

平成16年度
研究開発成果報告書

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

委託先：三菱電機(株)

平成17年5月

情報通信研究機構

平成 16 年度 研究開発成果報告書

「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	7
2-2-1 最終目標	7
2-2-2 中間目標	7
2-3 研究開発の年度別計画	8
3 研究開発体制	9
3-1 研究開発実施体制	9
4 研究開発実施状況	
4-1 光信号処理回路技術(光波面生成技術)の研究開発	10
4-1-1 はじめに	10
4-1-2 光信号処理回路のトレードオフ	11
4-1-3 要素技術の開発	20
4-1-4 まとめ	29
4-2 光信号処理回路技術(E/O, O/E 変換技術)研究開発	30
4-2-1 はじめに	30
4-2-2 E/O,O/E 変換装置のトレードオフ	30
4-2-3 要素技術の開発	34
4-2-4 まとめ	35
4-3 指向性合成技術の研究開発	36
4-3-1 はじめに	36
4-3-2 指向性合成技術における技術課題	36
4-3-3 まとめ	47
4-4 総括	48
5 参考資料・参考文献	
5-1 研究発表・講演等一覧	

1 研究開発課題の背景

(社会的・経済的・技術的背景)

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

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

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

近年の技術革新や市場ニーズの変化などにより、今後計画されている衛星通信サービスでは、ブロードバンド衛星通信サービス、移動体衛星通信サービスを行うことがトレンドとなっている。また、そのサービス提供地域が、いずれも国内だけではなく、複数国をカバーする地域、又は、全世界を対象としている点も共通したトレンドである。こうした背景には、世界的なインターネット及び移動通信の爆発的普及や地上インフラの発展により、地上と衛星の競争領域の拡大があると考えられる。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、対災害性、緊急性に対するニーズは高く、自動車のみならず、船舶、航空機などに対する広帯域の通信手段としては、他に代替器手段がないことから、単に経済的な観点からだけでなく将来的にもサービス提供が必要となる基盤的な情報通信インフラとして衛星通信は重要である。さらに、面積カバー率 100%のブロードバンド移動通信サービスを実現する唯一の手段であり、デジタル・ディバイドの是正に有効である。

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

(研究開発課題全体の目的)

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

(1) マルチビーム化

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

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

(2) 地上局の小型化

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

(3) 自在なビーム制御

衛星、国際サービスを提供する場合、現状では需要の高い地域を予め固定ビームでカバーするような衛星の設計を行っているが、10～15年という衛星の運用期間中に対象地域内の各国の

経済情勢や地上インフラの整備状況が変化し、当初想定していた需要と大きく異なっていくことも考えられる。このような場合に対処するためには、衛星打ち上げ後にもビームのカバレッジを変更できるようにしておくことが必要である。

(4) 柔軟な回線設定

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

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

以上のような要求を実現させる手段として、フェーズドアレーアンテナ装置によるビーム形成技術は有効であり、様々な研究・開発が進められている。フェーズドアレーアンテナを用いることにより、上述のようなメリットを享受することが可能となる。より高いサービスを実現するために、フェーズドアレーアンテナ装置に対して、さらなる多ビーム化、大規模アレー化、高周波数化が必要となる。その一方、衛星の搭載可能質量、容積、消費電力の制限から、装置の小型化・軽量化・低消費電力化が望まれている。

