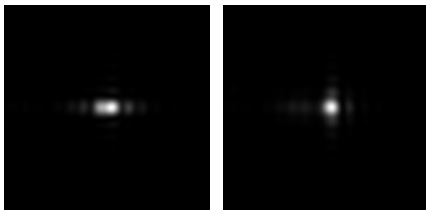
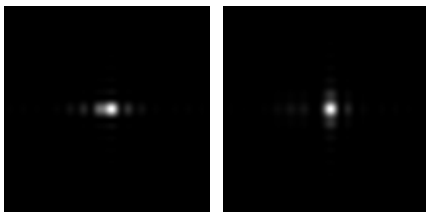


図 4-1-18. Phase-Diversity 像の計算値 (上) と測定結果(下)との比較



(7) ステップ位相幅 6mm

(8) ステップ位相幅 7mm



(9) ステップ位相幅 8mm

(10) ステップ位相幅 9mm

図 4-1-19: Phase-Diversity 像の計算結果 (上) と測定結果(下)との比較

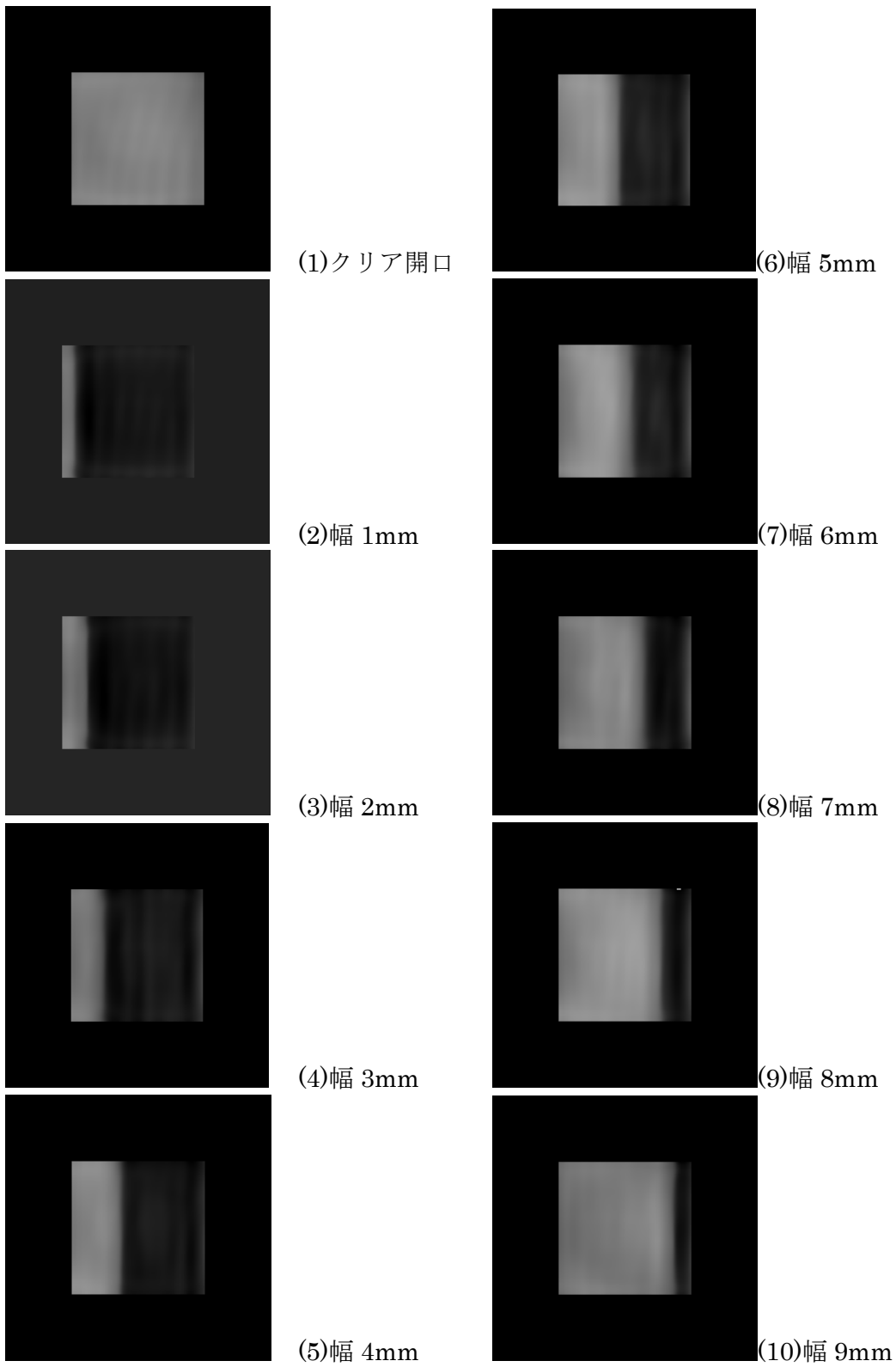


図 4-1-20: ステップ位相の推定結果

4-1-4 マルチビーム形成

光空間位相変調器上での開口分割アレー方式による4ビーム形成方式を提案した。構成を図4-1-21に示す。この例では、光空間位相変調器を2×2の4領域に分割し、これに対応してアレーアンテナの開口も分割し、分割アレー毎に独立にビームを形成する。H19年度より、システムの詳細検討、要素部品の設計、試作を行う予定である。

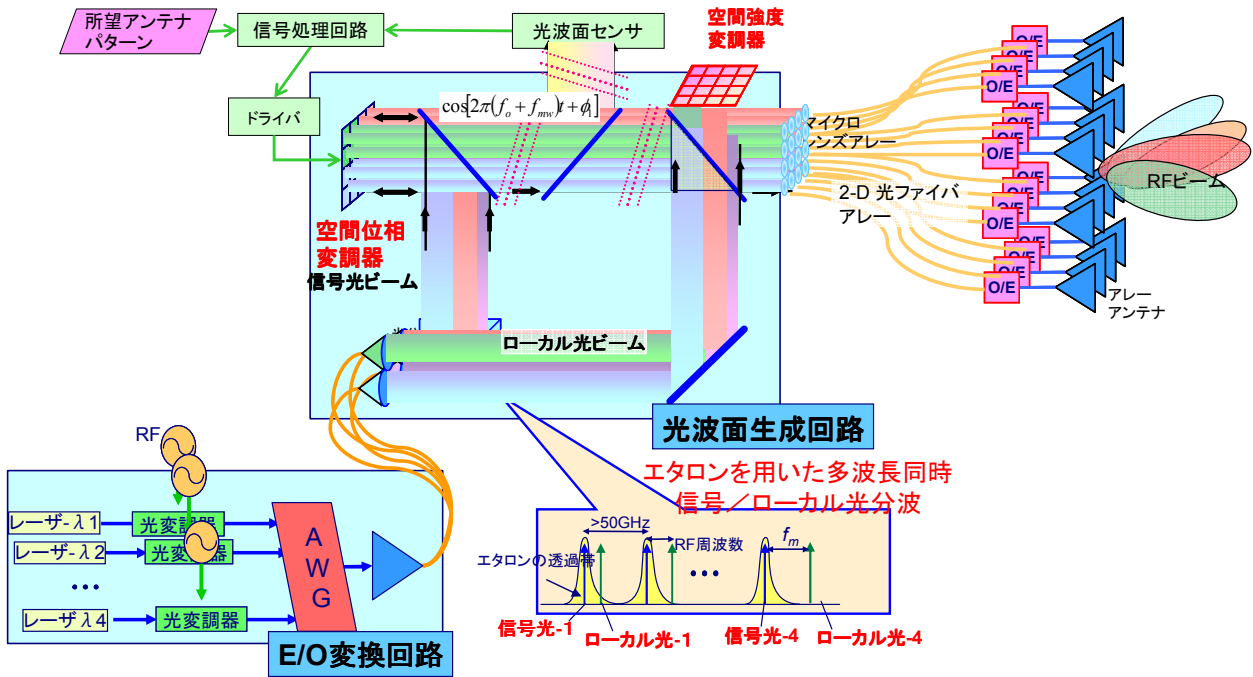


図 4-1-21: 開口分割によるマルチビーム形成光制御アレーアンテナの構成

4-1-5 まとめ

以下の項目を実施し、所望の特性が得られた。

- 光信号処理回路(光波面形成回路)の開発
光波面形成回路の詳細設計, 構成要素であるキーデバイス(空間光変調器など)の開発を実施した. 各キーデバイスの単体特性は所望の性能が得られた. 制御素子数 100(10×10)素子に対応した光波面生成回路の試作, 評価を行い、所望の特性が得られることを実証した. なお, 評価結果については, 次節の光信号処理回路(E/O, O/E 変換技術)にてまとめて述べる.
- 光波面モニタおよび位相回復アルゴリズムの開発
光空間位相検出装置の設計, 試作を行い, ベンチトップ試験により位相検出試験を行い, 本装置により位相計測が可能なことを実証した. 今後, 処理速度, 精度向上を行う予定である.
- マルチビーム形成方式の検討
空間光変調器上での開口分割アレー方式の検討を行った. H19 年度より, マルチビーム形成システムの詳細検討, 要素部品の設計, 試作を行う予定である.

