

平成19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20年4月

情報通信研究機構

平成19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」

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	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	
4-1	光信号処理回路(光波面生成技術)の研究開発	11
4-1-1	はじめに	11
4-1-2	波面制御技術	11
4-1-3	まとめ	13
4-2	光信号処理回路(光多重化/マルチビーム化技術)の研究開発	15
4-2-1	はじめに	15
4-2-2	全体構成	15
4-2-3	まとめ	24
4-3	光信号処理回路(E/O, O/E 変換技術)の研究開発	25
4-3-1	はじめに	25
4-3-2	高出力 O/E 変換器	25
4-3-3	PD 単体の高出力化	26
4-3-4	PD アレーによる高出力化	29
4-3-5	PD の動作級の最適化の検討	34
4-3-6	まとめ	37
4-4	指向性合成技術の研究開発	38
4-4-1	はじめに	38
4-4-2	指向性合成技術(低サイドローブ化)	38
4-4-3	まとめ	48
4-5	総括	49
5	参考資料・参考文献	50
5-1	研究発表・講演等一覧	50

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、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は、他に代替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の生成、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

衛星による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。このような状況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有効である。

(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”(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。

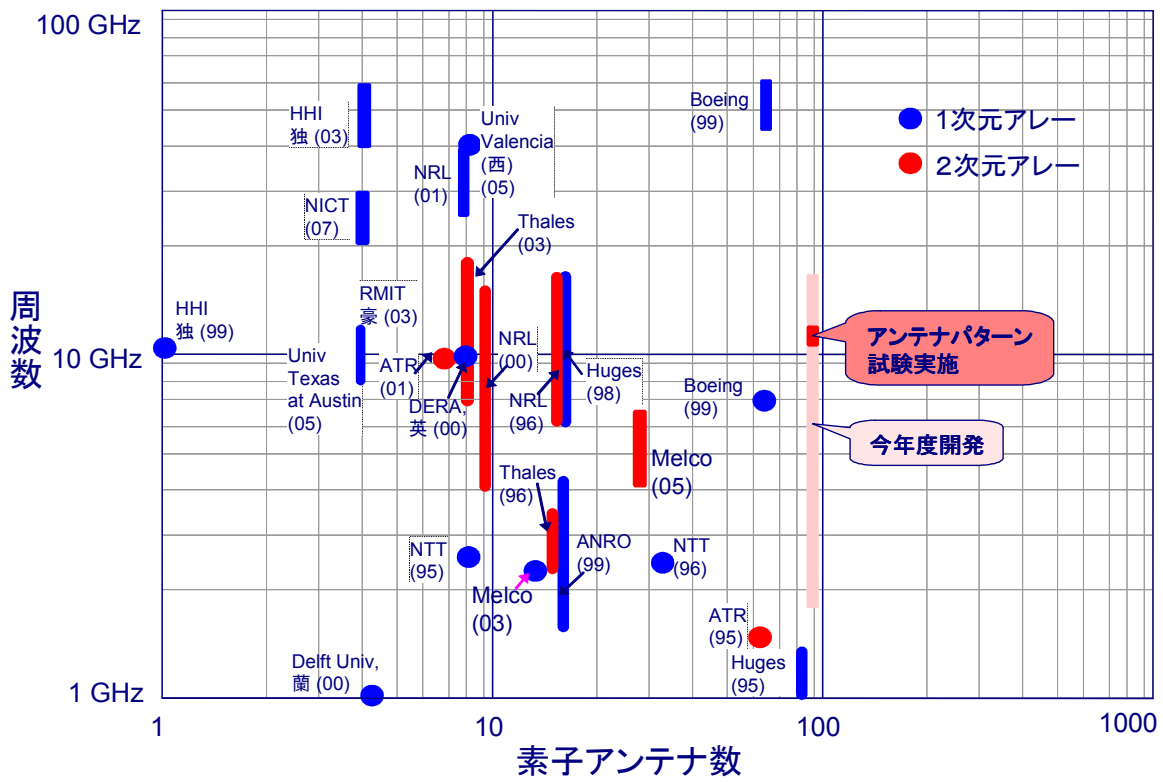


図 1-1 開発の技術的位置付け
光制御型アレーアンテナの報告例におけるアンテナ素子数一周波数

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

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。しかし、本方式では空間光並列信号処理を用いることにより、アンテナ素子数、ビーム数に対する処理回路の依存度が小さくなり、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周波数が数 GHz～数 10 GHz であるのに対し、周波数約 190THz (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、フレキシブル性に優れた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-マイクロ波変換器とアレーアンテナから構成される。

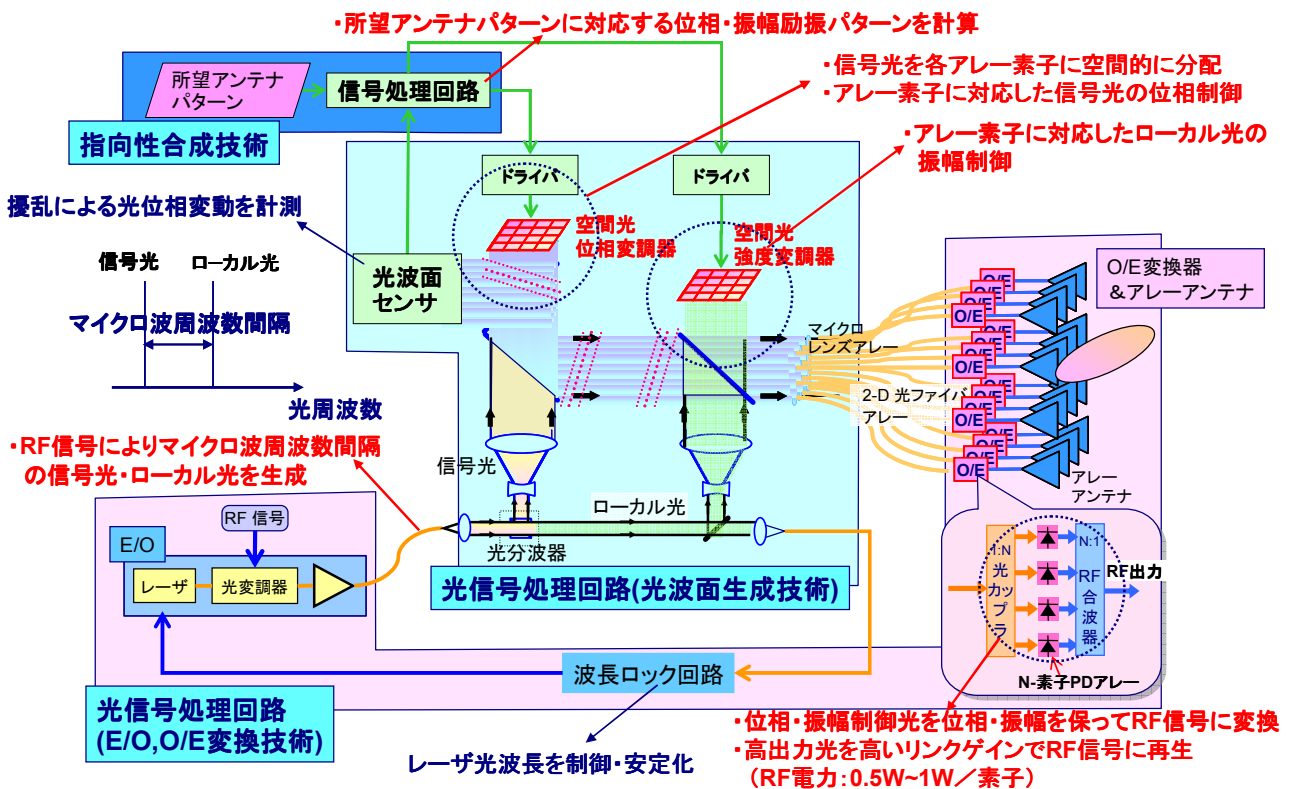


図 2-1-1 光制御型アレーアンテナの全体構成図

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
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)。

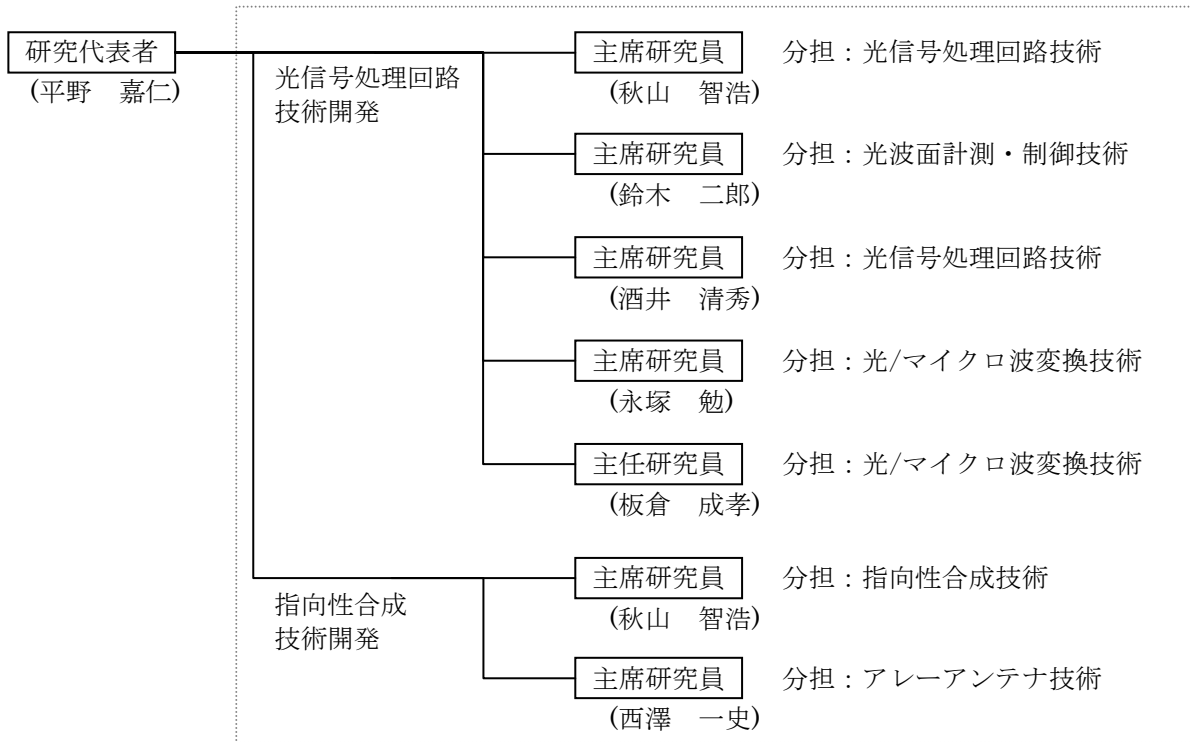
2 備考欄に再委託先機関名を記載

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（光波面生成技術）の研究開発

4-1-1 はじめに

装置の実用化には光波面の安定化が必要である。そのため、光波面の計測技術を開発し、その計測結果を空間光位相変調器への入力信号にフィードバックすることにより安定化を図る。また、マルチビーム実現のために、各アンテナビームに対応した光波ビームの波面制御技術とともに、それらの合分波技術を開発する。

4-1-2 波面制御技術

中間評価にて、光制御ビーム形成回路(光制御 BFN)を開発し、光の波面(位相分布)制御によりアレーアンテナ放射パターンを制御できることを実証した。本方式は、光波の位相変化量をアレーアンテナの各素子アンテナへの励振位相に変換できるため、移相器の小型化、多素子化、2次元化が容易という利点がある。しかし、このとき光波面に変動が生じると、アンテナパターンが劣化するために、衛星に搭載するためには、宇宙空間における温度変化や、姿勢制御動作時の振動などによる擾乱を抑圧する必要がある。しかしながら、光学系を光の波長オーダー($\sim\mu\text{m}$)で安定化させることは困難であるため、光波面の状態を計測し、フィードバック制御する補償系が有効である。そのために、フィードバック制御装置へ信号を与える光波面センサの開発を行っている。光波面センサ装置の設計、試作と、基本原理の検証試験を実施し、単体での検出精度を確認できた。フィードバック制御を行うためにはダイナミックレンジの改良が必要ながわら今後対策を行なう予定である。以下に、課題と対策検討内容を示す。

本研究開発における光制御型ビーム形成回路は、空間光位相変調器を用いて形成した空間位相分布がアンテナ放射パターンに変換されるものであり、空間光位相変調器に反射型マイクロミラーアレイ方式を使用して高出力レーザーの位相制御を実現している。さらに、空間光位相変調器を制御するためのローカルセンサーとして Phase Diversity 方式の光空間位相検出装置（以下本装置という）の検討を行なっている。本装置では、フーリエレンズを用いて光学的に求めた Fraunhofer 回折像から G-S 法 を使用して位相分布を推定する。本方式により、ビーム形成目的の所定の空間位相分布パターンに制御されたビームに対し位相分布の推定が可能であることを確認している。しかしながら、空間光位相変調器の起動時においては、マイクロミラーを駆動する PZT アクチュエータが未制御状態のため、空間光位相分布がランダム位相分布となるという課題がある。試作した光信号処理回路における 10×10 素子の空間光位相変調器が形成する Fraunhofer 回折像のシミュレーション例を図 4-1-1 に示す。空間位相分布の RMS 値が $1.3\text{rad}(0.2\lambda)$ を超えるとメインローブのピークがサブピークと近くなり、 $1.9\text{rad}(0.3\lambda)$ では完全にメインローブが消滅したスペckルパターンとなる。このようなスペckルパターンから空間位相分布を決定することは困難である。

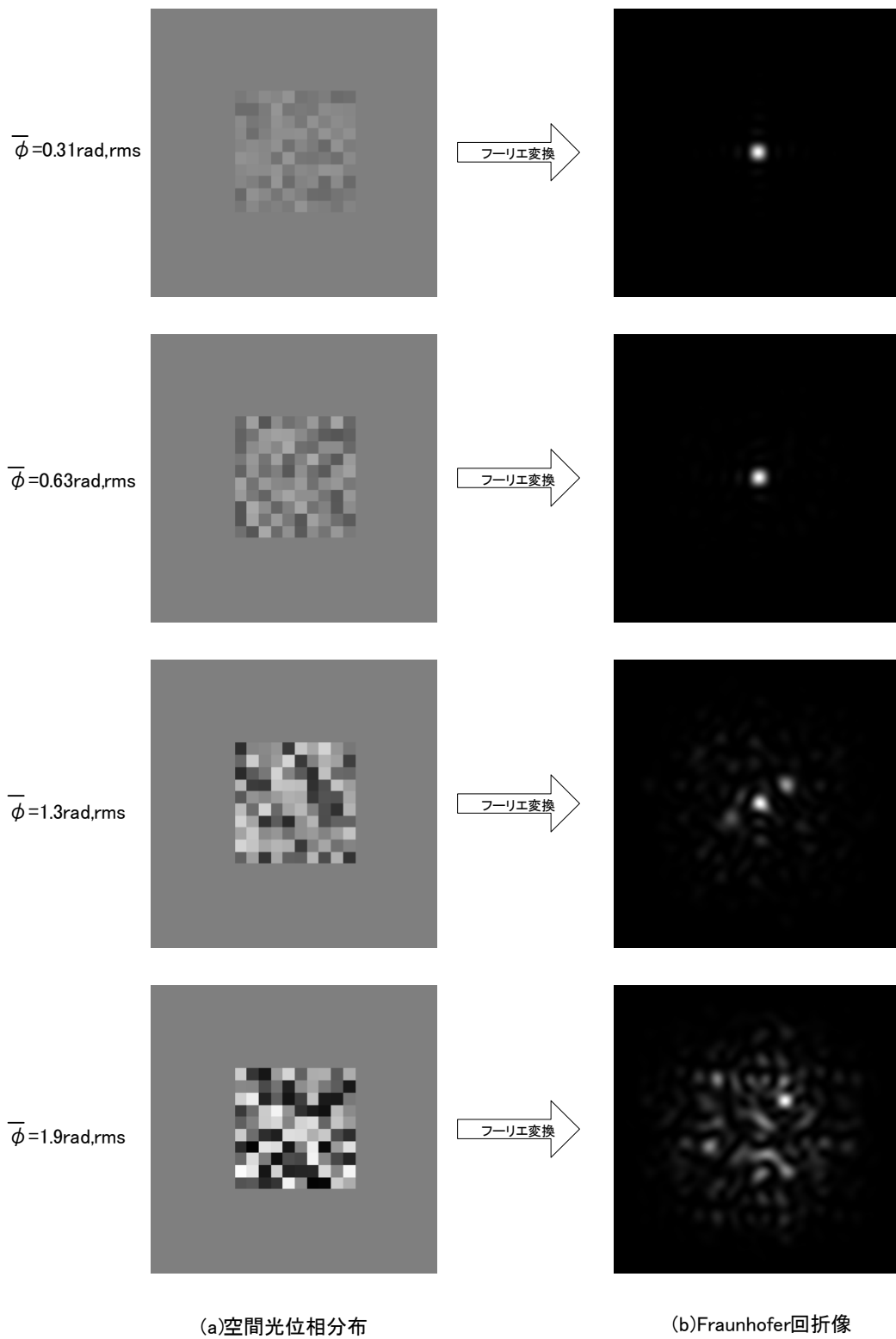
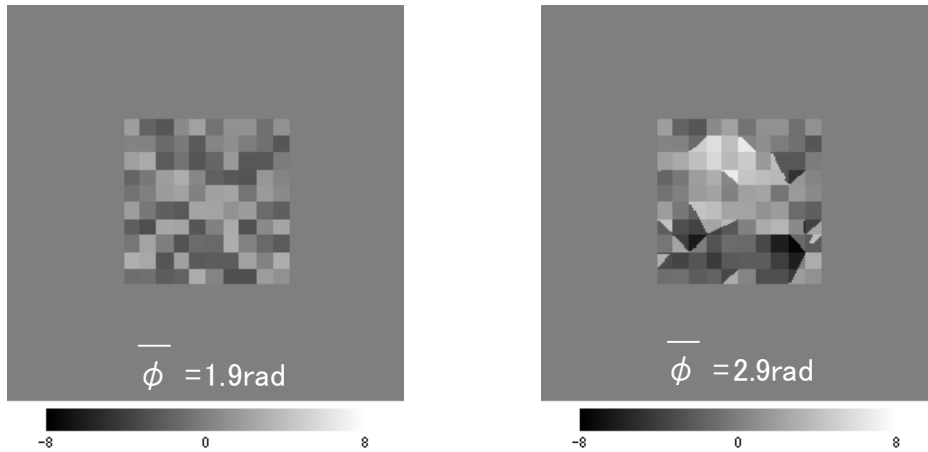