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

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

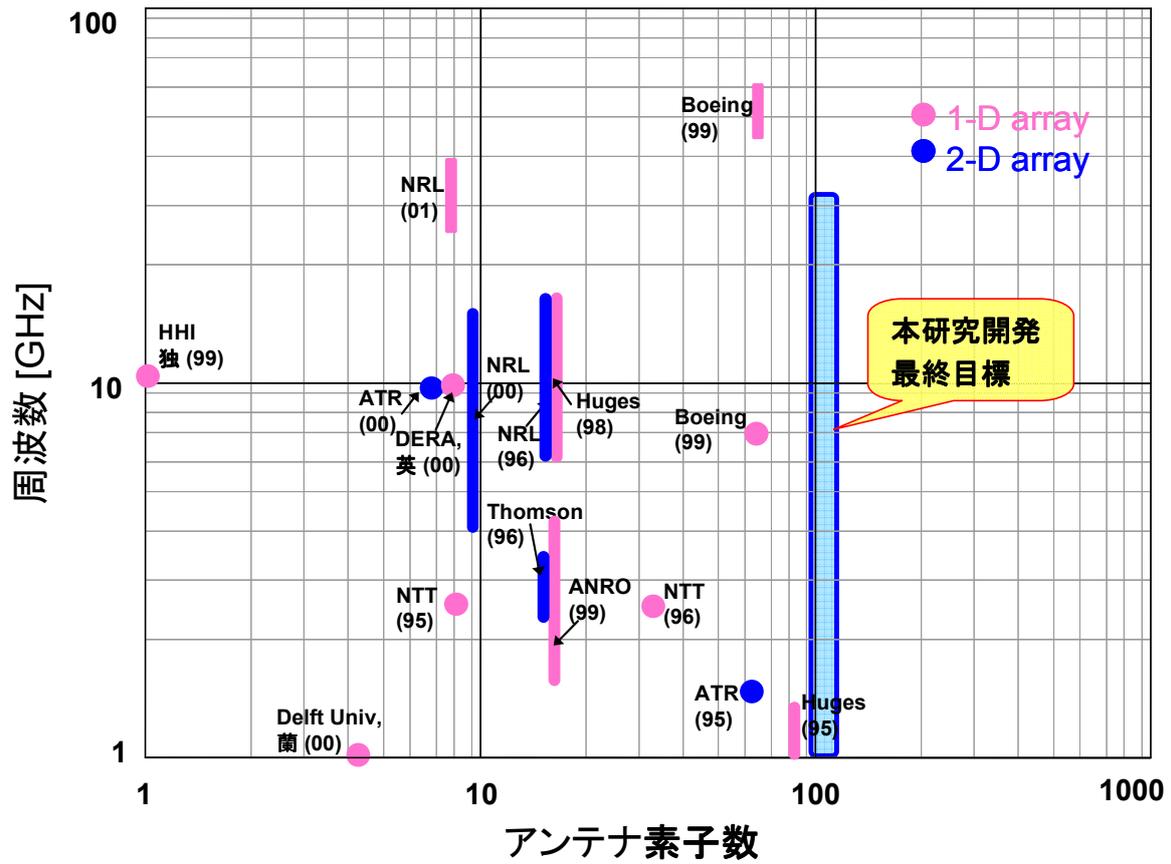


図 1-1 光制御型ビーム形成回路のアンテナ素子数と周波数の報告例

2 研究開発体の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

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

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

光技術を適用することにより、次のような効果が期待できる。

- ・ 小型・軽量化

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

- ・ 広帯域化、高周波数化が容易

マイクロ波のキャリア数周波数の数 GHz～数 10 GHz に対し、周波数約 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、フレキシブルな給電線が可能である。

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

(ア) 光信号処理回路技術

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

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

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

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

(イ) 指向性合成技術

光制御ビーム形成回路に適した指向性合成技術の開発を行う。

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

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」

以下の性能を有す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

- ・空間光波長分波, 多重(10 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)