4-2 光信号処理回路(E/O, O/E 変換技術)の研究開発

4-2-1 はじめに

本研究開発では、L~Ku(Ka)帯、アンテナ素子数 100 素子の試作装置の開発を行う。光信号処理回路(E/O,O/E)変換技術では、(1)光信号処理回路(光波面生成技術)および指向性合成技術で開発した技術を実証するための、既存の技術をベースとしたアンテナパターン評価用の O/E 変換モジュール開発と、(2)高出力光を高いリンクゲイン（低い変換損失）でマイクロ波信号を再生するためのよりハードルの高い高出力 O/E 変換器の開発の 2 つの技術開発を行う。

4-2-2 E/O, O/E コンバータ

(1) E/O コンバータ

E/O コンバータの構成を図 4-2-1 に、外観写真を図 4-2-2 に示す。E/O コンバータは、マイクロ波信号を重畳した光信号を光ファイバ増幅器で増幅した後、光信号処理回路(光波面形成部)へ入力する。

主要構成部品の概略諸元は以下の通りである。

- ・光源：偏波面保存型 DFB-ファイバレーザ。(1535nm)、温度/PZT により波長制御可能
- ・光変調器：LiNbO₃ Mach-Zehnder 型強度変調器、(RF 変調帯域 >8GHz)、
- ・光増幅器：偏波面保存型 EDFA (最大出力 2W)

信号光とローカル光の位相雑音の劣化を抑えるために、同一のファイバ及び光増幅器で全ての光信号を増幅し、前節で述べた光分波回路で信号光とローカル光を分離する構成としている。

また、前節で述べた光信号処理回路中のエタロンフィルタにより信号光/ローカル光の分波を行っている。エタロンフィルタは非常に狭帯域であるため、透過帯域へのローカル光の周波数を一致させる必要がある。光マイクロ波発生器では、エタロン透過光の一部を入力として、ファイバレーザの発振波長をエタロンフィルタの透過帯に一致するように、レーザの波長制御を行うフィードバック回路を含んでいる。

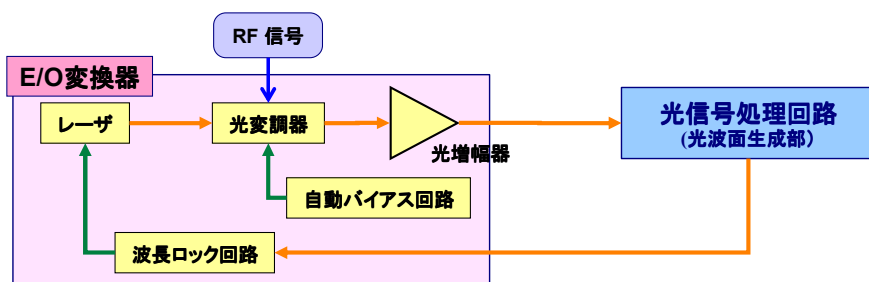


図 4-2-1 E/O 変換装置のブロック図

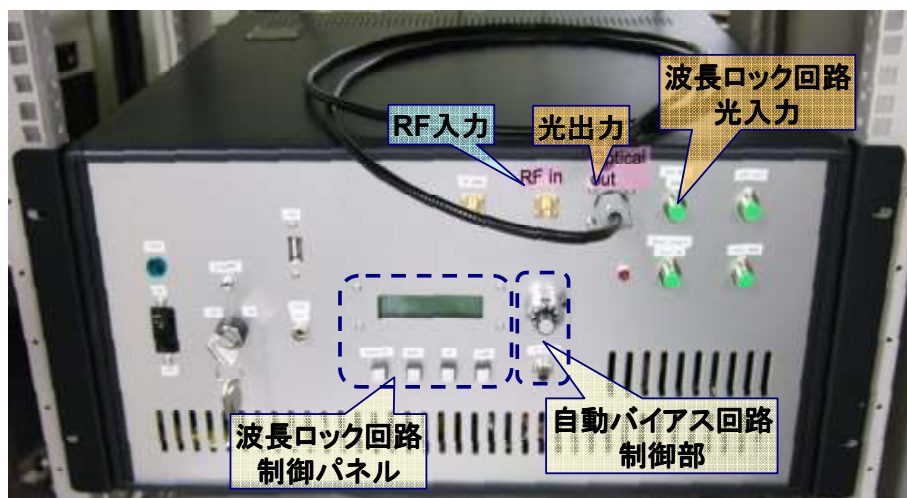


図 4-2-2: E/O 変換装置の概観写真

(2) 波長ロック回路部の評価結果

図 4-2-3 に波長ロック回路の評価結果の一例を示す。横軸に時間であり、縦軸はエタロン出力光強度(ローカル光の強度に相当)及び、レーザの周波数である。ロック前は、フィルタ透過光の強度は低く、また変動しているが、ロック後は、光出力強度の変動は1dB以下で安定した。

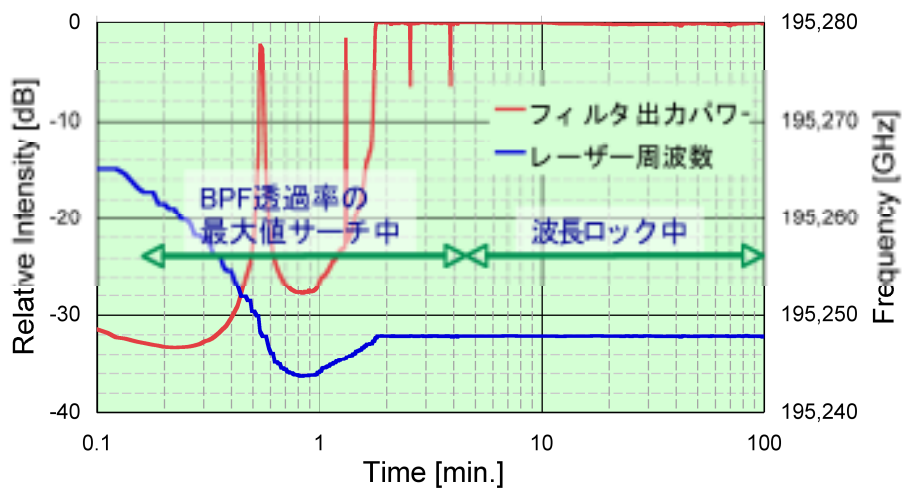


図 4-2-3: エタロンフィルタに対するレーザの波長ロック特性の測定結果

(3) O/E 変換モジュールおよびアレーアンテナ

アンテナパターン評価は、商用の光マイクロ波部品を用いて試作した O/E モジュール 100 個を用いた。各モジュールは光電変換器(PD モジュール)、マイクロ波増幅器、アイソレータにより構成され、このモジュール計 100 個をアレーアンテナの各アンテナ素子に給電することにより、アンテナ放射パターンの評価を行う。図 4-2-4 に O/E モジュールからアレーアンテナまでの全体構成、O/E モジュール(10 モジュール内蔵済みスロット及び RF アンプ 1 モジュール)の概観写真を示す。図 4-2-5 に RF 部分の入出力周波数特性を示す。図 14 から、応答特性の帯域が、本中間目標における周波数帯を網羅できていることが分かる。図 4-2-4 の 10 モジュール内蔵スロットを 10 台用いて 100 素子のアレーアンテナへ給電する。

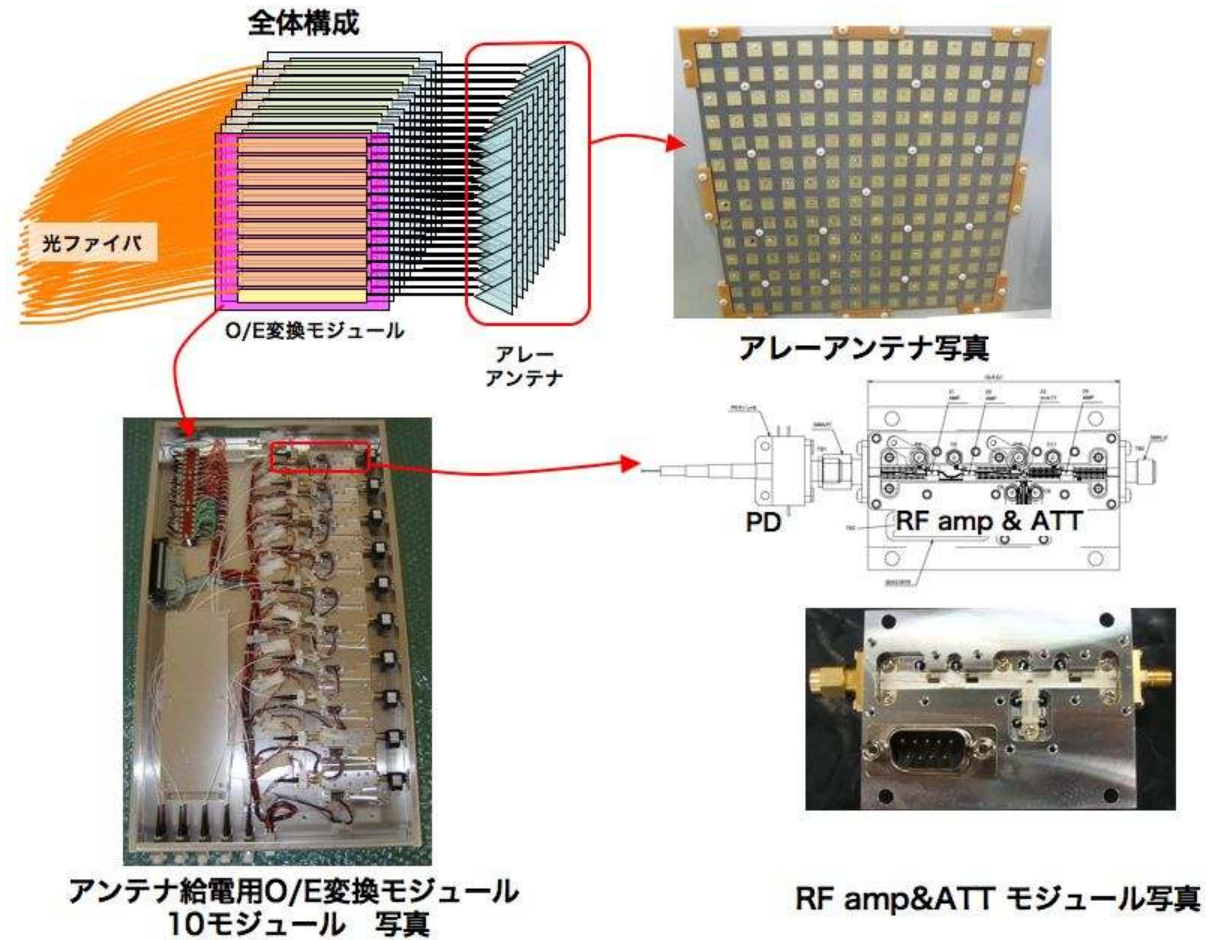
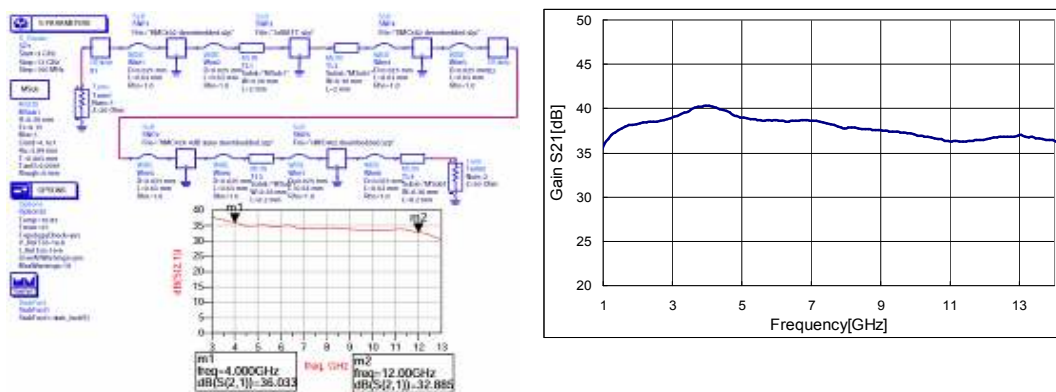


図 4-2-4: O/E モジュールの全体構成及び概観写真



(1) 設計値

(2) 測定値

図 4-2-5: O/E モジュールを構成する AMP モジュールの入出力特性 S21

E/O, O/E 間の周波数特性を図 4-2-6 に示す. 図より, L~Ku 帯まで適用可能なことが実証された.

