

# 平成20年度 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21年4月

情報通信研究機構

# 平成 20 年度 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」

### 目 次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発の全体計画	6
2-1	研究開発課題の概要	6
2-2	研究開発目標	8
2-2-1	最終目標	8
2-2-2	中間目標	8
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	11
4-1	光信号処理回路(光波面生成、制御技術)の研究開発	11
4-1-1	はじめに	11
4-1-2	光波面生成、制御回路の開発	11
4-1-3	光位相センサの開発	17
4-1-4	まとめ	23
4-2	光信号処理回路(E/O、O/E 変換技術)の研究開発	24
4-2-1	はじめに	24
4-2-2	PD モジュール構造	24
4-2-3	実験結果	26
4-2-4	PD 動作級の最適化検討	28
4-2-5	まとめ	29
4-3	光信号処理回路(光多重化技術/マルチビーム化技術)の研究開発	30
4-3-1	はじめに	30
4-3-2	全体構成	30
4-3-3	部分試作・評価	31
4-3-4	試作器の構成・評価	35
4-3-5	まとめ	37
4-4	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)の研究開発	38
4-4-1	はじめに	38
4-4-2	アンテナ放射パターン解析技術の開発	38
4-4-3	指向性合成技術(低サイドローブ化技術)の開発	39
4-4-4	まとめ	43
4-5	指向性合成技術(アンテナ校正技術)の研究開発	44
4-5-1	はじめに	44
4-5-2	校正方法の原理	44
4-5-3	評価結果	45
4-5-4	まとめ	46
4-6	総括	47
5	参考資料・参考文献	48



## 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、さらに各種規制緩和の推進により事業者間の競争と共に、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。この中でもインターネットサービスは特に顕著な成長を遂げており、我が国におけるインターネット利用者数は、平成 19 年末で 8811 万人(対前年比 0.7%増)、人口普及率は 69% (対前年比 0.5 ポイント増)と推計されている。

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、宇宙通信は、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あると考えられる。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インフラが未整備な地域、上空、海上など、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。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、耐災害性、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、ブロードバンドサービスを含めたユーザーズに伝えるためには、海上、上空など、地上の移動通信サービスを補完可能な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、以下の項目の実現、及び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、周波数を空間的に再利用することで、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、高速化できるメリットもある。

#### (2) 地球局の小型化

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には、地球局をどこにでも設置可能にするための小型軽量化、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の生成、大規模アレーアンテナによる狭ビーム化などによる高 EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power、等価等方放射電力)化が有効である。また、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

衛星による国際サービスを提供する場合、現状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。しかし、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。このような状況に対処するためには、衛星打ち上げ後で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有効である。

#### (4) 柔軟な回線設定

通信容量の広帯域化には、使用可能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。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、フェイズドアレーアンテナへのビーム形成手段としては、マイクロ波移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技術の一つとして、本研究開発では第3のビーム形成手段である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”技術の開発を目的とする。

参考までに、研究開発分野の現状として、図 1-1-1 に様々な機関から報告されている光制御ビーム形成技術について、アンテナ素子数一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。

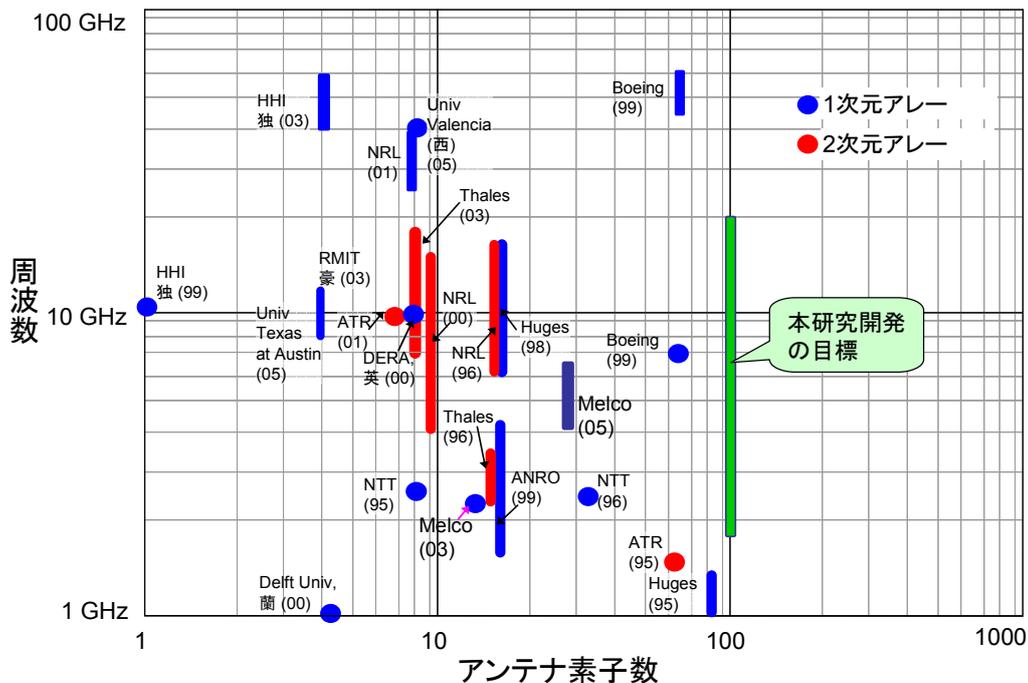


図 1-1-1: 開発の技術的位置付け  
光制御ビーム形成技術の報告例(アンテナ素子数一周波数)

## 2 研究開発の全体計画

### 2-1 研究開発課題の概要

本研究開発は、衛星搭載用アレーアンテナ装置の給電系、及びアンテナから送受信する電波の向きや形の制御に光技術を適用するものである。光技術の適用により、従来のフェーズドアレーアンテナの制御回路に対し、広帯域化、小型・軽量化、低消費電力化、低電磁干渉性などが期待できる。目標として、アンテナの素子数が100素子以上、マイクロ波の周波数がKa帯までの任意の帯域で、マルチビームを形成可能な光制御フェーズドアレーアンテナ、およびそのビーム制御部である光制御ビーム形成回路(光制御BFN: Beam Forming Network)を開発する。図2-1-1に開発装置の概略構成と開発課題の関係を示す。以下に、各開発項目について述べる。

(ア) 光信号処理回路：

(ア-1) 光波面生成、制御技術

光制御ビーム形成回路(光制御BFN)は、光波の波面制御によりアレーアンテナに給電するマイクロ波の振幅および位相分布を制御するものである。昨年度までに、100(10×10)素子2次元アレー、シングルビームに対応した光制御ビーム形成回路を開発し、Ku帯にて所望のビーム走査に必要な波面形成を実証した。さらに、光制御ビーム形成回路で形成した光波面を安定化するために、光制御ビーム形成回路内の光の波面状態を計測する光波面センサの方式検討を行い、シミュレーションにより実現性を検討し、光波面センサの試作、評価により、ピストン状の位相も測定可能なことを実証した。

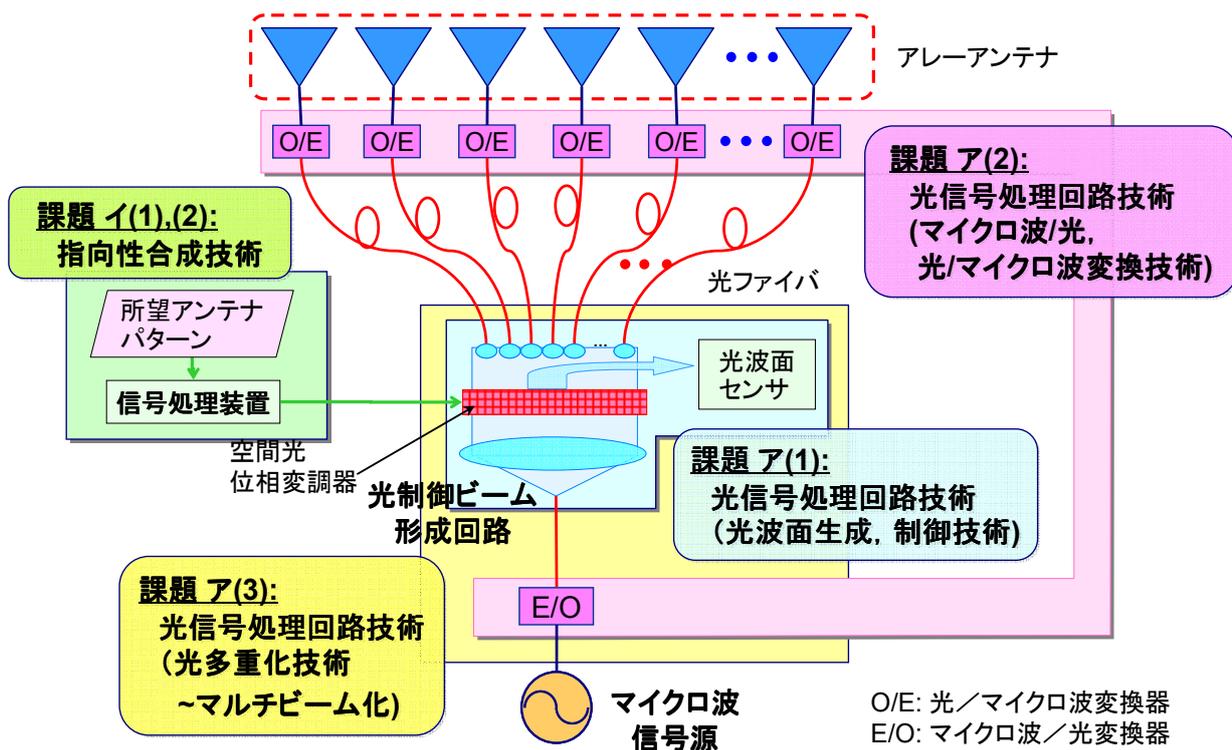


図 2-1-1: 光制御フェーズドアレーアンテナの概略構成図と開発課題の関係

## (ア-2) マイクロ波/光、光/マイクロ波変換技術

マイクロ波/光 (E/O)、光/マイクロ波変換 (O/E) 変換技術の開発では、光ファイバによるマイクロ波伝送技術の課題を抽出し、PD(フォトダイオード)アレーによる O/E(光電)変換器の飽和レベル向上技術を提案した。これまでに、飽和レベルの高い PD 素子の試作、評価を行い、周波数 5GHz において、PD 素子単体から最大 RF 出力電力 25.8 dBm、電源効率 40・%という大きな値が得られた。また、4 つの PD 素子出力を合成した PD アレーモジュールの試作、評価を行い、周波数 5 GHz で、最大 RF 出力電力 1 W と非常に高い出力を得た。このことにより、W 級出力 O/E 変換器が実現可能であり、E/O—O/E 間のリンク損失向上を実証した。

## (ア-3) マルチビーム化技術

アンテナビームに対応した波長で多重された複数の光ビームを空間的に分波し、ビーム毎にアンテナ励振位相分布で変調した後、空間的に合成する方式を考案した。これにより、単一の光学系でマルチビームを実現できる。今回、小型、短尺に光ビームの合分波機能を実現するために、平行平板上に透過波長帯を連続に変えた光バンドパスフィルタをコーティングした空間型光波長多重合分波器を開発した。試作した合分波器により、10 波の光ビームの空間分離、および再合成を可能とした。これを用いた光制御ビーム形成回路を試作し、Ka 帯にて 10 本マルチビームを形成できることを実証した。

## (イ) 指向性合成技術の開発

### (イ-1) 低サイドローブ化技術

光制御ビーム形成回路内を伝搬する光ビームの光空間位相/振幅分布から、アレーアンテナから空間に放射するマイクロ波の電波伝搬までを計算できるシミュレータを開発した。本シミュレータにより、光空間位相変調器や、強度変調器で形成した光波面分布からアンテナ放射ビームの状態を容易に求めることが可能となった。さらに、光学部品の歪みや、アライメント誤差を入力することにより、アンテナ放射パターンの変動を解析可能とした。

さらに、光制御ビーム形成回路内の空間光強度変調器を用いて、ローカル光の強度分布を制御することにより、一般的なアレーアンテナのサイドローブ低減手段と同様に、アンテナ励振振幅分布をテイラー分布にできることを示し、シミュレーションおよび、試作装置を用いた実測により、サイドローブレベル-25 dB 以下を実証した。

### (イ-2) 校正技術

光制御ビーム形成回路においても、アレーアンテナの代表的な校正法である素子電界ベクトル回転法 (REV 法) が適用可能なことを解析的に示し、電波暗室にてアレー合成振幅位相を用いた REV 法により光制御ビーム形成回路を校正し、ビーム走査試験を行った。その結果、所望のビーム走査が得られ、光領域での校正技術の有効性を実証した。

## 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
- ・サイドロープレベル < -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
- ・サイドロープレベル < -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)

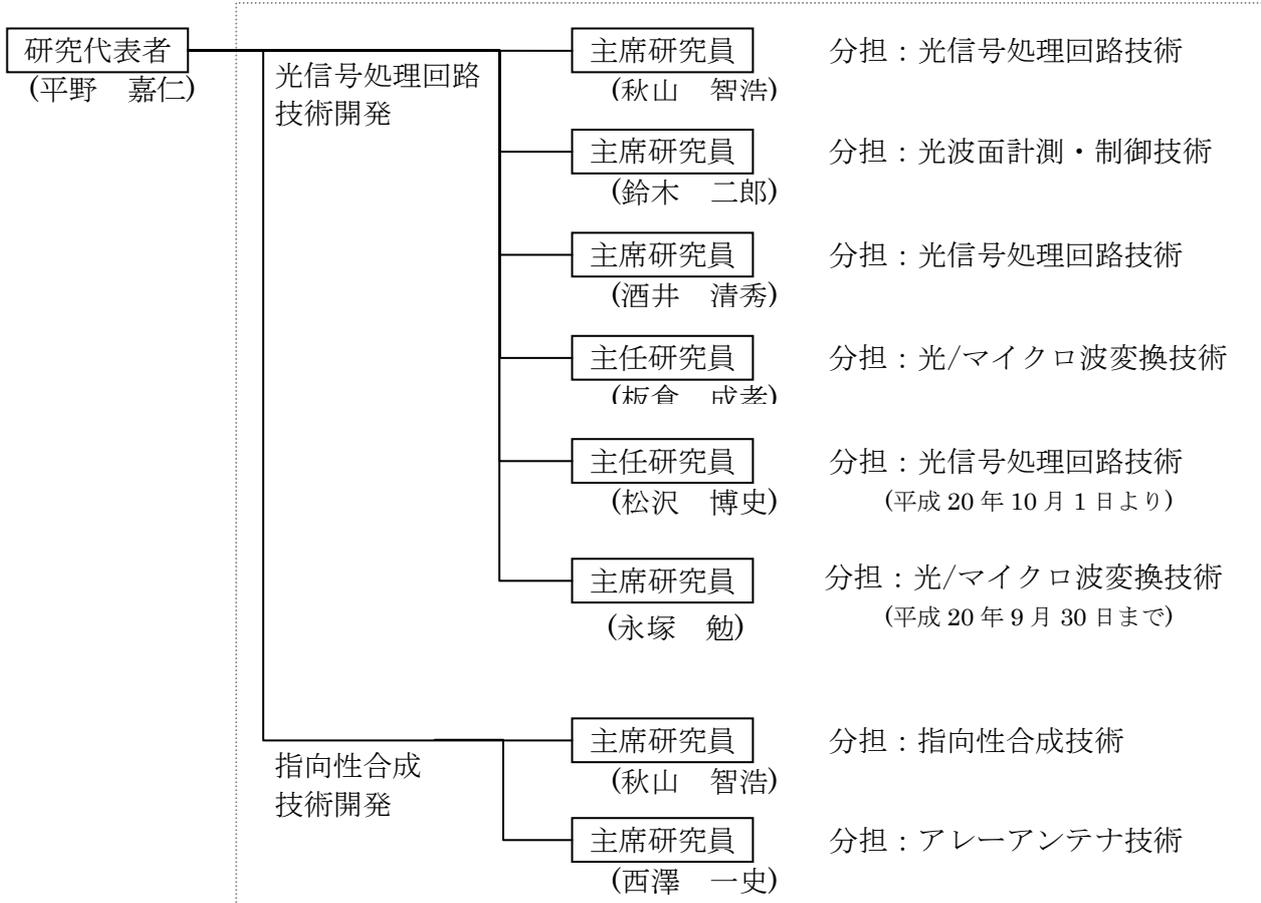
研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
ア. 光信号処理回路技術	-	-	-	-	-	-	
(1) 光波面生成、制御技術（ビーム成形）	-	-	-	-	-	-	
(2) マイクロ波/光、光/マイクロ波変換技術の開発	-	-	-	-	-	-	
(3) 光多重化技術（マルチビーム化）	-	-	-	-	-	-	
イ. 指向性合成技術	-	-	-	-	-	-	
(1) 指向性合成技術 （アンテナ放射パターン解析、 低サイドローブ化技術）	-	-	-	-	-	-	
(2) アンテナ校正技術	-	-	-	-	-	-	
間接経費	-	-	-	-	-	-	
合 計	-	-	-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

- 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

(研究分担者の体制)



## 4 研究開発実施状況

### 4-1 光信号処理回路(光波面生成、制御技術)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。4-1-2 節では、光信号処理回路(光波面生成技術)である光制御ビーム形成回路(光制御 BFN)の試作および評価結果について述べ、4-1-3 節で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 光波面生成、制御回路の開発

光制御ビーム形成回路(光制御 BFN)の全体構成を図 4-1-1 に示す。図 4-1-1 において、光制御 BFN に入射した光は光分波回路(A)により信号光ビームとローカル(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(B)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。空間光位相変調器は、2 次元アレー状にセグメント化されたミラーアレーをピエゾアクチュエータの前面に設置し、ミラー反射面の位置を機械的に制御することにより位相変調を行う。

一方、LO 光ビームは空間光強度変調器(C)で所望のアンテナ励振振幅分布に変調され、位相変調された信号光ビームと空間的に合波した後、空間的にマイクロレンズアレーと光ファイバアレーからなる 2 次元空間光サンプリングアレー(D)によりサンプリングされ、光/マイクロ波変換器(O/E)に伝送する。

さらに、光制御 BFN 内の空間光位相変調器による位相変調特性の変動、光学系の収差などによる位相変動は、マイクロ波の励振位相変動となるため、光位相センサ(E)により光波の位相分布をセンシングし、位相制御信号へのフィードバック信号としている。

以下に、主要構成要素(A)から(D)の部分試作の結果を示したのち、光制御ビーム形成回路の全体評価の結果を示す。また、光位相センサ部(E)については、次項で詳細に説明する。

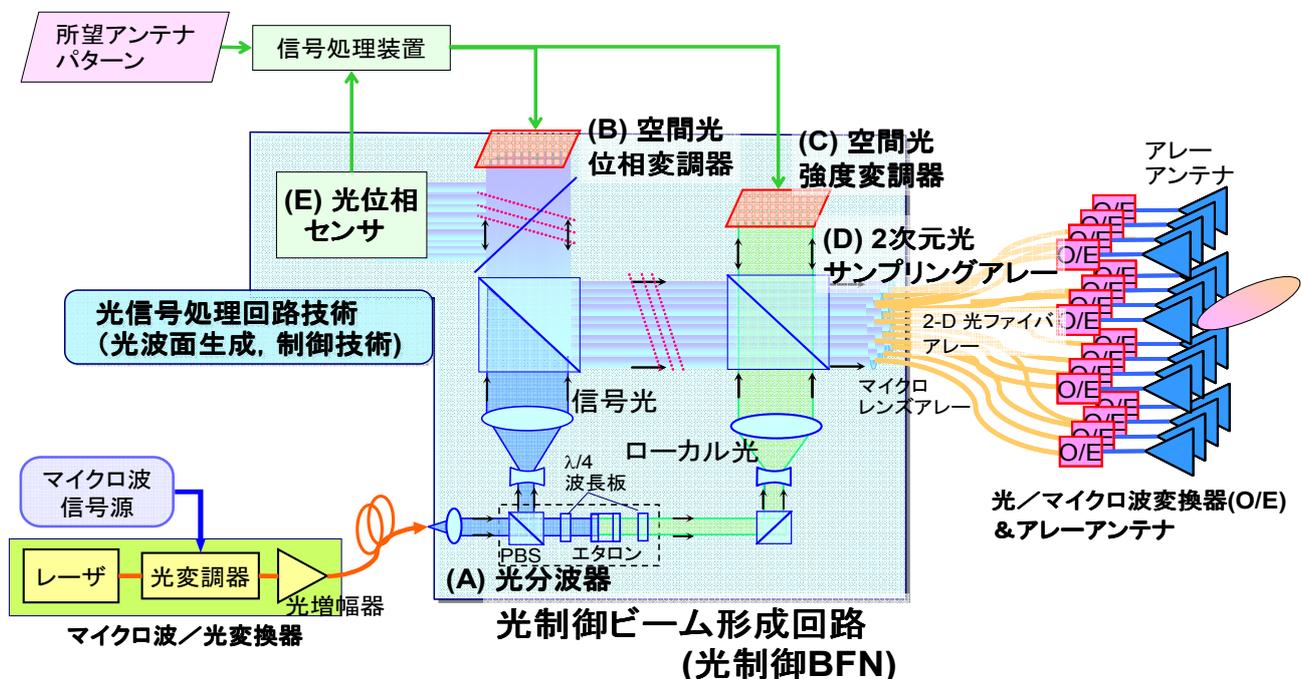


図 4-1-1: 光制御ビーム形成回路(光制御 BFN)の全体構成図

## (1) 部分試作結果

### (A) 光分波器

光分波の構成を図 4-1-2 に、試作品の概観写真を図 4-1-3 に示す。光分波器は偏光ビームスプリッタ (PBS)、 $\lambda/4$  波長板、エタロンフィルタにより構成した。PBS を透過した信号光およびローカル光は、 $\lambda/4$  波長板で円偏光に変換され、エタロンフィルタに入射する。エタロンフィルタによりローカル光を透過、信号光を反射させる。反射した信号光は、 $\lambda/4$  波長板により入射時から 90 度回転した直線偏光になり、PBS で反射する。一方、エタロンを透過したローカル光も、 $\lambda/4$  波長板により直線偏光に変換される。エタロンは温度安定性がよいエアギャップタイプを採用した。

エタロンの分光透過率および反射率の設計値を図 4-1-4 に示す。L 帯から Ku 帯で適用するために、FSR (Free Spectral Range): 25GHz、Finesse: 77、FWHM (Full Width at Half Maximum, 半値全幅): 325MHz とした。図 4-1-4 より、ローカル光を透過する光路において、信号光の消光比は、ローカル光からオフセット周波数 1 GHz (L 帯) で -15 dB、2 GHz 以上 (S 帯) で -20 dB、4-6 GHz (C 帯) で -25 dB、12-14 GHz (Ku 帯) で -30 dB 以上を達成した。以上より L 帯から Ku 帯において、信号光とローカル光の分離が可能となる。