以下の性能を有するアレーアンテナ用ビーム形成回路技術を開発する。

- ・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, ビーム方向, 形状の制御可能

(ア) 光信号処理回路技術に関する研究開発

- ・任意の光波面形成技術の確立, 波面制御技術の開発
- ・4波の波長分波, 合波技術の開発

(イ) 指向性合成技術の開発

- ・サイドローブレベル < -20 dB
- ・光領域での校正技術の実証

2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

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

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

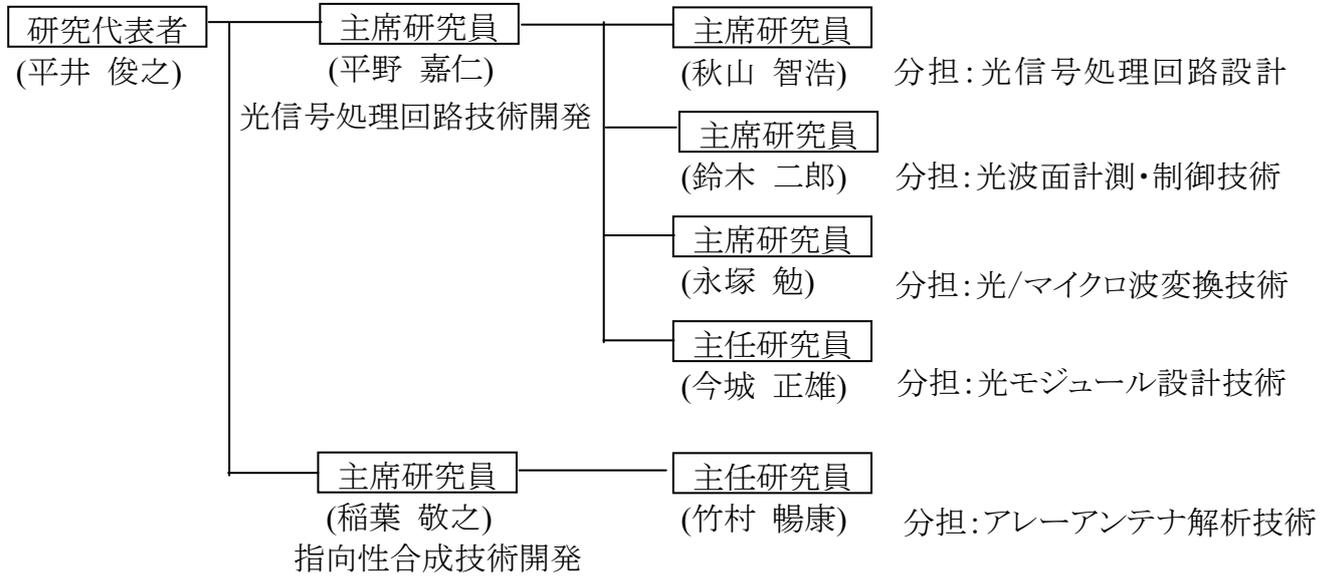
2 備考欄に再委託先機関名を記載

3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制

三菱電機(株)情報技術総合研究所



4 研究開発実施状況

4-1 光信号処理回路(光面生成技術)の研究開発

4-1-1 はじめに

光技術を適用したアレーアンテナの制御技術として、様々な方式の研究開発が行われている。図 4-1-1 に各種方式の分類を示す。本節では、衛星搭載に重要な小型化、軽量化、エネルギーの利用効率の向上に適した方式のトレードオフを行い、開発すべき方式を選定する。また、その実用化への要素技術開発として、開発課題を検討する。課題解決のためのキーデバイスの検討、設計状況について報告する。