図 4-1-1 空間光位相変調器におけるランダム位相パターンが形成する Fraunhofer 回折像の例



(a) 2π でラップ (b) アンラップ
 図 4-1-2 ランダム位相のアンラップ処理による波面の評価例

ランダム位相パターンが球面波のような空間的に連続した位相分布よりも回折像分布を分散させる理由を説明するため、ランダム位相分布を波面として考えてみる。ランダム位相分布を強制的にアンラップ処理（隣接ピクセル間を比較し、 2π に近い位相ギャップをつなげて波面を算出する処理）した結果を図 4-1-2 に示す。この例では、アンラップ前の空間位相分布 RMS 値が 1.9rad であるのに対し、アンラップ処理により空間位相分布の RMS 値が 2.9rad に増加している。この値は本装置の計測ダイナミックレンジ（波面換算で約 2rad）を超えている。

対策として、空間位相変調器のランダム位相分布を本装置のダイナミックレンジ以内に補正する手段の方法検討を行なった。同じ RMS 値のランダム位相分布でもセグメント数（空間位相変調器のマイクロミラーアレイ数）が多いほどアンラップ後の位相分布 RMS 値が増大する。明らかに 2 素子であれば RMS 値が 2rad を超えないことから、2 素子の部分開口の Fraunhofer 回折像強度分布を撮像し、部分開口毎に空間位相分布を算出する方式を考える。

図 4-1-3 はレンズレットアレイを用いて多数の部分開口の Fraunhofer 回折像を CCD で撮像する方法の構成を示す。1 回の撮像で全ての部分開口の Fraunhofer 回折像が取得できるメリットがあるが、1 つあたりの強度分布に必用な空間分解能（画素数）の確保が困難という問題がある。

図 4-1-4 は開口マスクを用いて一つの Fraunhofer 回折像を撮像し、開口マスクを移動または入れ替えて撮像を繰り返すことにより全ての部分開口の Fraunhofer 回折像を取得する方式である。本方式ではレンズレットアレイを用いた方式と比較し、空間分解能の問題が解決されるが、開口マスクの移動または入れ替え機構が必要である。

現在各方式の詳細検討を実施中である。

4-1-3 まとめ

H19 年度に実施を予定していた装置安定化のための光波面センサ装置の試作と単体性能試験による検証を完了した。さらに、今後解決すべき課題となる空間光位相変調器の未制御状態における位相分布が計測装置のダイナミックレンジを越える問題の説明と、対策案について説明した。今後方式検討を含めた詳細検討と実験を行なう予定である。

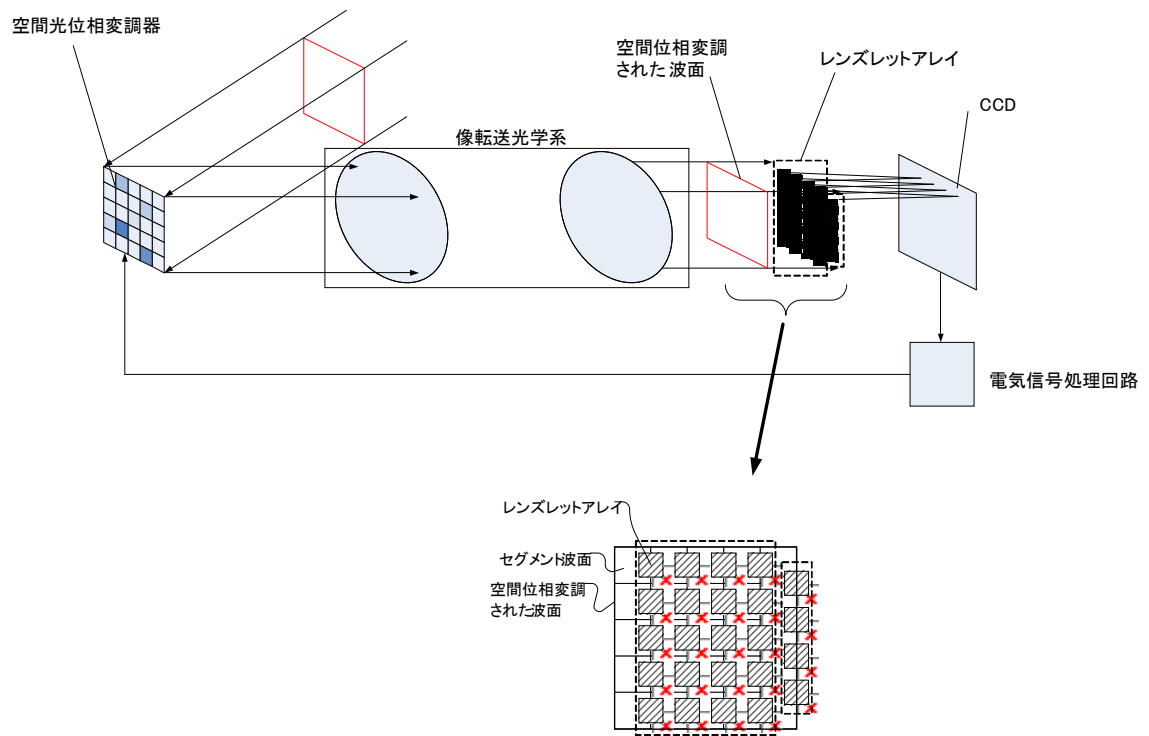


図 4-1-3 レンズレットアレイを用いた部分開口 Fraunhofer 回折像の測定方式

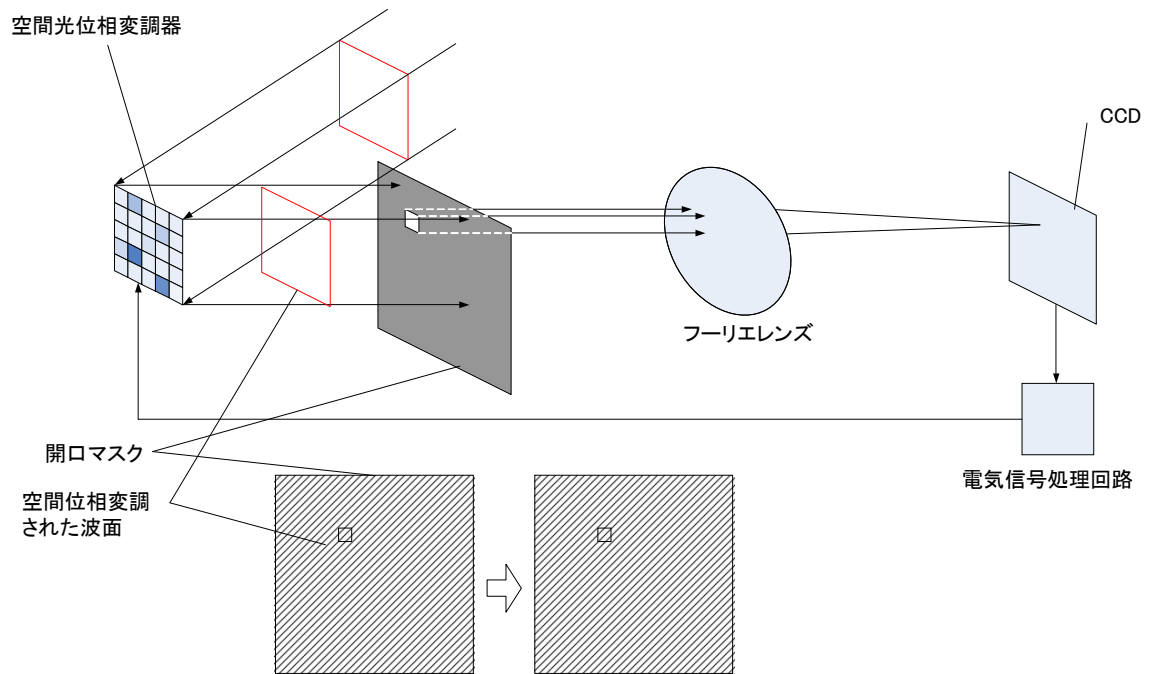


図 4-1-4 開口マスクを用いた部分開口回折像の測定方式

4-2 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

4-2-1 はじめに

H18 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を用いた 4 ビーム形成方法を提案した。本方式により、マルチビームを実現できる。しかし、アンテナ開口を分割して使用するために、1 ビーム当たりのアンテナ開口が小さくなる。アンテナ開口が小さくなると、ビーム幅が広がるため、アンテナの効率が低くなるという課題が生じる。

この課題を解決するために、H19 年度には、各ビームそれぞれがアンテナの全開口で励振される構成を検討した。本方式では、アンテナの各ビームの励振振幅位相を形成するために、空間位相変調器の開口はビーム毎に分割する。しかし、分割された各ビームを空間的に同一の軸のビームに変換することにより、全ビームそれぞれが全アンテナ素子を励振できる構成とした。これにより、H18 年度に検討した開口分割アレーに比べ、アンテナ放射ビームをより細くできるとともに、各ビームの励振素子が多くなるため、より柔軟な指向性合成が可能となる。

本節では、今年度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の評価結果について示す。

4-2-2 全体構成および部分試作

・全体構成

マルチビーム対応光制御フェーズドアレーアンテナの全体構成、および、主なポイントにおける各信号光およびローカル光の周波数配置を図 4-2-1 に示す。なお、説明図では 4 ビームで記述しているが、H20 年度には 10 ビームに対応する予定である。以下、主な要素の概要を説明する。なお、中間評価での試作器と同一あるいは、同等の要素については説明を省略する。

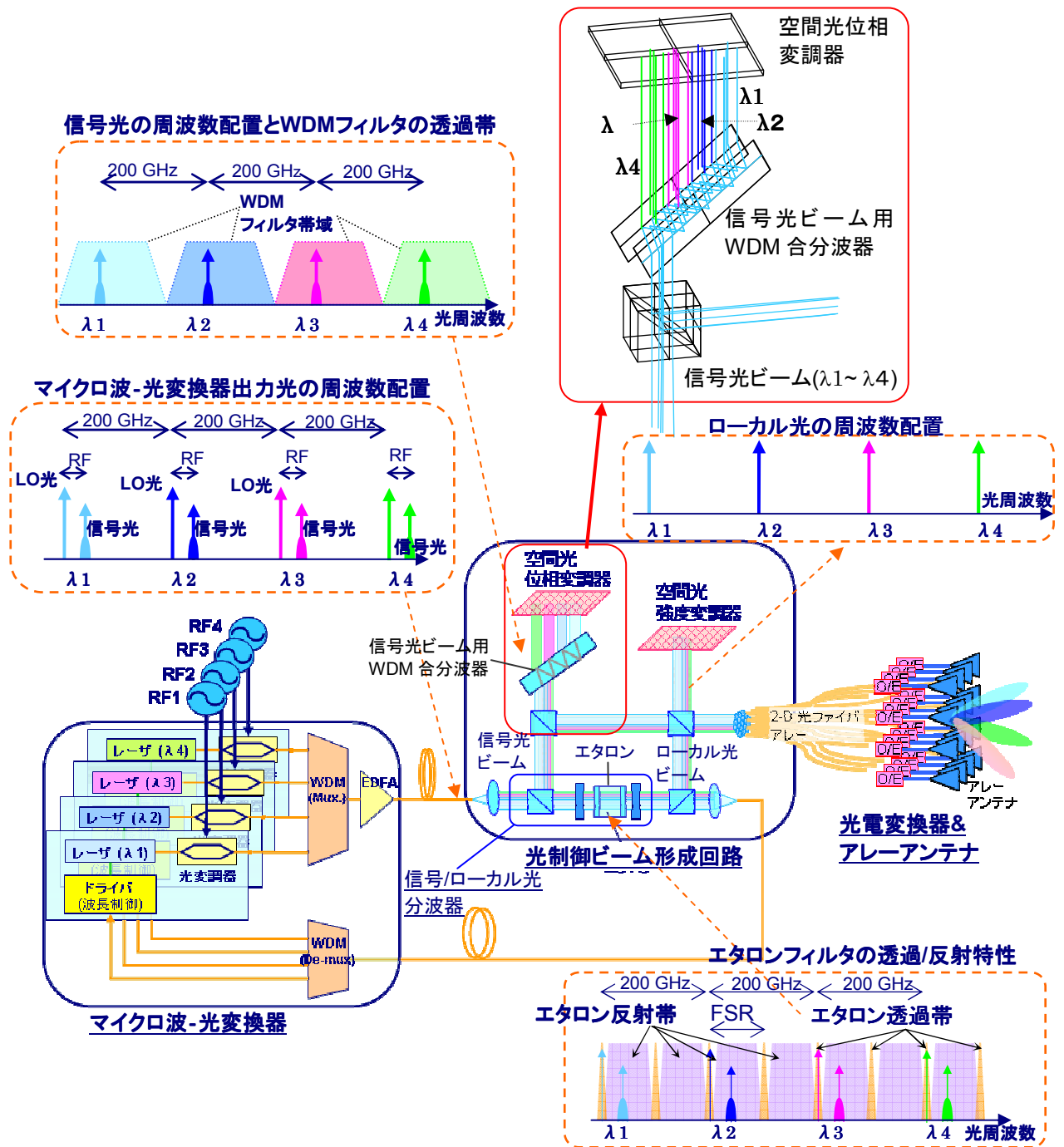


図 4-2-1 マルチビーム光制御フェーズドアレーアンテナの構成 (4 ビームの場合)

マイクロ波-光変換器

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．ここで，光増幅器 EDFA の帯域を C 帯（波長 1530～1565 nm）とすると，レーザを波長 200GHz 間隔で配置した場合は約 20 波，100GHz 間隔で配置した場合は約 40 波の波長多重が可能である．

各レーザを 2 電極 LN-MZ (LiNbO₃ -Mach Zehnder) 型光変調器にてマイクロ波信号で片側波帯 (SSB: Single Side band) 変調し，信号光とローカル光の 2 波を発生させる．図 4-2-2 に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しめす．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 型マルチプレクサにて合波し，偏波保存型 EDFA にて増幅する．ここで，各レーザの波長は，シングルビーム用のマイクロ波光変換器と同様に，後述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（波長ロック）する．

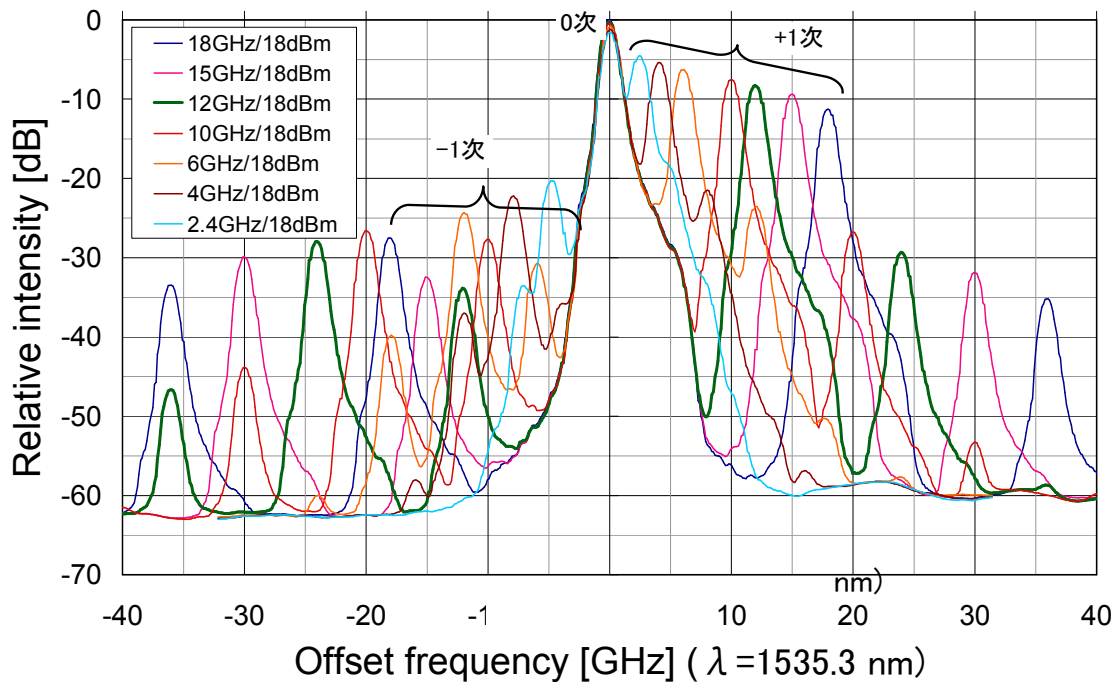


図 4-2-2 光変調器による片側波帯 (SSB: Single Side band) 変調信号の測定結果

- 光制御ビーム形成回路 (光制御 BFN)

信号/ローカル光分波器

信号/ローカル光分波回路は PBS, $\lambda/4$ 波長板, エタロンにより構成される. 図 4-2-3 に構成と1ビーム用の信号光とローカル光の偏波面を示す. 光制御ビーム形成回路に入射した多波長のレーザー光は, 信号/ローカル光分波回路に入射し, 回路内のエタロンにてローカル光のみを透過させ, 他の信号光は反射となるように, レーザの波長を設定する. レーザの波長は, エタロン透過光をサンプルし, レーザの波長帯毎に WDM 型デマルチプレクサで分波した後, 各帯のレーザー光強度が最大となるように, レーザの波長を制御(波長ロック)する. 信号/ローカル光分波回路で分波された信号光ビームは空間光変調器方向へ, ローカル光ビームは空間光強度変調器へ向かう.