試作した光分波器の分光透過率の測定結果を図 4-1-5 に示す。図 4-1-4 に示す設計通りの分光特性が得られた。ここで、エタロンの FWHM は 1.5  $\mu\text{m}$  帯 (約 190 THz) で約 300 MHz (比帯域:  $1.5 \times 10^{-4}\%$ ) と非常に狭帯域であるため、エタロンの透過域をローカル光の波長に合致させることは困難である。そこで、本装置ではエタロンを透過したローカル光の強度をモニタし、透過光強度が最大となるようにレーザの波長をフィードバック制御した。これにより、温度変動などによるエタロンの透過波長帯のズレにも対応できる。

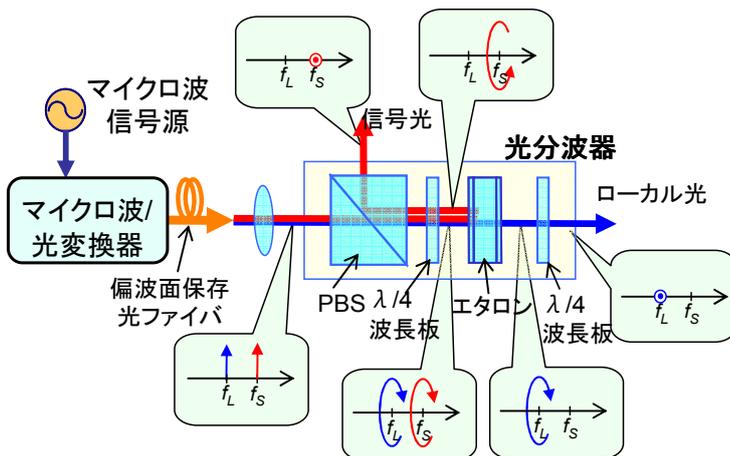


図 4-1-2: 光分波器の構成

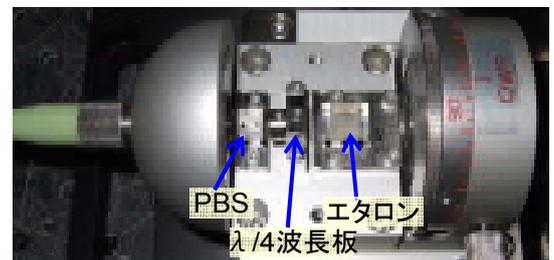


図 4-1-3: 試作光分波器の外観写真

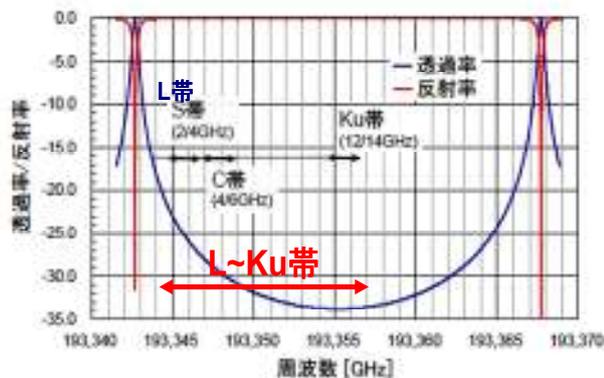


図 4-1-4: 光分波器の分光透過率/反射率の設計値

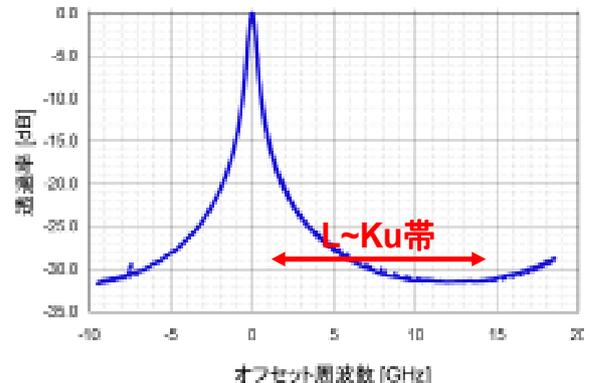


図 4-1-5: 試作光分波器の分光透過率の実測値

### (2) 空間光位相変調器

試作した空間光変調器は、 $10 \times 10$  アレーのセグメントミラーとピエゾ (PZT) アクチュエータアレーとを組合せて構成している。試作素子の外観を図 4-1-6 に、主要諸元を表 4-1-1 に示す。さらに、セグメントミラー

の開口率向上及び、ミラー面の傾きによる反射ビームの傾きを抑えるため、セグメントミラー前面に図 4-1-7 のように、マイクロレンズアレーを設けている。

図 4-1-8(a)に印加電圧に対する各ミラーの移動量の測定結果を、(b)に5素子分の位相変調特性の測定結果を示す。図 4-1-8(a)より、16 $\mu\text{m}$  以上(10 $\lambda$ 以上、 $\lambda=1.5\mu\text{m}$ )の駆動ストロークが得られることが確認できる。また、図 4-1-8(b)より波長 1.5 $\mu\text{m}$  において、約 12V の印加電圧で  $2\pi$  の位相変調可能なことが分かり、10 $\times$ 10 アレーで位相変調機能を実証した。

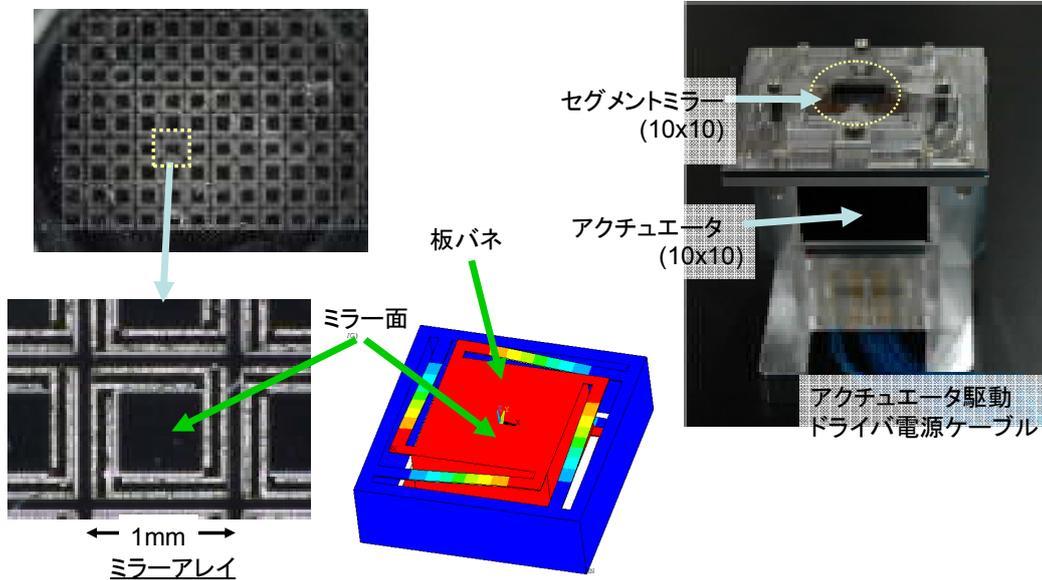


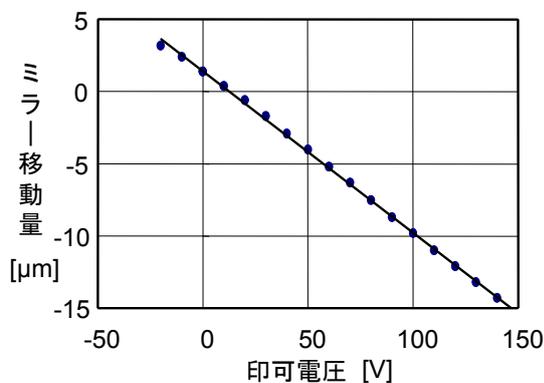
図 4-1-6: 反射型空間光位相変調器の外観

表 4-1-1: 反射型空間光位相変調器の概略仕様

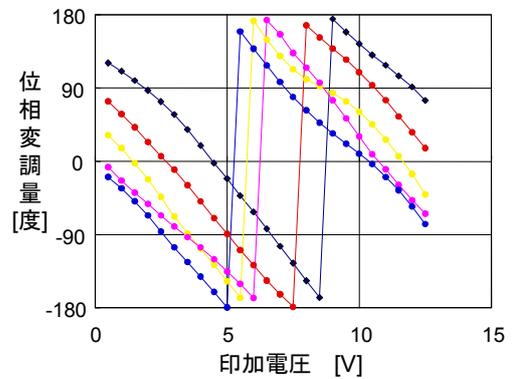
ミラー素子数	100 (10 $\times$ 10)
ミラー素材	Si + Au
駆動方式	PZT
素子ピッチ	1mm $\times$ 1mm
鏡面の傾き	<0.1mrad
固有振動数	>1kHz
ストローク	5 $\mu\text{m}$ P-V
駆動分解能	0.07 $\mu\text{m}$
耐レーザーパワー	>25W



図 4-1-7: 空間位相変調器の外観図 (マイクロレンズアレー装着時)



(a) 印加電圧—ミラー移動量



(b) 印加電圧—位相変調量( $\lambda=1.5\mu\text{m}$ )

図 4-1-8: 空間位相変調器の入出力特性

### (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を示す。強度変調機能は、位相変調器と偏光素子を組み合わせで実現した。図 4-1-10 に強度変調特性の測定結果を示す。図より 20dB 以上のダイナミックレンジでの強度変調特性できることが分かる。

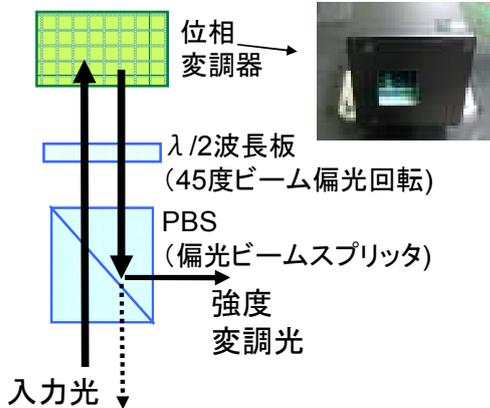


図 4-1-9: 空間光強度変調器の構成

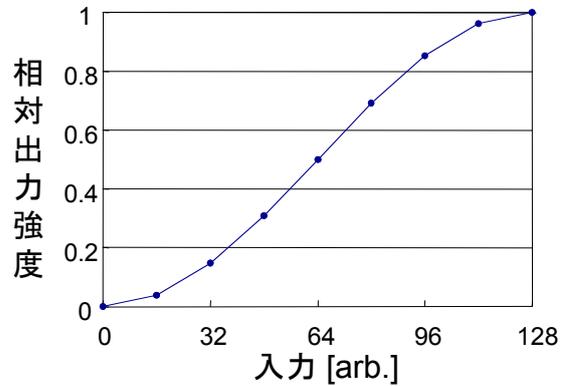


図 4-1-10: 空間光強度変調器の変調特性

### (4) 2次元光サンプリングアレー

位相変調された信号光ビーム、および、強度変調されたローカル光ビームは 2 次元光ファイバアレーを用いて空間的にサンプリングする。2 次元光ファイバアレーには、広帯域信号を伝送するためにシングルモードファイバを使用した。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  $10\mu\text{m}$  と小さいため、ファイバ入射側に 2 次元マイクロレンズアレーを設置して、各光ビームを効率よく光ファイバに入力している。

2 次元光ファイバアレーおよびレンズアレーの素子間ピッチは、前述の空間光位相変調器の素子間ピッチと一致するように  $1.0 \times 1.0 \text{ mm}$  とした。2 次元光ファイバアレー、レンズアレーおよび組み合わせた 2 次元光サンプリングアレーの概観写真を図 4-1-11 に示す。

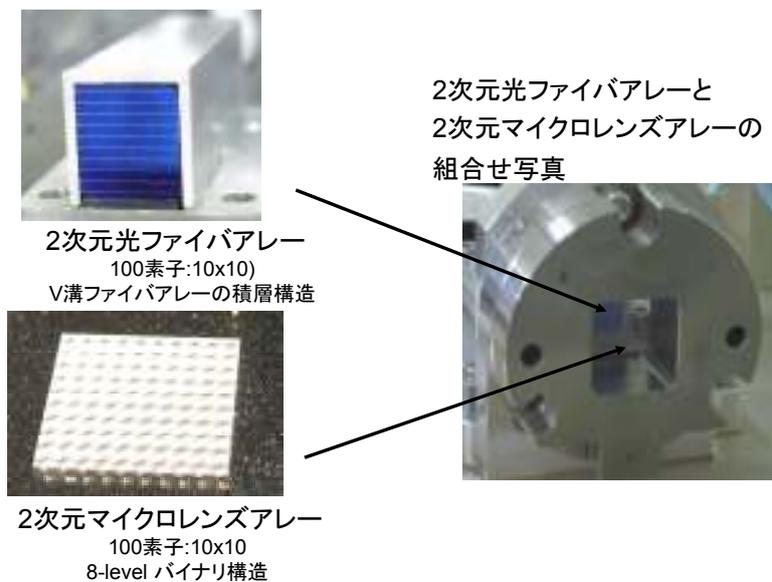


図 4-1-11: 2次元光サンプリングアレーの外観写真

(2) 全体写真

図 4-1-12 に光制御ビーム形成回路の外観写真を示す。なお、光位相センサ部は次の 4-1-3 項の図 4-1-20 に示す。

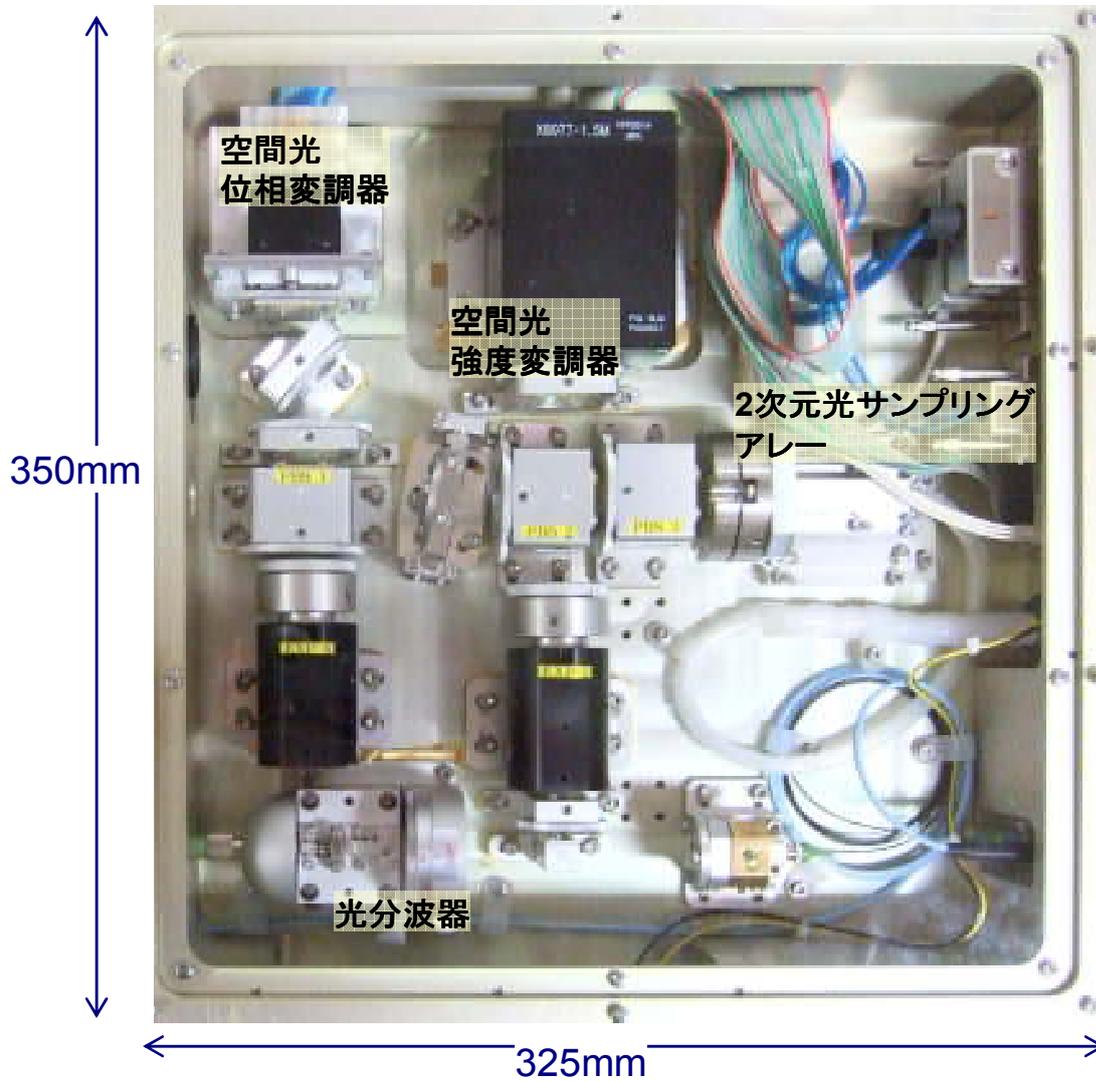


図 4-1-12: 光制御ビーム形成回路の外観写真

### (3) ビーム形成実験

以上に述べた光制御ビーム形成回路を用いて、空間光位相変調器で光波の位相分布を制御したときのアンテナ励振分布を測定し、アンテナ放射パターンを求めた。アレー各素子への励振信号は、サンプリング光ファイバアレーの各ファイバ出力を光チャネルセクタで切替えながら O/E 変換器でマイクロ波に光電変換し、ベクトルネットワークアナライザを用いて測定している。測定系の全体構成を図 4-1-13 に示す。

図 4-1-14 に振幅、位相分布の測定結果から求めたアレーアンテナ放射パターンを示す。アレーアンテナは素子間隔:  $0.58\lambda$  の  $10 \times 10$  正方配列、素子パターンは  $\cos\theta$  とした。マイクロ波周波数は Ku 帯の 12GHz に設定した。図 4-1-14(a) は 2 次元アンテナ放射パターンを、(b)、(c) はそれぞれ水平、垂直方向にビーム走査時のカット面パターンである。図 4-1-14 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を実証した。

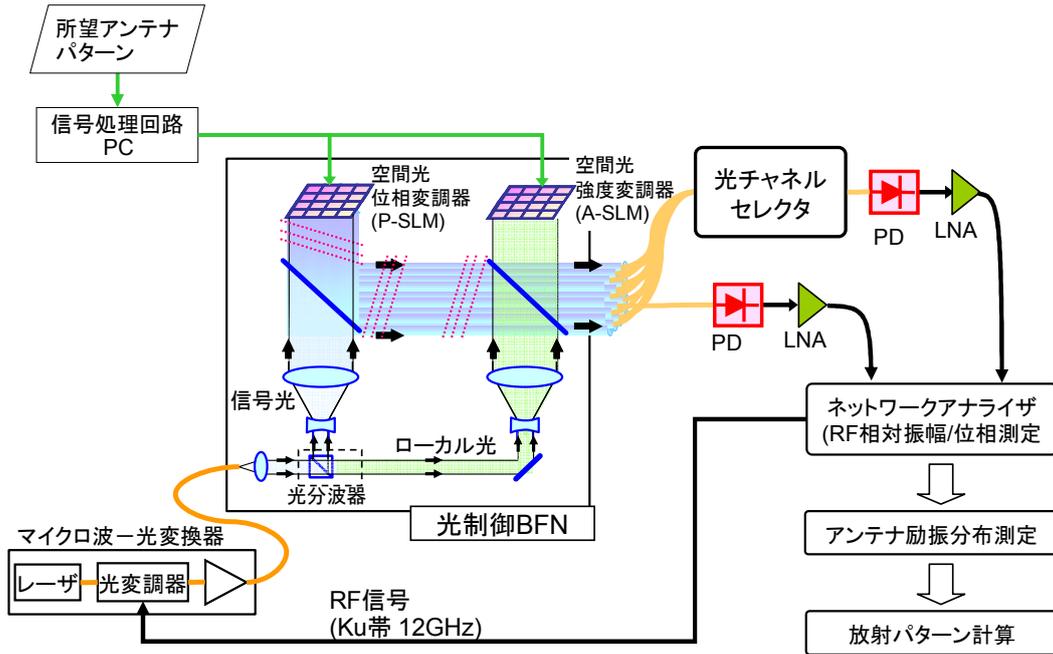


図 4-1-13: 光制御ビーム形成回路によるアンテナ励振分布測定系の構成図

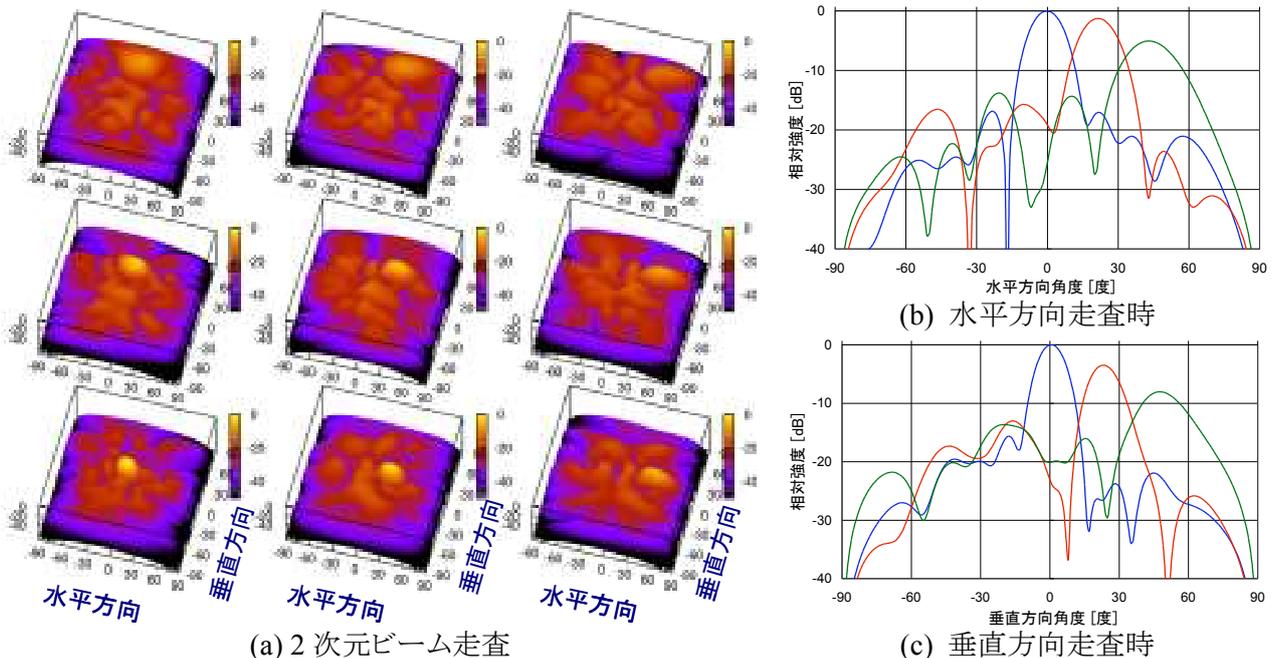


図 4-1-14: 測定振幅位相分布を用いたアンテナ放射パターンの計算結果

### 4-1-3 光位相センサの開発

#### (1) 概要

本研究における空間位相変調型光制御ビーム形成回路の概念図を図 4-1-15 に示す。本方式では空間位相変調器で形成された光波の位相パターンが、そのままアンテナ開口における素子アンテナの形成する電界位相になるので、ビーム制御のための位相制御アルゴリズムは一般のアレイアンテナと同様である。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、位相変換量を決定する必要がある。また、運用時の温度変化や、経時変動に起因し、空間位相変調器の形成する位相分布に歪が発生することが予想され、対策が必要である。本項では、アンテナビームの放射強度分布を任意のパターンとするための空間位相変調器の位相変換量演算アルゴリズムについて、机上検討を行った結果を示す。次に、前記位相変換量演算アルゴリズムを応用した新しい空間位相分布検出手段を考案し、試作評価を行った結果を示す。