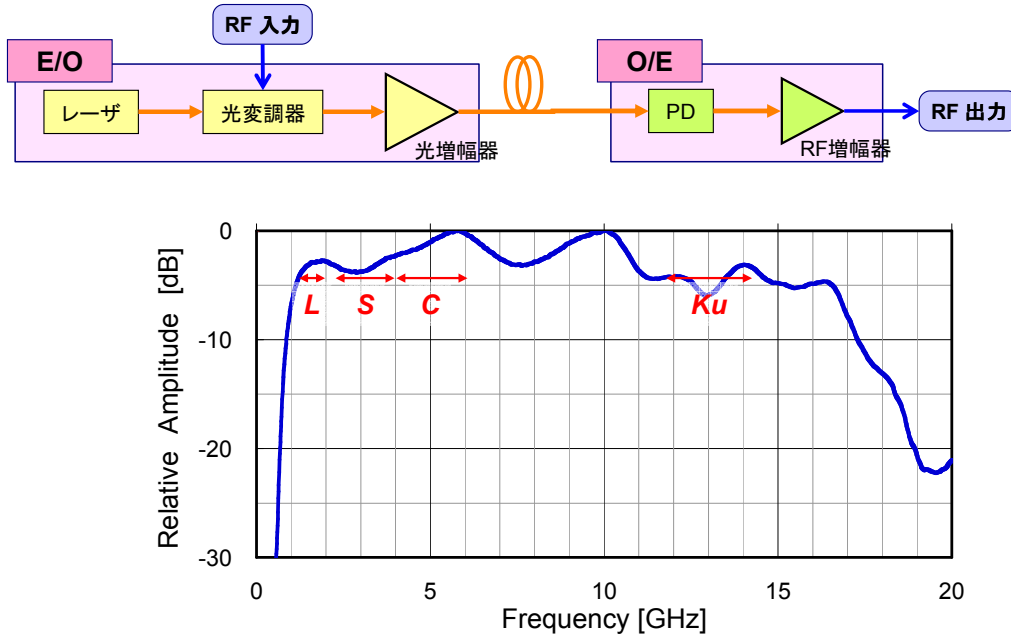


図 4-2-6: E/O, O/E 間の周波数特性 (S21)

(4) ビーム形成実験

以上に述べた光波面形成部(光ビーム形成器), E/O,O/E 変換器を用いて, 空間光位相変調器で位相分布を制御したときのアンテナ励振振幅・位相分布測定値を用いて, アンテナ放射パターンを求めた. アレー各素子への信号は光チャンネルセクタで切替えた光信号を O/E 変換器で光電変換し, ネットワークアナライザによりマイクロ波の振幅位相分布を測定している. 評価系の全体構成を図 4-2-7 に示す.

図 4-2-8 に振幅, 位相分布の測定結果を用いて計算したアンテナ放射パターンを示す. 測定および計算では, マイクロ波の周波数:12GHz,アレーアンテナ素子間隔 12.45mm 正方配列とした.

図 4-2-8 より, 2次元ビーム走査に必要なアンテナ励振信号を形成できることが実証された.

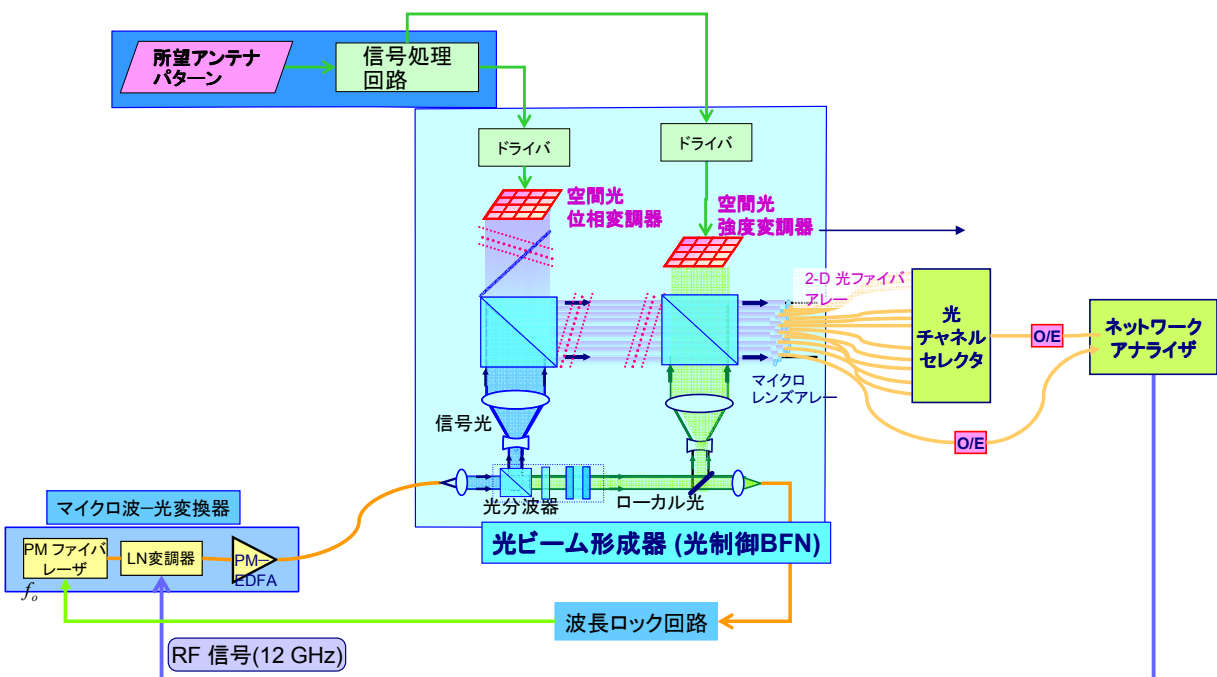


図 4-2-7: 光ビーム形成器評価系の構成図

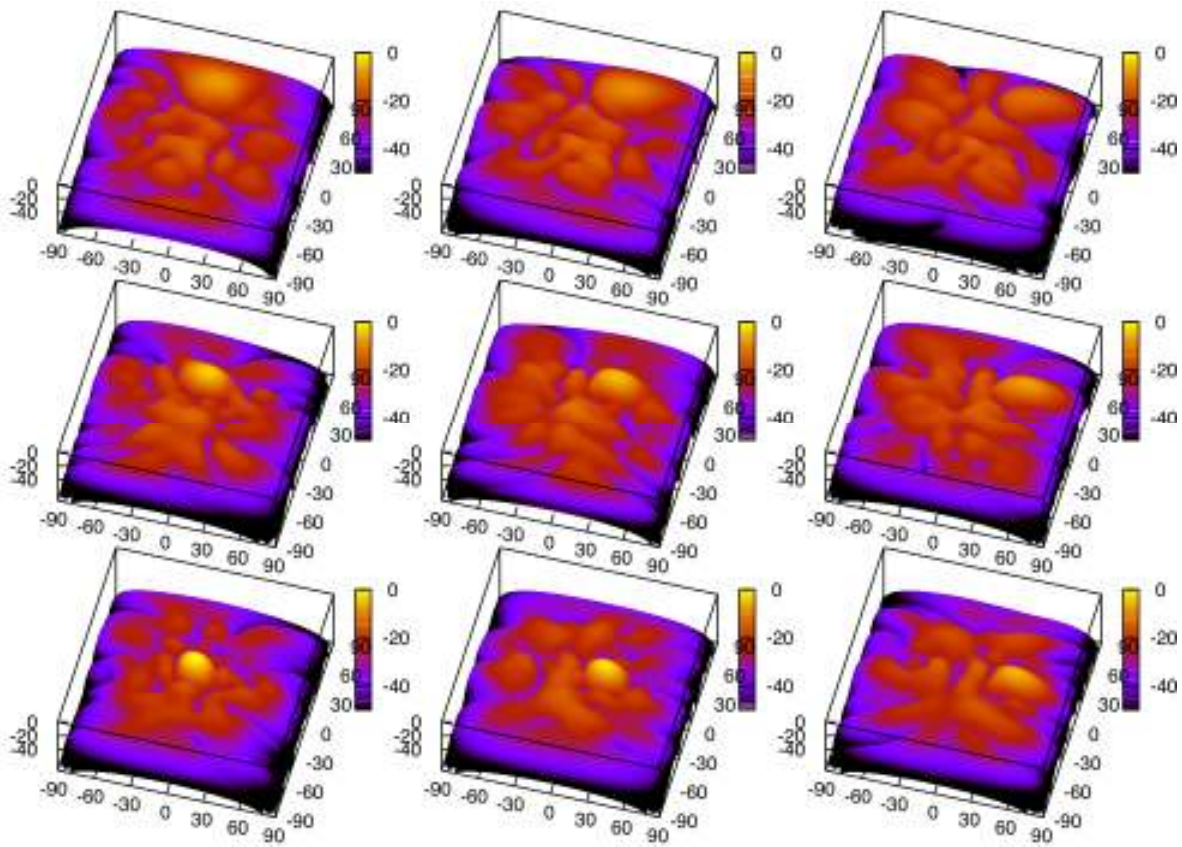
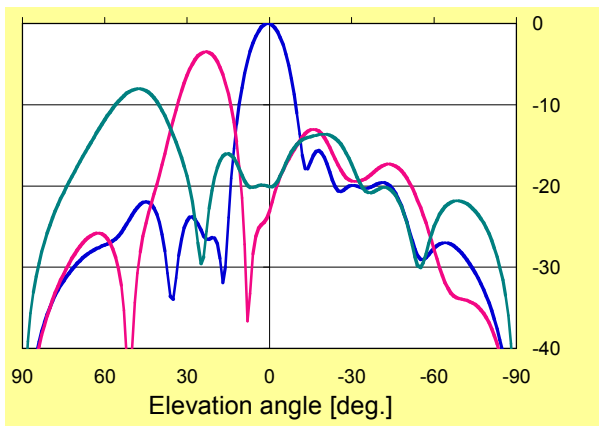
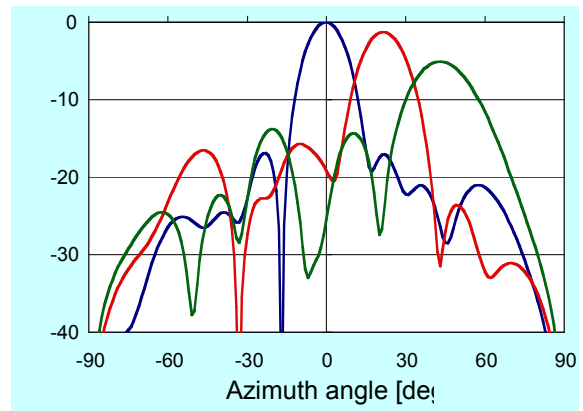