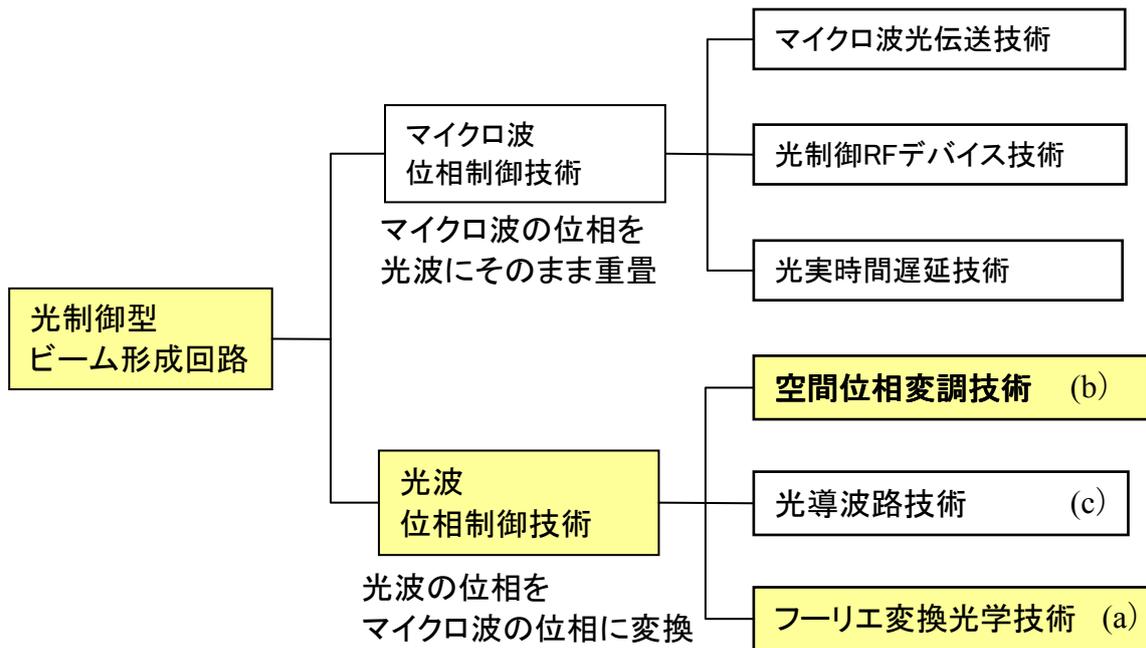


図:4-1-1 光制御型ビーム形成回路の実現技術

D. K. Paul, "Photonic Beamforming & Steering for SATCOM Phased Arrays,"
Workshop at *IEEE MTT IMS'99*, 1999 をベースに編集

4-1-2 光信号処理回路のトレードオフ

4-1-2-1 方式トレードオフ

光技術を適用したアレーアンテナの制御技術として、図 4-1-1 に示すように様々な方式の研究開発が様々な機関により行われている。方式を大別すると、光信号に重畳したマイクロ波信号をマイクロ波の領域で位相制御するマイクロ波位相制御 (Microwave Phase-Shift) 方式と、光の位相を直接制御することにより、マイクロ波の位相を制御する光波位相制御 (Optical Phase-Shift) 方式に分類できる。この中で、光波位相制御方式は、マイクロ波に対して $10^{-4} \sim 10^{-6}$ の波長の光波を直接制御することから、安定性、精度などの技術的課題が多いが、マイクロ波の波長を光の波長に置き換えられるため、装置の小型化が期待でき衛星搭載用に適していると考えられる。そこで、本節では、光波位相制御技術から、(a)フーリエ変換光学系型の光制御ビーム形成技術と、(b)空間位相変調型の光制御ビーム形成技術のトレードオフを行い、実用化検討を行う。なお、光波位相制御方式中の(c)光導波路技術は、大規模2次元アレーの実現には、大規模な光集積回路の開発が必要であることから困難と考え、今回の検討対象からは除外した。

以下に、各技術の原理について概要を示した後、比較検討する。

(a) フーリエ変換光学系型光制御ビーム形成技術

本方式の概略構成を図 4-1-2 に示す。アレーアンテナの放射パターン(遠視野像)はアンテナ励振分布のフーリエ変換となることが知られている。一方、レンズにはフーリエ変換機能があり、レンズの前側焦点面と後側焦点面との間にはフーリエ変換の関係が成り立つ。したがって、図 4-1-2 の構成をとったとき、空間光変調器で形成した光の振幅分布は、レンズによりサンプリングアレーの入射面にフーリエ変換される。サンプリングアレーの各光ファイバに入射した信号光は、ローカル光と相対的な位相関係を保ちながら伝送し、各々光電変換器(O/E)にてヘテロダイン検波され、信号光とローカル光との差周波数のマイクロ波信号となり、アレーアンテナの各アンテナから放射される。空間光変調器で形成したパターンは、レンズで1回フーリエ変換され、アンテナから空間に放射した後に再度フーリエ変換されることから、空間光変調器で形成したパターンとアンテナ放射パターンは同形となる。