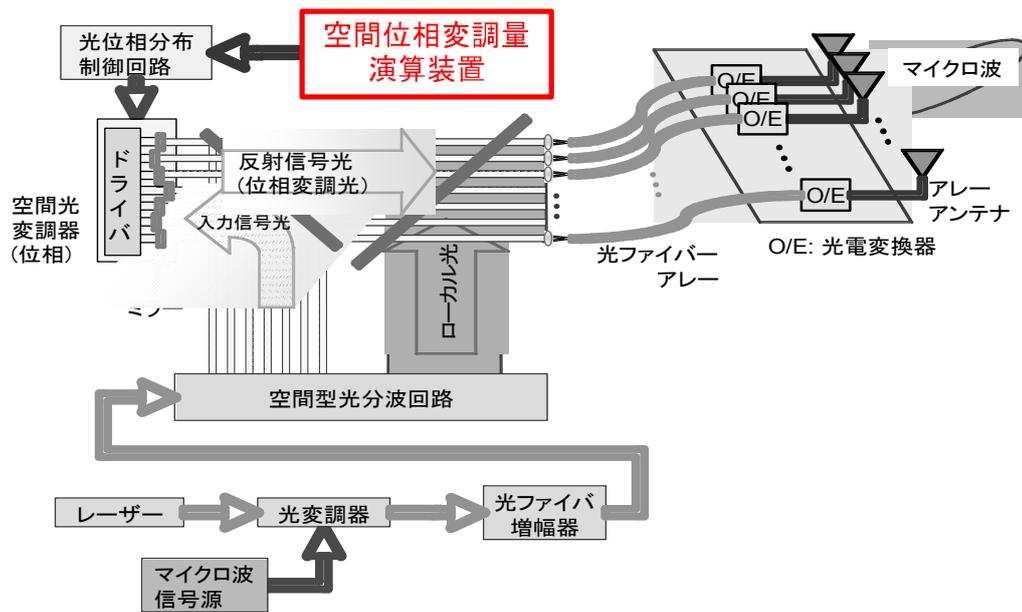


図 4-1-15: 光制御ビーム形成回路の概念図

#### (2) 位相分布演算アルゴリズム検討

所望のアンテナ強度パターンを形成するための位相分布を演算する方法について述べる。まず、所望のアンテナ強度パターンに適切な位相を組み合わせた電界を仮定する。この仮想的な電界を遠方からアンテナ開口に向けて逆伝播演算、すなわち逆フーリエ変換すれば、アンテナ開口上の電界分布が計算できる。ここで、遠方の位相分布の決定方法が課題のひとつである。位相を決定するための条件の一つとして、アレイアンテナは有限の数の素子アンテナで構成された有限の開口をもつという制限条件がある。この条件の範囲内で、位相分布を決定しなければならない。

前記アレイアンテナの制限条件から、アンテナ放射強度分布の位相を決定するという問題は、非線形最適化問題に属し解析的には決定できない。本研究では、非線形最適化問題の解法として CGH (Computer Generated Hologram) の設計に用いられているアルゴリズムの応用を検討した。CGH の設計においては、ホログラムをリソグラフィで製造する関係から位相変調量の階調や解像度に制約があり、アレイアンテナの物理制限による電界位相を決定する今回の問題と類似性がある。CGH の最適化設計アルゴリズムとしては前述の非線形最適化問題の解法アルゴリズムを含む様々な方法が提案されているが、できるだけ電子計算による演算量を増やさないことを考慮して、IFTA (Iterative Fourier Transform Algorithm) 法について検討した。IFTA 法の演算アルゴリズムを図 4-1-16 に示す。アンテナ開口上の電界と遠方ビームの電界との間で、フーリエ変換と逆フーリエ変換を繰り返し行う。このとき以下の制限条件を与えることで、素子アンテナで形成可能な位相分布に収束させる。

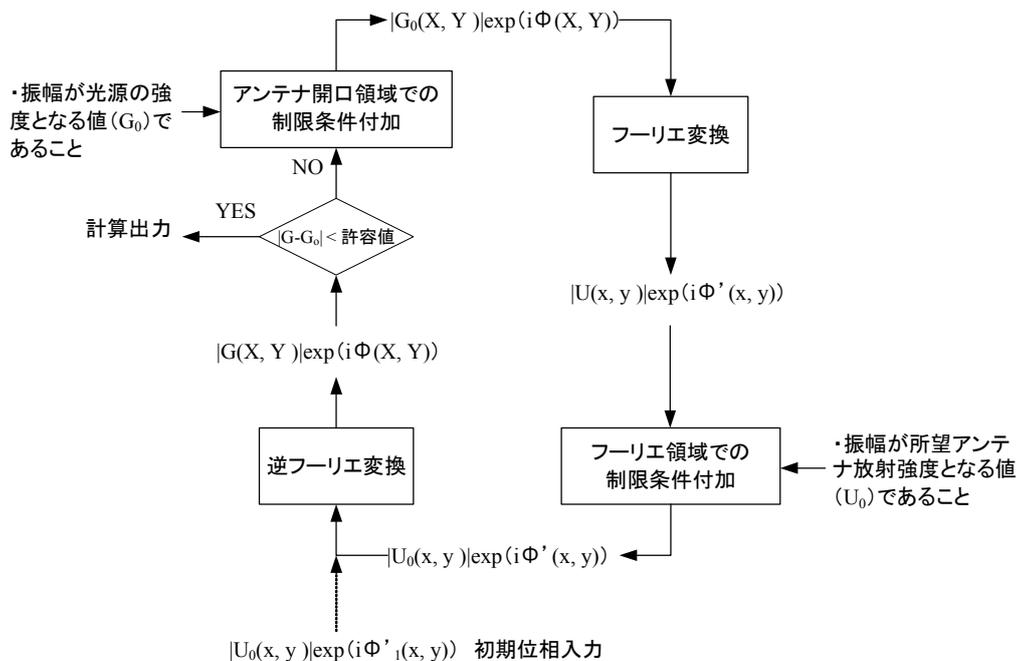


図 4-1-16: IFTA 法の演算アルゴリズム

- (1) アンテナ開口上における電界の振幅: 既知の光源の強度分布から決まる振幅  
(図 4-1-16 では  $G_0(X, Y)$ ) に固定
- (2) アンテナビームの放射電界の振幅: 所望のアンテナビーム放射強度から決まる振幅  
(図 4-1-16 では  $U_0(X, Y)$ ) に固定

計算機シミュレーションにより、光制御ビーム形成回路による IFTA 法の原理確認を行った。光学系の装置仕様を検証するため、フーリエ変換、逆フーリエ変換部分はフレネル回折積分による波動伝播計算を用いた。計算条件を表 4-1-2 に示す。

表 4-1-2: 計算条件

レーザービーム波長	1.55 $\mu\text{m}$
レーザービーム強度分布	Top Hat、正方形断面、10mm $\times$ 10mm
位相変調器画素ピッチ	6.25 $\mu\text{m}$
強度変調器画素ピッチ	6.25 $\mu\text{m}$
位相・強度検サンプリングピッチ	125 $\mu\text{m}$
FT レンズ焦点距離	500 mm

図 4-1-17 は光軸からずれた方向に回折限界ビームを形成する場合の電界強度、位相の状態を 2 次元マップで示したものである。図において、最上段は計算の制約条件である強度分布と、乱数により決定した空間光位相変調器の初期位相を示す。2 段目以降はアンテナ開口上の電界、及びアンテナビーム放射電界の強度、位相の演算結果であり、下段ほど反復計算回数が増えている。この例では、反復演算回数が 10 回で所望の強度分布を与えるための位相分布が得られることがわかった。

### (3) 位相センサの開発

本研究開発における光制御ビーム形成回路においては、耐環境性向上のため、温度変化や、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。本研究では、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)を設計試作し、ベンチトップ試験を行った。本装置の要件を以下に示す。

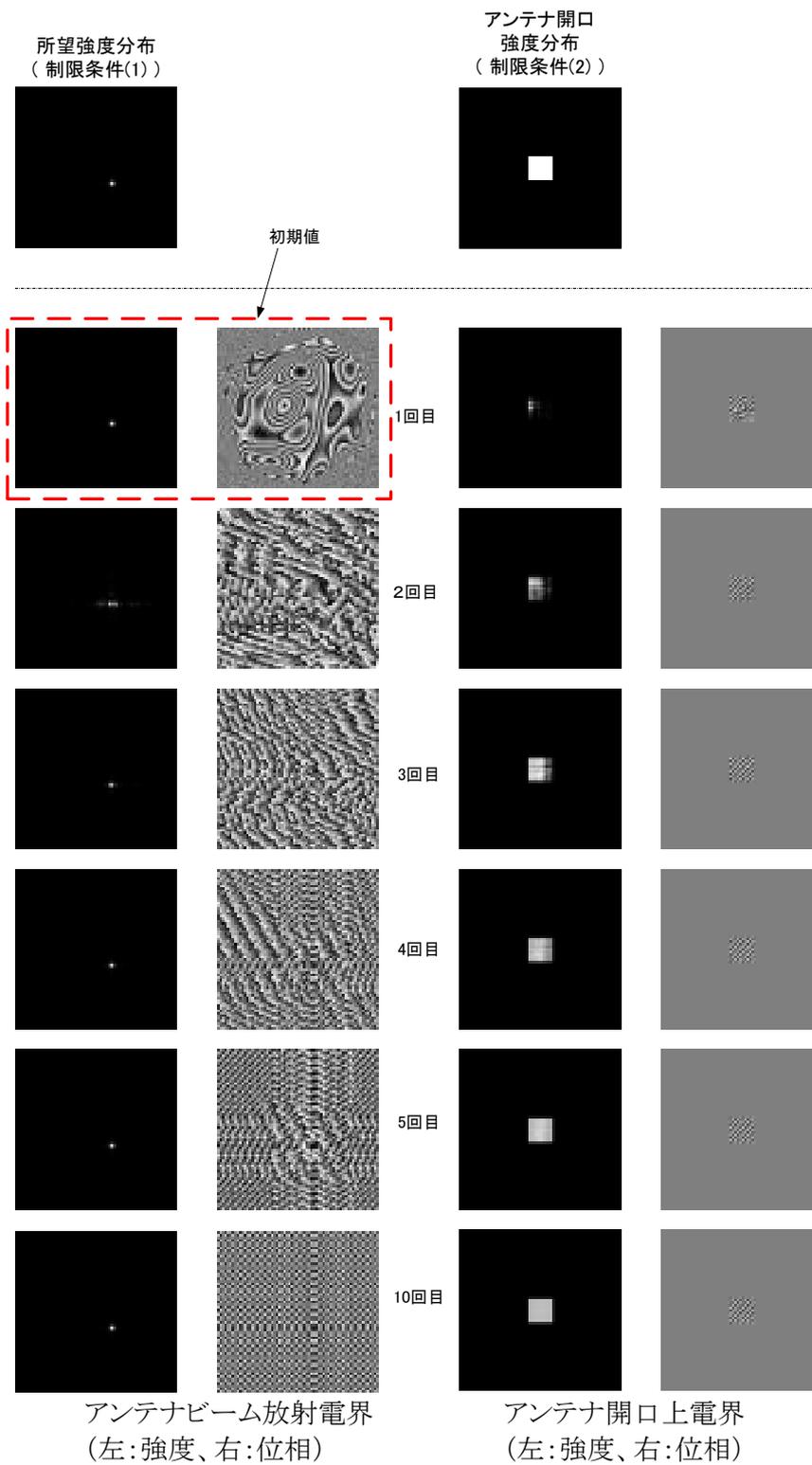


図 4-1-17: シミュレーション例(回折限界ビームの制御)

(i) 寸法

本装置は衛星搭載を考慮し開発した光制御ビーム形成回路(本体)に組み込む光学センサであり、小型軽量である必要がある。本体寸法  $425 \times 360 \times 100\text{mm}$  の 3 分の 1 程度を目標とする。

(ii) 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  $1 \times 1\text{mm}$ 、セグメント数  $10 \times 10$  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できない。

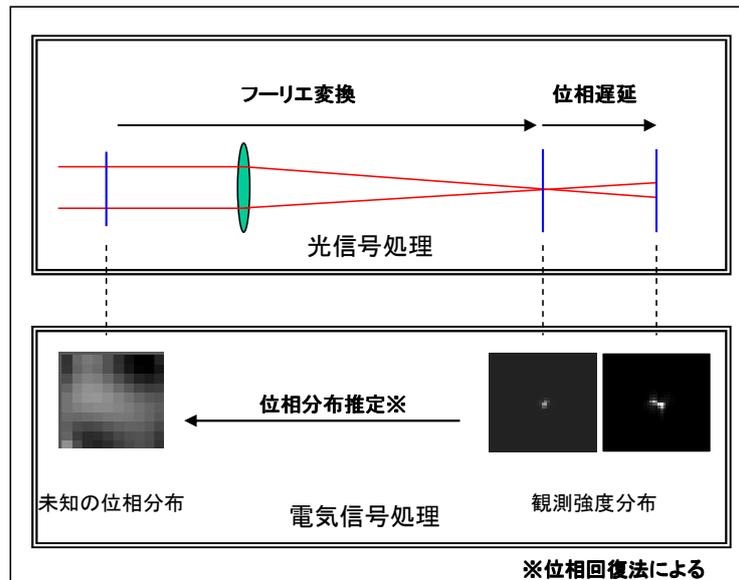


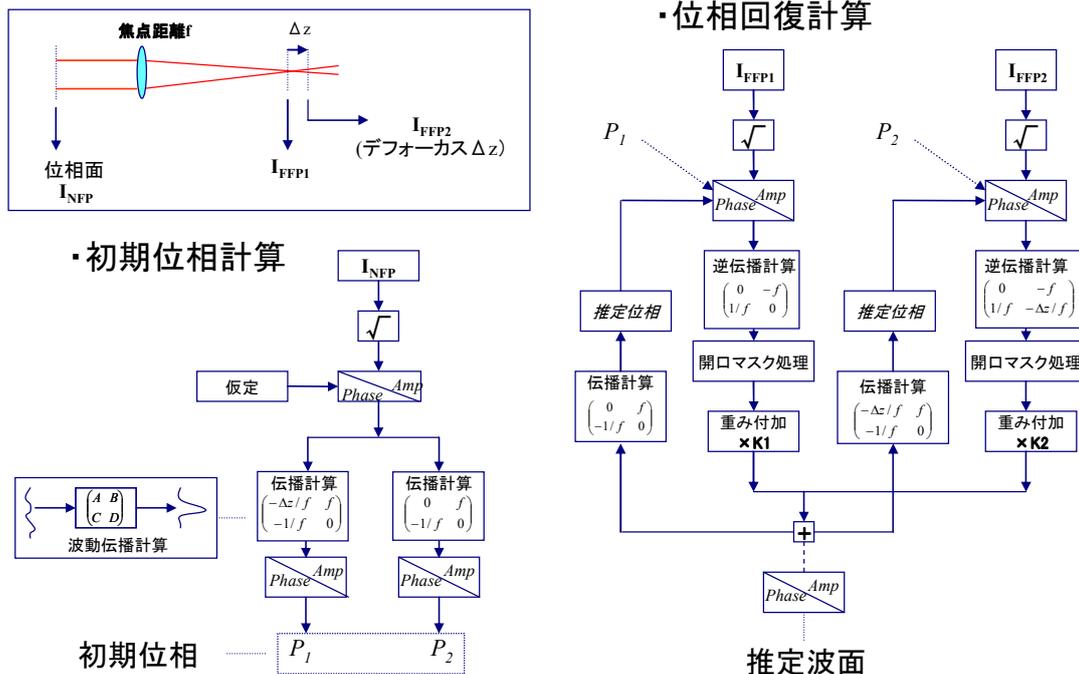
図 4-1-18: Phase-Diversity センサ方式の概念

以上述べた要件から、Phase-Diversity センサ方式を選定した。Phase-Diversity センサの概念を図 4-1-18 に示す。Phase-Diversity センサは、Fraunhofer 回折像からフーリエ変換像を取得し、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。

本装置の演算アルゴリズムを図 4-1-19 に示す。演算内容を以下に説明する。

- (i) 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)から振幅を求め、各々に対し波動伝播計算を行い2つの開口面上での複素振幅を計算する。
- (ii) 前記2つの開口面上での複素振幅の平均を求める。
- (iii) (ii)の平均化した複素振幅に対し波動伝播計算を行い、Phase-Diversity 像位置での複素振幅を求める。
- (iv) (iii)で求めた複素振幅の振幅のみを Phase-Diversity 像から得られる複素振幅に置き換える。
- (v) (i)~(iv)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。

### Gerchberg-Saxtonアルゴリズム※



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

図 4-1-19: 位相回復アルゴリズム

設計製作した本装置の構成を図 4-1-20 に、仕様を表 4-1-3 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。設計要点を以下に説明する。

(i) 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、焦点距離の長いフーリエ変換レンズが必要である。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小型化を図った。

(ii) 2 分岐光学系

Phase-Diversity 像を1フレーム時間で取得するため、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。

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 4-1-21 に示す。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、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。

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 4-1-22 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分かる。以上より、アレーアンテナへの給電線路間など、位相分布が不連続に変化していても、本位相センサは計測可能であることを実証した。

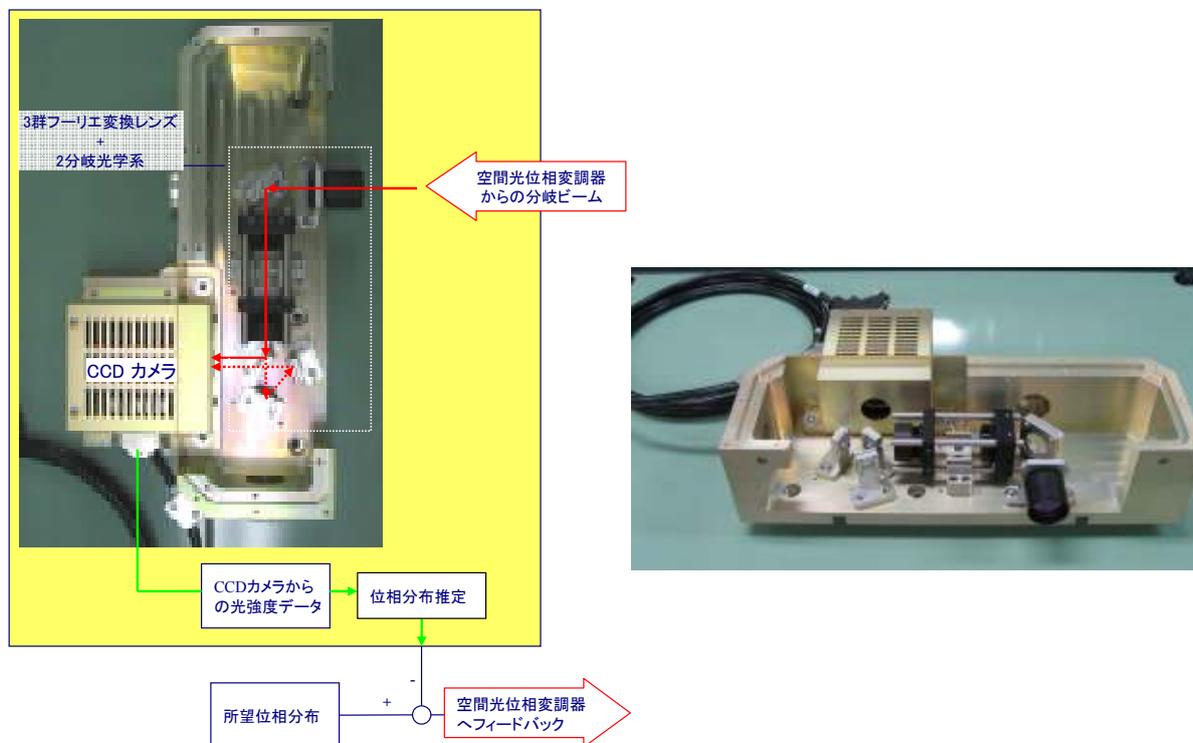


図 4-1-20: 光位相センサの構成

表 4-1-3: 光位相センサの仕様

項目	仕様	
全体	外形寸法	290(D)*110(W)*(100)
	波長	1540±20nm
	計測範囲	矩形開口10×10mm
	ダイナミックレンジ	±π/2 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 mm
	画素数	320(H)×256(V)
	フレームレート	30Hz