図 4-2-8(a)： 測定振幅位相分布を用いたアンテナ放射パターンの計算結果 (2D ビーム走査)



(1) 水平方向走査時



(2) 垂直方向走査時

図 4-2-8(b)： 測定振幅位相分布を用いたアンテナ放射パターンの計算結果 (断面図)

4-2-3 高出力 O/E 変換器

(1) はじめに

近年、光通信の技術発展は目覚しく、様々な光伝送技術が研究・開発されている。また、光伝送システムに用いられる光変調器、光検出器など、種々のデバイスが実用化されている。しかしながら、光通信ではデジタル通信がメインであるため、一般的な光デバイスもデジタル光通信用に最適化されているものが多い。このため一般的な光デバイスは、本開発目標であるアナログ通信の光信号処理型ビーム形成回路に用いるには、ダイナミックレンジ、スプリアスなどの特性が必ずしも適していない。ここでは、本開発における光信号処理回路技術のうち、アナログ光通信のマイクロ波伝送部分、特に、マイクロ波／光変換及び、光／マイクロ波変換技術(E/O,O/E 変換技術)について、装置の検討を行い、E/O, O/E 変換装置における課題を抽出した。また、この E/O, O/E 変換装置でキーデバイスとなる高出力 PD について検討を行った。

本開発におけるアナログ光通信のマイクロ波伝送装置では、O/E 変換部のフォトダイオード(PD)に入力する光入力パワーを増加することにより受信能力が飛躍的に増加する。このため、光の入力パワーに対して PD が飽和しにくいことが必要である。このためには、PD 素子自体の飽和電流を高めるとともに、PD 素子を合成し、さらなる高出力化を図ることが考えられる。このような、高出力 PD の一構成として図 4-2-9 に示すような PD アレーを考える。

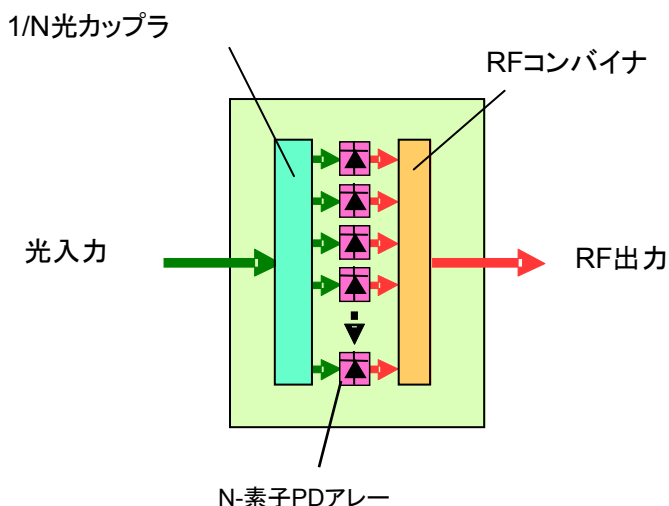


図 4-2-9 : PD アレー

図 4-2-9 では、光ファイバから供給される光信号を $1/N$ 光カップラで N 分割する。これらの信号を N 個の PD 素子にそれぞれ入力する。それぞれの PD で生じたマイクロ波信号を RF コンバイナで合成し RF 出力として取り出す。このような PD アレー構成によって、各 PD から取り出した RF パワーをさらに N 倍にでき、高出力化が図れるものと考えられる。

(2) PD 単体の高出力化

(a) 測定系

複数個の PD を接続し、RF 出力を合成することにより、PD 単体での RF 出力パワーをアレーに用いる PD 素子の試作を行い、特性評価を行った。PD 素子としては高感度の pin 型を採用した。また、放熱性向上と低容量化のため、熱抵抗の高い InGaAs 吸収層を InP で埋込む構成とした。今回、吸収層の厚さが、 $0.8\mu\text{m}$ のものと、 $1.4\mu\text{m}$ のものとの2品種の素子を試作した。さらに放熱性を上げるため、光を裏面入射する構成とし、吸収層とキャリアを近づけるようにした。図 4-2-10 に PD の評価測定系を示す。LD 光源からのレーザ光に、LN 変調器で RF の変調をかける。LD 波長は $1.55\mu\text{m}$ 、変調信号周波数は 5GHz、変調度は 91%とした。変調光を光ファイバアンプで増幅し光学モジュールを通して PD に照射した。PD にはバイアスティーを介して DC バイアスが印加されており、バイアスティーで分離した RF 出力のパワーを測定した。RF は 50Ω 系に統一している。図 4-2-11 に測定系の写真を示す。

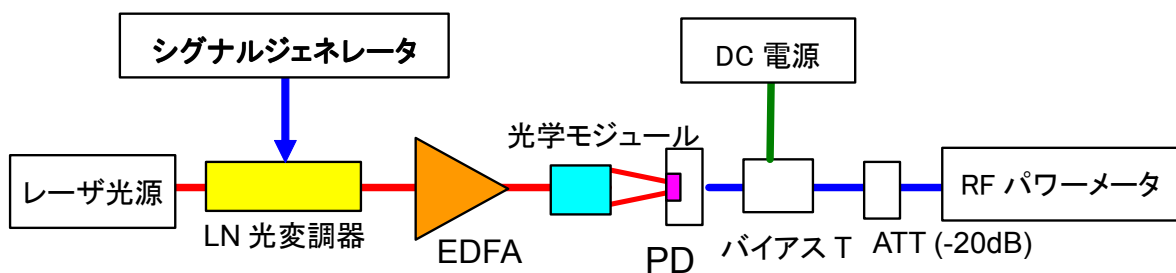


図 4-2-10: 測定系

PDチップ写真

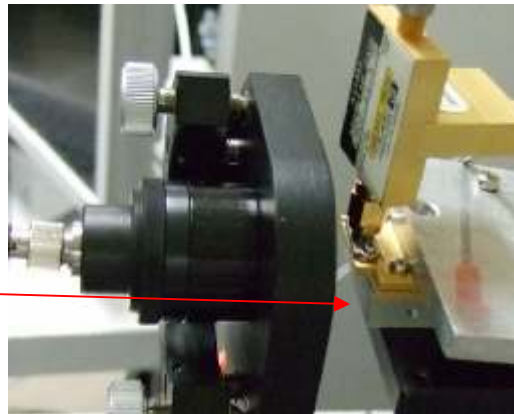
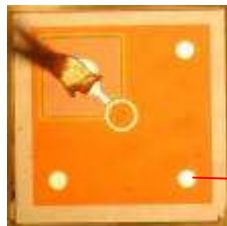


図 4-2-11: PD 素子の測定写真

(b) 評価結果

図 4-2-12 に、吸収層の厚さが $0.8\mu\text{m}$ の PD 単体の RF 出力電力測定結果を示す。DC バイアスは 6V とした。図の横軸は PD に照射した光パワーの平均値である。ただし、レンズから出力している光パワーの値であり、PD の受光径から漏れたパワーや素子端面で反射したパワーも含まれている。図から、入力光のパワーを増加していくと、PD から出力される RF パワーも増加していく。入力光パワーを 25.2dBm にしたとき、最大 RF 出力電力 23.3dBm が得られた。このときの RF 出力電流値は 185mA(p-p) である。図 4-2-13 に、PD に流れる DC 電流値をもとに電源効率を求めた値を示す。最大 RF 出力電力時に電源効率 26% と大きな値が得られている。これらの図において、入力光のパワーを増加していくと、出力電力が不連続に増加する現象が観測される。この点では DC 光電流も不連続に増加していることが分かった。この不安定な現象について、吸収層の厚さが $1.4\mu\text{m}$ の PD では、ほとんど観測されなかった。この現象の原因は不明であり、今後原因解明を行う予定である。