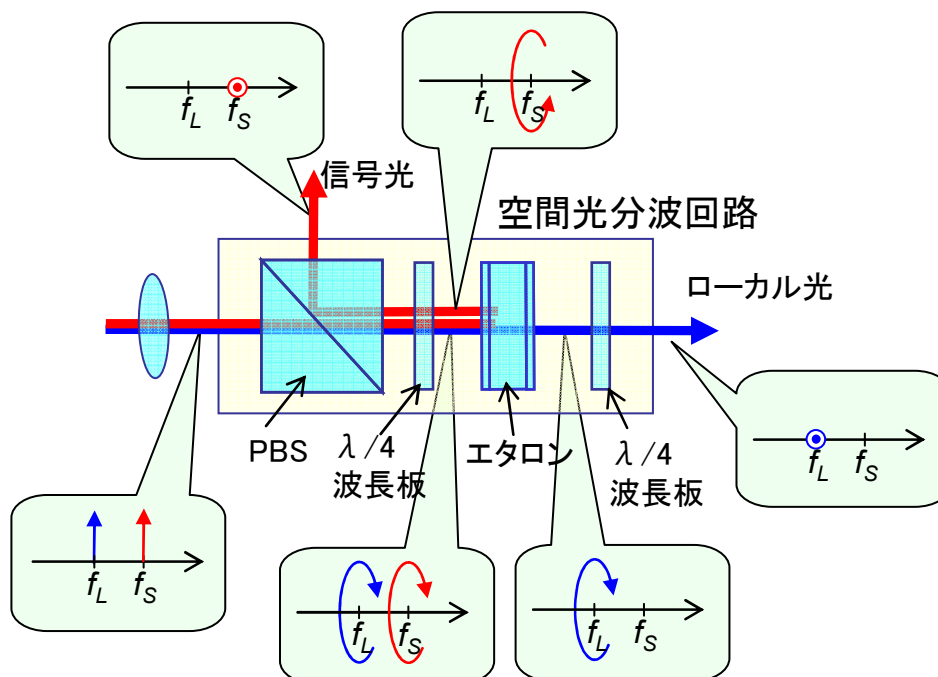


図 4-2-3 信号光/ローカル光分波器の構成とビームの偏波方向

ここで, ローカル光のみを透過し, 信号光を反射させるエタロンフィルタの設計値および試作素子の評価結果を以下に示す. 表 4-2-1 に仕様を, 図 4-2-4 に分光透過率の設計値を, 図 4-2-5 に試作素子の測定結果を示す. 図 4-2-4 において, 青線は分光透過率, 赤線が分光反射率の実測値である. 図のように, 透過波長は 30GHz 間隔となっている. 図 4-2-4 及び図 4-2-5 では4本のピーク部を示したが, 同間隔でピークが発生する. また図 4-2-4 及び図 4-2-5 で透過波長の絶対波長は異なっているが, FSR, Finess は設計通りの値が得られていることが確認できる. なお, 絶対波長に関しては, 後述する10波フィルタの各ビーム帯域内で, 光源の波長を制御することで, エタロンフィルタの透過帯にロックさせるため, 問題とはならない.

表 4-2-1 信号/ローカル光分波用エタロンフィルタの仕様

フィルタのタイプ	エアギャップエタロン
スペーサ	ゼロデュア
Finess	>50
FSR	30GHz

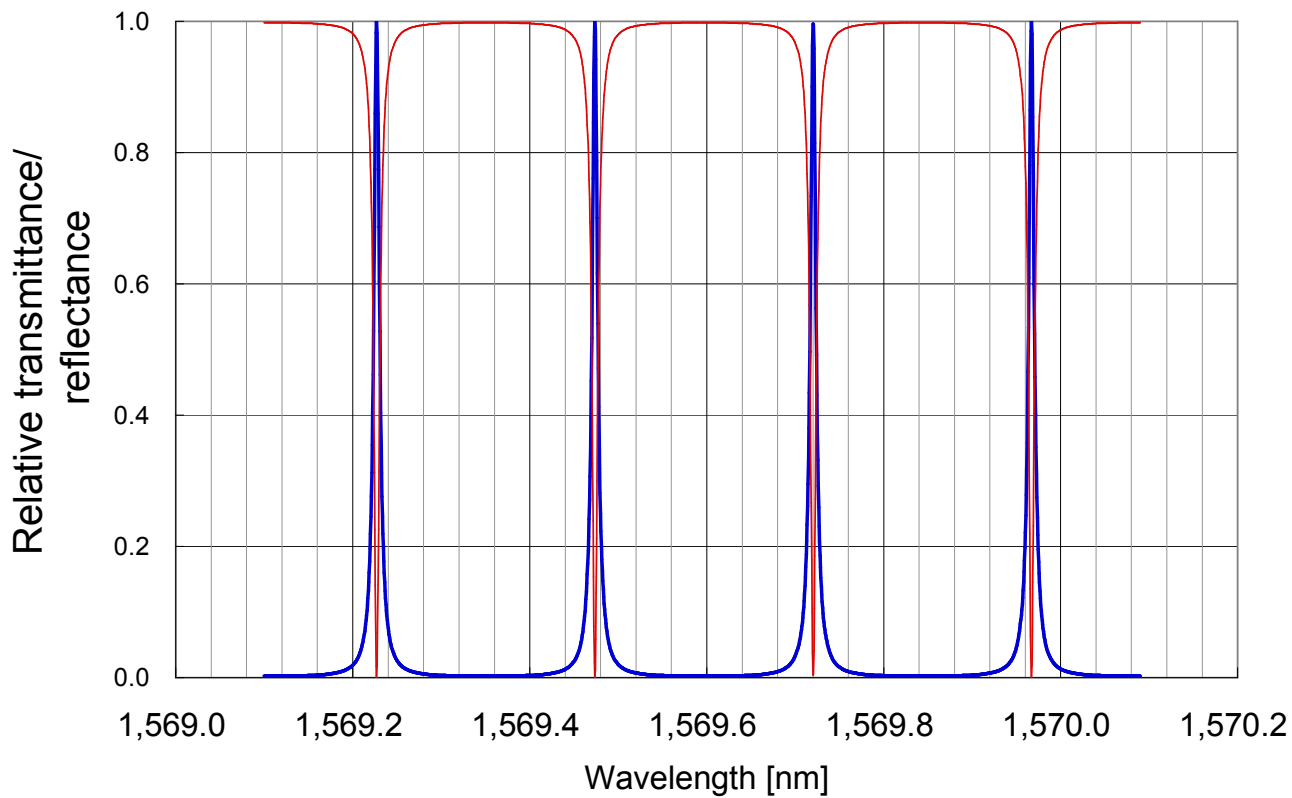


図 4-2-4 エアギャップエタロンの分光透過率および反射率 (設計値)

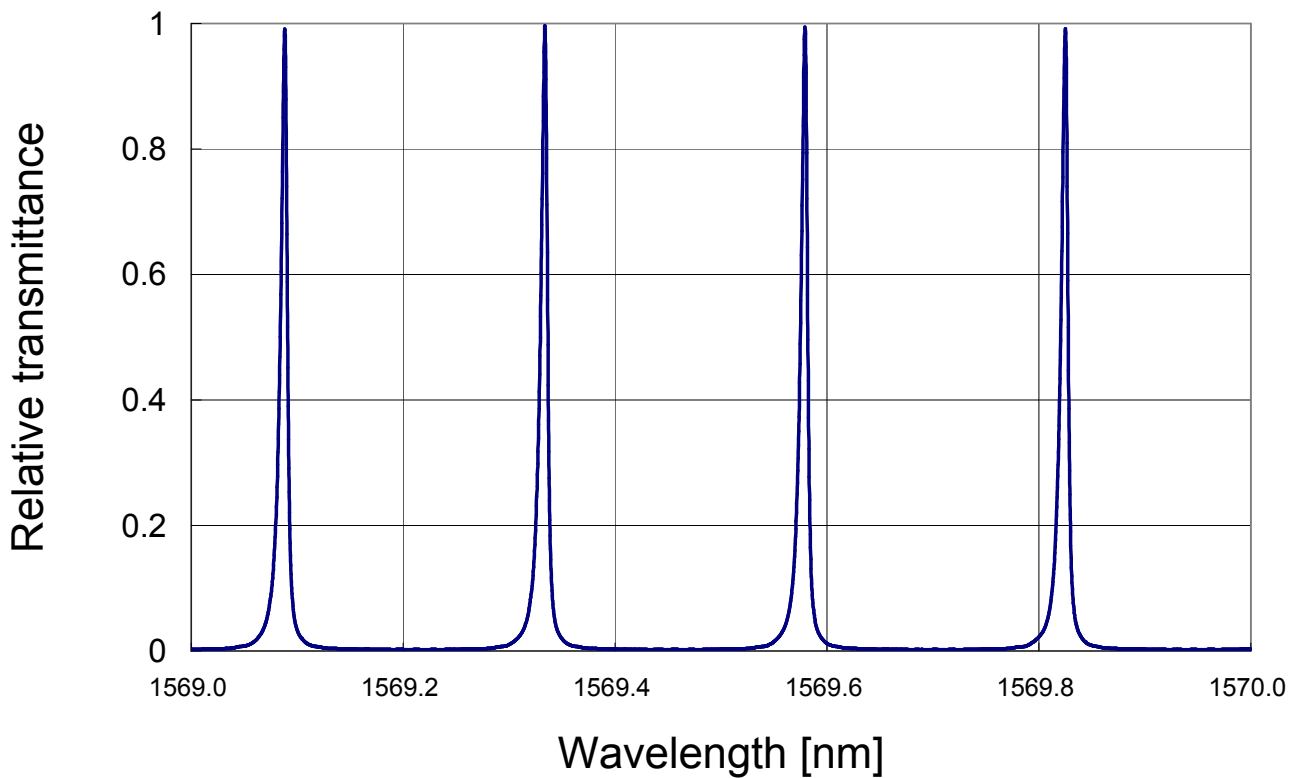


図 4-2-5 エアギャップエタロンの分光透過率(実測値)

信号光用 WDM 合分波器

波長多重された信号光ビームは、信号光用 WDM 合分波器へと入射し、波長帯により、空間的に分割されて出射する。WDM 合分波器の構成を図 4-2-6 に示す。平行平板を入射ビームに対し斜め方向に設置する。斜入射した信号光ビームは、平行平板内で反射位置をシフトしながら多重反射する。このとき、各反射点に誘電体多層膜フィルタを形成すると、そのフィルタの透過波長帯の信号光のみを選択的に透過させることができるので、各ビームを空間的に分離することができる。なお、上記の信号/ローカル光分波器のエタロンの透過帯にレーザの波長を制御するが、エタロンの FSR を 30GHz に、多層膜フィルタの帯域を > 100GHz に、多層膜フィルタの帯域幅をエタロンの FSR の数倍以上に設計すれば、エタロンへの制御範囲は多層膜フィルタの帯域内となるため、上述のように動作する。

WDM 合分波器を出射した各ビームは、空間光位相変調器にて反射し、同一の光路で WDM 合分波器に入射し、WDM 合分波器内で多重反射しながら、空間的に合成され出射する。空間合成された波長多重信号光ビーム群は、ローカル光ビーム群と合成され、光ファイバアレーでサンプリングされ、O/E 変換器でそれぞれマイクロ波に変換され、アレーアンテナから複数のビームとして空間に放射される。

以下に、今回開発したフィルタアレーの設計値および評価結果を示す。図 4-2-6 にフィルタの構成を示す。平行平板基板の片側に AR(反射防止膜)をコーティングする。波長多重された光ビーム ($\lambda 1 \sim 10$ は AR 膜を透過し、平行平板内に入射する。平行平板に入射した光は、AR 膜と反対側の面に入射するが、このとき、反対側の面の多重ビームが入射する領域には $\lambda 1$ のビーム光のみが透過する光バンドパスフィルタをコーティングする。したがって、 $\lambda 1$ のビーム光のみが透過し、他のビーム光は反射する。反射光は、基板の逆面に入射する。ここで、逆面には全反射膜をコーティングしておくことにより、ビーム光は多重反射される。ここで、多重反射光から所望の波長の光のみを透過させる光バンドパスフィルタを順番に設置することにより、各波長ごとに光ビームを取り出すことができる。試作素子では、平行平板へのビームの入射角を 14 度、基板厚を 3.08mm とし、分波ビームは 1mm 間隔で分離出力させることができる。

図 4-2-6(b)に光バンドパスフィルタアレーの外観写真を示す。

次に、試作フィルタの分光特性を図 4-2-7 及び図 4-2-8 に示す。図 4-2-7 は各ビームの出射位置 (1mm 間隔) 毎の分光透過率を、図 4-2-8 にビーム出射位置近傍における透過率の場所依存性をしめす。

図 4-2-7 より、各ビーム出射位置毎に光ビームの透過波長をずらせること、各ビーム出射位置間でのビームのアイソレーションは 14dB 以上を得られることを実証した。

また、図 4-2-8 より各ビーム出射領域内での透過率の劣化は < 1dB 以下となることを実証した。

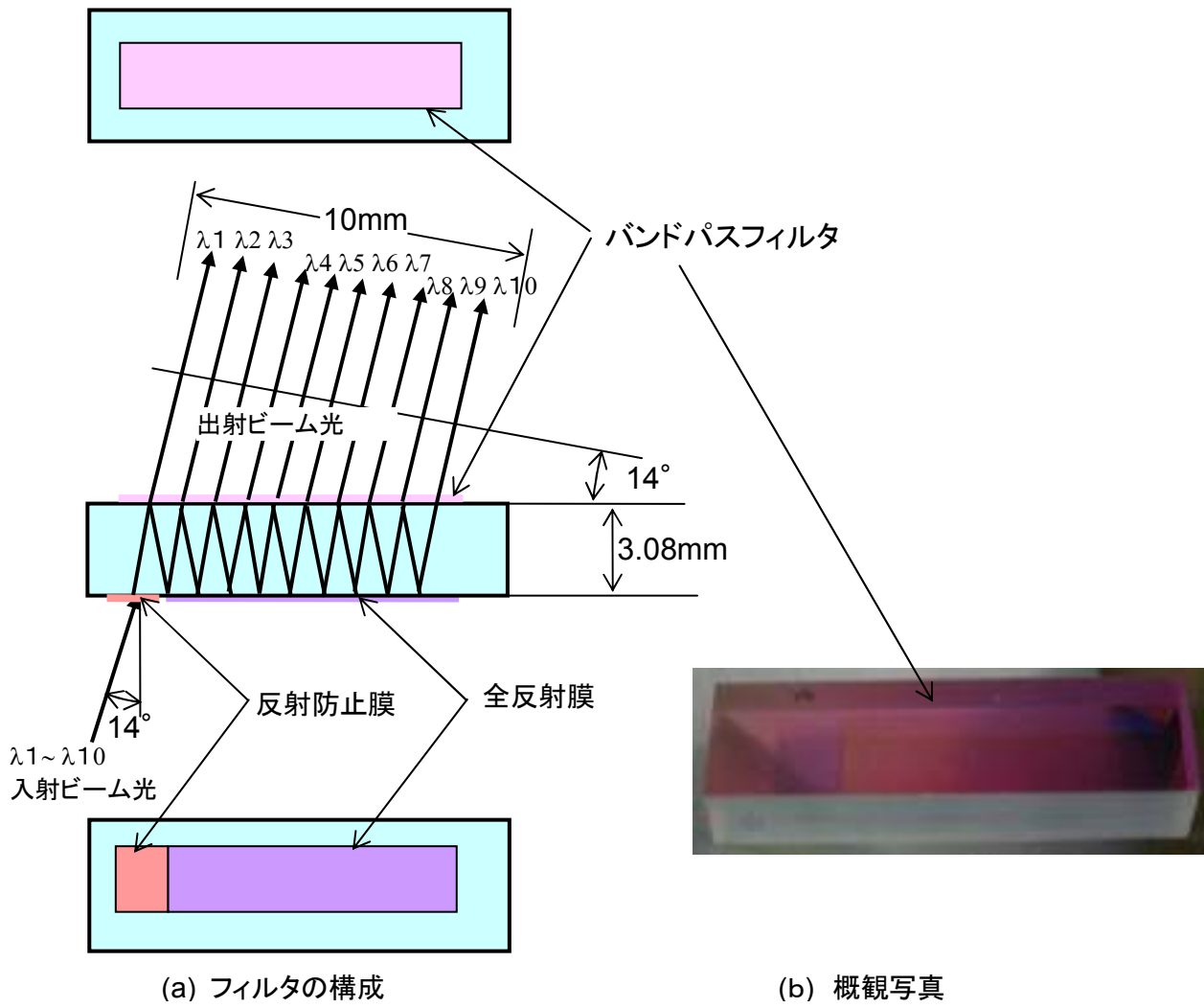


図 4-2-6 光バンドパスフィルタアレーの構成および概観写真

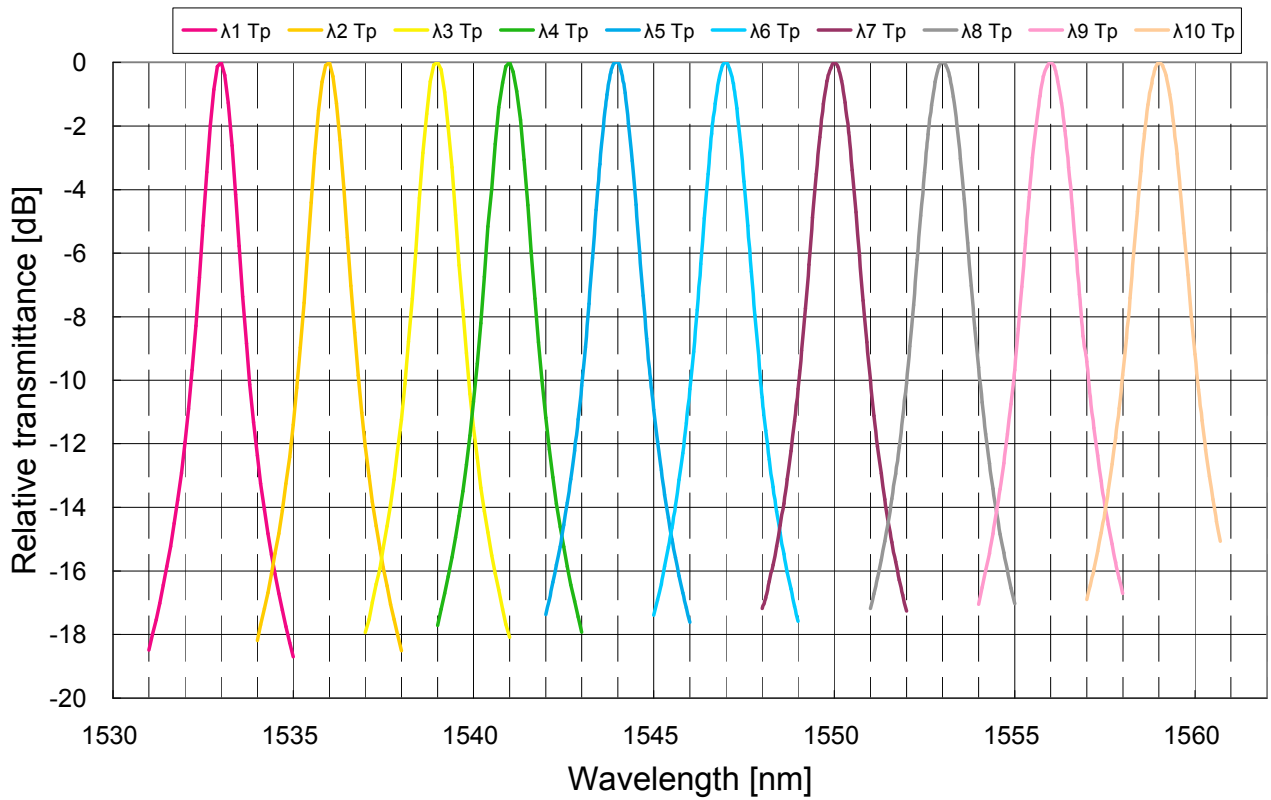


図 4-2-7 10 波長バンドパスフィルタアレーの分光透過率の測定値 (ビーム中心位置 1mm ステップ時)