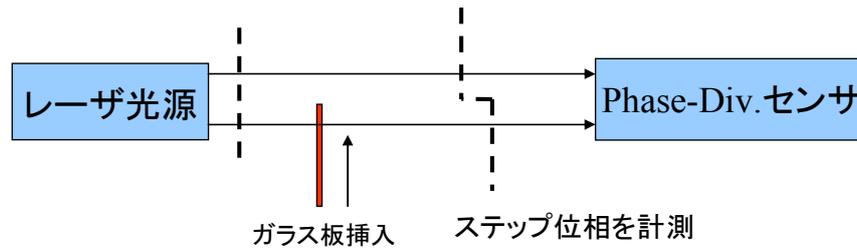


図 4-1-21: 位相検出試験系

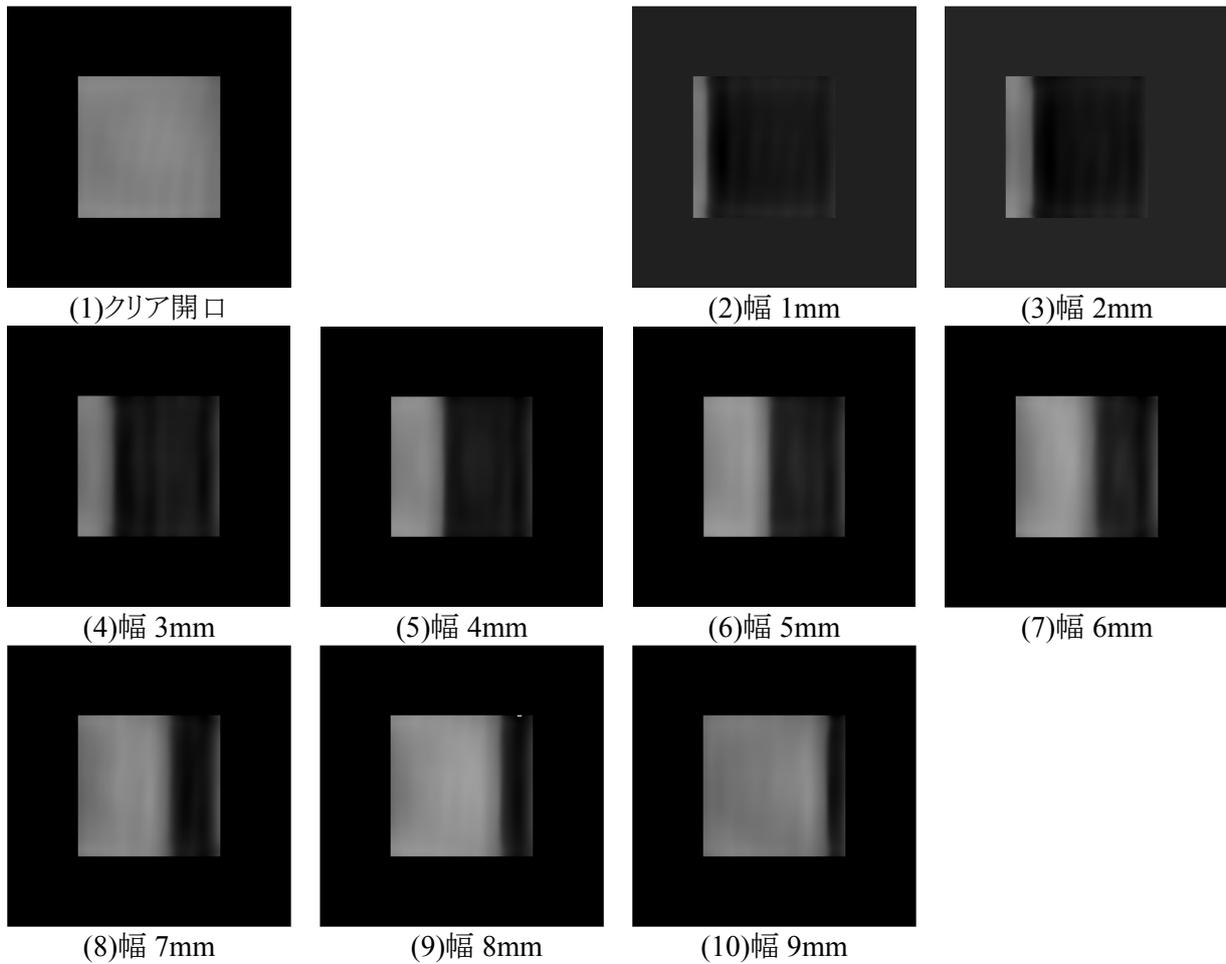


図 4-1-22: ステップ位相の推定結果

#### (4) まとめ

光制御ビーム形成回路において、空間光位相変調器に対し制御指令を与える方式を検討した。はじめに、所望のビーム強度パターンを形成する演算処理において、ホログラムの設計手法である IFTA 法の応用を検討した。計算機シミュレーション例を示し、所望ビーム強度パターンに応じた空間位相分布が出力されることを示した。次に、光制御ビーム形成回路内の光学系の歪補正のため、空間光位相変調器に制御指令値を与える、光空間位相検出装置(光位相センサ)を試作した。光位相センサでは、高速化のため、1フレームで Phase-Diversity 像を撮像できる光学系を考案した。また、衛星への搭載性を考慮した光学レイアウト設計を行い、光学系の短尺化を図った。ベンチトップ試験により、位相検出評価を行ない、空間位相変調器を模擬したステップ位相の変化に応答し、入力と一致した位相分布を演算できることを実証した。

#### 4-1-4 まとめ

本節では、光信号処理回路(光波面生成、制御技術)に関し、光波面形成部の試作、評価結果、および光位相センサおよび位相回復アルゴリズムの設計、評価結果をまとめる。

- **光波面形成部**: 光信号処理回路の開発として、アレーアンテナへの励振振幅位相分布を形成する、光制御ビーム形成回路を開発した。本開発では、キーデバイスである空間光位相変調器 (100 素子、 $10 \times 10$  正方アレー)、2 次元光サンプリングアレーなどの試作を行い、これらを用いた組合せ試験により、100 素子の 2 次元アレーアンテナにおいて、所望のビーム制御が可能な励振振幅位相分布を形成できることを実証した。
- **光位相センサ**: 光制御ビーム形成回路では、光波の位相分布がそのままアンテナから放射するマイクロ波の位相分布となるため、高い安定度が必要である。しかしながら、光の波長オーダーで装置の安定化は困難と考え、光の位相状態をセンシングする技術を開発し、変動位相の補償を可能とした。本開発では、IFTA 法を応用することで、強度分布のみの測定で位相分布を推測可能とした。次に、制御の高速化のために、1 フレームで Phase-Diversity 像が測定可能な光学系を考案した。シミュレーション及び試作器を用いた測定により、位相検出が可能であることを実証した。

## 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

光ファイバによるマイクロ波伝送技術において、通常、電気/光(E/O)変換および、光/電気(O/E)変換によりリンク損失が生じるため、伝送距離が比較的短い衛星—アンテナ間の給電系では、同軸線路に対して優位性を確保できなかった。例えば、スロープ効率 0.2 W/A, 光パワー平均値 5 mWの半導体レーザダイオードモジュールと、感度 0.8 A/W の InGaAs 系のフォトダイオード(Photodiode, PD)モジュールをバックツ—バック接続した場合、マイクロ波のリンク損失が 16 dB 発生する。このリンク損失を低減するには、発光素子、受光素子の光パワーを増加させる必要がある。今回、PD 素子出力を合成した PD アレーモジュールの試作、評価を行い、4つのPD素子からなるPDアレーにおいて、周波数 5 GHz で、最大 RF 出力電力 1 W と非常に高い出力を得た。このことにより、W 級出力 O/E 変換器が実現可能であり、E/O—O/E 間のリンク損失向上を実証した。本節では、試作した PD モジュールの構造及び評価結果について述べる。

### 4-2-2 PD モジュール構造

本開発における O/E 変換器は、アレーアンテナ装置の各アンテナ素子にそれぞれ接続されることを前提にしている。このため、O/E 変換器は小型であることが要求される。PD のアレー化により高出力化が期待できるが、複数の PD 素子を用いる必要があることに加え、光分岐回路および電力合成回路が必要である。本節では、小型かつ、高出力化可能な PD アレーモジュールについて、検討を行なった。

図 4-2-1 は PD アレーモジュールの構成図、図 4-2-2 はモジュール内部を示す写真である。光ファイバからの入射光は、レンズで横倍率 5.5 倍に像変換され、4 分岐ビームスプリッタで等分配された後、PD アレーに結像する。各 PD 素子からの RF 出力は、2 段構成ウィルキンソン型合成回路で電力合成し、K コネクタを介して出力するようにした。PD 素子へのバイアスは、オープンスタブとウィルキンソン型合成回路を介して印加される。

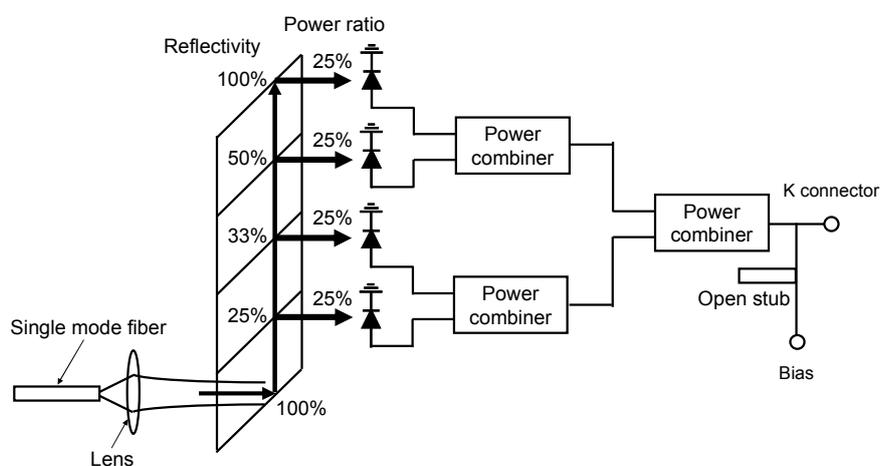


図 4-2-1: PD アレーモジュールの構成図

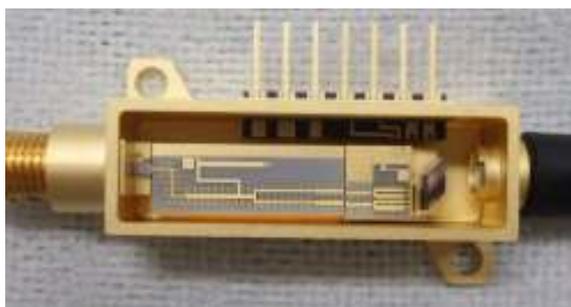


図 4-2-2: PD アレーモジュールの全体写真  
(11 mm×33.5 mm×10 mm)

図 4-2-3 は InGaAs 系 pin PD 素子の断面構造、図 4-2-4 は PD アレー素子の写真である。受光径は直径 50  $\mu\text{m}$ 、光吸収層の厚さは 0.8  $\mu\text{m}$  であり、光吸収層の一部が p 層に広がる部分空乏構造にしている。図 4-2-5 は、その PD 素子の感度の波長依存性を示す。光吸収層が 0.8  $\mu\text{m}$  と薄いため、感度は 0.6 A/W 程度と比較的に低い値になっている。これは、空間電荷効果を防ぐのに必要な電界強度を、発熱が抑制できる低バイアス電圧で得るためであり、具体的には最大 RF 電力を見ながら実験的に光吸収層の厚さを最適化したものである。電力変換効率の最大値は 40% 程度と予想され、残りはこの光吸収層を熱源とした発熱となり、単位面積当たりの発熱量は高出力のブロードエリア半導体レーザに匹敵する。空間電荷による電界の低下を考えると表面入射の方が好ましいが、ここでは放熱性を最優先して裏面入射型を採用した。ブロードエリア半導体レーザの実装方法と同様に、PD 素子の p 側をヒートシンクに向けて窒化アルミのヒートシンクに実装することで廃熱抵抗を減らしている。さらに、受光領域を Fe 添加の高抵抗 InP 層で埋め込んで、放熱面積の拡大を図っている。PD アレー素子は 0.25 mm 間隔の 8 素子構成で作製したが、放熱性を考え 0.5 mm 間隔の 4 個のみを使用した。PD 素子は熱伝導の良い窒化アルミサブマウントに光吸収層 (p) 側を半田付けされ、銅タングステンブロックで熱拡散を図った後、サーミスタとペルチェ素子 (Peltier cooler) で温度制御されている。この温度制御部分に対してウィルキンソン型合成回路を介して熱が流入しないように、2 段目のウィルキンソン合成回路の手前に空間を設けて、熱アイソレーションを図っている。

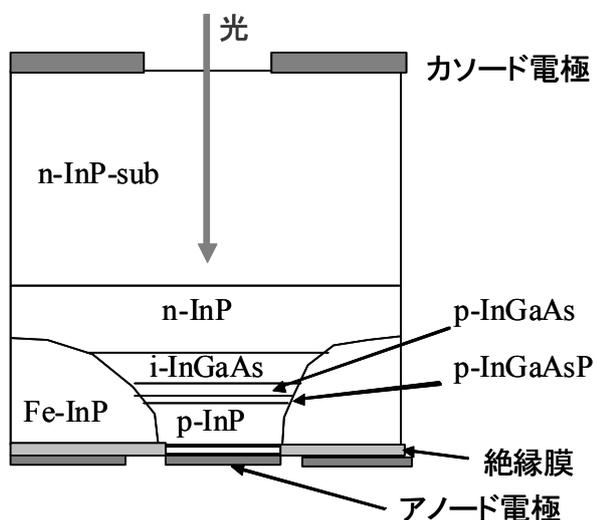


図 4-2-3: PD 素子の構造

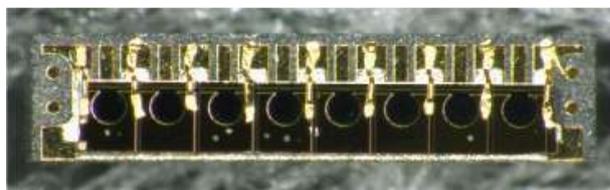


図 4-2-4: PD アレーの写真

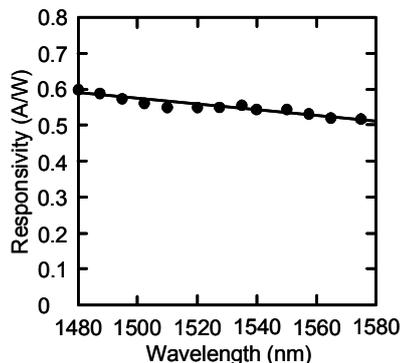


図 4-2-5: 感度の波長依存性



図 4-2-6: ビームスプリッタの写真  
(1.5mm×4.5mm、厚さ 4mm)

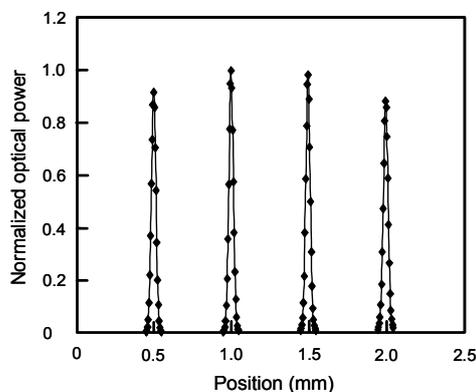


図 4-2-7: ビームスプリッタ通過後の光分布

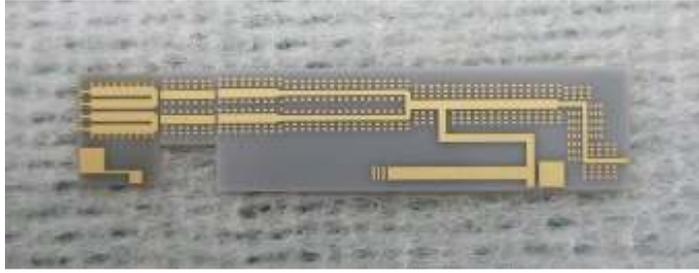


図 4-2-8: ウィルキンソン型電力合成器の写真  
(22.5mm×4.9mm、厚さ 0.2mm)

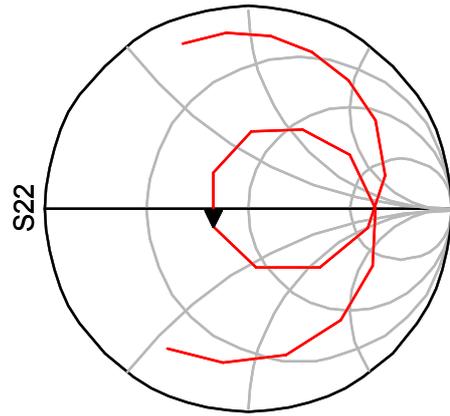


図 4-2-9: スミスチャート

単一モード光ファイバで取り扱える光量は、光ファイバや光コネクタのファイバフェーズ現象で制限され、概ね 2 W と考えられる。そのため、ビームスプリッタは光路に接着剤を使用せず、熔融石英を基板とし、表面を二酸化珪素とした多層膜( $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ )で構成して、基板の石英と光学溶着(Optical contact)し、強度を上げるため高温で拡散接合したものである。図 4-2-6 に 4 分岐ビームスプリッタの写真を示す。図 4-2-1 の構成図に示したとおり、レンズからの入射光を反射率 100%のミラーで直角に折り返した後、 $45^\circ$  配置の部分反射ミラーの反射率をそれぞれ 25%、33%、50%、100%とすることで入射光を4等分している。光ファイバと各 PD 素子の光路長差による位相差は、周波数 5 GHz で  $4.5^\circ$  であり、RF 合成回路で生じるスキューによる損失は 0.8%程度と小さい。図 4-2-7 にビームスプリッタを通過した後の PD アレー素子の配置位置における光分布を示す。光パワーのばらつきは 4%程度、モードフィールド径は  $55 \mu\text{m}$  である。このガウスビームは中心部の輝度が高く PD 素子の光吸収層面内での空間電荷効果が発生しやすいため、RF 出力を見ながら光ビームのモードフィールド径を最適化したものである。

PD アレーからの出力は、図 4-2-8 に示す 2 段構成ウィルキンソン型合成回路で電力加算される。PD 素子の RF 出力は、(1)PD 素子直後の給電線路を用い 5 GHz におけるインピーダンスをスミスチャートの実軸上に移動し、(2)最初のウィルキンソン型合成回路でインピーダンスを移動しながら電力合成、(3)インピーダンス変成器で予め 5 GHz におけるインピーダンスを移動させた後、(4)2 段目のウィルキンソン型合成回路でインピーダンスを  $50 \Omega$  に整合している。図 4-2-9 は、4~6 GHz のスミスチャートであり、5 GHz ではほぼインピーダンス整合している。比帯域の狭い周波数を有効利用する無線通信では、このような狭帯域のインピーダンス整合が有効である。線路の出力部にバイアス電圧の供給部を設け、5 GHz で高いインピーダンスに見えるようにオープンスタブを設けている。なお、信号線は K コネクタを介して出力される。

### 4-2-3 実験結果

高 RF 出力 PD 素子のバイアス電圧  $V_{bias} (min)$  としては、図 4-2-10 に示すとおり、PD 素子の光吸収層で発生する空間電荷をドリフト電流として取り出し、電流対 RF 出力特性の直線性を維持するための電圧  $V_{pd} (min)$  と、負荷抵抗  $R_{load}$  での電圧降下に対応したバイアス電圧  $\pm V_{pk\_load} (= I_{avr} \times R_{load})$  が必要である。 $V_{pd} (min)$  は、小信号で測定する 1dB コンプレッション電流  $I_{1dB}$  が零になるバイアス電圧  $V_{th}$  と、変調度 100%の電流振幅  $2I_{ave}$  に対する電界低下を補う電圧  $2I_{ave} \alpha^{-1}$  である。

図 4-2-11 は、小信号での 1dB コンプレッション電流特性の測定系であり、小信号側の LD の光入力を一定にして、もう一方の LD 光を EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) で増幅後、可変アッテネータで出力調整して光電流依存性を測定する。図 4-2-12 は、周波数 5 GHz における 1dB コンプレッション電流特性の光電流依存性の測定結果であり、バイアス電圧 0~4 V まで 0.5 V 毎の特性を示している。図 4-2-13 は、図 4-2-12 の結果を図 4-2-10 と同様に纏めたものである。図より、 $V_{th}$  は 0.2 V、アドミタンス勾配  $\alpha$  39 mS である。従ってバイアス電圧  $V_{bias} (min)$  は次式で表せる。

$$V_{bias} (min) = 0.2 + 2 \times I_{avr} / 0.039 + I_{avr} \times R_{load} \quad (4-2-1)$$

例えば、光電流 100mA まで RF 出力特性の直線性を保つためには、バイアス電圧  $V_{bias} (min)$  は 10.3 V 以上必要になる。

この PD アレーモジュールのバイアス電圧 10 V、周波数 5 GHz における RF 出力の入射光依存性を図

4-2-14 に示す。比較のため、PD 素子単体の RF 出力の入射光依存性も示している。図より、同じ光入力条件で見ると、PD アレイでは個々の PD 素子への光入力が 1/4、RF 出力が 1/16 となり、その RF 電力を 4 つ合成するため総電力量は 1/4 となり、同一の光ファイバ入力に対しては RF 出力が 6 dB 低くなる。その代わり、飽和する RF 電力量は理想的には 4 倍になる筈であるが、熱的な干渉が発生しており、約 2.1 倍の 29.0 dBm で飽和した。

この PD アレイモジュールを無線通信分野での応用を考えると、良好な相互変調歪特性が必要であり、特に、信号周波数付近に発生する相互変調 3 次歪特性は重要な特性である。図 4-2-15 に変調周波数 4.94 GHz と 4.96 GHz による 2 トーンによる歪測定系を、図 4-2-16 にその測定結果を合成光電流 40 mA、80 mA、200 mA に対して示している。図より、基本波と 3 次相互変調波が交差する OIP3 (3rd-order Output Intercept Point) はそれぞれ 32.6 dBm、32.5 dBm、32.6 dBm という、良好な結果となった。

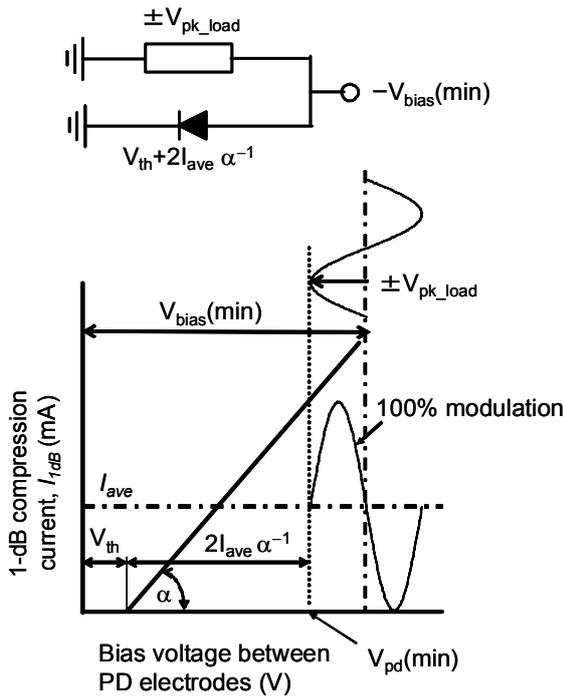


図 4-2-10: 1dB コンプレッション特性とバイアス電圧の関係

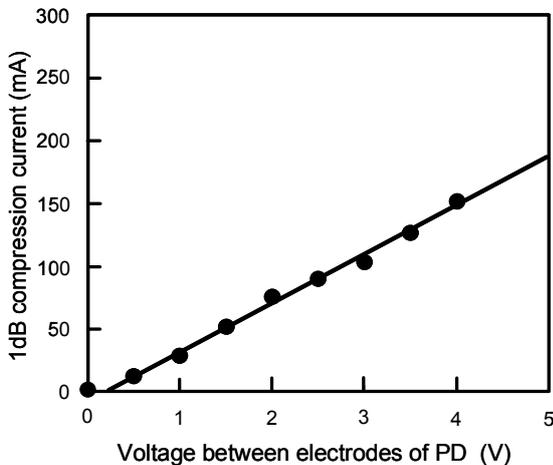


図 4-2-13: 1 dB コンプレッション特性

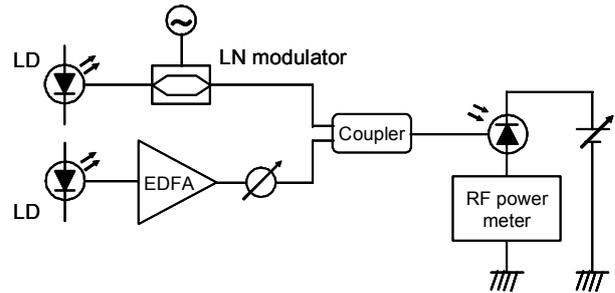


図 4-2-11: 1 dB コンプレッション電流の測定系

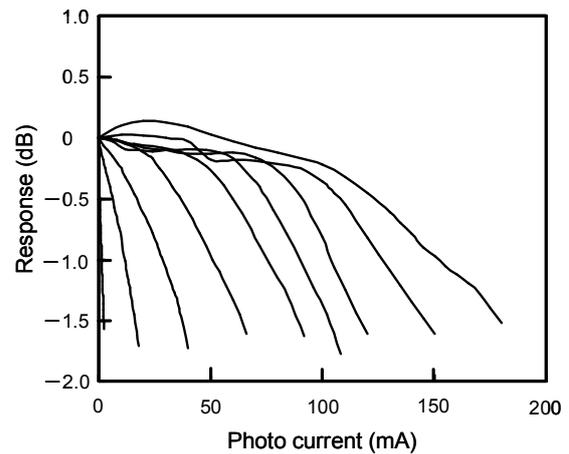


図 4-2-12: 1 dB コンプレッション電流の光電流依存性 (バイアス電圧 0~4V、0.5V 毎)