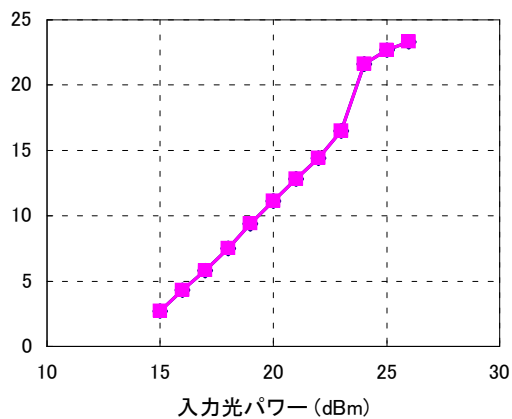


図 4-2-12: RF 出力電力測定結果

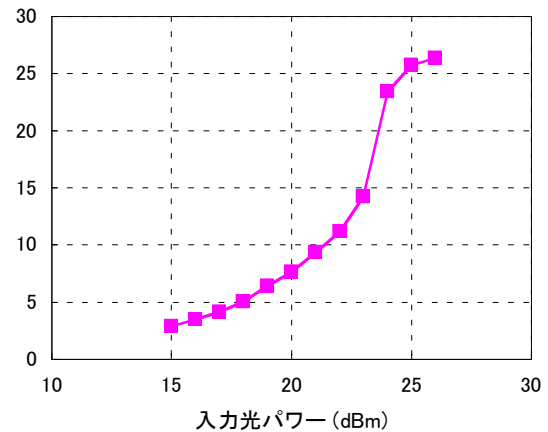


図 4-2-13: 電源効率測定結果

(3) PD アレーによる高出力化

(a) 構成

複数の PD からの RF 出力を合成して取り出すことにより、PD 単体で取り出せるパワーをさらに高出力化することができると考えられる。このような PD アレーの出力合成方法として、大きく2通りが考えられる。1つは PD を複数並列に接続した並列合成方式であり、もう1つは PD と伝送線路をはしご型に交互に接続した進行波合成方式である。進行波合成方式は広帯域での動作が可能であるが、各 PD の動作条件が異なり、入力光の遅延時間調整が必要であるなどのことから、設計が複雑となる。ここでは、各 PD の動作条件を等しくでき、調整が容易な並列合成方式により、PD 出力電力の合成を検証する実験を行った。

図 4-2-14 に、PD アレーの構成と、各構成部品の写真を示す。

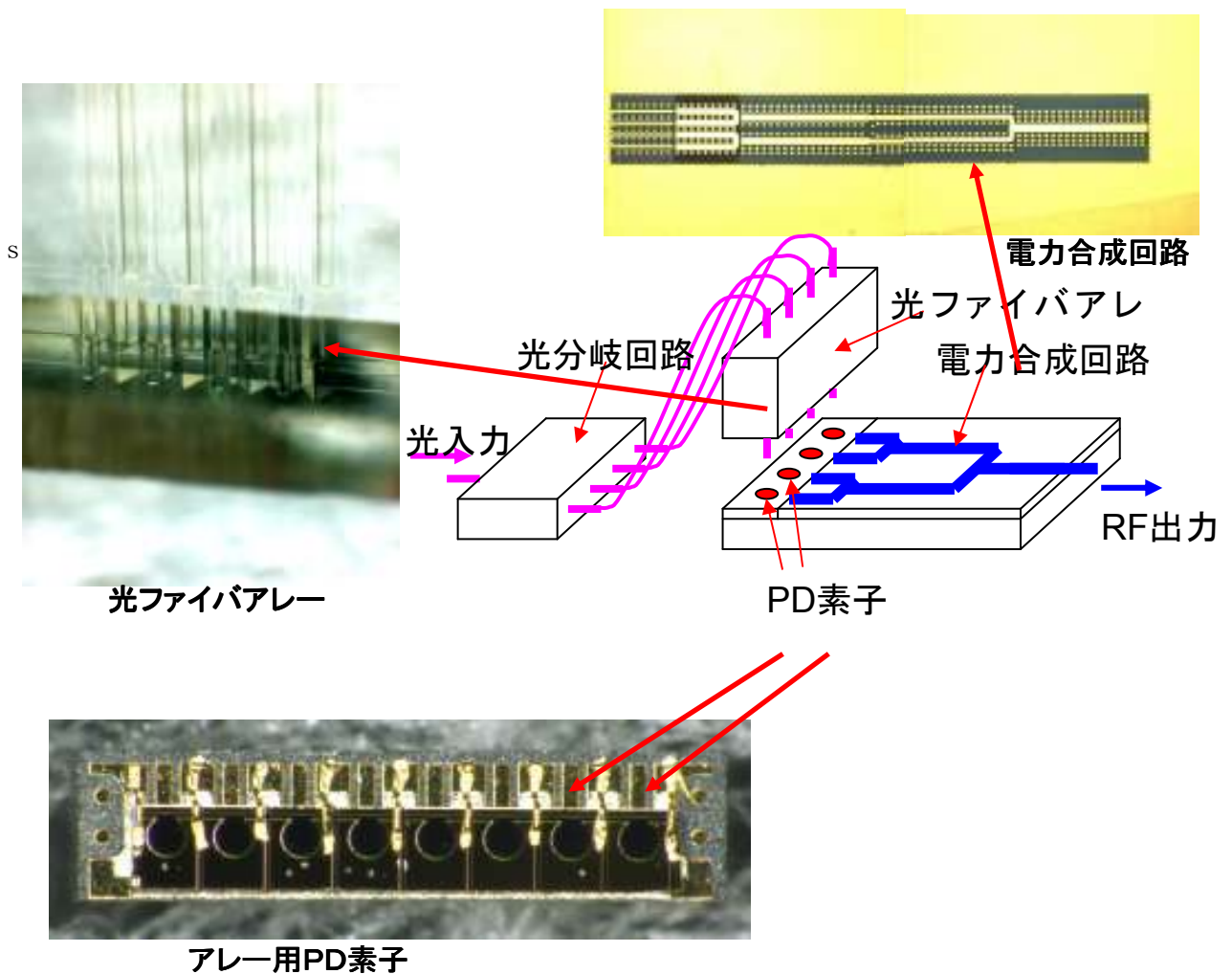


図 4-2-14: PD アレーの構成と構成部品の写真

(b) 評価結果

図 4-2-15 に、PD 単体と PD を 4 個合成した PD アレーについて、RF 出力電力を測定した結果を示す。PD 素子は、特性が安定している吸収層の厚さが $1.4\mu\text{m}$ のものを用いた。RF 周波数は 5GHz である。図において、横軸は PD1 素子あたりに入力する光パワーであり、縦軸はトータルの RF 出力電力である。PD 単体では RF 出力電力の最大値が 18.5dBm (70mW) であるのに対し、4 合成アレーでは RF 出力電力の最大値が 24.5dBm (282mW) であった。これは、4 合成 PD アレーにおいて、単体での RF 電力がほぼ 4 倍になっていることを示している。このことから、本方式の 4 合成アレーにおいて、ほとんど損失なく、PD 単体からの RF 電力を合成できることが確認できた。したがって、RF 出力電力がより大きい PD を用いることにより、より大きなアレー出力電力が得られるものと考えられる。

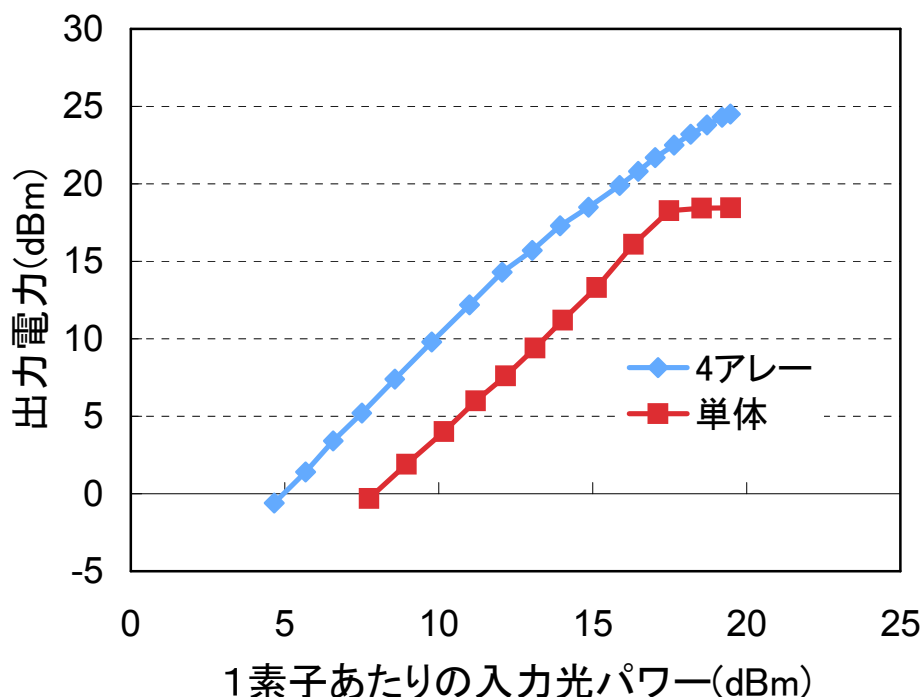


図 4-2-15: 4 合成 PD アレーの RF 出力電力測定結果

(4) まとめ

光信号処理回路における E/O, O/E 変換装置の検討として、PD 単体の高出力化、および、PD アレーによる RF 出力の高出力化について検討を行った。周波数 5GHz において、PD 単体からの RF 出力 23.3dBm 、電源効率 26% の値が得られた。また、並列合成方式による 4 合成 PD アレーの試作を行い、ほとんど損失なく RF 電力の合成が行なえることを確認した。

4-2-4 まとめ

以下の項目を実施し、所望の特性が得られた。

- 光制御型ビーム形成回路の全体評価用 E/O,O/E 変換装置の試作
L~Ku 帯に適用可能な E/O コンバータの試作を完了。同時に前節で述べた光波長分波回路内の光バンドパスフィルタの帯域にレーザ光源の波長をロックさせる波長ロック回路の開発を行い、装置の安定性向上を図った。O/E コンバータ 100 モジュールおよび、アレーアンテナの試作を完了した。
- 評価用 E/O,O/E 変換装置を用いた光波面形成回路の評価
光信号処理回路(光波形成回路)でのビーム制御試験を実施し、回路出力信号(アンテナ励振振幅位相)の実測値からアンテナ放射パターンをシミュレーションした。その結果、アンテナ放射パターンを 2 次元制御可能なことを実証した。
- 高出力 PD の試作
周波数 5GHz おいて、PD 単素子で 23.3dBm, 電源効率 26%を達成した。
- 4 合成 PD アレーの試作
並列合成による 4 合成 PD アレーの試作を行い、低損失に RF 電力合成可能なことを実証した。