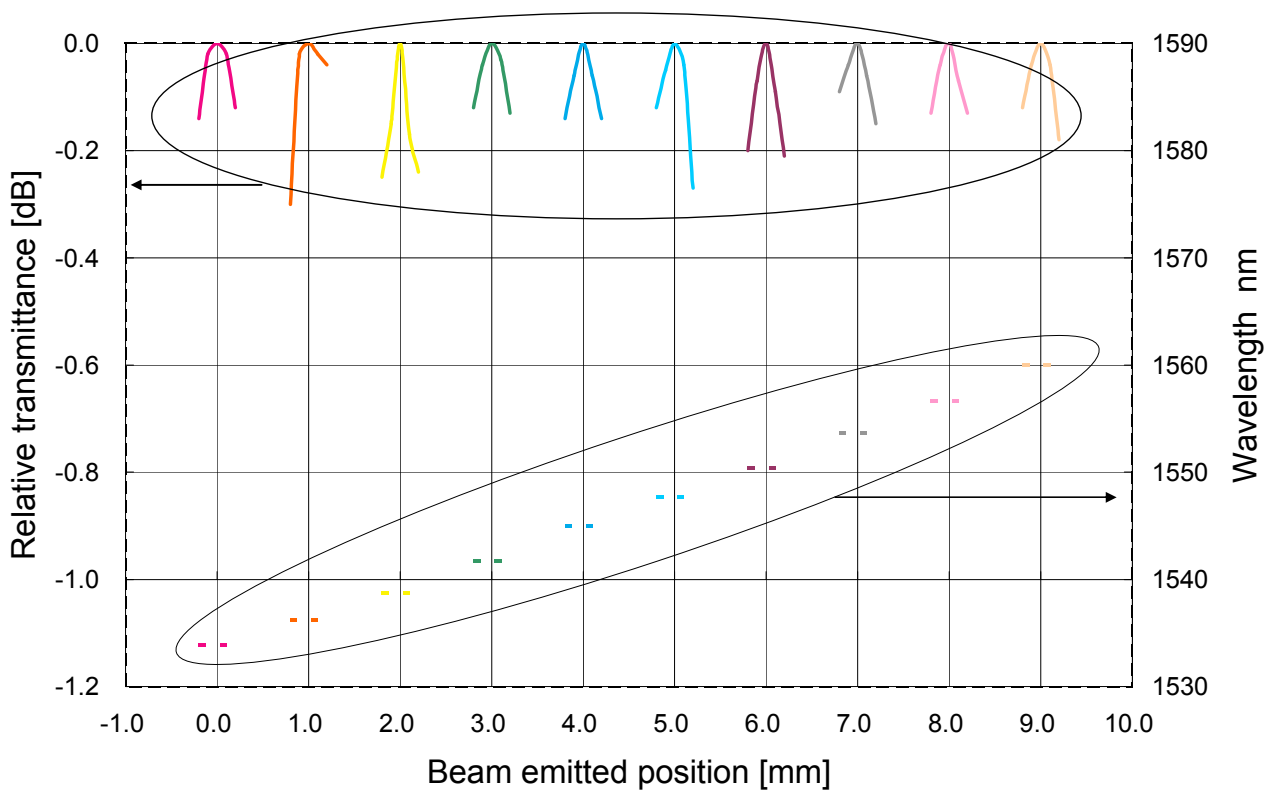


図 4-2-8 10 波フィルタの分光透過率の測定値 (ビーム中心位置 1mm ステップ時)

次に、PMF ファイバから出射したコリメート光が、前記の光バンドパスフィルタアレーで空間的に分波され、空間光位相変調器で位相変調される。各ビーム毎に、光バンドパスフィルタアレー間での多重反射数が異なるため、ビームの伝搬距離も異なるため、ビーム径などが変動する可能性がある。この影響を調べるために、空間光位相変調器に入射する信号光ビーム(10 ビーム)の強度分布をシミュレーションした。計算結果を図 4-2-9 に示す。図のように、BPF フィルタアレー内での多重反射数が多くなるほど (λ_{10} が最多)、回折の影響でビームが僅かに広がるが、10 ビームをそれぞれ空間的に分離できることが確認できる。

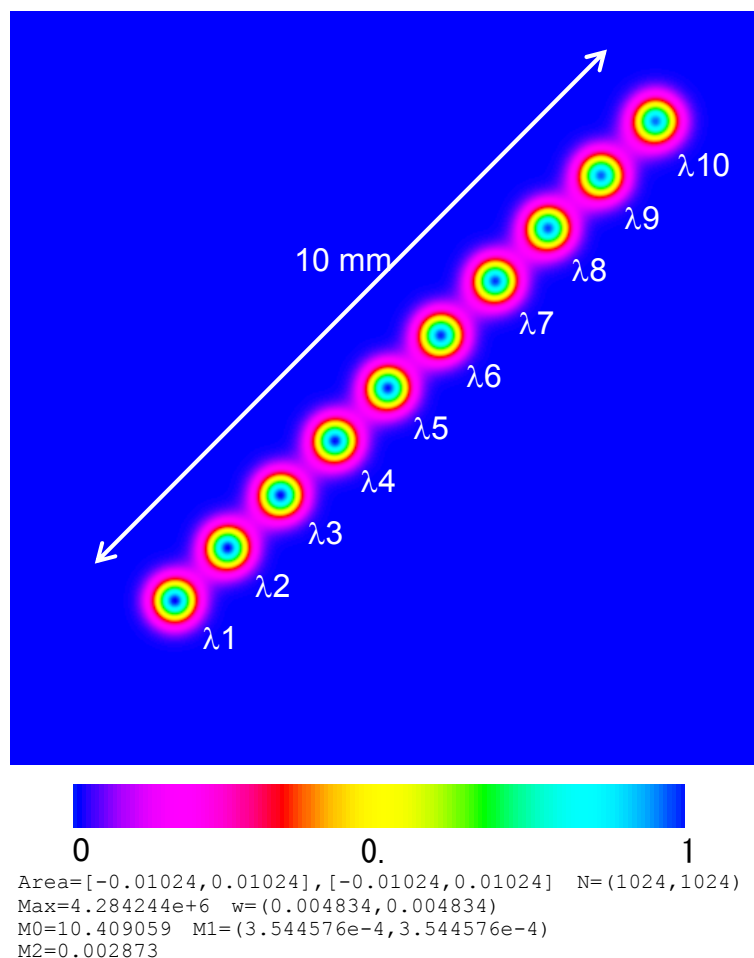


図 4-2-9 空間光位相変調器上における光ビーム強度のシミュレーション結果

以上の、空間的に振幅、位相変調されたビーム光は光のサンプリングファイバアレーで空間的にサンプリングする。今回、アレーアンテナとしての基本特性向上のため、装置小型化のため、光ファイバアレーの再試作も実施した。試作ファイバアレーの断面写真を図 4-2-10 に示す。

図 4-2-10 は断面の一部であるが、今回 (1) ファイバアレーの配置を正方から三角配列に変更、(2) 素子間を 1mmk 間から $250\mu\text{m}$ 間隔とした。素子間を狭くできたことから、各ビーム光のサイズを細くすることができるため、最終的に光学系の全体のサイズを小型にすることが可能となる。

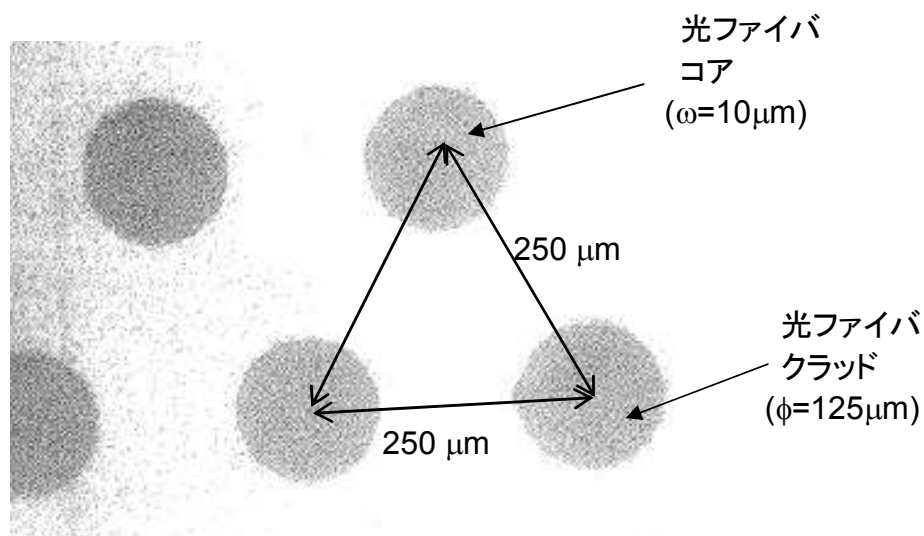


図 4-2-10 光ファイバアレーの端面写真

4-2-3 まとめ

以上、マルチビームモデルの概要を説明するとともに、今年度、部分試作したエタロンフィルタ、10波光バンドパスフィルタ、光ファイバアレーの基本特性の評価結果について示した。部分試作の評価結果、所望の特性が得られることを確認した。

以上の成果をもとに、現在、全体システムの詳細設計を進めている。H20 年度上期にベンチトップにて全体システムの原理実証を行い、その結果を反映させて、下期に筐体への組込み、装置化を図る。装置の基本特性(振幅、位相制御)を評価後、この開発装置を用いて、電波暗室にてマルチビーム形成実験を行うとともに、後述する指向性合成技術の評価試験を行う予定である。

4-3 光信号処理回路 (E/O, O/E 変換技術) の研究開発

4-3-1 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を、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るとは限らない。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。

4-3-2 高出力 O/E 変換器

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。これは、PD の特性として、入力する光入力パワーの 2 乗に比例した RF 出力電力が得られること、PD からの出力電力増加に伴い、システムの S/N 比とダイナミックレンジが向上すること、などによる。このため、PD は光の入力パワーに対して飽和しにくいことが必要となる。この目的のためには、まず PD 素子自体の飽和電流を高めるとともに、この PD 素子の出力を合成し、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 4-3-1 に示すような PD アレーを考える。

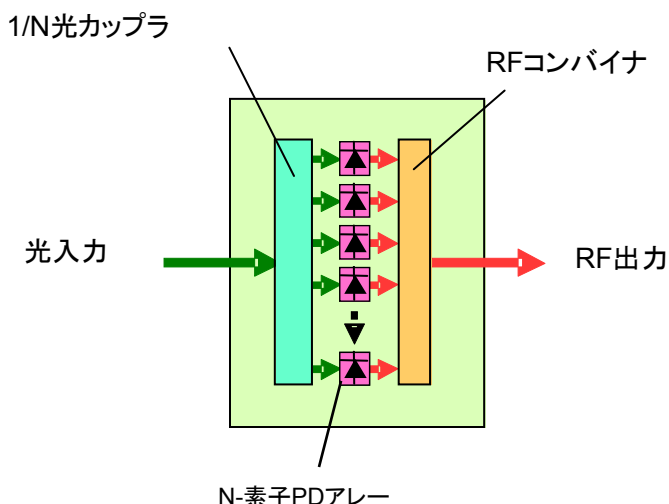


図 4-3-1 PD アレー

図 4-3-1 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.

4-3-3 PD 単体の高出力化

(1) 測定系

ここでは, まず, この PD アレーに用いる PD 素子の試作を行い, 素子単体としての特性評価を行った. PD 素子としては InGaAs 吸収層を用いた高感度の 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 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 4-3-2 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 , 変調度はほぼ 100% 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 4-3-3 に測定系の写真を示す.

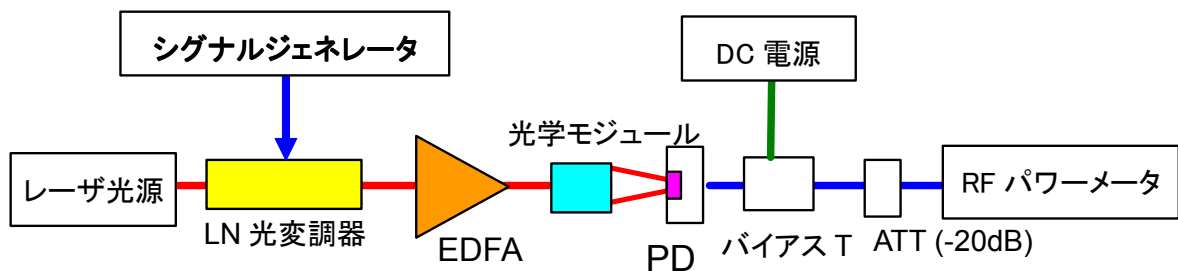


図 4-3-2 測定系

PDチップ写真

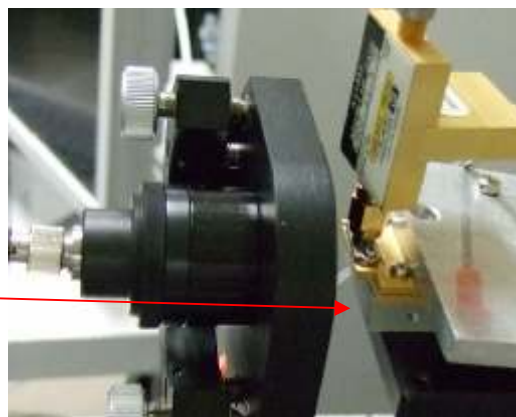
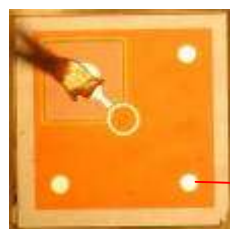


図 4-3-3 PD 素子の測定写真

(2) 評価結果

PD 単体の電気端子のインピーダンスは容量性になっており，そのまま 50Ω 測定系に接続すると整合がとれないため，大電力を得られない．ここでは，図 4-3-4 に示すような，オープンスタブによる整合回路を PD 出力端子に接続し，外部回路とのインピーダンス整合を図った．図 4-3-5 は，スタブによって PD のインピーダンスがどう変化するかをスミスチャート上に示したものである．スタブにより，周波数 5GHz において，インピーダンスがほぼ 50Ω にマッチングされていることが分かる．図 4-3-6 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．吸収層の厚さが $1.4\ \mu\text{m}$ の PD についても測定を行なったが，吸収層の厚さが $0.8\ \mu\text{m}$ のものの方が大きい出力電力が得られたので， $0.8\ \mu\text{m}$ 品のデータを示している．PD に印加する DC バイアスは 8V 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 $23.9\ \text{dBm}$ にしたとき，最大 RF 出力電力 $25.8\ \text{dBm}$ ($380\ \text{mW}$) が得られた．このときの RF 出力電流値は $247\ \text{mA}$ (p-p) である．図 4-3-7 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．RF 出力電力 $24.4\ \text{dBm}$ 時に電源効率 40.4% が得られている．