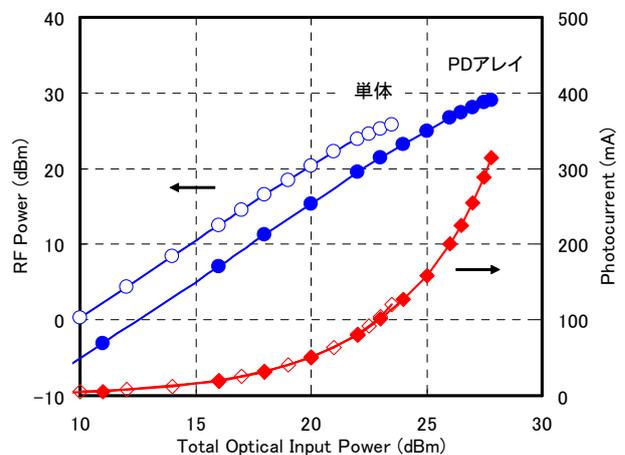


図 4-2-14: RF 出力特性

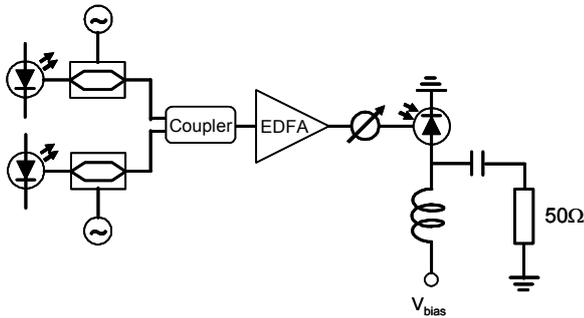


図 4-2-15: 2-tone 相互変調歪の測定系

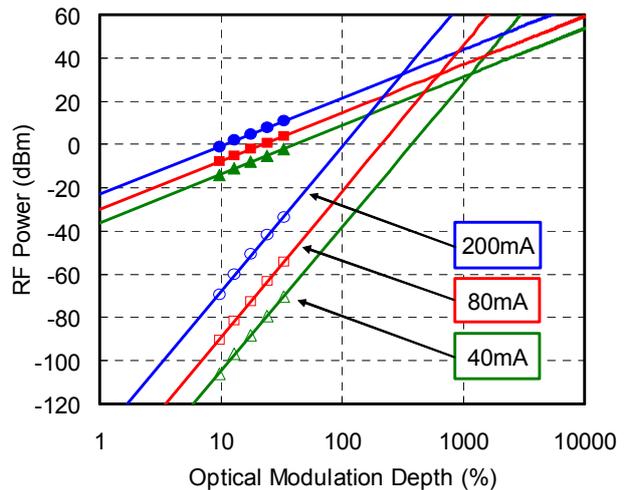


図 4-2-16: 3 次相互変調歪

#### 4-2-4 PD 動作級の最適化検討

##### (1) 最適化の方法

本開発の目標である高出力 PD では、入力する電力のうち、RF 出力として変換されない電力は熱になり、有効活用されないとともに、素子の温度上昇をまねき、素子の性能劣化につながる。このため、このような素子では、入力電力に対して出力電力の効率が良いことが重要となる。

FETなどのマイクロ波トランジスタでは、効率を上げる手法として、トランジスタを A 級ではなく、B 級で動作させる方法がある。これは、トランジスタに流れる電流の波形を正弦波ではなく、半波整流状にし、RF 成分に対する直流成分の比率を減らすことによって、電流分による電力消費を抑える手法である。電源効率の理論最大値は A 級動作では 50%であるが、B 級動作では 78.5%と、1.57 倍に向上することが知られている。ここでは、この B 級動作を高出力 PD に適用し、電源効率を向上させるための基礎実験を行なった。

PD を B 級動作させるためには、マイクロ波トランジスタと同様に、PD に流れる電流を半波整流形状の波形とすればよい。しかし、PD に半波整流形状の電流を流すには、PD に入力する光信号の強度も半波整流形状の波形とする必要がある。ここでは、LN 光強度変調器を中点からずらして駆動させて光を変調することにより、擬似的な半波整流状の入力光を生成し、PD に入射した。図 4-2-17 に、LN 光強度変調器を用いて擬似的な半波整流状の入力光を生成する様子を示す。

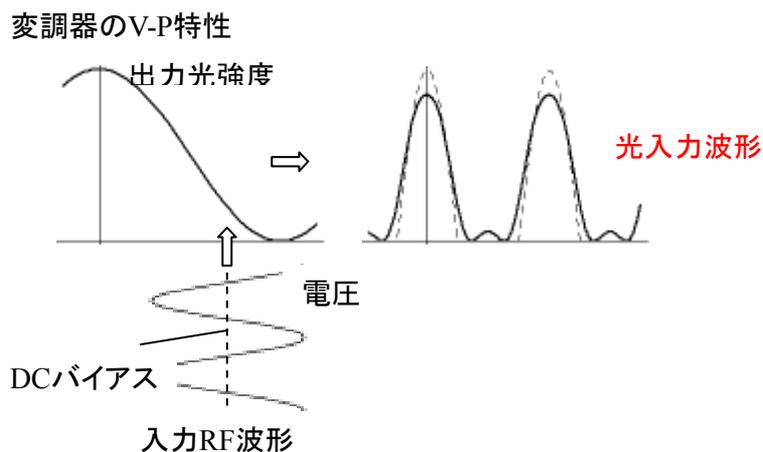


図 4-2-17: LN 光変調器による擬似半波整流光信号の生成

##### (2) 評価結果

上記の光信号を PD に入射し、PD から出力される RF 信号の基本波成分の電力を測定した。PD 素子は 4-2-2 項に示したように pin 構造であり、吸収層厚は 0.8  $\mu\text{m}$ 、受光径は 50  $\mu\text{m}$  である。

図 4-2-18 に、DC バイアスを 8V としたときの、RF 基本波の出力の電源効率測定結果を示す。B 級動作

では、RF 出力に基本波成分以外にも、高調波成分が含まれる可能性があるため、RF パワーメータの代わりに RF スペクトルアナライザを用い、基本波の電力のみを測定した。LD 波長は 1.55  $\mu\text{m}$ 、RF 周波数は 5 GHz である。外部 RF 回路は 50  $\Omega$  系とし、PD の出力端子には RF 基本波で動作するオープンスタブによる整合回路を設けた。図の横軸は入射光の平均パワーである。ただし、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。図中実線が B 級動作時の測定結果である。図より、入力光パワーを 22.5 dBm 付近にしたとき、B 級動作時の最大電源効率 44.8% が得られた。比較のため、同時に従来の A 級動作時での測定も行なった。この結果を図中点線で示している。A 級動作時の最大電源効率は 39.9% である。したがって、B 級動作にすることにより、A 級動作に比べ、電源効率が改善することが分かった。図 4-2-19 は、PD から出力される RF 基本波電力の測定結果である。光入力パワーが同じ場合でも、B 級動作(実線)を行なうことで、A 級動作(点線)より大きな RF 電力が得られることが分かる。

以上のように、高出力 RF 伝送用 PD を B 級に近い動作をさせることにより、周波数 5 GHz において、最大電源効率 44.8% の値が得られた。このように、電源効率を従来の A 級動作時よりも大きくできることが分かった。

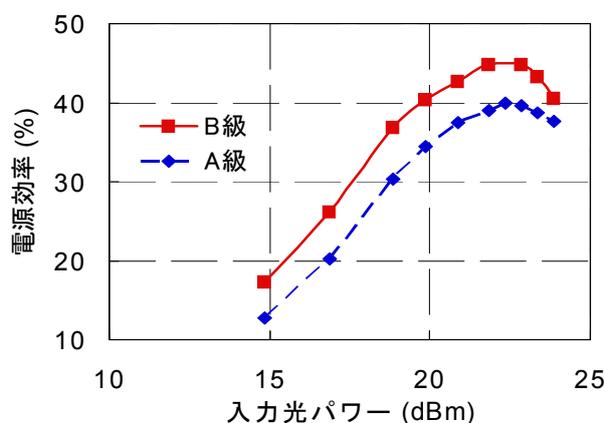


図 4-2-18: RF 電源効率測定結果

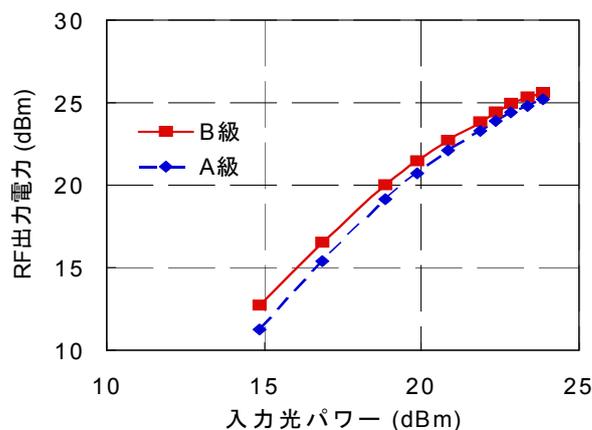


図 4-2-19: RF 出力電力測定結果

#### 4-2-5 まとめ

光信号処理回路 (E/O、O/E 変換技術) の研究開発において、以下の項目を実施し、所望の成果が得られた。

- ・ 高出力 PD 単体を評価
  - 射型 InGaAs pin フォトダイオード(PD)に対して、高出力化の最適化を行ない、5GHz において、RF 出力電力最大値 25.8 dBm を得た。
- ・ 4 素子 PD を用いた高 RF 出力 PD アレーモジュールを開発
  - 開発このモジュールは、光ファイバからの入射光を 4 分岐ビームスプリッタで等分配して PD 素子入射し、それぞれの RF 出力をウィルキンソン型合成回路で電力合成するものである。モジュール寸法は 11mm×33.5mm×10mm である。評価の結果、周波数 5 GHz で RF 出力 29.0 dBm、また、好な 3 次相互変調歪による交差点(OIP3)32.6 dBm を得た。
- ・ PD 動作級の最適化検討
  - 電源効率向上を目指し、PD を擬似的に B 級で動作させる方法について検討した。この結果、従来の A 級動作よりも大きい、電源効率 44.8% を達成した。

以上の成果により、W 級出力 O/E 変換、E/O—O/E 間のリンク損失向上を実証した

### 4-3 光信号処理回路（光多重化技術／マルチビーム化技術）の研究開発

#### 4-3-1 はじめに

平成 18 年度に、マルチビーム形成方式の検討を行い、空間光位相変調器の開口、およびアレーアンテナの開口を空間分割する開口分割アレーによるマルチビーム化を提案した。本方式により、マルチビームが実現できるが、アンテナ開口を分割するため、1 ビーム当たりのアンテナ開口が小さくなり、アンテナの EIRP(Equivalent Isotropically Radiated Power、等価等方放射電力効率)が低くなる課題があった。この課題を解決するために、平成 19 年度に、アンテナの全開口で各ビームを励振する構成を検討した。本方式は、空間光位相変調器の開口をビーム毎に分割し、ビーム毎に励振分布を形成した後、各ビームを空間的に同軸のビームに変換することにより全ビームを合波する。これにより、各々のビームを全アンテナ素子で励振可能となり、開口分割アレーに比べ、アンテナ放射ビームを細くできるとともに、各ビームの励振素子を多くできるため、より柔軟な指向性合成が可能となる。

今回、アンテナビームに対応した波長で多重された複数の光ビームを空間的に分波し、ビーム毎にアンテナ励振位相分布で変調した後、空間的に合成する方式を考案した。これにより、単一の光学系でマルチビームを実現できる。今回、小型、短尺に光ビームの合分波機能を実現するために、平行平板上に透過波長帯を連続に変えた光バンドパスフィルタをコーティングした空間型光波長多重合分波器の試作、評価を実施した。さらに、試作した光合分波技術を適用した、光制御型マルチビーム形成回路の試作器を開発し、10 ビーム形成可能なことを実証した。本節では、マルチビーム化のために提案したシステムの全体構成および構成要素の部分試作および、試作したビーム形成回路の評価結果について示す。

#### 4-3-2 全体構成

マルチビームに対応した光制御マルチビーム形成回路の全体構成、および、主な場所における信号光およびローカル光の周波数配置を図 4-3-1 に示す。なお、この説明図では簡単のため 4 ビームで記述している。以下、各構成要素について説明する。

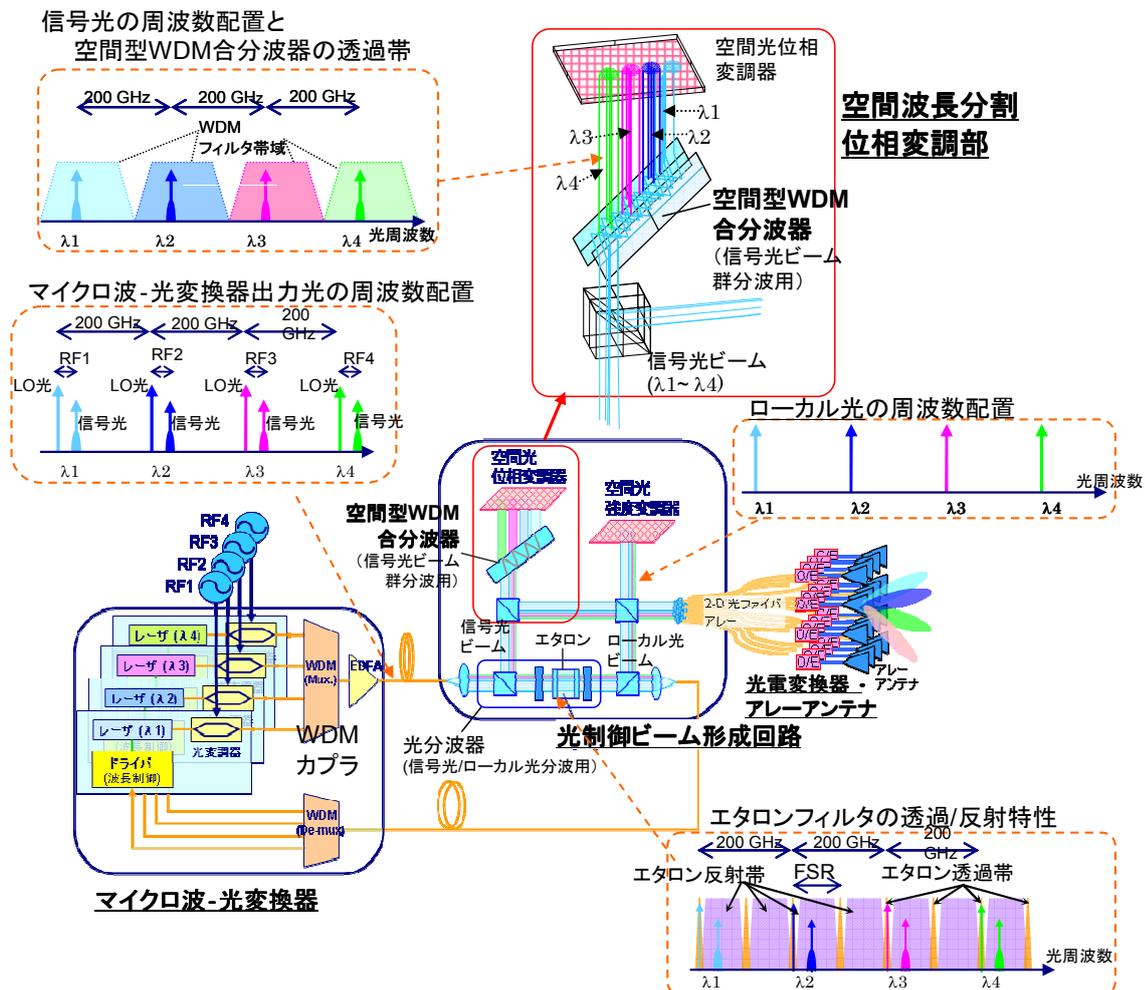


図 4-3-1: 光制御マルチビーム形成回路の構成 (4 ビームの場合)

### 4-3-3 部分試作・評価

#### (1) マイクロ波 - 光変換部(E/O 部)

マルチビームを構成するビーム毎に異なるレーザの波長を設定する。各レーザを 2 電極 LN-MZ (LiNbO<sub>3</sub>-Mach Zehnder) 型光変調器にてマイクロ波信号で SSB (Single Side band、片側波帯) 変調し、信号光とローカル光の 2 波を発生させる。図 4-3-2 に SSB 変調波の測定例を示す。横軸に光キャリアからのオフセット周波数を、縦軸に各スペクトルの強度を示す。図のように S 帯から Ka 帯にわたり SSB 変調できることがわかる。全てのレーザからの変調光を、WDM (Wavelength Division Multiplex, 波長多重) カプラにより合波し、偏波面保存型光ファイバ増幅器にて増幅する。ここで、各レーザの波長は、4-1-2 項で述べたシングルビーム用光制御ビーム形成回路と同様に、後述する光分波器を構成するエタロンフィルタの透過波長に一致するように、波長制御する。図 4-3-3 にマイクロ波-光変換器試作装置の概観写真を示す。マイクロ波ビームに対応して、各波長別に 10 台のモジュールで構成している。

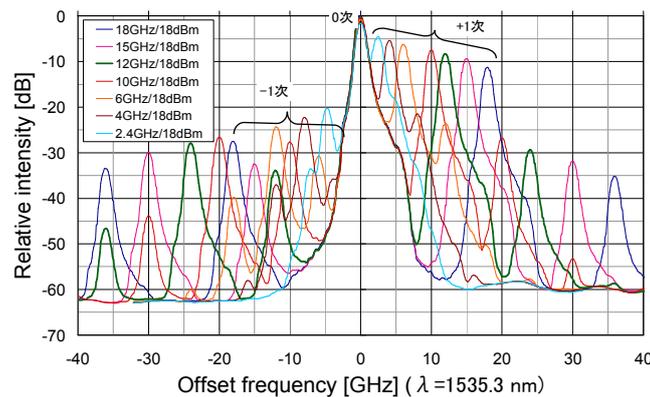


図 4-3-2: 光変調器による SSB (Single Side band、片側波帯) 変調信号の測定結果



図 4-3-3: マイクロ波-光変換器の試作装置概観写真(波長別に 10 台モジュールで構成)

#### (2) 光制御マルチビーム形成回路部 (光制御 BFN)

光制御 BFN に入射した波長多重された信号光群、ローカル光群は、コリメータによりそれぞれ平行光ビーム群となる。各ビームは光分波器にて、信号光ビームとローカル光ビームに空間的に分離される。信号光ビーム群は空間光位相変調器により所望のアンテナ励振位相分布に、ローカル光ビーム群は所望のアンテナ励振振幅分布に変調したのち、再び空間合成し、2 次元光ファイバアレーにより空間的にサンプリングし、光电変換器アレーにてマイクロ波に変換される。このとき、波長多重された信号光ビーム群は、空間型 WDM (光波長多重) 合分波器で空間的に分離され、分離された各信号光ビームを各々位相変調したのち、空間型 WDM 合分波器により、再び同軸の光ビームに変換する。

以下、4-1-2 項で述べた構成要素については簡単に説明し、空間型 WDM 合分波器の構成および評価結果について詳細に述べる。

## (A) 光分波器

信号/ローカル用の光分波器は 4-1-2(1)項で説明した光分波器と同一の構成である。なお、FSR(Free Spectral Range)は、18 GHz の Ka 帯に対応させるために、25 GHz から 30 GHz に変更した。光分波器を構成するエタロンフィルタは 30 GHz 間隔で透過波長が繰り返されるので、単一の光分波器で 10 本のローカル光を分離できる。

## (B) 空間波長分割位相変調部

### ・空間光位相変調器

マルチビームの各々を独立に制御するためには、空間光位相変調器の画素数はビーム数×素子数が必要である。近年、波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯で使用可能で、多素子化が容易な LCoS(Liquid-Crystal on Silicon)型液晶による空間光位相変調器が実用化された。LCoS 型空間光位相変調器の概略構成を図 4-3-4 に示す。シリコン基板上に電極、反射鏡、液晶セル、電極が構成されている。液晶セルは電界をかけると複屈折率が変わるので、電極間に電界をかけることにより位相変調が可能である。図 4-3-5 に波長 1.5 $\mu\text{m}$  における位相変調特性の測定結果を示す。入力信号に対し、リニアに 360 度の位相制御可能なことが確認できる。LCoS はシリコン基板上に構成していることから、放熱性がよく、開口率 100%とすることが可能である。また、反射鏡に誘電体多層膜ミラーを用いたことから、高強度光への対応が可能であり、約 1 W/mm<sup>2</sup> の光を入力できる。以上のように、多素子化が期待でき、高強度光で使用可能なことから、マルチビーム用の光制御ビーム形成回路には LCoS 型の空間光位相変調器を採用した。

図 4-3-6 に空間光位相変調器上における波長分離された各信号光ビームの配置を模式的に示す。図中の格子が空間光変調器の画素を表し、各円が各々信号光ビームを、六角形の集まりがサンプリングファイバアレー(光ファイバアレー)受光部の投影パターンを表す。空間光変調器として、画素サイズ 15×15  $\mu\text{m}^2$ 、画素数 512×512 画素、エリアサイズ 7.68×7.68 mm<sup>2</sup> のものを採用した。各信号光ビームを空間光位相変調器の対角 10 mm を 10 ビームで分割できるように、各信号光ビームの間隔を 1 mm に、ビーム径を 800  $\mu\text{m}$  に設計した。また、“空間光変調器の画素数” ≧ “アンテナの素子数×ビーム数”であり、複数の画素でアンテナの 1 素子の位相を制御している。なお、図 4-3-6 では簡易的にサンプリングファイバアレー(アンテナ素子に対応)を 37 素子で記述しているが、実際には、次の 4-4-3 項の図 4-4-4 に示したように、110 素子の配列である。

各信号光ビームに対し位相分布を制御した後、全信号光ビームを同一の光軸のビームに変換することにより、光ファイバアレーには全ビームが合成されてサンプリングされる。次項で空間光位相変調器への入出力ビームを合分波する、空間型 WDM 合分波器について説明する。