4-3 指向性合成技術の研究開発

4-3-1 はじめに

光制御型ビーム形成回路は基礎研究段階であるため、光領域で形成した光波の波面分布とアンテナ放射パターンとの関係に関して、指向性合成技術が確立されていないのが現状である。本節では、光領域での低サイドローブ化、校正技術について検討し、実験的に実証した。また、検討にあたり、シミュレーションツールの開発を行った。

4-3-2 指向性合成シミュレーションツール

光学系からアンテナ放射パターンまで模擬するシミュレータを開発した。図 4-3-1 にシミュレータの全体構成を支援示す。光学系の各部品は ABCD 行列で表している。1 波面光学部品の波面収差は位相マスクを設定することで考慮しているため、光学部品の歪、アライメント誤差などの影響も計算可能である。

これを用いて、光ビーム形成回路、アンテナ放射パターンのサイドローブレベルなど放射パターンの解析、シミュレーションが可能である。図 4-3-2 にシミュレータの画面の例を示す。左図はビーム走査を、右図はビーム幅制御のシミュレーションの様子である。

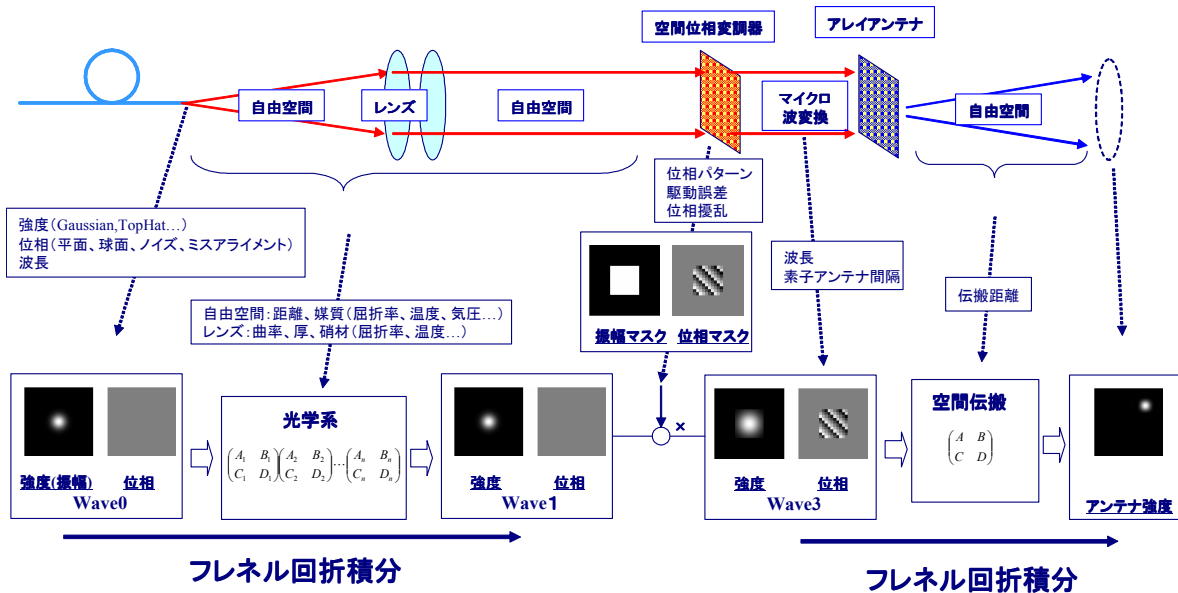
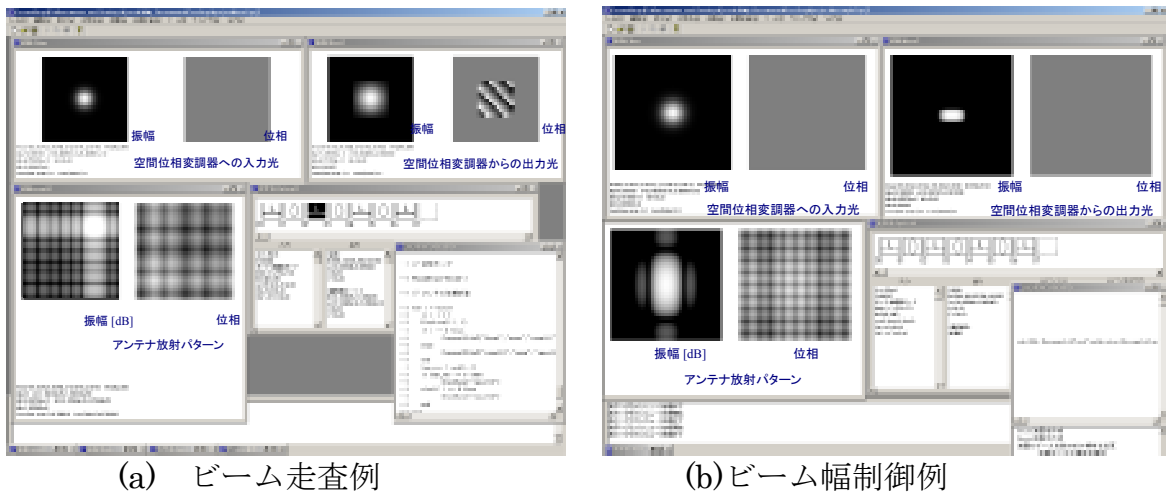


図 4-3-1: シミュレータの構成



(a) ビーム走査例

(b) ビーム幅制御例

図 4-3-2: シミュレータの操作画面例

4-3-3 低サイドローブ化技術

(1) ローカル光制御による低サイドローブ化

昨年度までの検討ではガウスビームのビーム径によるサイドローブ低減について検討していたが、サイドローブレベルの低減量に比例してアンテナビーム径が広がる課題もあった。そこでローカル光の強度分布を積極的に制御することによるサイドローブ制御について検討した。その結果、ローカル光の強度分布制御機能を付加することにより、信号光とローカル光の積となるマイクロ波の強度分布をチェビシェフ、テイラーなどの分布にすることが可能となる。ローカル光の強度分布を、信号光とのヘテロダイン検波されたものがテイラー分布となるように設定するときの、信号光、ローカル光、アンテナ励振分布の説明図および計算例を図 4-3-3 に示す。

図 4-3-4 に空間光位相変調器での位相分布に誤差があった場合の、アンテナ放射パターンの計算結果を示す。

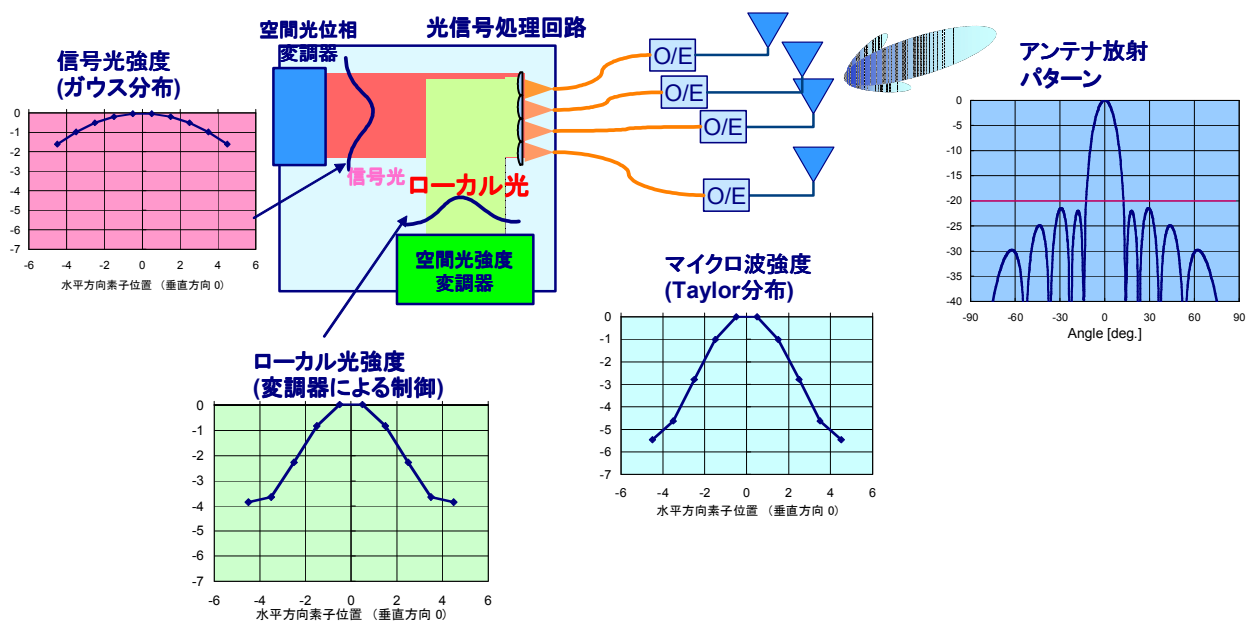


図 4-3-3: 信号光・ローカル光・RF の強度分布の説明図

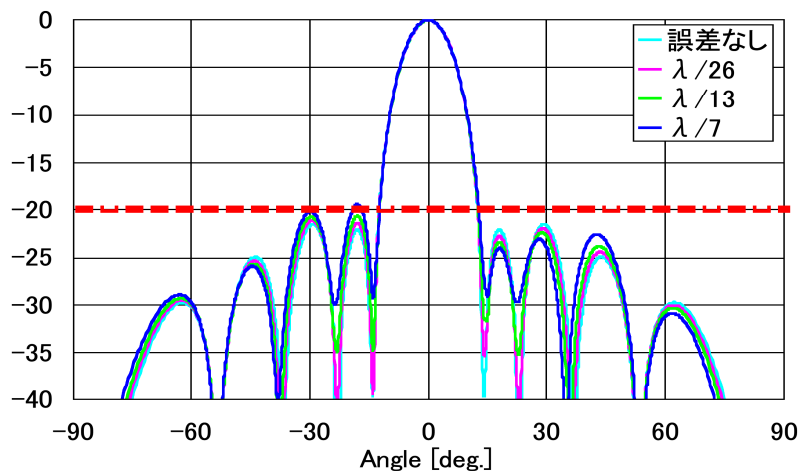


図 4-3-4: 低サイドローブ化の計算例 (位相誤差考慮)