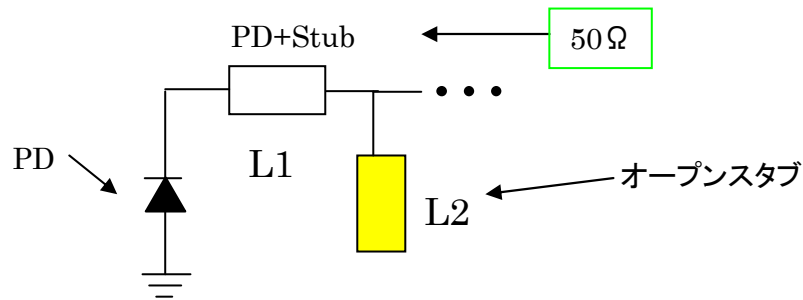


図 4-3-4 整合回路の構成

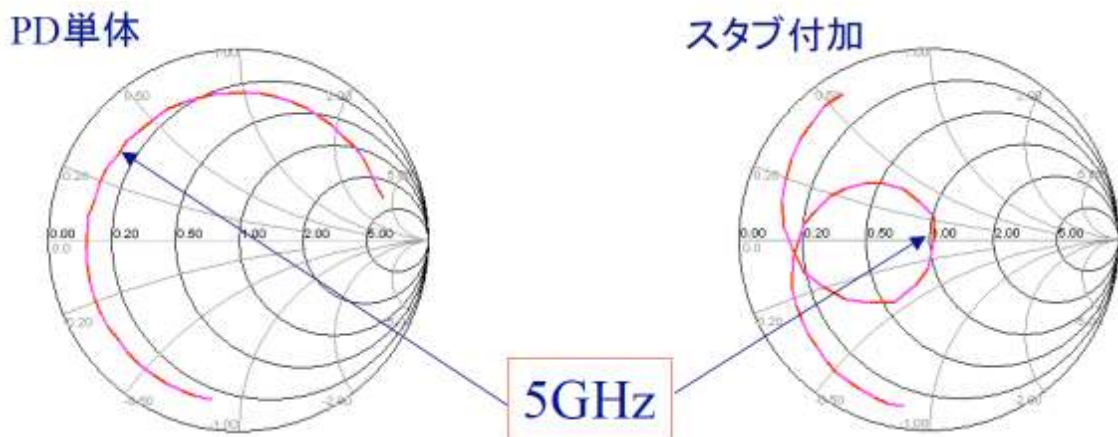


図 4-3-5 スタブによるインピーダンスの変化

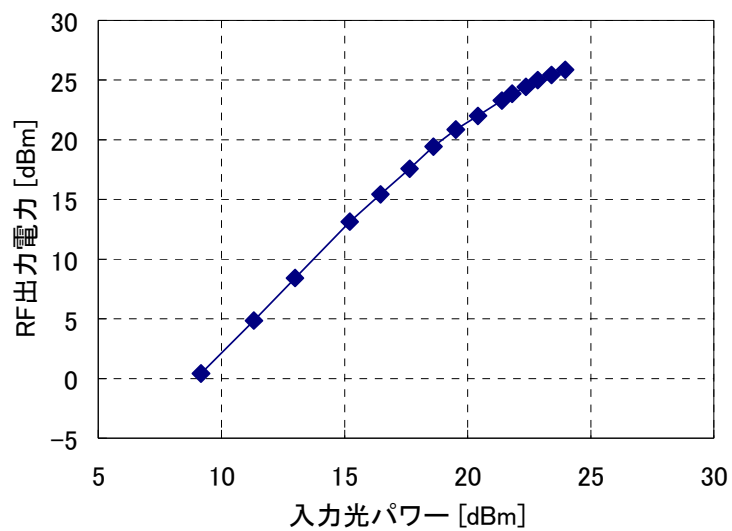


図 4-3-6 RF 出力電力測定結果

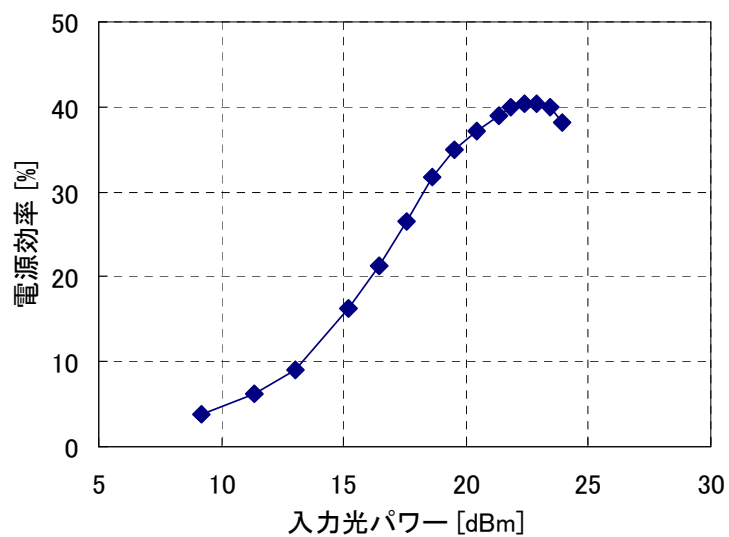


図 4-3-7 電源効率測定結果

4-3-4 PD アレーによる高出力化

(1) 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、図 4-3-8 に示すように、おおまかに 2 通りの方法が考えられる。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。表 4-3-1 に各方式の特徴をまとめて示す。

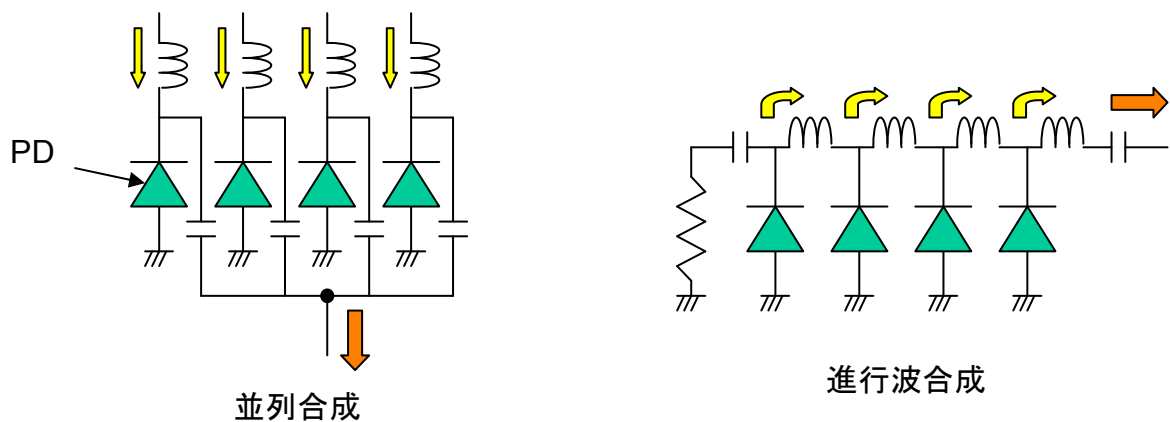


図 4-3-8 PD アレーの方式

表 4-3-1 各方式の特徴

	入力信号位相差	PD の動作	回路のインピーダンス	動作帯域
並列合成方式	同相なので調整容易	各 PD の動作条件が均一で安定	PD の数により変化	整合回路接続により狭帯域
進行波合成方式	遅延時間の調整必要	位置により動作条件が異なる	PD の数によらず一定	広帯域

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が最適と考え、PD 出力電力の合成を検証する実験を行なった。図 4-3-9 に、PD アレーの構成と、各構成部品の写真を示す。W 級出力を目標とし、PD の合成数は 4 個とした。この構成において、光入力信号は光分岐回路でほぼ同じ電力に 4 分配される。この光信号はテープ芯線による光ファイバアレーで伝送され、それぞれの PD にほぼ同位相で入射する。光ファイバアレーの端部は所要の間隔を得るため V 溝基板に固定し、先端に GI 型のファイバレンスを融着した。これにより各ファイバからの光信号は集光され各 PD に入射する。PD からの RF 出力は電力合成回路によって合成され、出力される。電力合成回路は PD からの RF 出力をほぼ同位相で合成するため、ウィルキンソン・カップラを 3 つ組み合わせた構成とした。電力合成回路はインピーダンス

変成回路も兼ねており，出力端子において 50Ω に整合するようにしている．

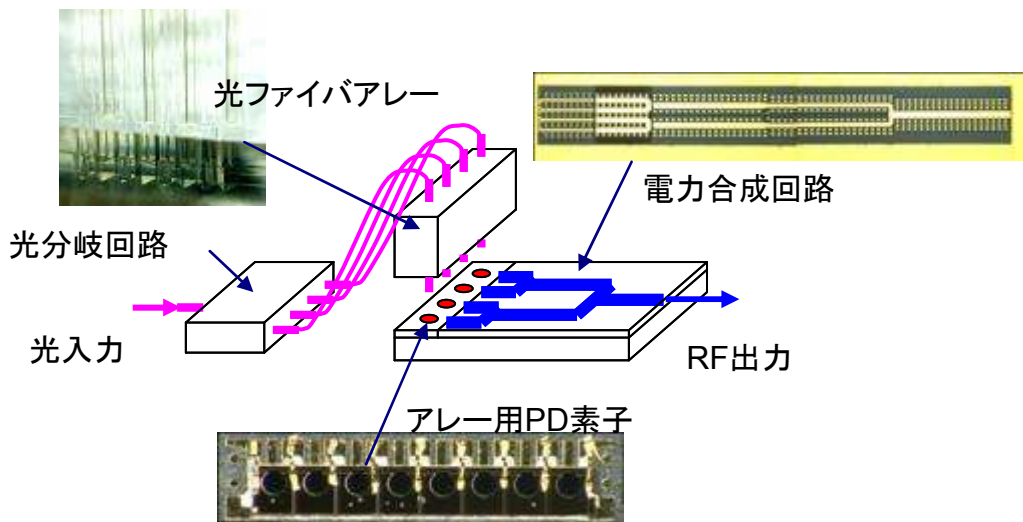


図 4-3-9 PD アレーの構成と構成部品の写真

(2) 評価結果

図 4-3-10 に，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．ここでは，図 4-3-9 に示した構成で，定盤上での測定を行なった．PD 素子は，吸収層の厚さが $0.8\ \mu\text{m}$ のものを用いた．バイアス電圧は 8V であり，RF 周波数は 5GHz である．測定系は図 4-3-2 に示したものと同様である．図において，横軸は PD 素子に入力する全光パワーであり，縦軸はトータルの RF 出力電力である．図より入力光パワーを 30.4dBm としたとき，最大 RF 出力電力 30.0dBm (1.007 W) が得られている．これにより，PD をアレー合成することにより，W 級出力の O/E 変換器を得られることが実証された．図 4-3-11 に，この PD アレーの電源効率測定結果を示す．最大 RF 出力電力時に電源効率 30.2% の値が得られている．

PD 単体では RF 出力電力の最大値が 25.8 dBm (380 mW) 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 30.0 dBm (1.007 W) であった．これは，4 合成 PD アレーの出力が，単体での RF 電力の 4 倍よりも小さな値になっていることを示している．また，PD 単体での電源効率が最大 40.4% であったのに対し，PD アレーでは最大 30.2% にとどまっている．これらの原因として，アレーに用いた各 PD 素子の特性ばらつき，光分岐回路からの入力光や RF 電力合成回路からの RF 出力に位相ばらつきがあること，などが考えられる．今後，詳細検討していく予定である．

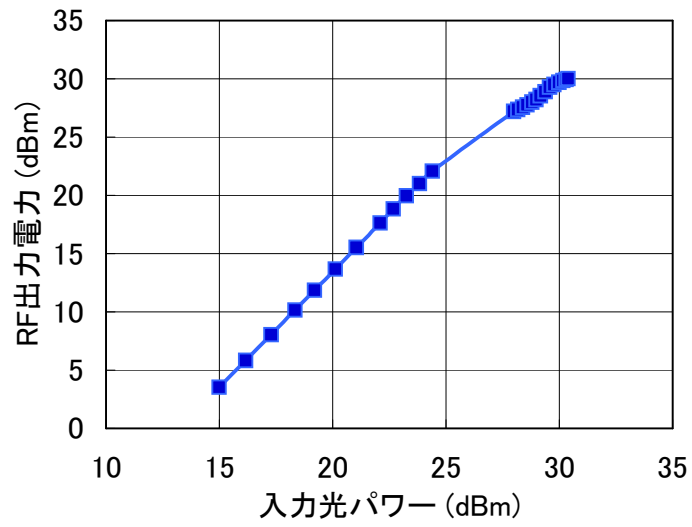


図 4-3-10 4 合成 PD アレーの RF 出力電力測定結果

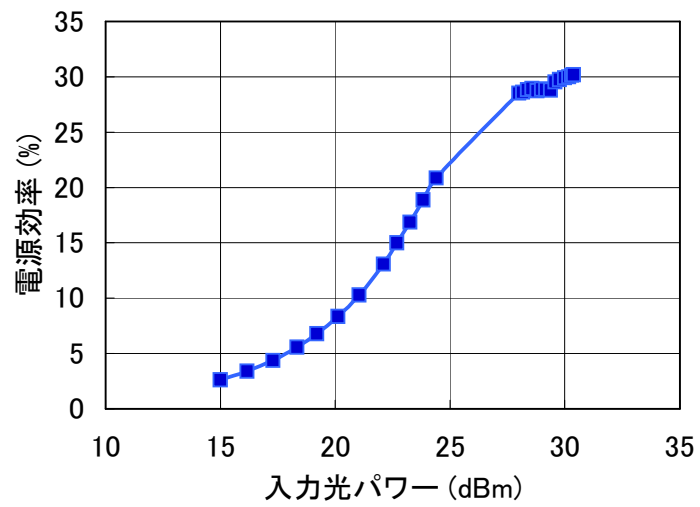


図 4-3-11 4 合成 PD アレーの電源効率測定結果

(3) モジュール化の検討

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としている。このため、O/E 変換器は小型であることが要求される。PD アレーは高出力が期待できるが、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。したがって、これらを一体化し、小型なモジュールとすることが求められる。ここでは、PD アレーのモジュール化について、検討を行なった。

まず、モジュール化のために、全体を 1 パッケージに収めることを考えた。パッケージはハーメチック封止が可能な金属パッケージとした。PD 素子は図 4-3-9 に示したように、複数の素子を 1 チップに作製し小型化を図った。これにより、各 PD に入射する光信号ビームのアライメントも容易にした。光分岐回路は図 4-3-12 に示すようなプリズムを用いた。大きさは $1.5\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ (厚さ 4mm) に収まる大きさであり、非常に小型である。

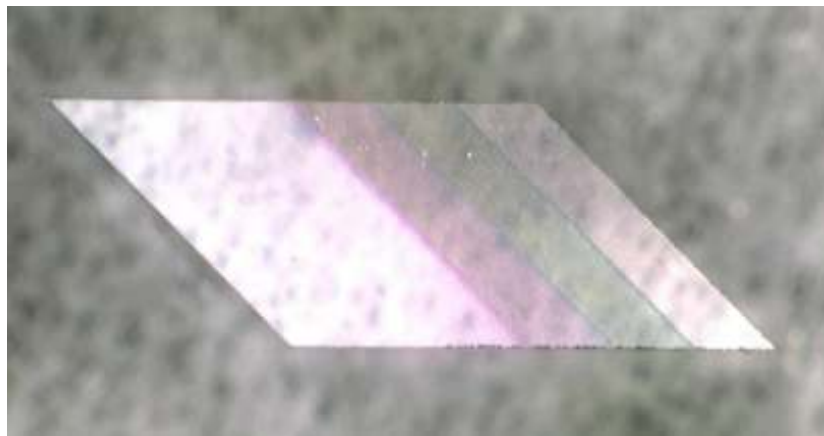


図 4-3-12 4分岐プリズムの写真

電力合成回路については、(1)に示したものと同一構成としたが、図 4-3-13 に示すように、バイアス線路を含んだ上で各回路を最適化し小型化した。大きさは $22.5\text{mm} \times 4.9\text{mm}$ (厚さ 0.2mm) である。

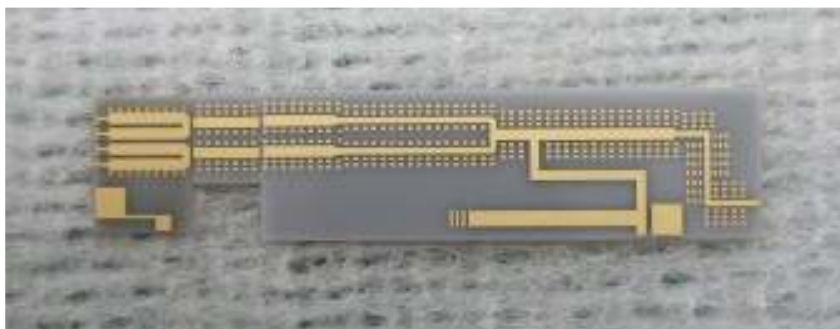


図 4-3-13 電力合成回路の写真

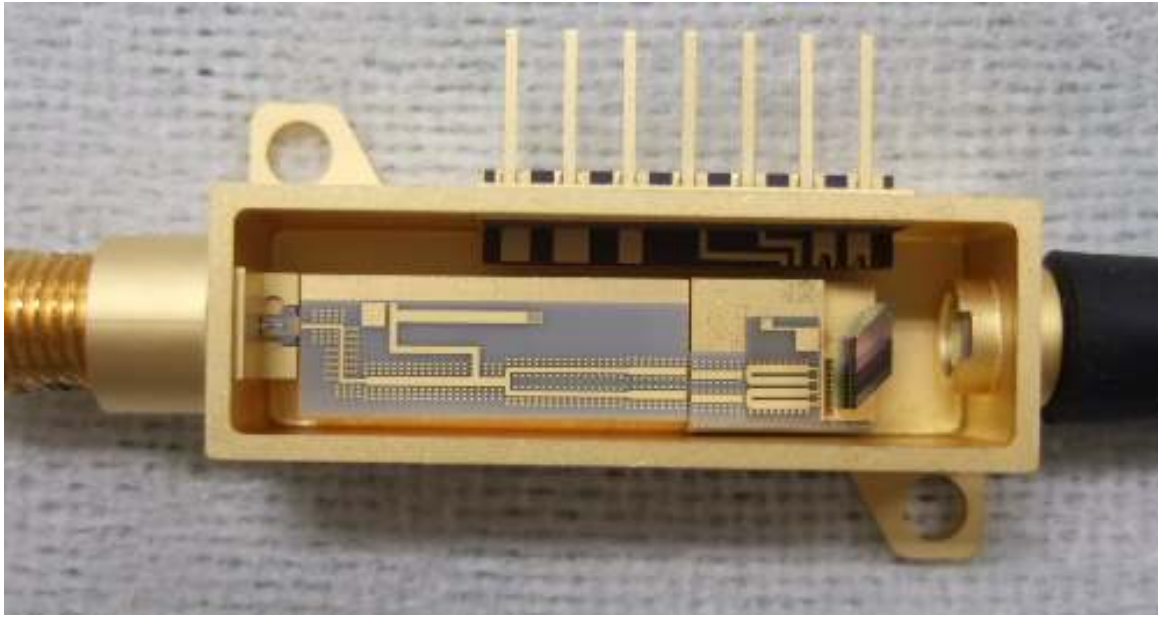


図 4-3-14 PD アレーモジュールの正面写真



図 4-3-15 PD アレーモジュールの全体写真

さらに、モジュールの小型化を図るため、入力光の光端子の向きと出力する RF の端子の向きをパッケージの両側に一直線に並ぶようにした。このため、PD チップをパッケージ内部に縦に置く構成とした。さらに素子の冷却が行なえるように、ペルチェ素子をパッケージ内に収め、全体を一体化した。図 4-3-14 に組み立てたモジュールの正面写真を、図 4-3-15 にモジュール全体の写真を示す。パッケージの直方体の部分の寸法は $11\text{mm} \times 33.5\text{mm} \times 10\text{mm}$ （厚さは蓋を含む）と非常に小型である。今後、モジュール化した場合の性能評価を行なっていく予定である。