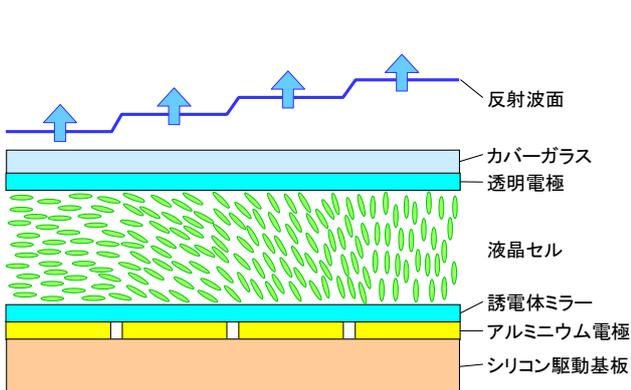


図 4-3-4: 空間光位相変調器の構成

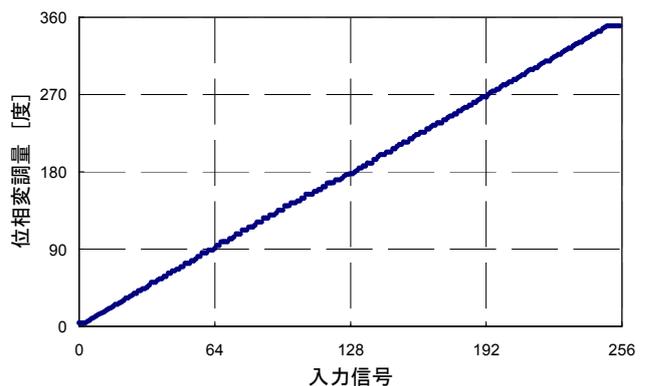


図 4-3-5: 空間光位相変調器の位相変調特性測定結果 (波長: 1.5 $\mu\text{m}$ )

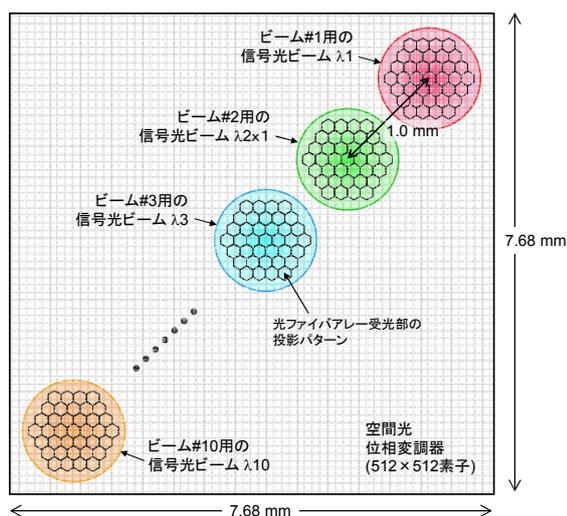


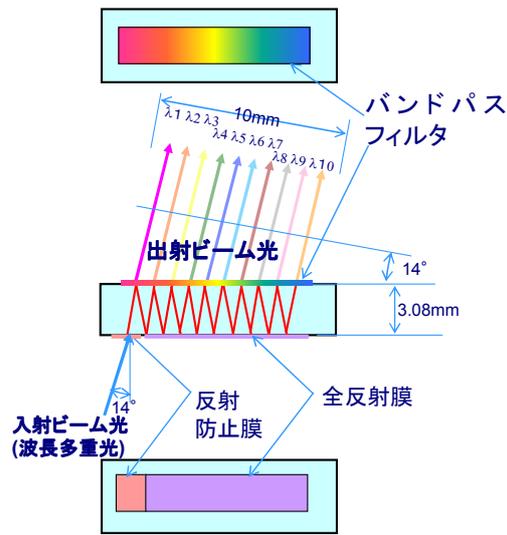
図 4-3-6: 空間光変調器上における信号光ビームの配置

### ・空間型 WDM 合分波器

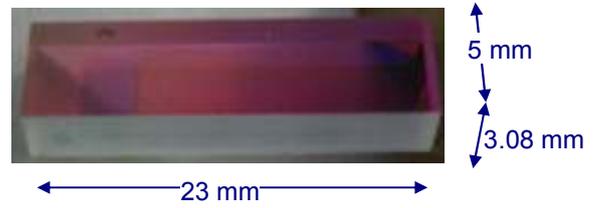
波長多重されている信号光ビーム群は、空間型 WDM 合分波器により波長帯毎に空間的に分離される。各分離ビームは各々空間光位相変調器により所望の位相分布に変換されたのち、空間型 WDM 合分波器により再合成され、同軸の波長多重ビームとして出力される。今回開発した空間型 WDM 合分波器の構成を図 4-3-7(a)に、外観写真を(b)に示す。平行平板基板の表面に広帯域 AR(反射防止)膜をコーティングする。波長多重された信号光ビーム群( $\lambda_1 \sim \lambda_{10}$ )は AR 膜を透過し、AR 膜と反対側の裏面に入射する。裏面の信号光ビームが入射する場所に、 $\lambda_1$  の光のみが透過するバンドパスフィルタをコーティングすることにより、 $\lambda_1$  の信号光ビーム光のみが出射し、他の波長の信号光ビームは平行平板基板内を多重反射する。ここで、並行平板基板の裏面に、ビームの入射場所毎に透過帯が異なるバンドパスフィルタを順番にコーティングすることにより、波長毎に信号光ビームを取出すことが可能となる。これにより、波長により信号光ビームを空間的に分離できる。

空間型 WDM 分波器は可逆構成をとっていることから、出射ビームを空間光位相変調器にて位相変調したのち、同一の光路で再び空間型 WDM 合分波器に入射させることにより、各波長の信号光ビームは同一光軸上の合成信号光ビーム群として出射する。

図 4-3-7 に示したように、平行平板へのビームの入射角を 14 度、基板材料を BK7、厚を 3.08mm に設定した。このとき、信号光ビームは 1mm 間隔で分離出力する。図 4-3-8 に、空間型 WDM 合分波器を出力した信号光ビームの強度分布を示す。図のように、信号光ビームの波長によりビームは 10 本に分離される。図 4-3-9 に、空間型 WDM 合分波器を、空間光位相変調器で反射することにより往復したときの、分光透過率を示す。図 4-3-9(b)に示すように、波長による透過率の劣化は 1.4dB 以下であった。

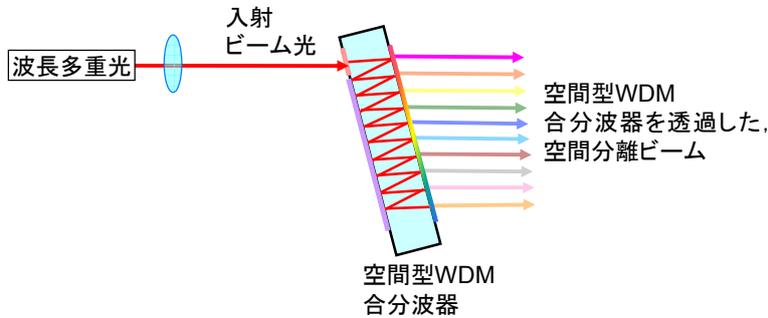


(a) 空間型 WDM 合分波器の構成

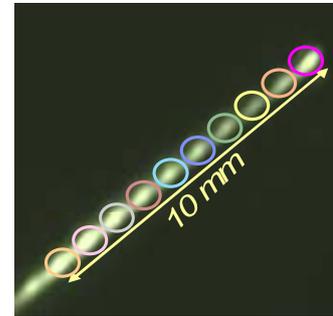


(b) 外観写真

図 4-3-7: 空間型 WDM 合分波器の構成および概観写真

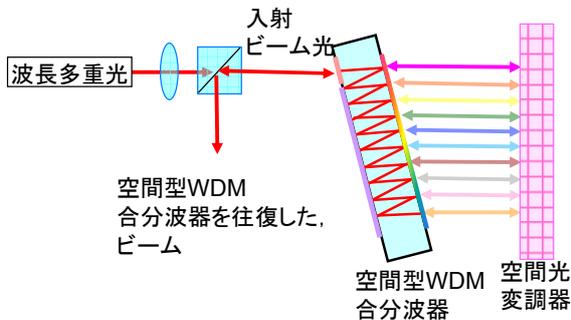


(a) 空間型 WDM 合分波器の空間分離評価系の構成

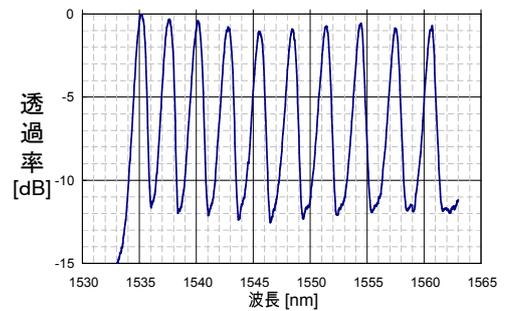


(b) 空間分離された  
ビーム光の様子

図 4-3-8: 空間型 WDM 合分波器による空間分離特性の測定結果



(a) 空間型 WDM 合分波器の分光特性評価形の構成



(b) 空間型 WDM 合分波器の分光特性

図 4-3-9: 空間型 WDM 合分波器による分光特性の測定結果

#### 4-3-4 試作器の構成・評価

##### (1) 試作器の構成

試作器の外観写真を図 4-3-10 に示す。図のように、4-1 節で述べたシングルビーム用の光制御ビーム形成回路とほぼ同サイズで 10 ビームに対応している。

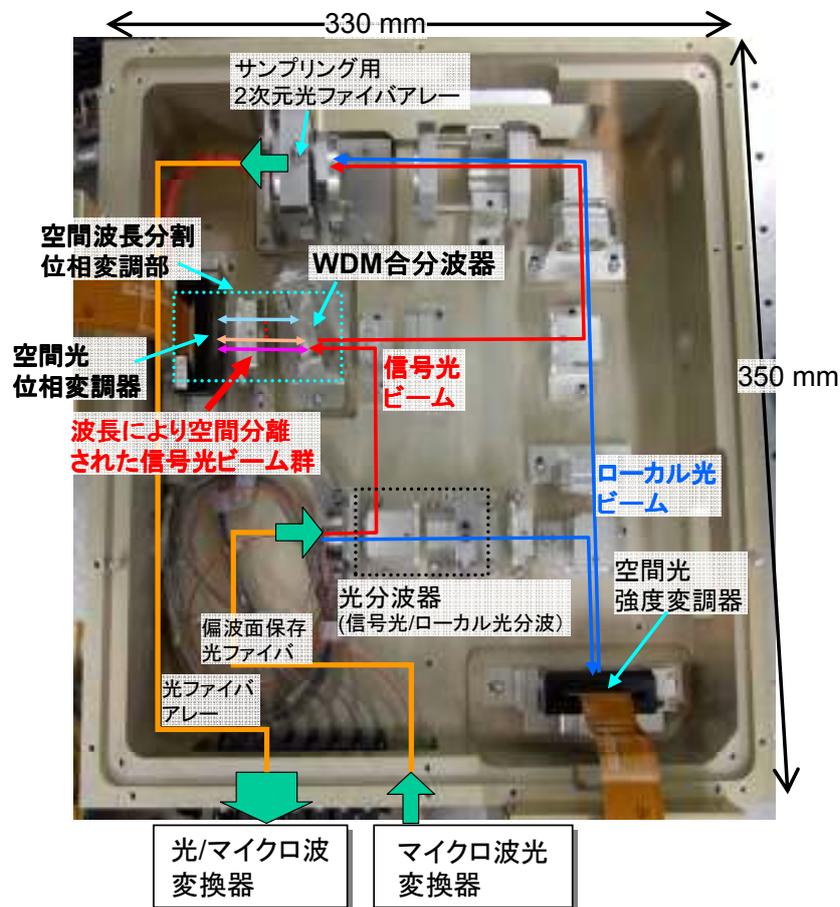


図 4-3-10: 光制御マルチビーム形成回路試作器の概観写真

##### (2) 測定結果

前項に示した試作装置を用いて、10 波各々の波長についてアンテナ各素子への励振分布を制御し、アンテナ放射パターンを指向性合成により求めた。図 4-3-11 に測定系の構成を、表 4-3-1 に測定および指向性合成の条件を示す。図 4-3-12 に、波長毎にビーム走査用に位相分布を制御したときの、励振振幅位相分布の測定値から求めたアンテナ放射パターンの例を示す。図のように、各波長でビーム走査が可能なが実証できた。次に、全 10 波長について各々異なる方向にビーム方向を指令したときの、各ビーム用の励振振幅位相分布の測定値からアンテナ放射パターンを求めた。測定結果を図 4-3-13 に示す。図のように、全ての波長でビームが形成できることが確認できる。以上の結果から、空間光多重化技術を適用した光制御マルチビーム形成回路により Ka 帯で 10 ビーム制御可能なことを実証した。

表 4-3-1: 測定および指向性合成の条件

項目	緒言
光波長	$\lambda_1$ :1535 nm, $\lambda_2$ :1537 nm, $\lambda_3$ :1540 nm, $\lambda_4$ :1542 nm, $\lambda_5$ :1545 nm, $\lambda_6$ :1548 nm, $\lambda_7$ :1551 nm, $\lambda_8$ :1554 nm, $\lambda_9$ :1557 nm, $\lambda_{10}$ :1560 nm
光ファイバアレー素子配置	三角配列、素子間隔: 一辺 250 $\mu\text{m}$
マイクロ波帯域	Ka 帯 (18GHz)
アレーアンテナ素子配置	三角配列:110 素子、素子間隔: 一辺 0.58 波長 素子パターン: $\cos\theta$

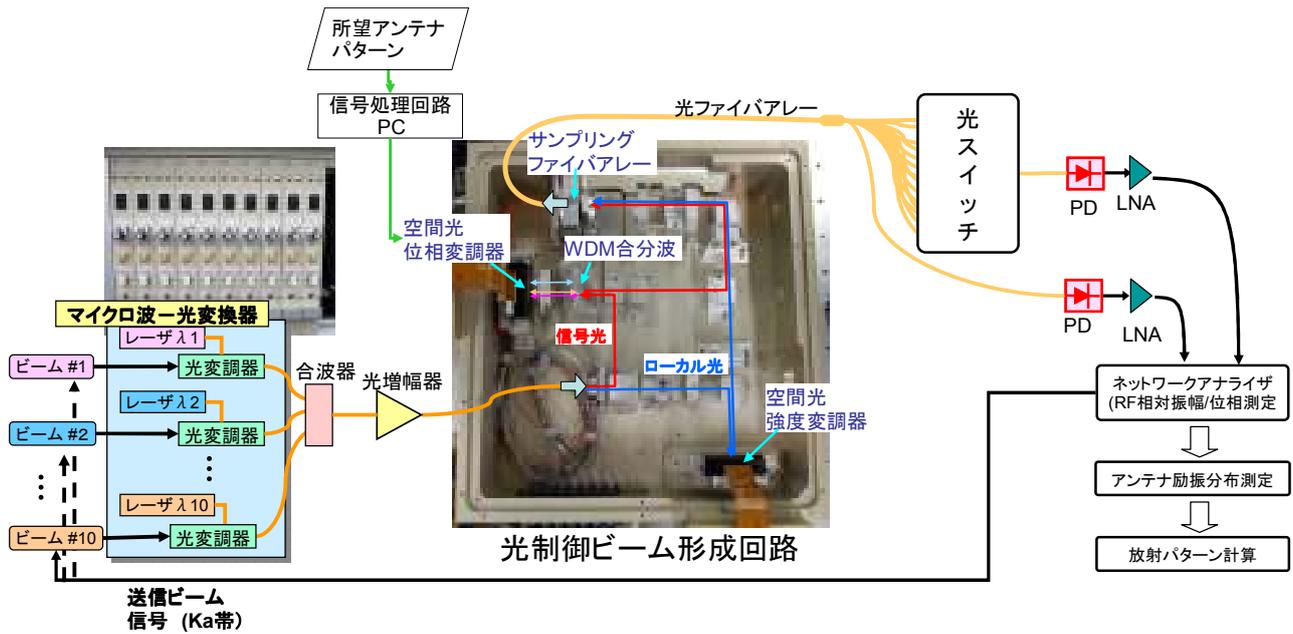


図 4-3-11: 測定系の構成

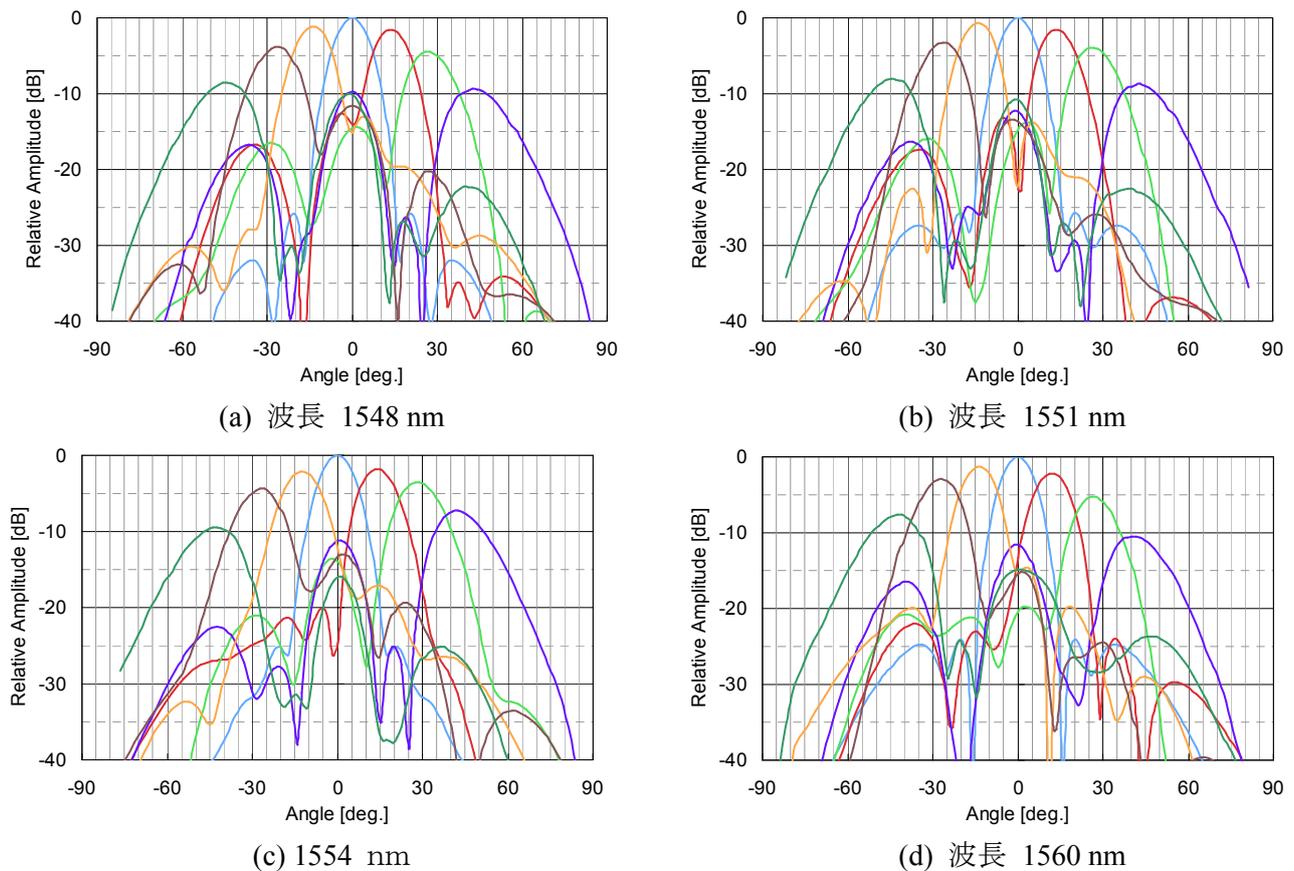


図 4-3-12: 光制御マルチビーム形成回路により形成したアンテナ励振分布の実測値を用いて指向性合成したアンテナ放射パターン(1)、各波長帯でビーム走査

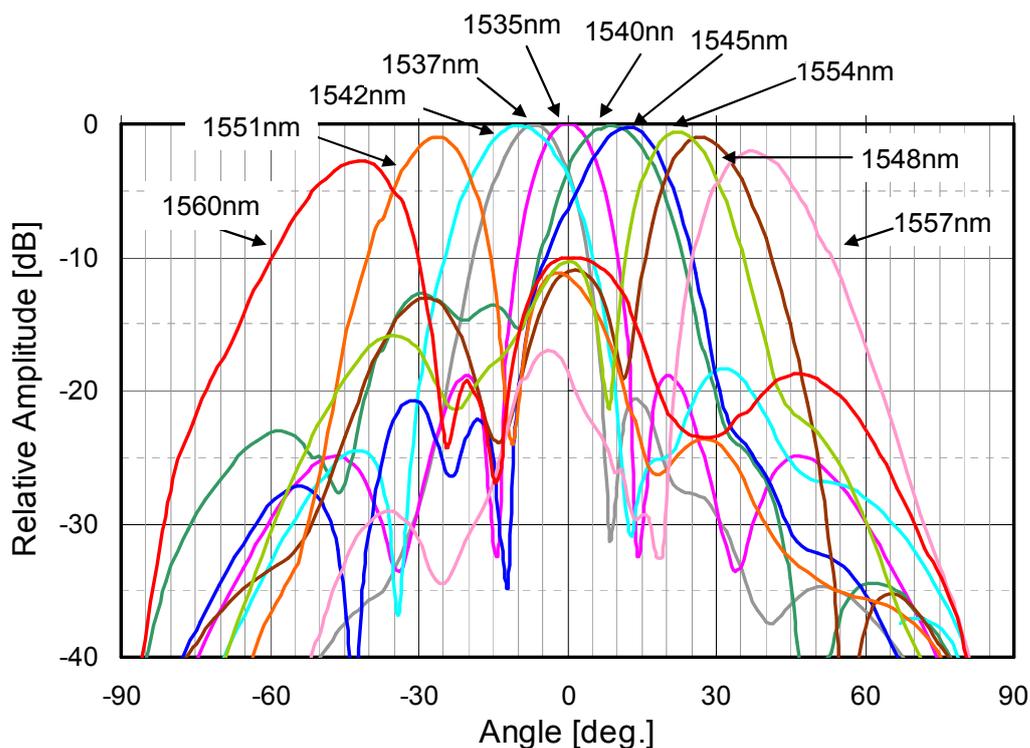


図 4-3-13: 光制御マルチビーム形成回路により形成したアンテナ励振分布の実測値を用いて指向性合成したアンテナ放射パターン(2)、波長により異なる方向にビーム走査した場合

#### 4-3-5 まとめ

アンテナビームに対応した波長で多重された複数の光ビームを空間的に分離し、ビーム毎にアンテナ励振位相分布で変調した後、空間的に合成する光制御マルチビーム形成回路を開発した。これにより、単一の光学系でマルチビームを実現できる。今回、小型、短尺に光ビームの合分波機能を実現するために、平行平板上に透過波長帯を連続に変えた光バンドパスフィルタをコーティングした光合分波器を開発した。試作した合分波器により、C帯で10波が多重された信号光ビームを、空間光位相変調器上で1 mm 間隔で分離でき、位相変調された信号光ビームを再合成できることを実証した。

試作光合分波器を用いた光制御型マルチビーム形成回路の試作器を開発し、アンテナ励振分布を形成、評価した。その結果、アンテナビーム毎に割り当てた10波長の光ビームで、所望の位相分布を得られ、マルチビーム形成可能なことが実証できた。

## 4-4 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)の研究開発

### 4-4-1 はじめに

光制御ビーム形成回路やアンテナ放射パターンの解析など、光波の波面生成検討に必要な光の空間伝搬シミュレーションのアルゴリズムを開発し、そのソフトウェア(S/W)を作製した。また、本 S/W を用い、光波面からアンテナ放射パターンまでを解析可能とした。本節では、シミュレーションソフトウェアの概要を簡単に説明した後、光の強度分布制御によるアンテナ放射ビームのサイドローブ低減方法およびシミュレーションによるサイドローブレベル-25dB 達成の見込みを示す。最後に、4-3 節に示した試作装置を用いてアンテナ励振分布を制御し、アンテナ励振振幅分布の実測値からアレーパターンを求め、サイドローブレベル-25dB 以下を実証した。