(2) 測定結果

光波面計器内の光強度変調器の各素子を制御することにより，低サイドローブ化の実験評価を行った．測定系は図 4-2-7 と同様であり，空間光強度変調器によりローカル光の強度分布を制御している．アレー各素子からの励振振幅位相信号の実測値を用いて計算したアンテナ放射パターンを図 4-3-5 に示す．図より目標とするサイドローブレベル-20dBが達成できることが示された．

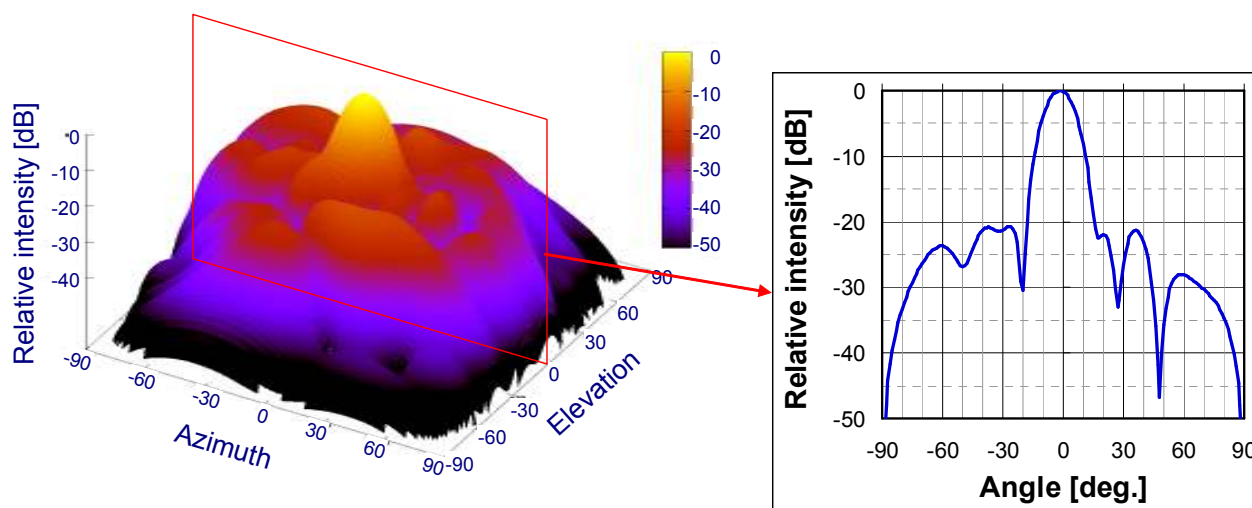


図 4-3-5: 光制御 BFN 出力信号の実測値より計算したアンテナ放射パターン (低サイドローブ化)

4-3-4 校正技術

(1) 光領域における REV 法

衛星通信やレーダなどに搭載されるフェーズドアレーアンテナの大規模化に伴い、ビーム制御回路の小型化、低消費電力化などが課題となっている。これらの課題を解決するための一手段として、給電系、ビーム制御系を光コンポーネントで構成する光制御フェーズドアレーアンテナ（以下、光制御 PAA）技術について検討している。ここでは光空間位相制御による光制御 PAA について、SLM（Spatial Light Modulator：空間光変調器）²を用いることによる REV 法（Rotating element Electric field Vector method：素子電界ベクトル回転法）の適用について検討した。

空間位相変調器の各素子の位相を所定の初期値に設定したとき、その値からの位相変化量を $\Delta_m(k)$ とすると、アレーアンテナの励振分布は次式で表される。

$$A(k) = \sqrt{p_{RF}(k)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{r_0}{F} (x_k \cos \phi_0 + y_k \sin \phi_0)} \cdot e^{j\Delta_m(k)} \quad (4-3-1)$$

ここで、 (x_k, y_k) は光サンプリングアレーの位置座標、 r_0 は空間光変調器の駆動素子の位置の光軸からの距離、 ϕ_0 は x 軸とのなす角度、 m は空間位相変調器のビット数である。

式(4-3-1)に示されるように、SLM による位相量を変化させることにより、アレーアンテナ励振分布の位相量が増加するため、以下に示すように、REV 法を適用する。

アレーアンテナを動作させた場合、ある方向における合成電界ベクトル図は図 4-3-9 のように表すことができる。ここで、空間光変調器により着目する n 番目の素子の位相を変化させると図 1 に示されるように n 番目の素子の電界ベクトルの回転に伴って合成電界ベクトルが変化する。この合成電界ベクトルの振幅の変化を測定し、その測定結果より、 n 番目の素子の振幅・位相を推定する。

図 4-3-6 において、初期状態の合成電界ベクトルの振幅・位相を E_0, ϕ_0 、着目する n 番目の素子の電界ベクトルの振幅・位相を E_n, ϕ_n とする。この n 番目の素子の位相を Δ だけ変化させたときの合成電界は次のように書くことができる。

$$\dot{E} = (E_0 e^{j\phi_0} - E_n e^{j\phi_n}) + E_n e^{j(\phi_n + \Delta)} \quad (4-3-2)$$

ここで、 n 番目の素子の相対振幅・位相を

$$k = \frac{E_n}{E_0} \quad (4-3-3)$$

$$X = \phi_n - \phi_0 \quad (4-3-4)$$

とにおいて、式(4-3-2)を変形すると合成電力 Q は次のようになる。

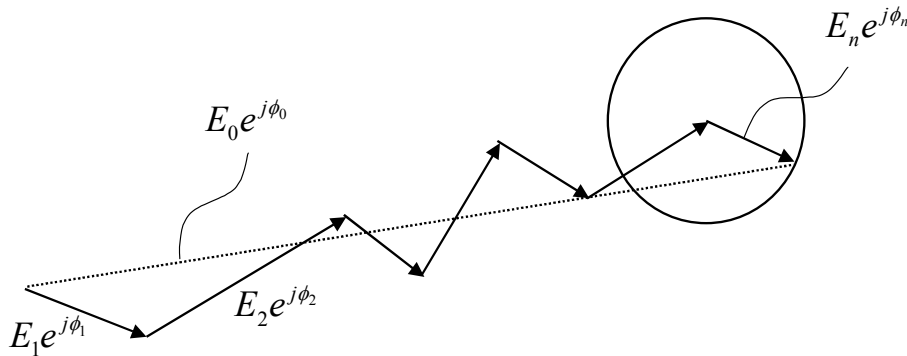


図4-3-6 合成電界ベクトル図

² 真野, 片木, "フェーズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—," 信学論(B), vol. J65-B, no. 5, pp. 555-560, May 1982.

$$Q \equiv \frac{|E|^2}{E_0^2} = (Y^2 + k^2) + 2kY \cos(\Delta + \Delta_0) \quad (4-3-5)$$

ただし,

$$Y^2 = (\cos X - k)^2 + \sin^2 X \quad (4-3-6)$$

$$\tan \Delta_0 = \frac{\sin X}{\cos X - k} \quad (4-3-7)$$

つまり, 一つの素子の位相変化により合成電力 Q は式 (4-3-5) のように余弦的に変化する. この合成電力の推移を, 図 4-3-7 に示す. ここで, $-\Delta_0$ は合成電力 Q の最大値を与える位相である. 合成電力 Q の最大と最小の比を

$$r^2 = \frac{(Y+k)^2}{(Y-k)^2} \quad (4-3-8)$$

とおくと, n 番目の素子の相対振幅 k と相対位相 X は r の符号に対応して次のようになる.

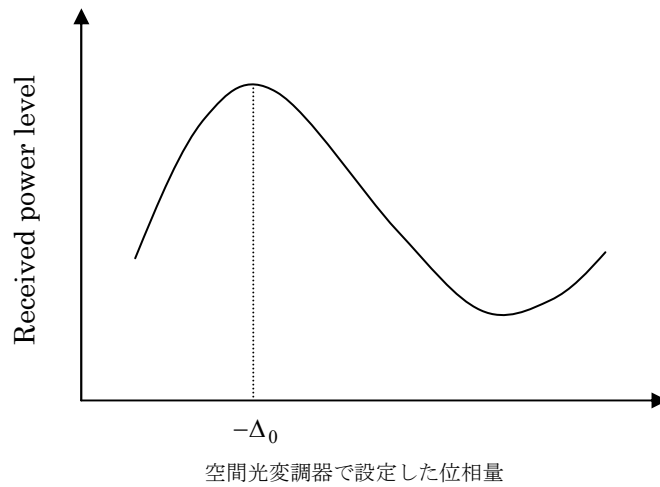


図 4-3-7 REV 法による合成電力の推移

r の符号が正の場合 :

$$k \equiv k_1 = \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2}} \quad (4-3-9)$$

$$X \equiv X_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Delta_0}{\cos \Delta_0 + \Gamma} \right) \quad (4-3-10)$$

r の符号が負の場合 :

$$k \equiv k_2 = \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2}} \quad (4-3-11)$$

$$X \equiv X_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Delta_0}{\cos \Delta_0 + (1/\Gamma)} \right) \quad (4-3-12)$$

ただし,

$$\Gamma = \frac{r-1}{r+1} \quad (4-3-13)$$

以上より, n 番目の素子の位相を変化させたときの合成電力 Q を測定し, Q の最大値を与える位相 $-\Delta_0$, Q の最大値と最小値との比 r を求めることにより, n 番目の素子の相対振幅・位相を得ることができる.