4-3-5 PD の動作級の最適化の検討

(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、素子の性能劣化や破壊につながる。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 に半波整流形状の波形の電流を流すには、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 4-3-16 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。

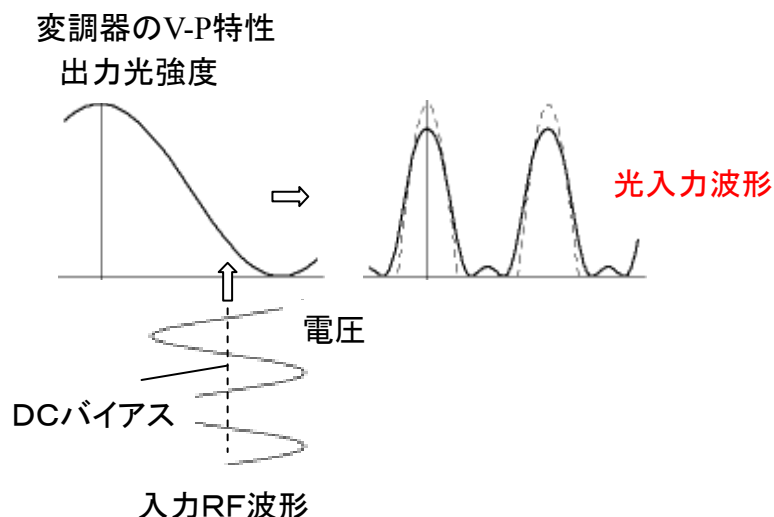


図 4-3-16 LN 光変調器による擬似半波整流光信号の生成

(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 4-3-3 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 4-3-17 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。測定系は図 4-3-2 に示したものと同様のものであるが、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 パワーメータに換えて 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 5GHz 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 22.5dBm 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 4-3-18 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 5GHz 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。しかし、この値は本来の B 級動作の効率最大値に比べると小さい値である。これは、PD に与える光信号が正確な半波整流形状ではなく、擬似的な形状となっていることが一因と考えられる。今後、さらなる高効率化のための検討を行なう予定である。

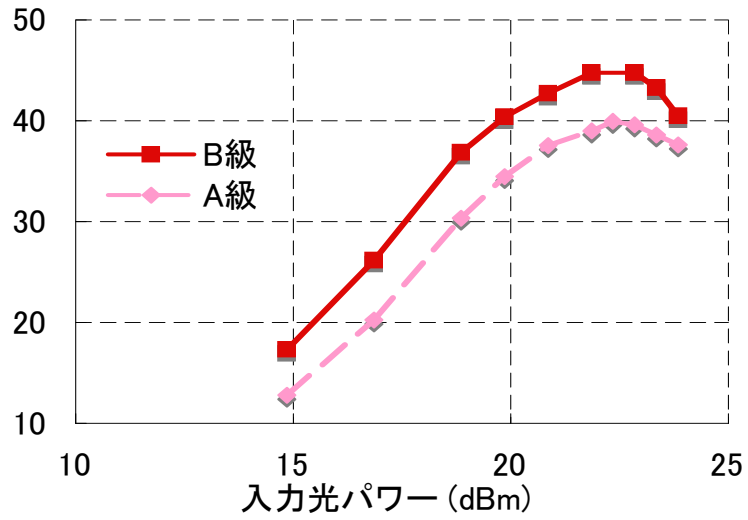


図 4-3-17 RF 電源効率測定結果

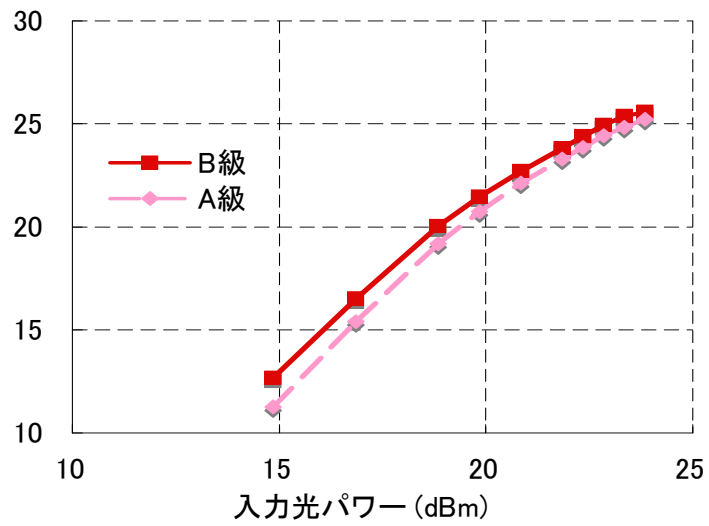


図 4-3-18 RF 出力電力測定結果

4-2-6 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 単体の評価
高出力 PD の最適化を行ない、5GHz において、RF 出力電力最大値 380mW を得た。
- 高出力 PD アレーの評価
PD 素子を 4 合成した PD アレーを試作し、5GHz において、RF 出力電力最大値 1W を得た。
- PD アレーのモジュール化の検討
PD アレー小型化のためのモジュール化を検討し、4 素子合成 PD アレーをパッケージ寸法 11mm×33.5mm×10mm に収めることができることを示した。
- PD 動作級最適化の検討
PD を擬似的に B 級で動作させることにより、従来の A 級動作よりも大きい、電源効率 44.8% の値を得た。
- 今後の課題
今後、モジュール化 PD アレーの特性評価を含めた、アンテナ給電用 O/E 変換器としての伝送実証を行う予定である。

4-4 指向性合成技術の研究開発

4-4-1 はじめに

平成18年度までに、光信号処理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、S/Wを作製した。また、本S/Wを用いた光波の波面シミュレーション及び、生成光波面によるアンテナ放射パターンの解析技術を確立した。光制御BFNにより形成した開口分布の実測値をもとに、オフラインにて放射パターンを求め、サイドローブレベル-20dB以下とできることを実証した。

本年度は、光信号処理回路内の光ビーム伝搬からアンテナ放射パターンまでの解析技術の開発を継続するとともに、サイドローブレベル-25dB以下を実現するための検討を行った。

4-4-2 指向性合成技術（低サイドローブ化）

昨年度までに、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4-4-1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、アンテナのサイドローブが抑圧可能な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形成することが可能となる。

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により、サイドローブレベルを<-25 dB以下にできることを示した。

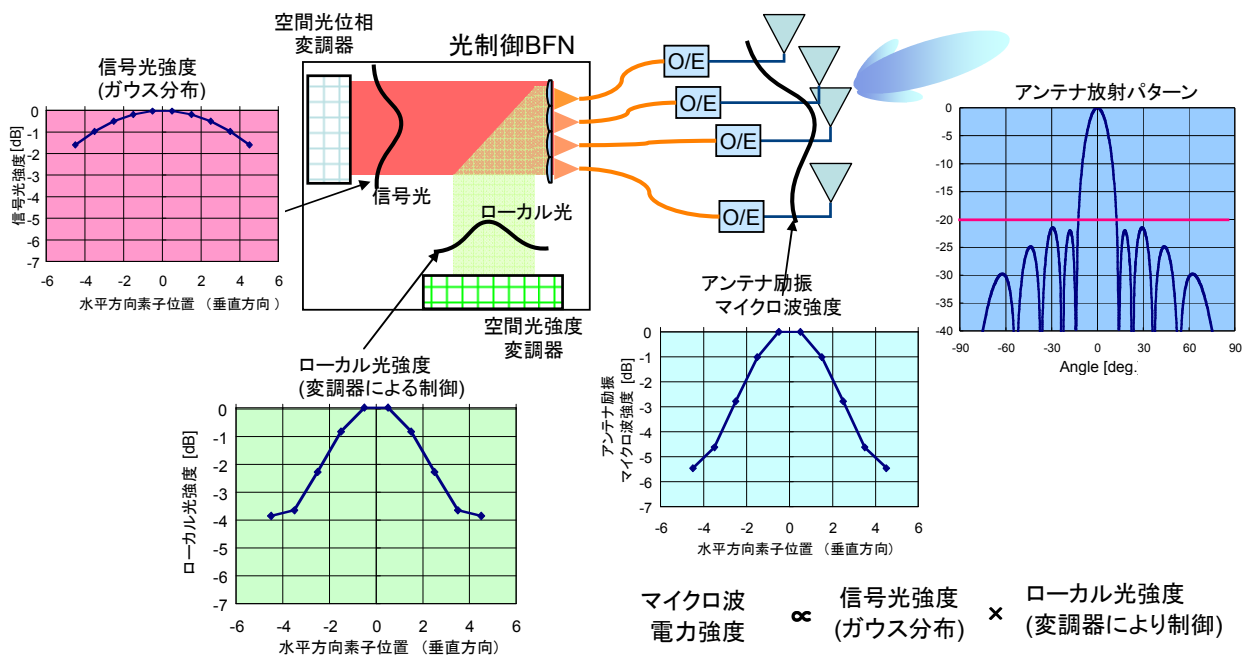


図 4-4-1 信号光/ローカル光とマイクロ波強度分布の関係の説明図

(1) 解析結果 (サイドローブレベル-25dB 設計)

本節では、サイドローブレベル-25dB 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、H18 年度まで実施した正方配列、矩形開口アレーから、3 角配列、円形開口に変更した。また、アンテナ素子数は開口形状の変更に伴い、110 素子として検討を行った。アレーアンテナのアンテナ素子の配列を図 4-4-2 に示す。なお、以下の説明では素子番号を図 4-4-2 に示す番号順に 1, 2, …, 110 とおく。

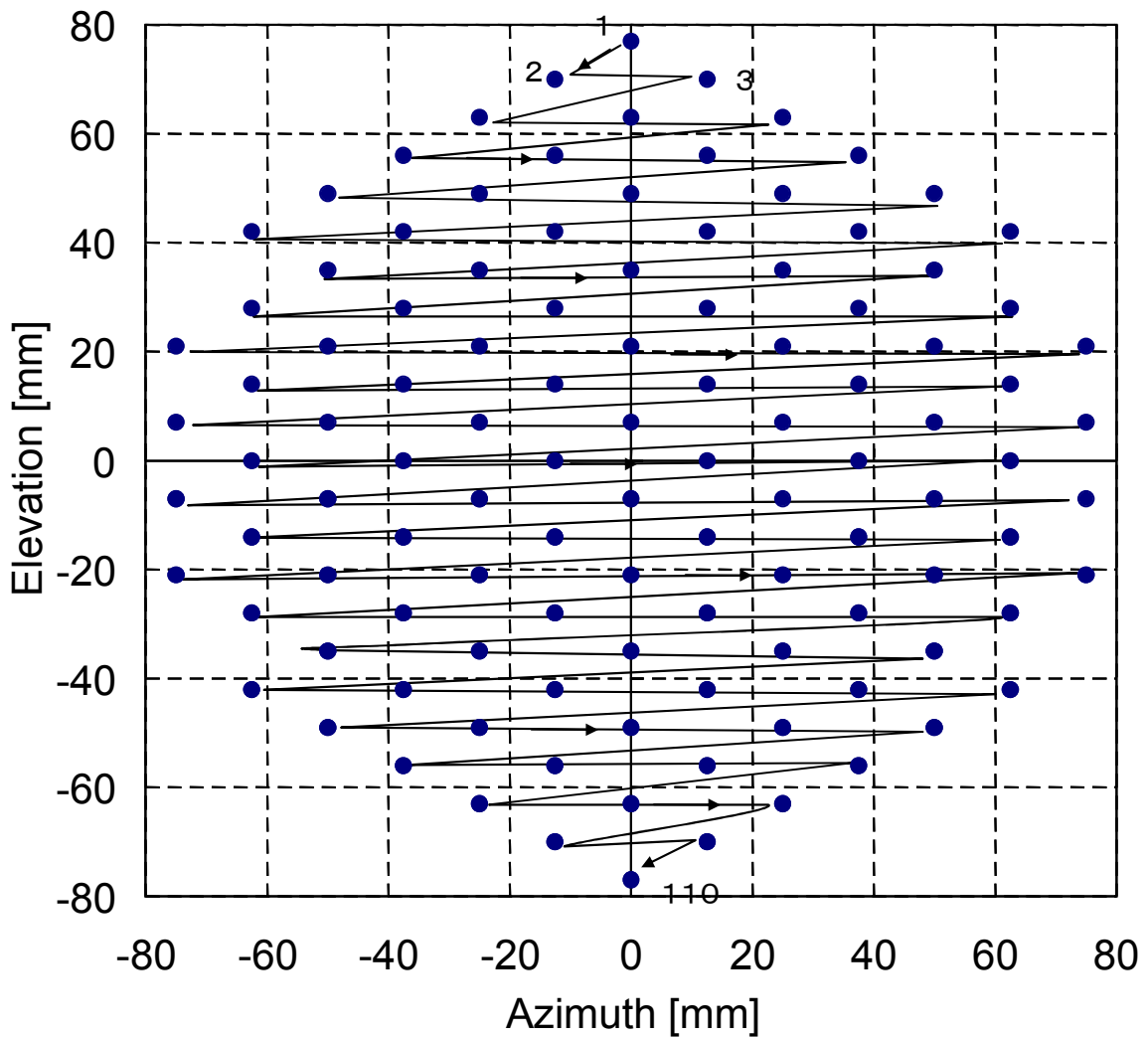


図 4-4-2 アンテナの条件

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 4-4-3 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、サンプリング光ファイバアレーにてサンプリングされる光強度はガウシアン分布となる。このため、ローカル光ビームの強度分布を光強度変調器にて制御した。図 4-4-4 に光強度変調器での光減衰量を示す。

図 4-4-5 に、図 4-4-3 の信号光およびローカル光分布から求めたアレー開口分布を、また図 4-4-6 に、図 4-4-5 の開口分布より計算したアレーファクタを示す。図 4-4-6 (a) に 2次元分布を、(b) に水平(Azi)、垂直(Elе)方向のカット面分布を示している。図 4-4-5, 4-4-6 の結果から、ローカル光の強度分布を空間光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-25dB のアレーファクタを達成できることが示された。