### 4-4-2 アンテナ放射パターン解析技術の開発

光制御ビーム形成回路を構成する光学系内のビーム光、光学部品の条件から、アンテナ放射パターンまでを模擬する指向性合成シミュレーションツールを開発した。図 4-4-1 にシミュレータの全体構成を示す。光学系の各部品は ABCD 行列で表している。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、光制御ビーム形成回路、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 4-4-2 にシミュレータの画面の例を示す。(a)はビーム走査例を、(b)はビーム幅制御のシミュレーション例である。

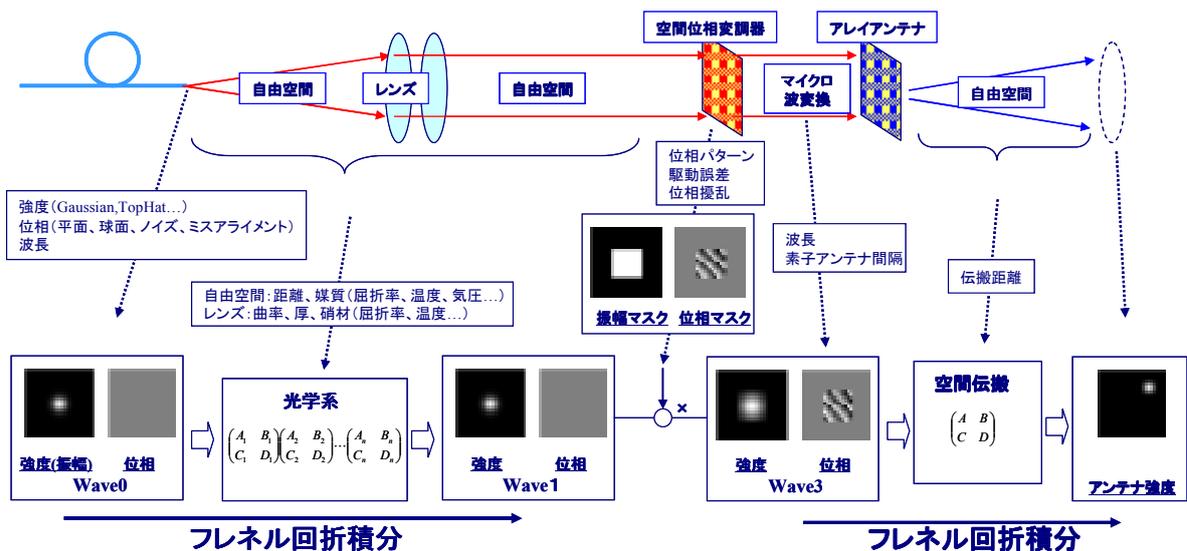
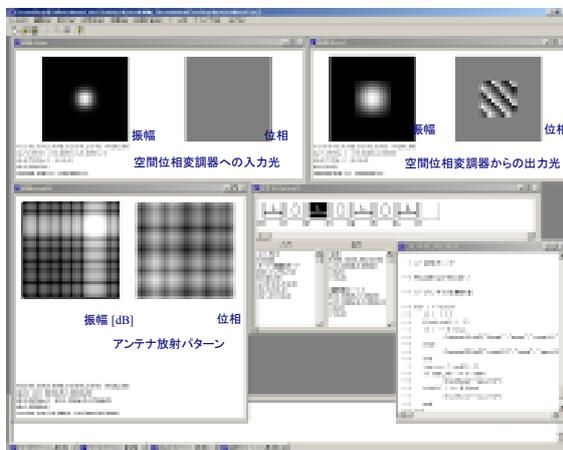
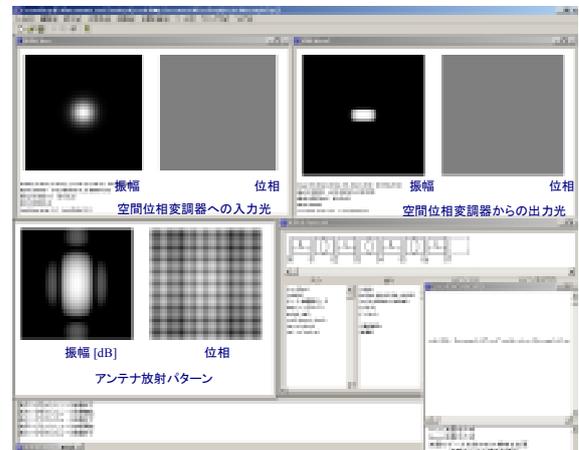


図 4-4-1: 指向性合成シミュレーションツールの概要



(a) ビーム走査例



(b) ビーム幅制御例

図 4-4-2: シミュレータの操作画面例

### 4-4-3 指向性合成技術(低サイドローブ化技術)の開発

4-4-2 節にて光波ビームからアレーアンテナの放射パターンまでを一括して計算できるシミュレータを開発し、これを用いて光波ビームパターンからアレーアンテナパターンの解析を可能とした。図 4-4-3 に示すように、マイクロ波の強度分布は信号光強度分布とローカル光強度分布の積となる。したがって、ローカル光の強度分布を積極的に制御することにより、アンテナの低サイドローブ化可能な励振分布として広く利用されているチェビシェフ分布やテイラー分布などを生成可能となる。

今回、信号光ビーム、ローカル光ビームの強度分布の制御による開口分布制御のシミュレーションを行い、アンテナ放射ビームのサイドローブレベルを $-25$  dB 以下にできることを示し、最後に試作装置を用いて実証する。

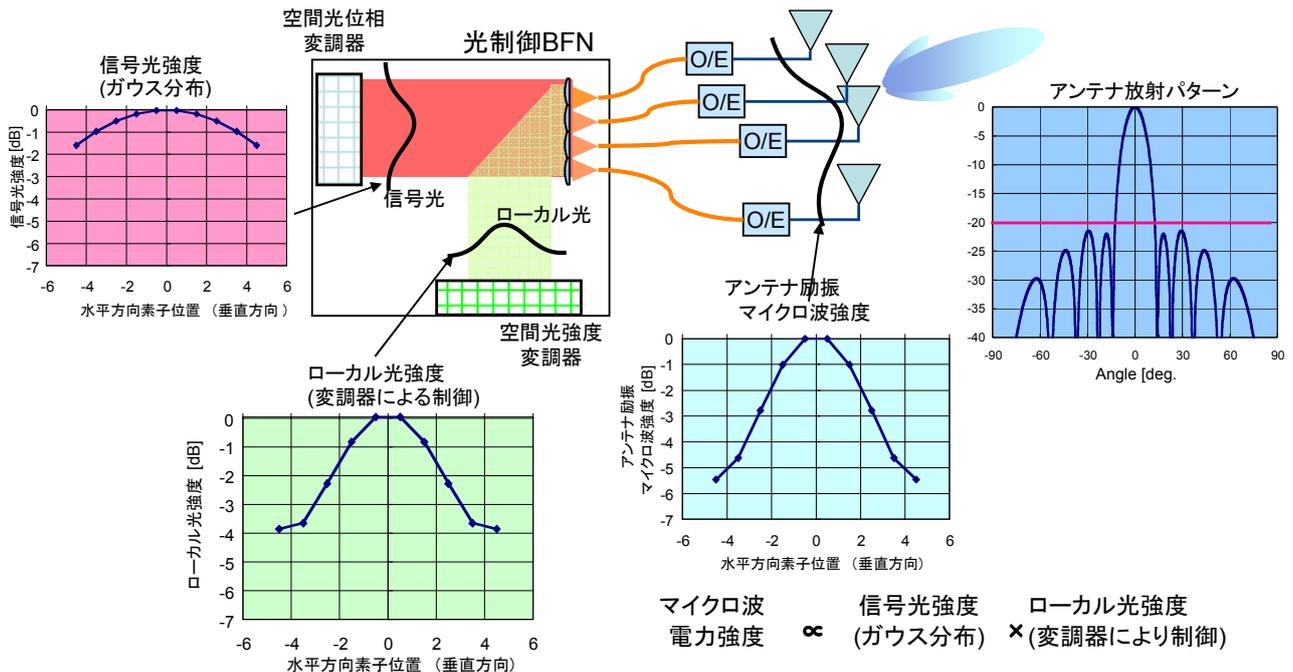


図 4-4-3: 信号光/ローカル光とマイクロ波強度分布の関係の説明図

#### (1) 解析結果 (サイドローブレベル $-25$ dB 設計)

本節では、サイドローブレベル $-25$ dB 以下を達成するために必要な信号光およびローカル光の強度分布と、これらがヘテロダイン検波されることにより発生するマイクロ波信号の強度分布とを示す。アレーアンテナの素子配置は、4-3-3 項で示したマルチビーム対応光制御ビーム形成回路と同様に、3 角配列、円形(六角形)開口に変更した。アレーアンテナの素子配列を図 4-4-7 に示す。

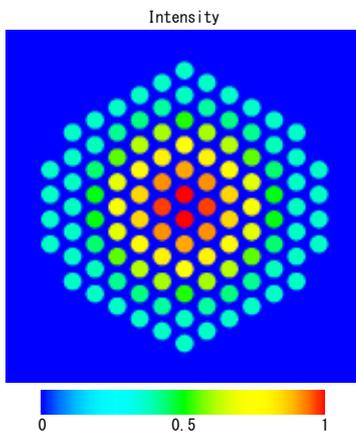


図 4-4-4: サイドローブ $-25$ dB 設計時の信号光の強度分布

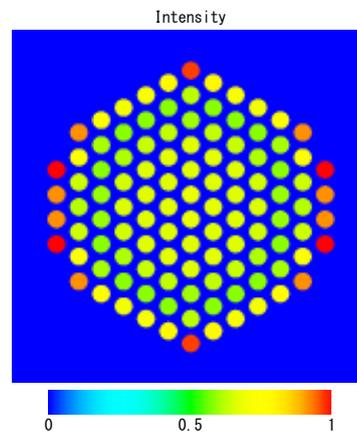


図 4-4-5: サイドローブ $-25$ dB 設計時のローカル光の強度分布

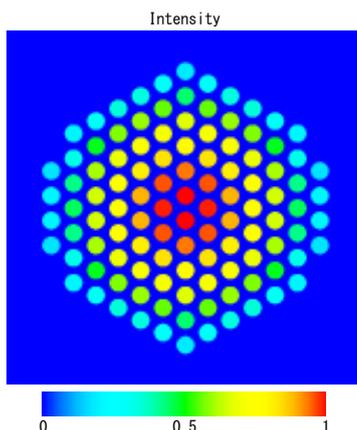


図 4-4-6: サイドローブ -25dB 設計時のローカル光に対する空間光変調器による透過率

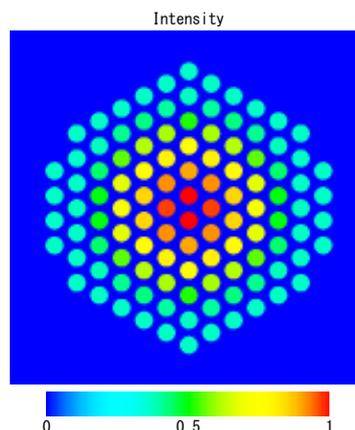
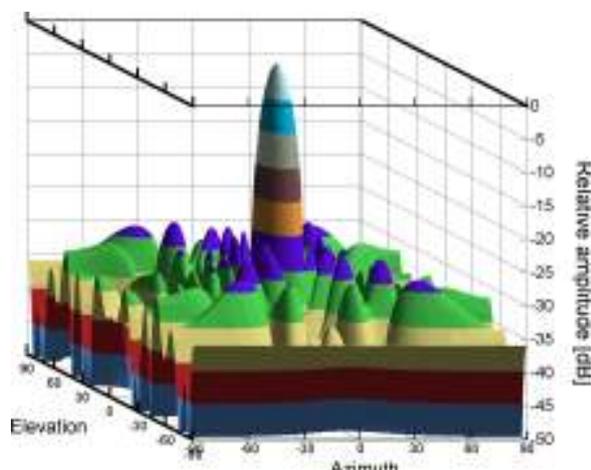


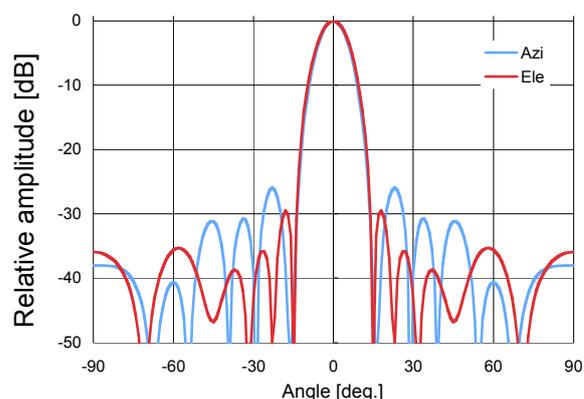
図 4-4-7: サイドローブ -25dB 設計時の光電変換されたマイクロ波強度分布 (アンテナ励振分布)

サイドローブレベル -25dB を達成するために必要な光制御 BFN 内の信号光ビームおよびローカル光ビームの強度分布を図 4-4-4、図 4-4-5 に示す。光制御 BFN に入射した各ビーム光の強度分布はガウシアン分布であり、信号光ビームは位相変調のみを行うため、光ファイバアレーにてサンプリングされる光強度もガウシアン分布となる。そこで、ローカル光ビームの強度分布を空間光強度変調器にて制御した。図 4-4-6 にローカル光の強度を図 4-4-5 と一致させるため光強度変調器で与える光の透過率を示す。

図 4-4-7 に、図 4-4-4、図 4-4-5 の信号光およびローカル光の強度分布から求めたアレー開口分布を示す。また図 4-4-8 に、図 4-4-7 の開口分布より計算したアレーファクタを示す。図 4-4-8 の(a)に 2 次元分布を、(b)に水平(Azi)、垂直(Ele)方向のカット面分布を示している。図 4-4-8 の結果から、ローカル光の強度分布を空間光強度変調器で制御することにより、所望の開口分布を形成でき、サイドローブレベル -25dB のアレーファクタを達成できることが示された。



(a) 2次元分布



(b) カット面パターン

図 4-4-8: サイドローブレベル -25dB 設計時にアレーファクタ

以上のように、理論的にサイドローブレベル -25dB 以下が得られる見込みを得た。しかしながら、光ファイバアレーの製造精度のばらつきなどや、アライメント誤差などにより、光ファイバアレーへの結合効率にもばらつきが生じる。図 4-4-9 に光ファイバアレーへの結合効率にバラツキが生じた場合の、アレーファクタのシミュレーション結果を示す。図 4-4-9(a)は振幅に標準偏差( $\sigma$ ) 1 dB のバラツキが生じた場合、(b)は標準偏差( $\sigma$ ) 2 dB のバラツキが生じた場合である。図より、 $\sigma$  に 1 dB のバラツキがある場合、サイドローブが -25dB 以上になり得ることがわかる。

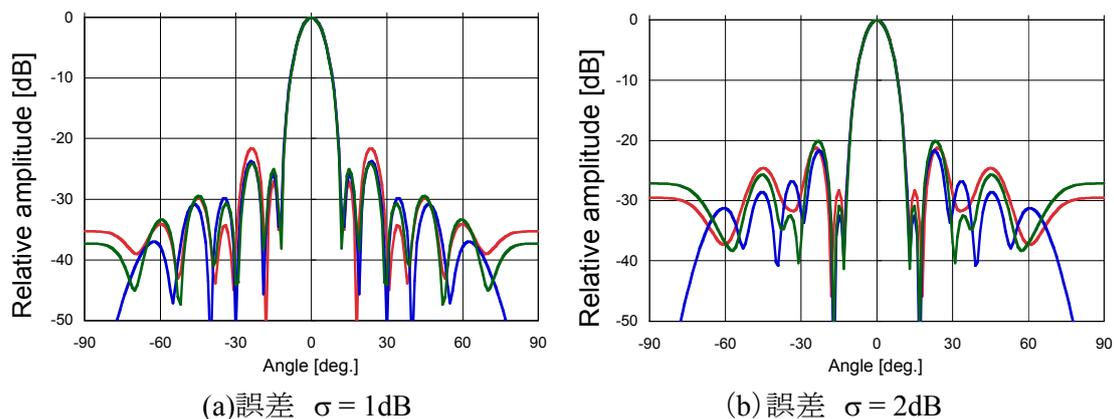


図 4-4-9: 光ファイバアレーへの結合効率にバラツキがあった場合のアレーファクタ

(2) 解析結果 (サイドローブレベル-30dB 設計)

以上の検討から、様々な誤差要因を考慮すると、さらにマージンをもった設計が必要であると考えられる。以下に、一例としてサイドローブレベルを-30dB に設計したときのシミュレーション結果を示す。

図 4-4-10、及び図 4-4-11 はそれぞれ信号光とローカル光の強度分布、図 4-4-12 は図 4-4-11 のローカル光の強度分布を得るために必要な空間光強度変調器による透過率の設定値、図 4-4-13 は図 4-4-10、及び図 4-4-11 の信号光およびローカル光強度から得られた開口分布である。図 4-4-13 の開口分布から求めたアレーファクタを図 4-4-14 に示す。図 4-4-14(a)に 2 次元分布、(b)にカット面分布を示す。図 4-4-14 よりサイドローブレベル-30dB を達成できる見込みが得られた。

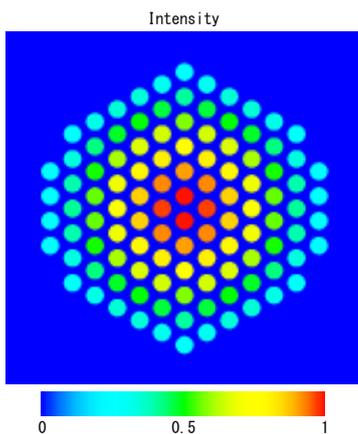


図 4-4-10: サイドローブ-30dB 設計時の信号光の強度分布

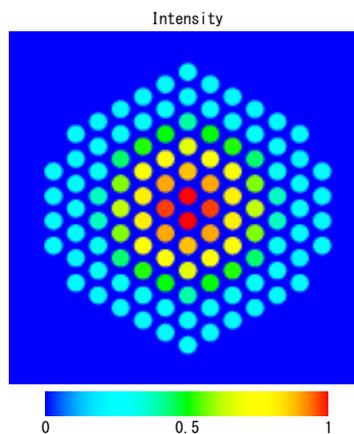


図 4-4-11: サイドローブ-30dB 設計時のローカル光の強度分布

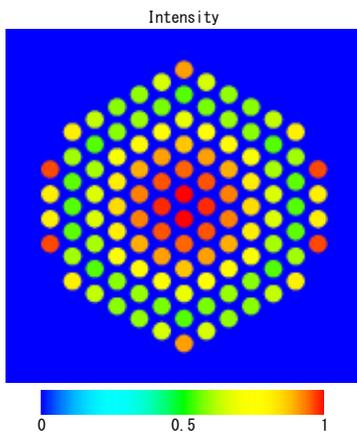


図 4-4-12: サイドローブ-30dB 設計時のローカル光に対する空間光変調器による透過率

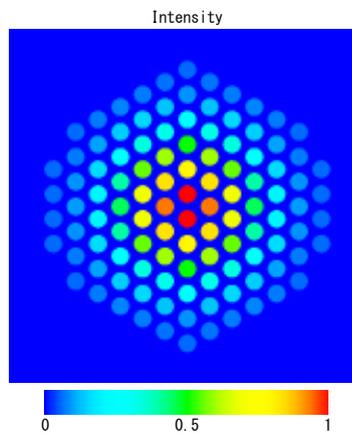
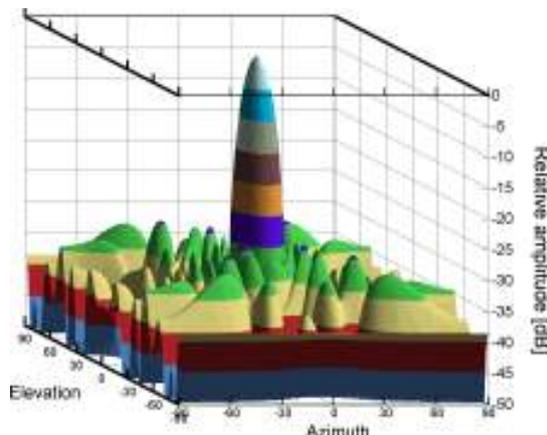
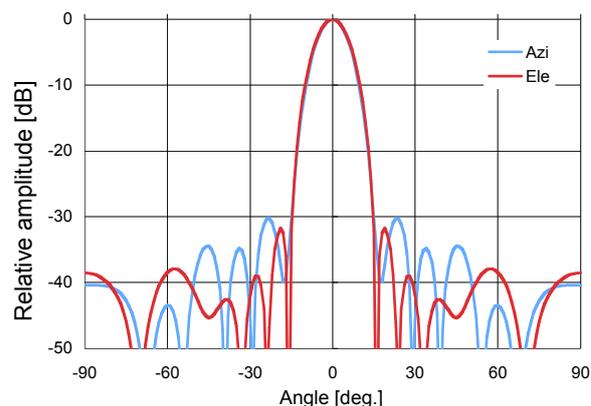


図 4-4-13: サイドローブ-30dB 設計時の光電変換されたマイクロ波強度分布



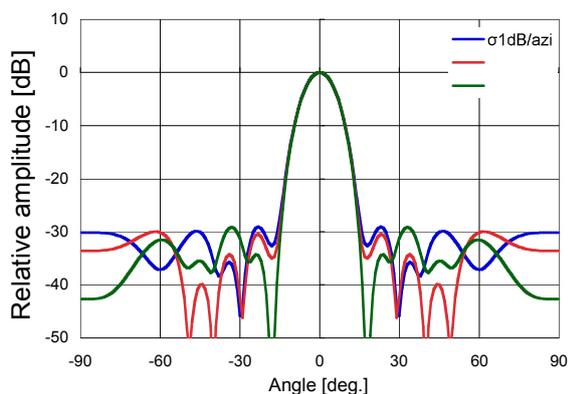
(a) 2次元分布



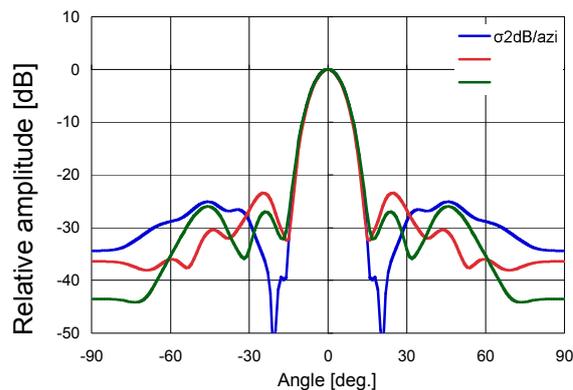
(b) カット面パターン

図 4-4-14: サイドローブレベル  $-30\text{dB}$  設計時のアレーファクタ

前記と同様に、光ファイバアレーへの結合効率にバラツキが生じた場合の、アレーファクタのシミュレーション結果を示す。図 4-4-15(a)は振幅に $\sigma = 1\text{dB}$ のバラツキが生じた場合、(b)は $\sigma = 2\text{dB}$ のバラツキが生じた場合である。図より、設計値として $-30\text{dB}$ 程度にマージンをとることにより、強度分布に $2\text{dB}$ 程度のバラツキがあっても、サイドローブレベル $-25\text{dB}$ 以下を達成できる見込みを得た。