(2) 合成振幅の測定結果例

設計周波数 12.0 GHz (衛星通信 ダウンリンク用に割当)としている。ここで、アレーアンテナは周波数依存性があるため、放射パターン測定は、技術的なハードルが難しい Ku 帯での評価を計画している。他の周波数帯域に関しては、各 O/E 出力における振幅位相分布を測定することにより、アンテナ放射パターンを算出可能である。図 4-3-8 に測定時のアレーアンテナおよび O/E 変換モジュールの概観写真を、図 4-3-9 に試作アレーアンテナの素子パターンを示す。図 4-3-10 に空間位相変調器の各素子の駆動電圧(位相変調量に相当)を変化させたときのアレー合成された振幅の測定結果を示す。図 4-3-10 より、位相を変化させることにより、合成電力の変化が観測される。図 4-3-11 に測定結果より求めた各空間光位相器の設定値と位相変調量の関係を示す。図のように、合成電力から各空間位相変調器の変調特性が求まる。

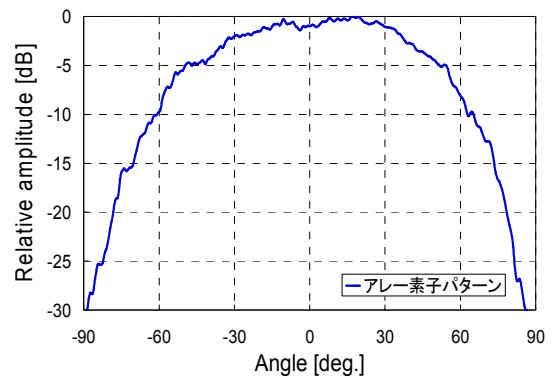
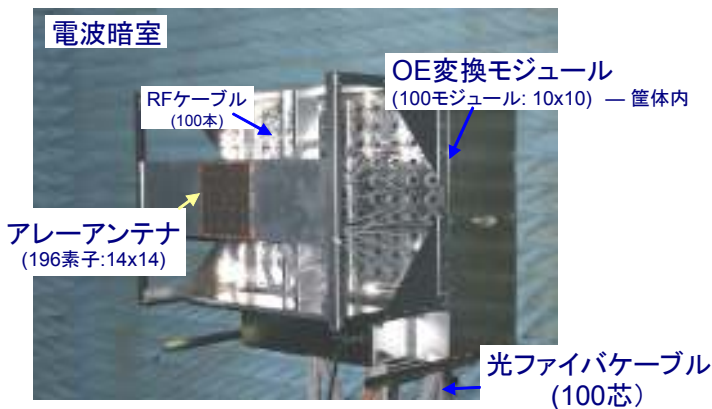


図 4-3-8 : アンテナ放射パターン測定系の様子

図 4-3-9 試作アレーアンテナの素子パターン

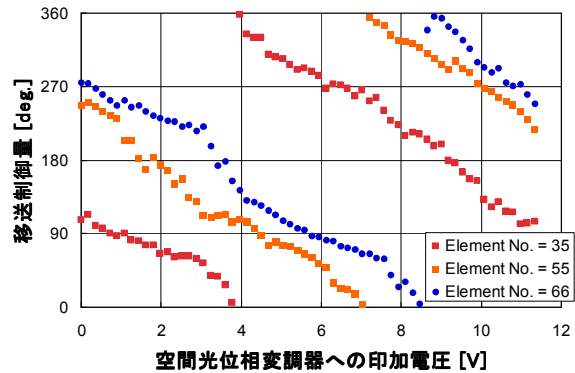
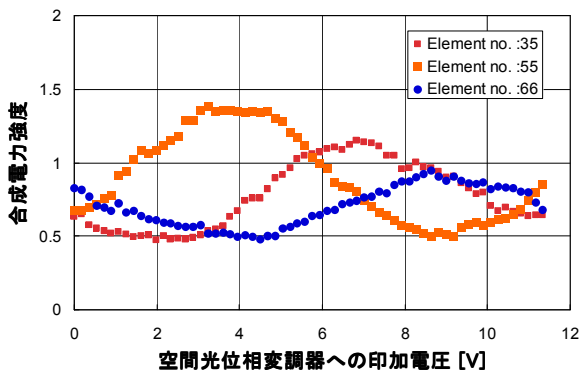


図 4-3-10 : 合成振幅・位相の変化

(3) アンテナ放射パターン試験例

位相校正結果を元に、アンテナ放射パターンの測定を行った。図 4-3-11 に測定結果を示す。各ラインは水平方向にビーム走査を行ったときの、アンテナ放射ビームである。測定結果のように、各ビームが形成できていることから、位相校正が適切に行われていることが確認できる。また、所望の方向へのビーム走査がされており、アンテナ放射パターン試験からも本方式の有効性が実証された。

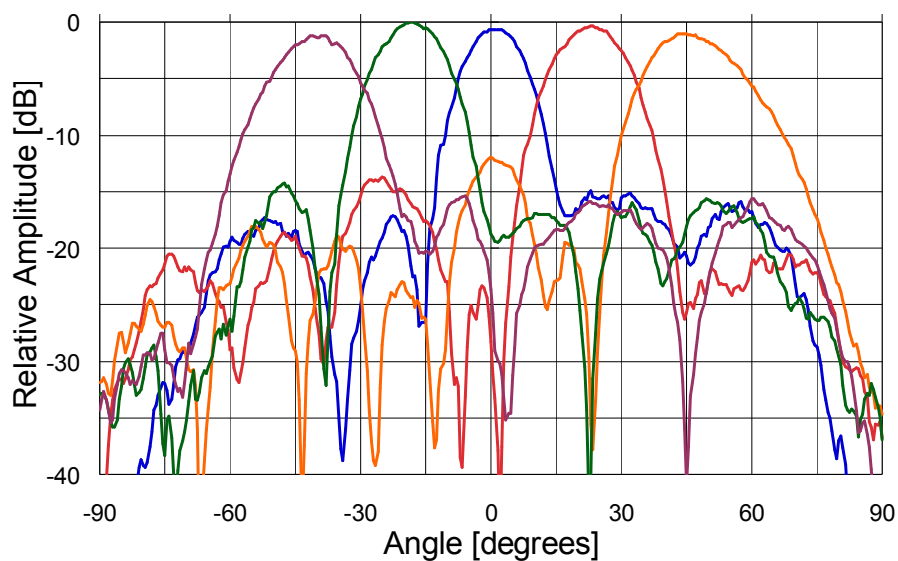


図 4-3-11 : アンテナ放射パターンの試験結果

4-3-5 まとめ

以下の項目を実施し、所望の成果が得られた。

- ・ 指向性合成シミュレーションツールの開発
光学系の歪、アライメント誤差などを考慮した光学系内の波面変動から、アンテナ放射ビームまでを一括計算する、シミュレータを開発した。
- ・ 低サイドローブ化技術の開発
空間光強度変調器を用いてローカル光強度分布を制御することにより、アンテナ励振強度をテイヤ一分布に変換した。このとき、アンテナ放射ビームのサイドローブレベルは、シミュレーションおよび、実測励振振幅位相を用いた計算値より、目標とするサイドローブレベル-20dB を達成できることを実証した。
- ・ 光領域での位相校正技術の開発
光の位相制御により、従来マイクロ波で使用してきた REV 法が適用できることを示した、REV を適用したアンテナ放射パターン試験において REV 法による位相校正を適用し、所望のビーム走査特性が得られることを実証した。

4-4 総括

超高速通信用衛星搭載ビーム形状可変マルチビームアンテナ装置の実現に向け、以下の項目を実施し、所望の成果が得られた。

(1) 光信号処理回路(光波面生成技術)

- ・ 光波面形成回路の開発
光波面形成回路の詳細設計、構成要素であるキーデバイス(空間光変調器など)の開発を実施した。各キーデバイスの単体特性は所望の性能が得られた。制御素子数 100(10×10)素子に対応した光波面生成回路の試作、評価を行い、所望の特性が得られることを実証した。
- ・ 光波面モニタおよび位相回復アルゴリズムの開発
光空間位相検出装置の設計、試作を行い、ベンチトップ試験により位相検出試験を行い、本装置により位相計測が可能なことを実証した。今後、処理速度、精度向上を行う予定である。
- ・ マルチビーム形成方式の検討
空間光変調器上での開口分割アレー方式の検討を行った。

(2) 光信号処理回路(O/E,E/O 変換技術)

- ・ 光制御型ビーム形成回路の全体評価用 E/O,O/E 変換装置の試作
L~Ku 帯に適用可能な E/O コンバータの試作を完了。同時に前節で述べた光波長分波回路内の光バンドパスフィルタの帯域にレーザ光源の波長をロックさせる波長ロック回路の開発を行い、装置の安定性向上を図った。O/E コンバータ 100 モジュールおよび、アレーアンテナの試作を完了した。
- ・ 評価用 E/O,O/E 変換装置を用いた光波面形成回路の評価
光信号処理回路(光波形成回路)でのビーム制御試験を実施し、出力信号(アンテナ励振振幅位相)の実測値からアンテナ放射パターンをシミュレーションした結果、アンテナ放射パターンの 2 次元制御可能なことを実証した。
- ・ 高出力 PD の試作
周波数 5GHz おいて、PD 単素子で 23.3dBm、電源効率 26%を達成した。
- ・ 4 合成 PD アレーの試作
並列合成による 4 合成 PD アレーの試作を行い、低損失に RF 電力合成可能なことを実証した。

(3) 指向性合成技術

- ・ 指向性合成シミュレーションツールの開発
光学系内の波面制御量、変動などから、アンテナ放射ビームまでを一括計算する、指向性合成シミュレータを開発した。
- ・ 低サイドローブ化技術の開発
空間光強度変調器を用いてローカル光強度分布を制御することにより、アンテナ放射ビームのサイドローブレベルを低減できることを、シミュレーションおよび、実測励振振幅位相を用いた計算値より、実証し、目標とする-20dB を達成した。
- ・ 光領域での位相校正技術の開発
光の位相制御により、従来マイクロ波で使用してきた REV 法が適用できることを示し、REV を適用したアンテナ放射パターン試験により、所望のビーム走査特性が得られることを実証した。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

(1) 光信号処理回路技術（光波面生成技術）

- ・ 秋山 他, “空間光位相制御による光制御型フェーズドアレーアンテナ,” 2006 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C14-6, 2006.
- ・ 鈴木 他, “PZT 駆動マイクロミラーアレイによるフラウンホーファー回折像の適応制御,” Optics & Photonics Japan 2006 , 9pP47,2006
- ・ 鈴木 他, “光制御型フェーズドアレーアンテナの Phase Diversity センサによる制御,” 2007 年春季応用物理学関係連合講演会大会, 27p-S-10

(2) 光信号処理回路技術 (E/O,O/E 変換技術)

- ・ 永塚 他, “高出力 RF 伝送用 PD の出力電力測定結果,” 2007 年電子情報通信学会 総合大会 C-14-11.

(3) 指向性合成技術

- ・ 秋山 他, “空間光振幅/位相制御による光制御型フェーズドアレーアンテナの基本特性の評価結果,” 2007 年電子情報通信学会 総合大会 C14-12
- ・ 秋山 他, “光によるマイクロ波位相制御—光波面制御によるビーム成形—,” 2007 年春季応用物理学関係連合講演会大会 30a-SG-7