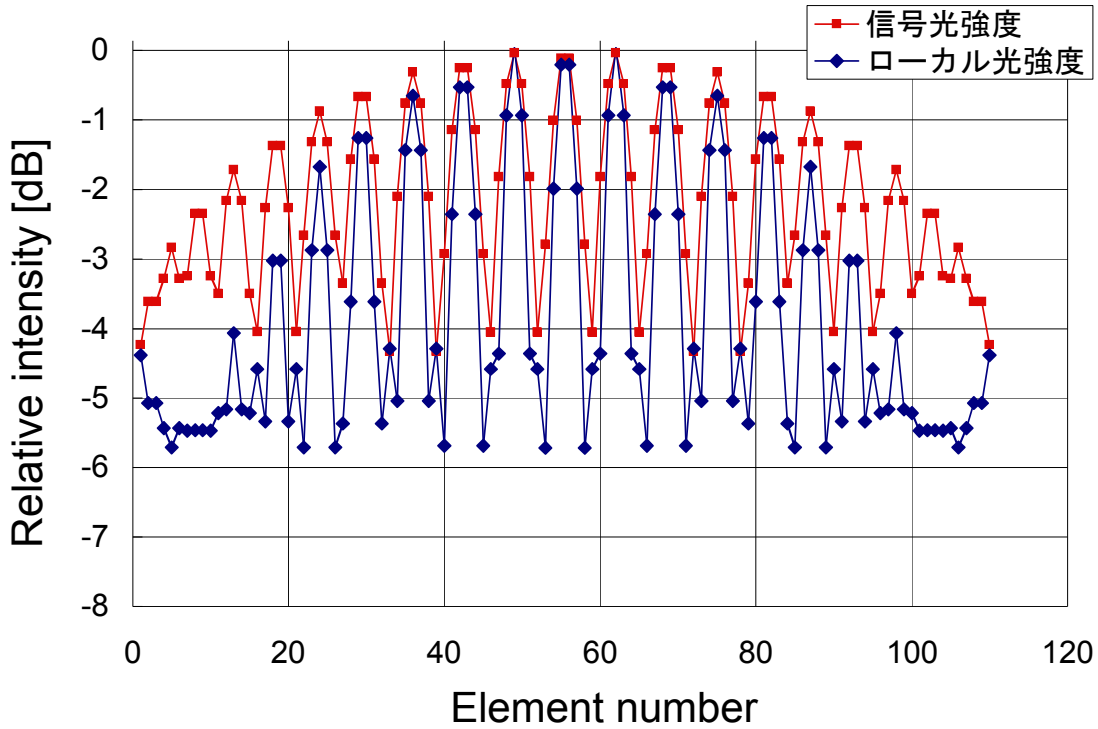


図 4-4-3 サイドローブ-25dB 設計時の信号光およびローカル光の強度分布

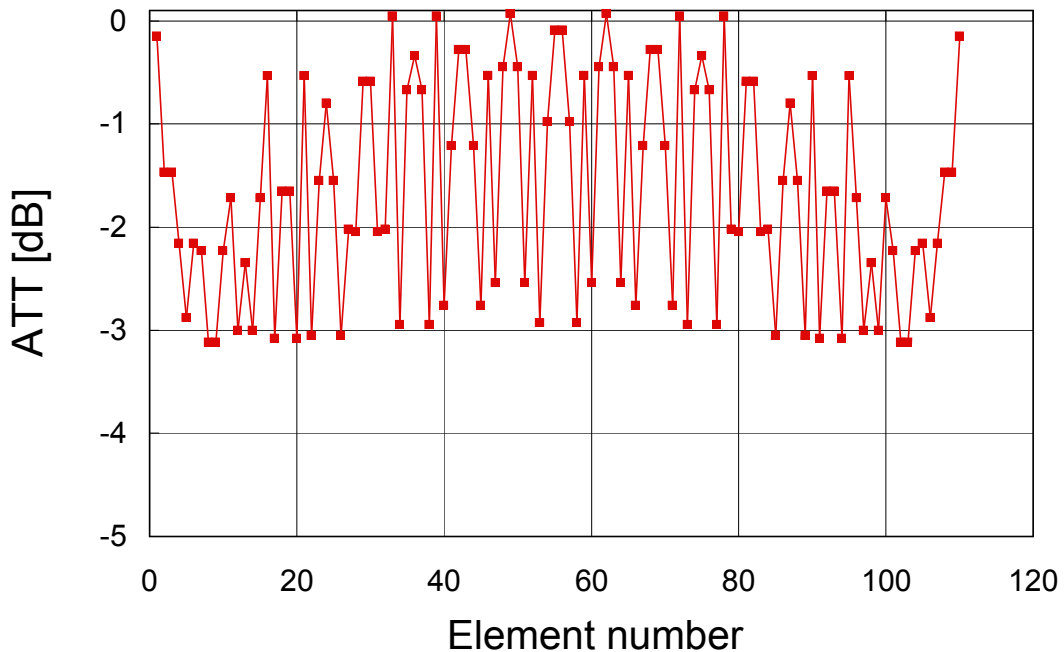


図 4-4-4 サイドローブ-25dB 設計時のローカル光に対する空間光強度変調器による減衰量

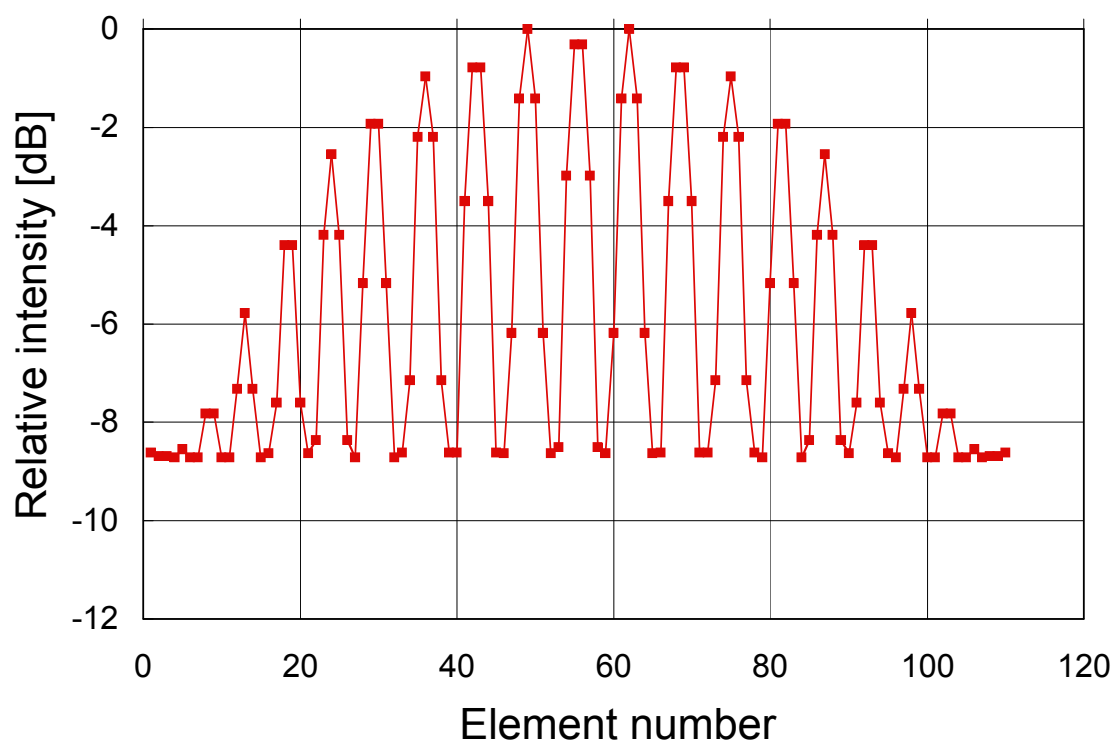
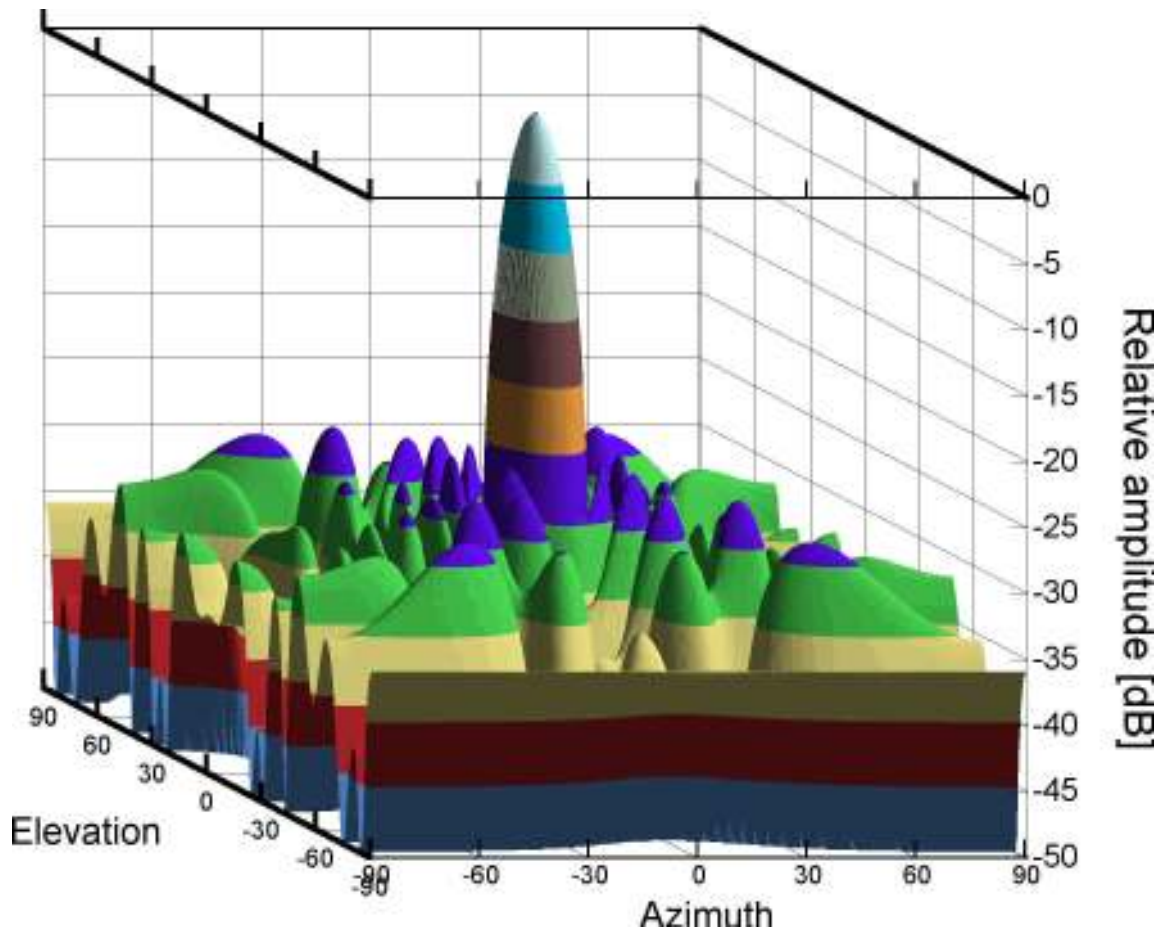
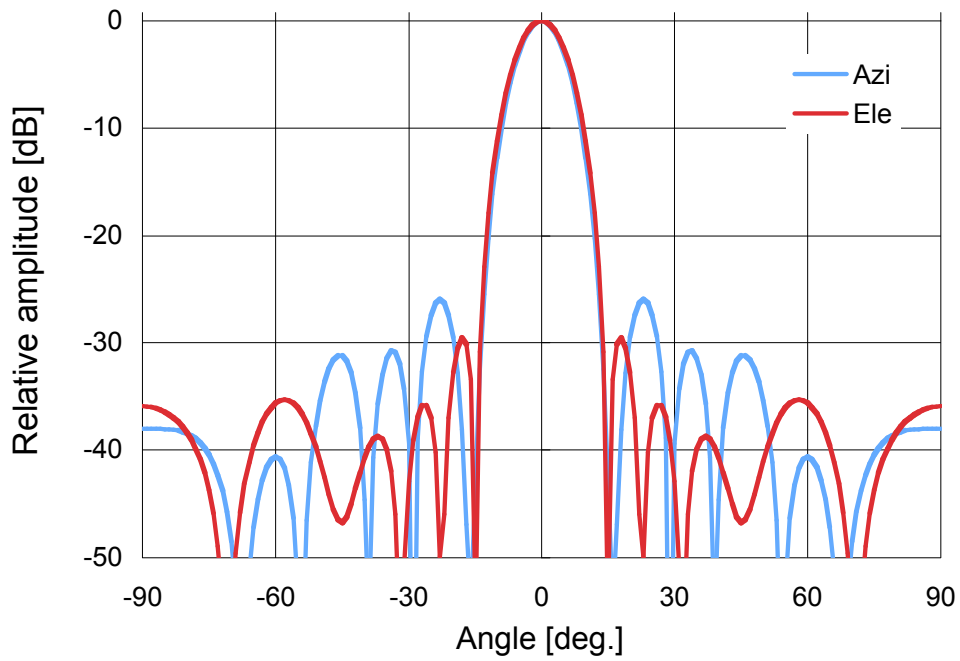


図 4-4-5 サイドローブ-25dB 設計時の光電変換されたマイクロ波強度分布（開口分布）



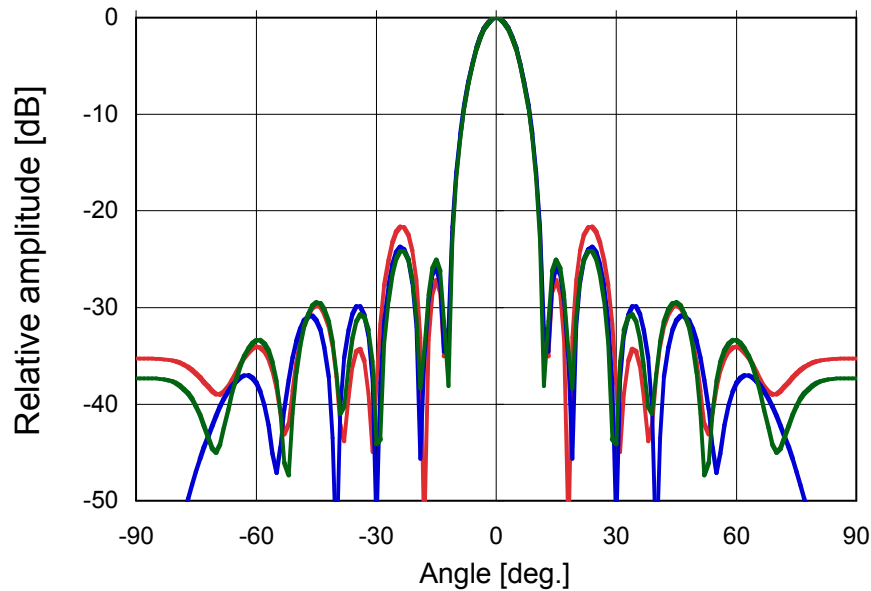
(a) 2次元分布



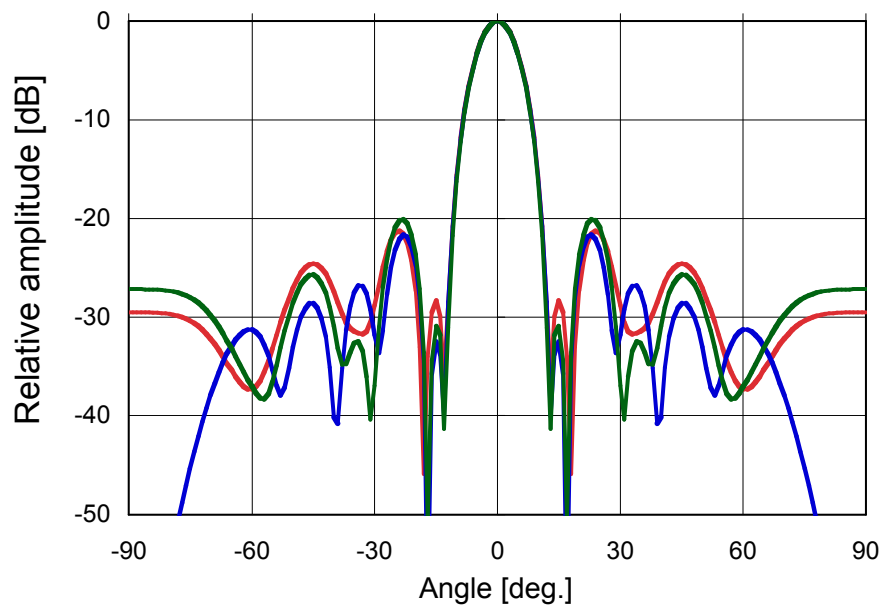
(b) カット面パターン

図 4-4-6 アレーファクタ

以上のように、理論的にはサイドローブレベル -25dB 以下が得られる。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があるとき、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 4-4-7 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 4-4-7(a) は振幅に標準偏差 $\sigma=1\text{dB}$ 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、 $\sigma=1\text{dB}$ 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。



(a) 誤差 $\sigma = 1 \text{ dB}$



(b) 誤差 $\sigma = 2 \text{ dB}$

図 4-4-7 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 で設計したときのシミュレーション結果を示す。

サイドローブレベルを低くすると通常開口分布は中心に集中するので、ここでは信号光ビームの空間光強度変調器における変調前のビームサイズを狭くした。図 4-4-8 は信号光とローカル光の強度分布、図 4-4-9 は図 4-4-8 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減衰量の設定値、図 4-4-10 は図 4-4-8 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 4-4-10 の開口分布から求めたアレーファクタを図 4-4-11 に示す。図 4-4-11(a)に2次元分布、(b)にカット面分布を示す。図 4-4-11 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。