(a)誤差  $\sigma = 1\text{dB}$



(b)誤差  $\sigma = 2\text{dB}$

図 4-4-15: 光ファイバアレーへの結合効率にバラツキがあった場合のアレーファクタ

### (3) 試作器を用いた実証

以上の結果をもとに、4-3 節で試作した光制御ビーム形成回路の試作器を用いて、低サイドローブ化を実証した。測定系の構成は図 4-3-8 と同様であり、光制御ビーム形成回路の出力信号を光電変換されたアンテナ励振分布より、アレー放射パターンを指向性合成した。

測定した開口分布より指向性合成したアンテナ放射パターンを図 4-4-16 に示す。図のようにサイドローブレベルは $-28\text{dB}$ となり、目標とする $-25\text{dB}$ 以下を達成できることを実証した。

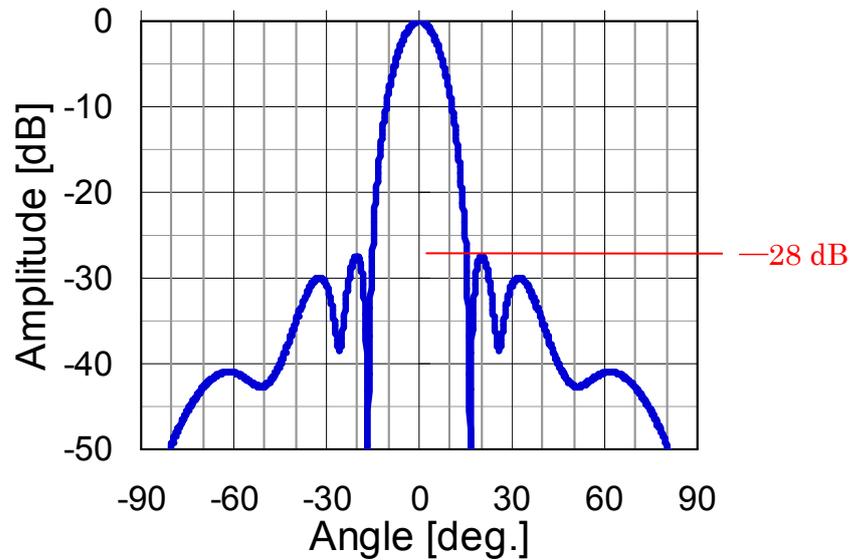


図 4-4-16: 開口分布の実測値から指向性合成したアレーアンテナ放射パターン  
(サイドローブレベル-28dB)

#### 4-4-4 まとめ

- 光制御ビーム形成回路を構成する光学系内の光ビーム伝搬から、アンテナ放射パターンまでのシミュレーション可能な S/W を開発した。
- サイドローブレベル-25 dB 以下を実現するための検討を行った。検討の結果、ローカル光の強度分布を空間光強度変調器で制御することにより、サイドローブレベル< -25dB を達成できる見込みを得た。また、光ファイバアレーへの結合効率のバラツキを考慮すると、ローカル光の強度分布により、設計値を-30dB 程度に設定するなどのマージンを見込む必要があることが分かった。
- 試作装置を用いた評価により、サイドローブレベル-28 dB が得られ、目標とする-25 dB を達成した。

## 4-5 指向性合成技術(アンテナ校正技術)の研究開発

### 4-5-1 はじめに

アレーアンテナの代表的な位相校正方法である素子電界ベクトル回転法(REV 法:Rotating element Electric field Vector method)<sup>1</sup>は、アレー動作状態で各素子アンテナの励振位相を変化させて、合成電界の振幅変化から、各素子の位相を求める方法であり、広く利用されている。本研究開発では、はじめに素子電界ベクトル回転法が今回開発した光制御ビーム形成回路にも適用できることを示し、次に、4-1-2 項で示した試作装置を用いて、電波暗室にてアンテナ放射パターン評価を行い、その有効性を実証する。

### 4-5-2 校正方法の原理

図 4-5-1 に光制御ビーム形成回路の概略構成と、合成電界ベクトル図を簡単に示す。はじめに従来の REV 法の概要を簡単に説明し、その後、改良型 REV 法の概要を説明する。アレーアンテナを動作させた場合、ある初期状態における合成電界ベクトル図は図 4-5-1 のように表すことができる。ここで、空間光位相変調器で変調した光の位相と光電変換されたマイクロ波位相は同一となるので、光空間位相器の  $n$  番目の素子の位相を変化させると、図のように  $n$  番目の素子の電界ベクトルの回転に伴い、アレーの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変化を測定することにより、 $n$  番目の素子の振幅、位相を推定することができる。

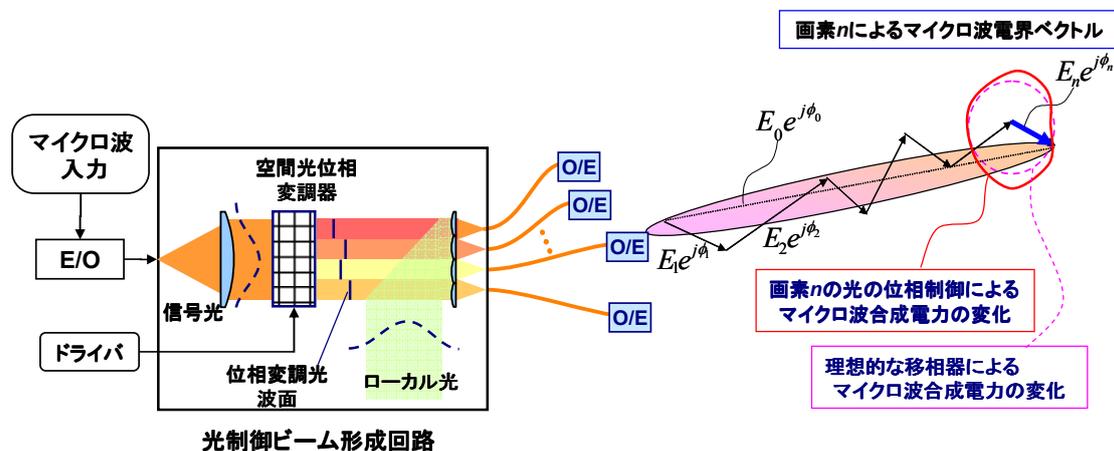


図 4-5-1: 移相器の誤差を考慮した素子電界ベクトル

図 4-5-1 において、初期状態の合成電界ベクトルの振幅・位相を  $E_0$ 、 $\phi_0$  と、着目する  $n$  番目の素子の電界ベクトルの振幅・位相を  $E_n$ 、 $\phi_n$  とする。この  $n$  番目の素子の位相を  $\Delta$  だけ変化させたときの合成電界  $\dot{E}$  は次のように書くことができる。

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

ここで、 $n$  番目の素子電界の初期合成電界ベクトルに対する相対振幅  $k$ 、位相  $X$  を

$$k = \frac{E_n}{E_0}, \quad X = \phi_n - \phi_0$$

とおくと、相対合成電力  $Q$  は次のようになる。

$$Q \equiv \frac{|\dot{E}|^2}{E_0^2} = (Y^2 + k^2) + 2kY \cos(\Delta + \Delta_0)$$

ただし、

$$Y^2 = (\cos X - k)^2 + \sin^2 X$$

$$\tan \Delta_0 = \frac{\sin X}{\cos X - k}$$

つまり、一つのアンテナ素子の位相変化により合成電力  $Q$  は余弦的に変化する。従って、 $n$  番目のアン

<sup>1</sup> 真野, 片木, "フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法," 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J65-B, No.5, pp. 555-560, May, 1982

テナ素子(空間光位相変調器の素子  $n$ )の位相を変化させたときの合成電力  $Q$  を測定し、その最大値を与える位相  $-\Delta_0$ 、 $Q$  の最大値と最小値との比を求めることにより、 $n$  番目の素子電界の相対振幅  $k \cdot$  位相  $X$  を得ることができる。

ここで、従来 REV 法は移相器の誤差や振幅分布を考慮していないため、空間光位相変調器の変調特性に非線形性や誤差がある場合や、前項で示したような振幅分布がある場合に、合成電界ベクトルの軌跡は図 4-5-1 のように歪んだ円になる。そのため、従来の REV 法により推定した振幅、位相値には誤差を含む。今回、測定値と推定値との差の二乗和の平均が最小となるように各空間光位相変調器の各設定状態における誤差を決定し、かつ、この各状態の誤差の二乗和の平均が最小となるように、最小二乗法により合成電界を決定する改良型 REV 法<sup>2</sup>を用いた。

### 4-5-3 評価結果

光領域での改良型 REV 法の評価結果について述べる。放射パターン測定は、12GHz (Ku 帯、衛星通信ダウンリンク用に割り当て)で行った。図 4-5-2 に測定系の全体構成と、各部の概観写真を示す。光電変換器とアレーアンテナは電波暗室内を回転台上に設置し、光制御 BFN とは 100 芯、約 20m 長の光ファイバアレーケーブルにて接続している。

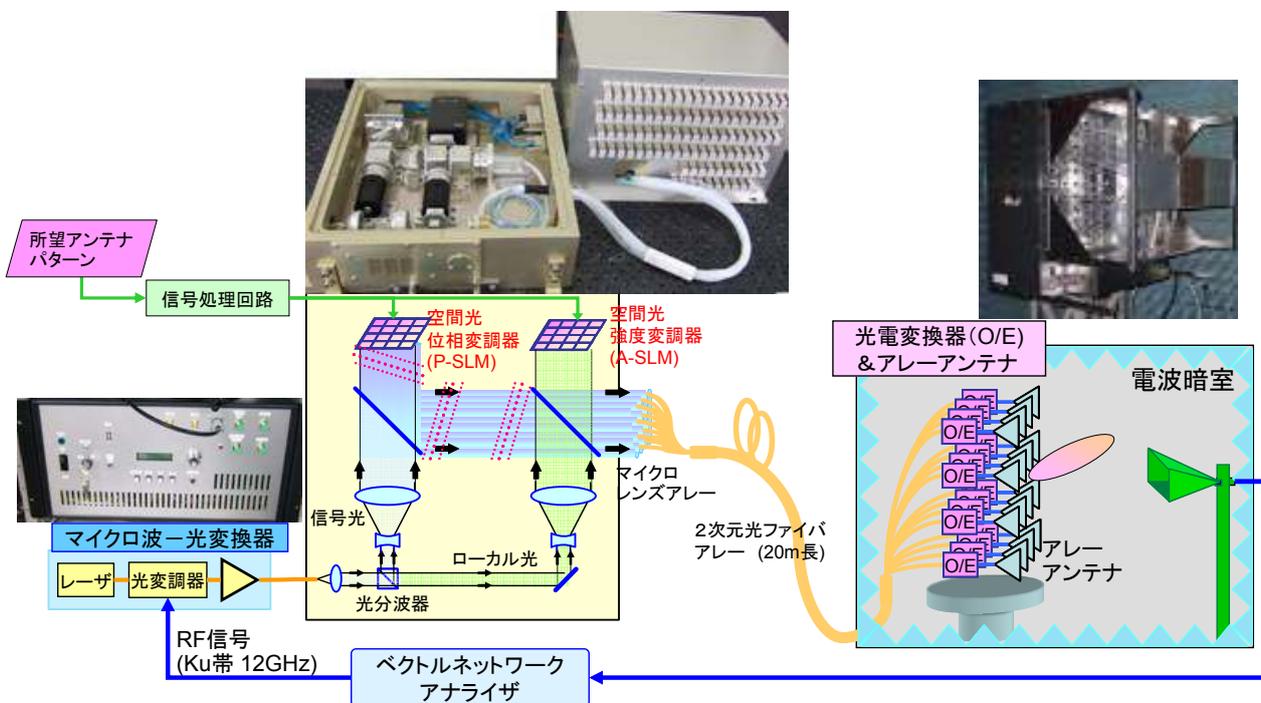


図 4-5-2: 測定系の構成及び光制御ビーム形成回路の概観写真

図 4-5-3 に、空間位相変調器の各素子への印加電圧(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電力の測定結果の一例を示す。各素子のデータはそれぞれ色分けして示す。各点が実測値、実線が近似値である。1 素子の位相変化により、合成電力の変化が観測される。

測定結果より求めた各空間光位相器への印加電圧と位相変調量との関係を図 4-5-4 に示す。図のように、空間光位相変調器の各素子への印加電圧に対する位相変調特性を推定できる。

<sup>2</sup>竹村, 大塚, 千葉, 佐藤, "フェーズドアレーアンテナの合成電界振幅位相を用いたアレー素子電界及び移相器誤差の測定法," 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J85-B, No.9, pp. 1558-1565, Sep. 2002

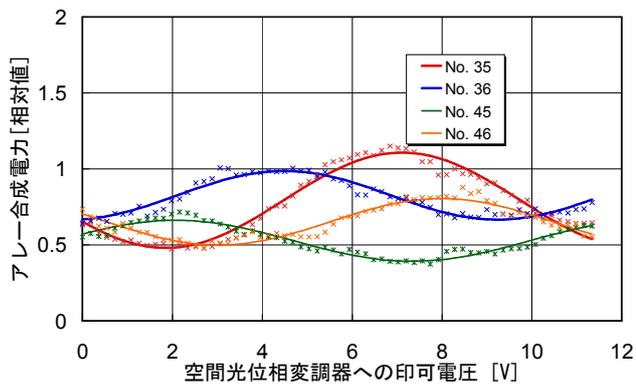


図 4-5-3: 合成電力の測定結果

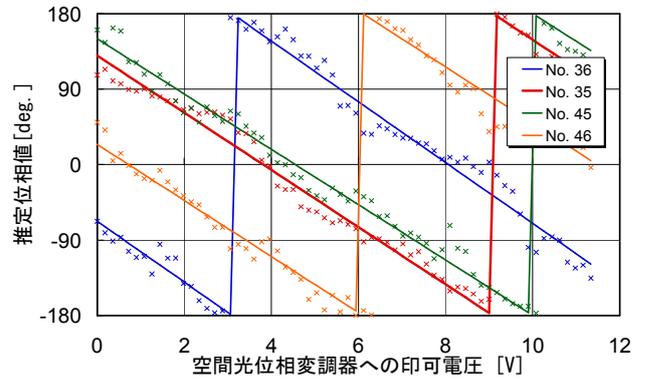


図 4-5-4: 位相推定結果

以上のように、アレー全素子の振幅位相を校正し、アンテナ放射パターンを評価した。アンテナは Ku 帯 (中心周波数 12 GHz、帯域 100 MHz)、励振素子数 100 (10×10、四角配列)、素子間隔 12.45×12.45 mm、の方形パッチによるアレーを使用した。空間光位相変調器により、アンテナ放射ビーム方向を 0、±20 度、±40 度となるように設定し、水平面内のアンテナパターンを測定した。図 4-5-5 に測定結果を示す。各ラインはビーム走査角の違いを表す。測定結果のように、各々ビームが形成され、所望の方向にビームが走査されていることが確認できる。以上より、光領域での校正の有効性を実証した。

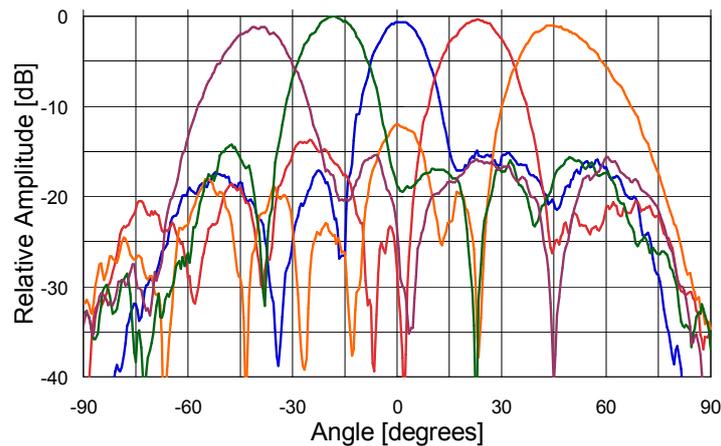


図 4-5-5: 放射パターンの測定結果

#### 4-5-4 まとめ

光の位相制御により、従来マイクロ波で使用してきたアレーアンテナの校正方法である素子電界ベクトル回転法 (REV: Rotating element Electric field Vector method) 法が適用できることを示した。光制御ビーム形成回路に対して、電波暗室にて REV 法を適用したアンテナ放射パターン試験を実施し、REV 法により光波の初期位相を推定できること、推定した位相値をもとに所望のビーム走査が可能であることを実証した。以上より、光領域で REV 法が適用できることを示した。

## 4-6 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研究開発」に対する総括として、最終目標に対する達成状況を述べる。

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  
平成 19 年 1 月(中間評価時) シングルビーム対応光制御ビーム形成回路の試作器にて 100 素子を実現  
平成 21 年 3 月 マルチビーム対応光制御ビーム形成回路の試作器にて 110 素子を実現
- 周波数 L~Ka 帯の任意のバンド使用可能  
平成 19 年 1 月(中間評価時) L~Ku 帯を実証済み  
平成 21 年 3 月 Ka 帯にてビーム形成回路の評価を実施し、ビーム形成を実証。
- ビーム数：10 ビーム以上、かつ各ビームを独立に制御可能  
平成 21 年 3 月 空間光波長多重技術を適用することにより、単一の光学系からなる光制御ビーム形成回路で 10 本のマルチビーム形成を実証。

### (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
  - 温度、振動などによる波面変動をモニタする、波面センシング技術を開発。  
波面センサの光学系に 3 群フーリエ変換レンズを適用することにより、単レンズ比 1/10 の光学系長を実現 (平成 19 年 1 月、中間評価時)
  - 平行平板基板上に透過波長帯を連続的に変えた光バンドパスフィルタをコーティングした空間型光波長多重合分波器を開発した。これにより光波長 1535 から 1560 nm の光を、波長による損失変動 1.4 dB 以下で分離および再合成できることを実証した。

### (イ) 指向性合成技術の開発

- サイドローブレベル < -25 dB  
ローカル光強度制御による振幅制御方式を示し、シミュレーションにより -25dB 以下が可能なことを示し、試作器を用いた励振分布評価により、-28dB を達成し、目標性能を得た。
- 光領域での校正技術の確立  
光領域での素子電界ベクトル回転法(REV 法: Rotating element Electric field Vector method) が適用できることを解析的に示し、光 REV 法により校正したアンテナ放射ビーム試験により、所望のビーム形成ができることを実証。

以上に示したように、最終目標を達成することができた。

## 5 参考資料・参考文献

### 5-1 研究発表・講演等一覧

1. 秋山智浩、鈴木二郎、安藤俊行、永塚勉、平野嘉仁、“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,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、C14-6、2006/9
2. 鈴木二郎、秋山智浩、安藤俊行、永塚勉、平野嘉仁、“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、2006/11
3. 鈴木二郎、秋山智浩、安藤俊行、永塚勉、平野嘉仁、“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,” 春季応用物理学関係連合講演会大会、27p-S-10、2007/3
4. 永塚勉、秋山智浩、安藤俊行、大塚浩志、崎村武司、平野嘉仁、“高出力 RF 伝送用 PD の出力電力測定結果,” 電子情報通信学会 総合大会、C-14-11、2007/3
5. 秋山智浩、鈴木二郎、安藤俊行、平野嘉仁、“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,” 電子情報通信学会 総合大会、C-14-12、2007/3
6. 秋山智浩、鈴木二郎、安藤俊行、平野嘉仁、“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—,” 春季応用物理学関係連合講演会大会、30a-SG-7、2007/3
7. 秋山智浩、鈴木二郎、安藤俊行、崎村武司、平野嘉仁、“空間光振幅位相制御によるフェーズドアレーアンテナの放射パターン測定,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、C-14-3、2007/9
8. 板倉成孝、永塚勉、大塚浩志、酒井清秀、平野嘉仁、“RF 光伝送用高出力 PD,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、C-14-1、2007/9
9. 永塚勉、板倉成孝、大塚浩志、酒井清秀、平野嘉仁、“高出力 RF 伝送用 W 級出力 PD アレー,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、C-14-2、2007/9
10. 秋山智浩、永塚勉、鈴木二郎、安藤俊行、崎村武司、板倉成孝、大塚浩志、酒井清秀、平野嘉仁、“空間光振幅位相制御によるフェーズドアレーアンテナの開発,” 第 51 回宇宙科学技術連合講演会、3E07、2007/10
11. 永塚勉、板倉成孝、大塚浩志、酒井清秀、大橋英征、平野嘉仁、“高出力 RF 伝送用 PD の B 級動作,” 電子情報通信学会 総合大会、C-14-13、2008/3
12. 板倉成孝、永塚勉、大塚浩志、酒井清秀、平野嘉仁、“RF 光伝送用高出力 PD アレー,” 春季応用物理学関係連合講演会、28a-ZQ-12、2008/3
13. Tomohiro Akiyama, Jiro Suzuki, Toshiyuki Ando, Takeshi Sakimura and Yoshihito Hirano, “Spatial light modulator based optically controlled beamformer,” 2008 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and 2008 USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2008/7
14. Tsutomu Nagatsuka, Shigetaka Itakura, Kiyohide Sakai, Yoshihito Hirano, “High-Power Microwave Photodiode Array for Radio over Fiber Applications,” OECC/ACOFT 2008 Conference, OAEA5, 2008/7
15. 板倉成孝、永塚勉、大塚浩志、酒井清秀、平野嘉仁、“RF 光伝送用高出力 PD の相互変調歪特性,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、C-14-6、2008/9
16. 秋山智浩、鈴木二郎、安藤俊行、崎村武司、平野嘉仁、“空間光変調器を用いた光制御型フェーズドアレーアンテナの低サイドローブ化,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、C-14-9、2008/9
17. 秋山智浩、鈴木二郎、安藤俊行、崎村武司、平野嘉仁、“空間光変調器を用いた光制御型フェーズドアレーアンテナによるビーム制御,” 電子情報通信学会 信学技報 MW2008-50、2008/7
18. 秋山智浩、酒井清秀、平野嘉仁、“空間光変調器を用いた光制御型フェーズドアレーアンテナにおけるマルチビーム化の検討,” 第 52 回宇宙科学技術連合講演会、1F19、2008/11
19. Kiyohide Sakai, Tsutomu Nagatsuka, Shigetaka Itakura, Hiroshi Otsuka, Yoshihito Hirano, “Backside-illuminated High-Current Photodiode for Analog Optical Links,” 2008 IEEE LEOS 21st Annual Meeting, TuR4, pp. 288-289, 2008/11
20. 秋山智浩、松沢博史、酒井清秀、平野嘉仁、“空間光変調器を用いた光制御型フェーズドアレーアンテナのマルチビーム化の検討,” 電子情報通信学会 総合大会、C-14-10、2009/3
21. 板倉成孝、永塚勉、大塚浩志、酒井清秀、平野嘉仁、“RF 光伝送用高出力 PD アレーモジュール,” 電子情報通信学会 総合大会、C-14-11、2009/3