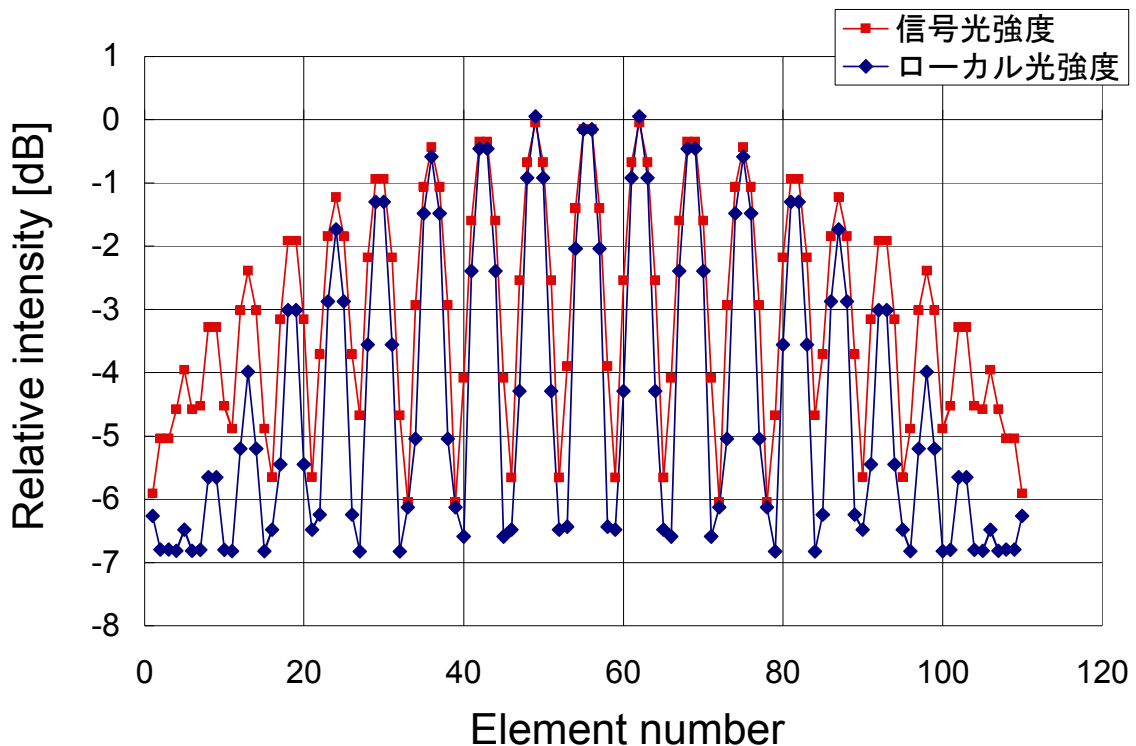


図 4-4-8 サイドローブ-30dB 設計時の信号光およびローカル光の強度分布

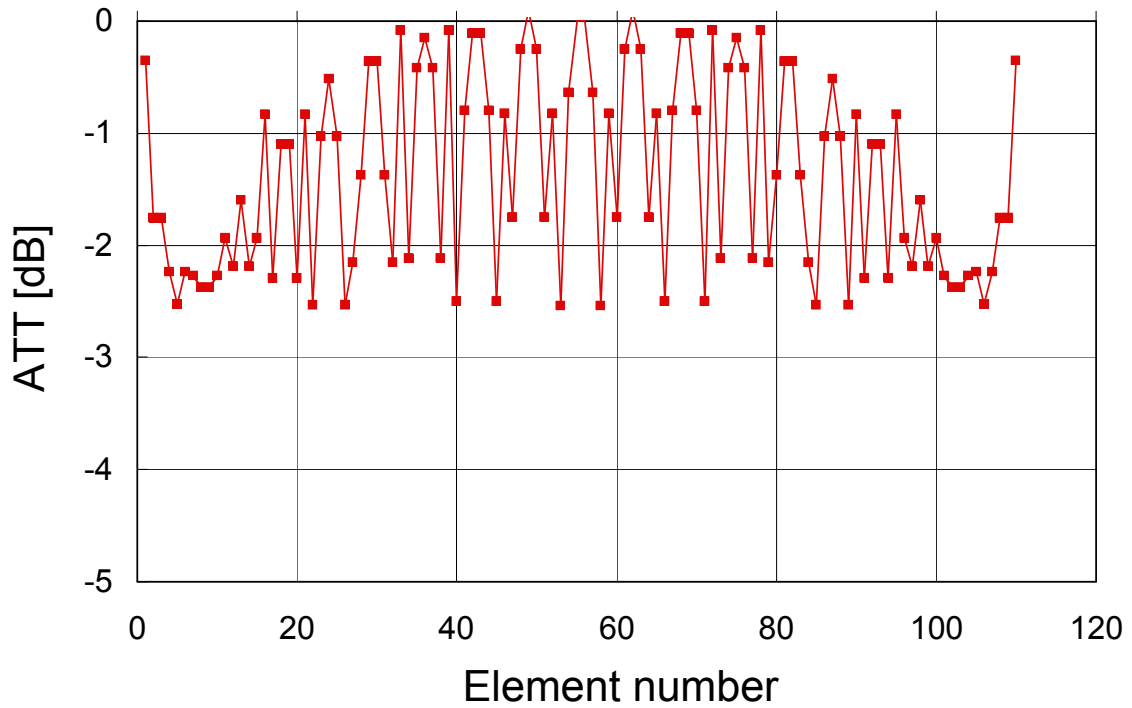


図 4-4-9 サイドローブ-30dB 設計時のローカル光に対する空間光強度変調器による減衰量

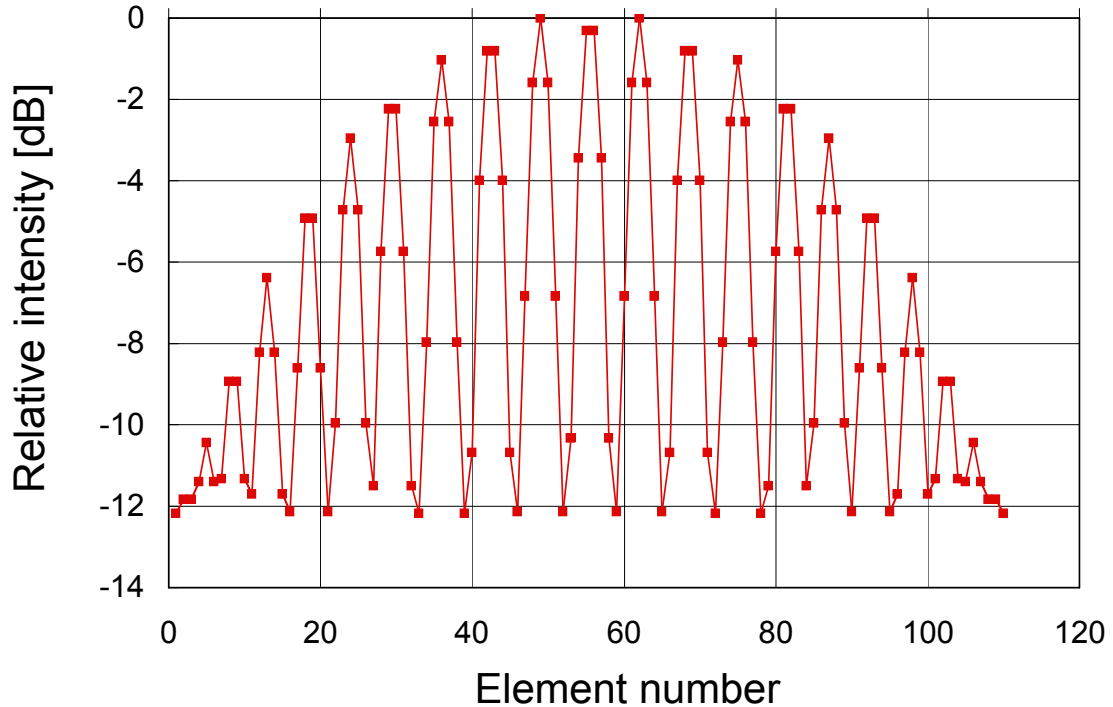
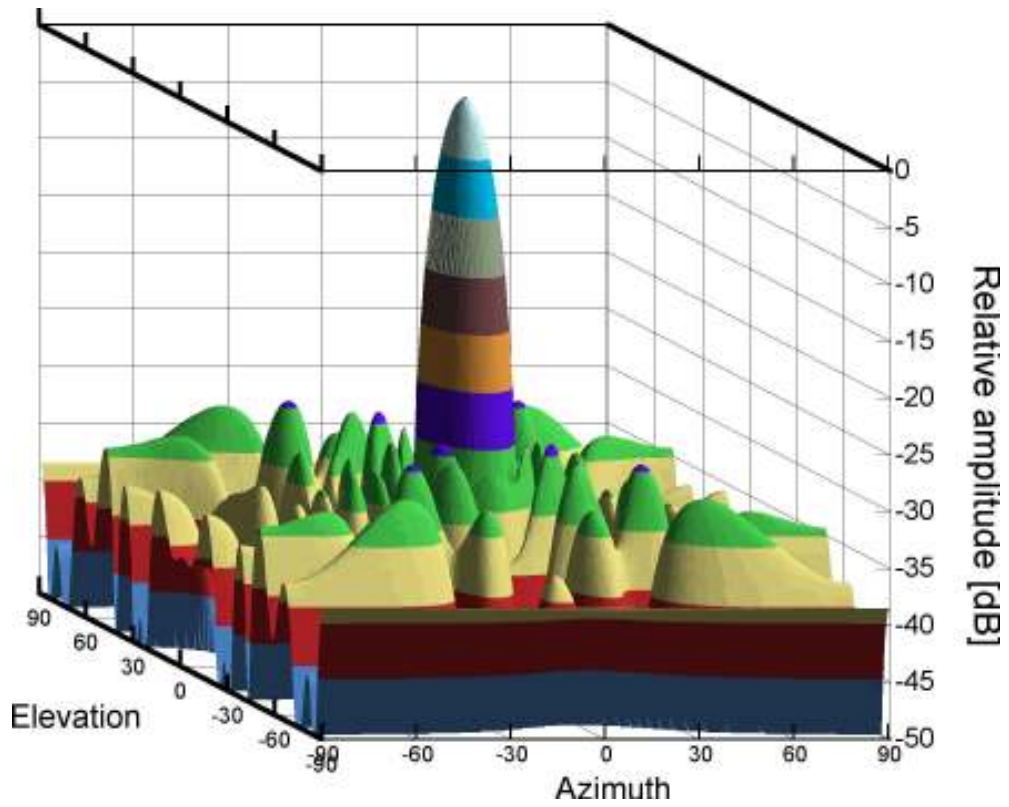
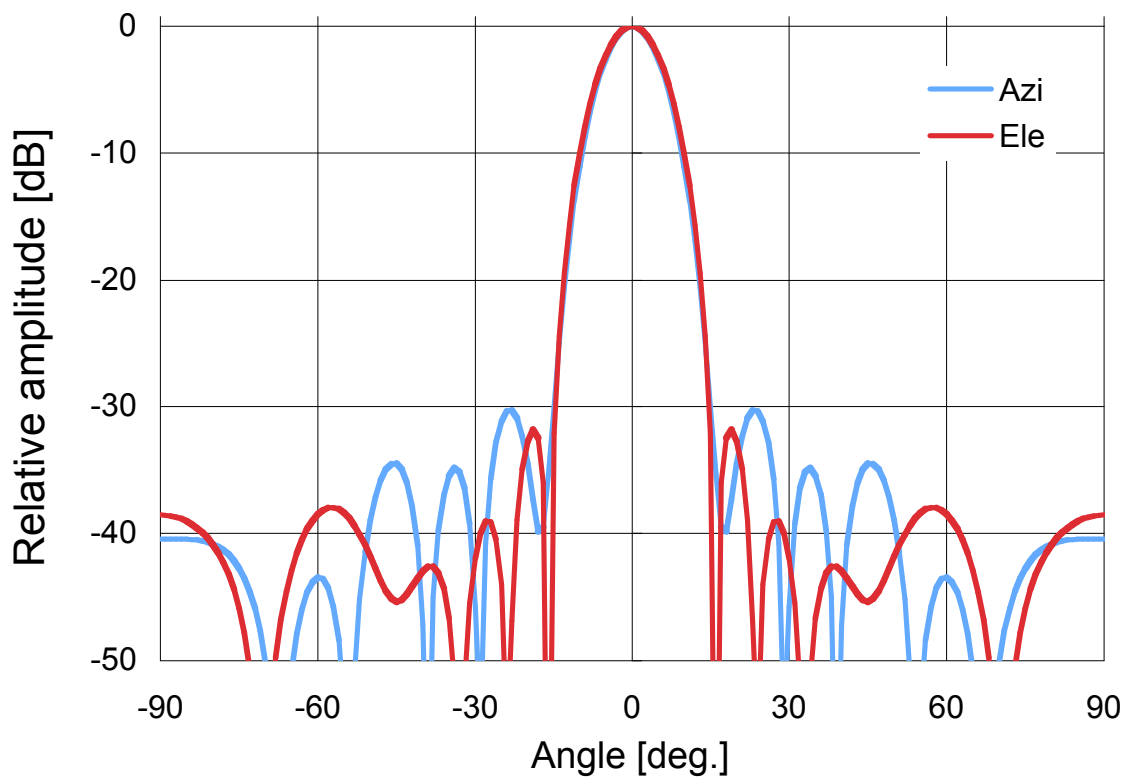


図 4-4-10 サイドローブ-30dB 設計時の光電変換されたマイクロ波強度分布（開口分布）



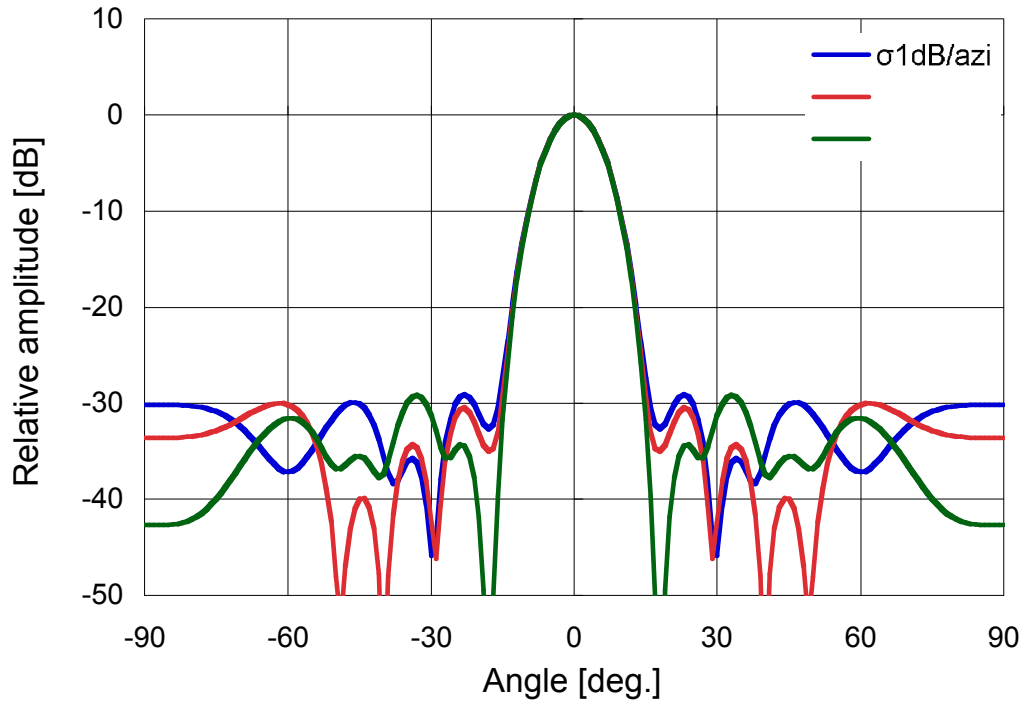
(a) 2次元分布



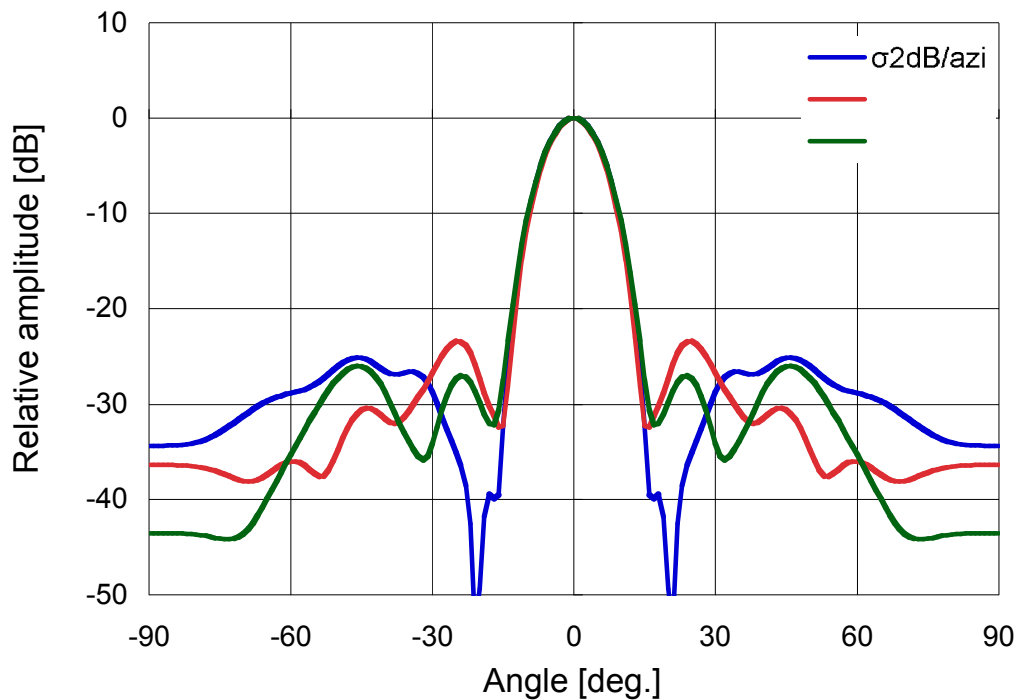
(b) カット面パターン

図 4-4-11 サイドローブレベル - 30dB 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 4-4-12(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 -30dB 程度にマージンをとることにより、 2dB 程度の結合効率バラツキがあっても、サイドローブレベル -25dB 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 4-4-12 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

4-4-3 まとめ

光信号処理回路内の光ビーム伝搬から、アンテナ放射パターンまでの解析技術の開発を継続するとともに、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。

4-5 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）

- ・光制御ビーム形成回路

光の波面劣化を空間光位相変調器により制御し、フィードバック補正する方式について、基本原理と有効性の検討結果を示した。

(2) 光信号処理回路（光多重化技術／マルチビーム化技術）

- ・マルチビーム形成方式

開口分割アレーに代えて、アンテナ開口を分割しないマルチビーム形成方式を示した。

- ・ビーム形成回路の部品評価

エタロンフィルタ、10 波光バンドパスフィルタ、光ファイバアレーの部分試作を行ない、基本特性の評価結果を示した。

(3) 光信号処理回路（E/O, O/E 変換技術）

- ・高出力 PD 単体の評価

高出力 PD の最適化を行ない、5GHz において、RF 出力電力最大値 380mW を得た。

- ・高出力 PD アレーの評価

4 素子合成 PD アレーにおいて、5GHz において、RF 出力電力最大値 1W を達成した。

- ・モジュール化の検討

PD アレーを 1 パッケージにモジュール化する検討を行ない、小型化できる見通しを得た。

- ・PD 動作級最適化の検討

PD を擬似的に B 級で動作させることにより、電源効率を従来の A 級動作よりも大きくできることを示した。

(4) 指向性合成技術

- ・解析技術

光信号処理回路内の光ビーム伝搬から、アンテナ放射パターンまでの解析技術の開発を継続中である。

- ・サイドローブレベルの検討

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 達成の見込みを得た。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

本研究開発に関する今年度に投稿した論文・学会発表等のリストを以下にまとめる。

1. 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,” 2007 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-14-3, 2007 年9月
2. 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,” 2007 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-14-1, 2007 年 9 月.
3. 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,” 2007 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-14-2, 2007 年 9 月
4. 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 年 10 月.
5. 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,” 2008 年電子情報通信学会 総合大会, C-14-13, 2008 年 3 月
6. 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,” 2008 年春季応用物理学関係連合講演会, 28a-ZQ-12, 2008 年 3 月.
7. Akiyama Tomhiro, Suzuki Jiro, Ando Toshiyuki, Sakimura Takeshi, Hirano Yoshihito, “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 (採択済み, 2008 年 7 月講演予定)
8. Nagatsuka, Itakura, Sakai, Hirano, “High-Power Microwave Photodiode Array for Radio over Fiber Applications,” OECC/ACOFT 2008 Conference (採択済み, 2008 年 7 月講演予定)