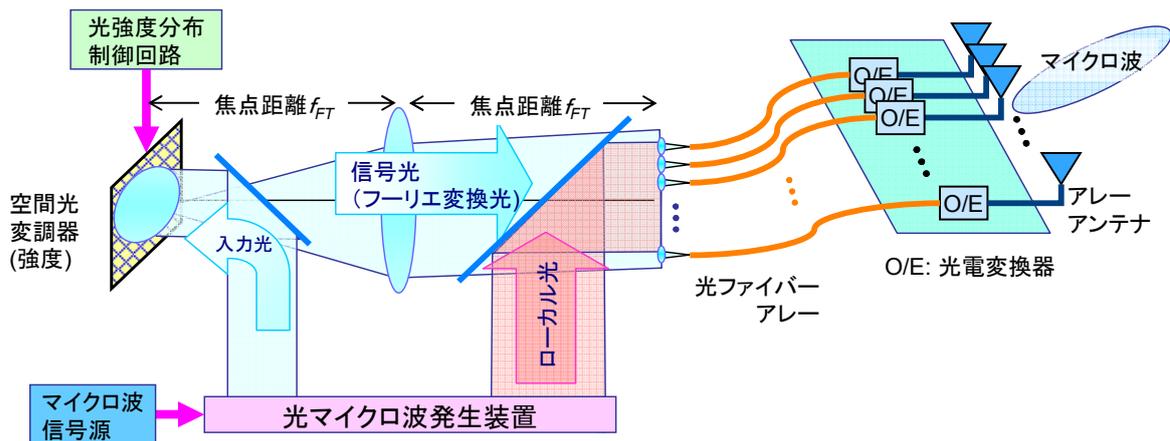


図 4-1-2 フーリエ変換光学系型光制御ビーム形成回路の構成図

表 4-1-1 検討条件

アンテナ放射ビーム	
ビーム走査範囲	±10 度
ビーム走査角の最小ステップ角度	0.5 度
アレーアンテナ	
素子数	20×20 (正方配列)
素子間隔	2.0 λ
光の波長	1.55μm
光空間変調器	
素子ピッチ	20x20 μm
サンプリング用光ファイバアレー	
素子間隔	500x500 μm

表 4-1-1 の条件で、光信号処理回路への要求、性能を検討した。検討結果を以下に示す。

・ビーム走査角と光学系の関係

フーリエ変換(FT)レンズの焦点距離 f_{FT} に対する、ビーム走査角の最小ステップ角の計算結果を図 4-1-3 に示す。図のように、FT レンズの焦点距離 f_{FT} を短くすると、ビーム走査角の最小ステップ角は粗くなる。例えば、ビーム走査の最小ステップ角を 0.5 度以下にするには、FT レンズの焦点距離 f_{FT} は 370 mm 以上が必要である。FT レンズを単レンズとすると、光学系の全長(空間光変調器の出射面から光サンプリング面間の距離)は、焦点距離 f_{FT} の 2 倍($2f_{FT}$)が必要であり、この場合、光学系の全長は 740mm 以上となる。さらに分解能をあげるには、より焦点距離を長くする必要があるのである。このように、FT 光学系型のビーム形成回路では、ビーム走査角の最小ステップ角を細かくするには、光空間変調器と光サンプリングファイバアレーの各々の素子間隔を狭くするか、FT レンズの焦点距離 f_{FT} を長くしなければならない。空間変調器のサイズ、ファイバの径の小型化には限界があるため、通常は、光学系により設定しなければならない。

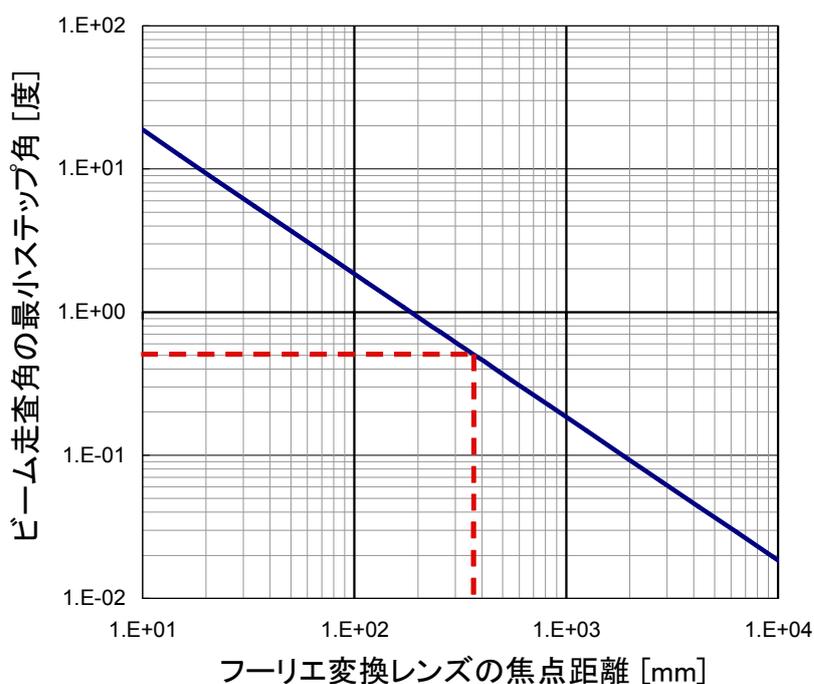


図 4-1-3 フーリエ変換型光制御ビーム形成回路における、レンズの焦点距離 f_{FT} に対する、アンテナ放射ビームの最小ステップ角の関係

図 4-1-4 に FT レンズの焦点距離 f_{FT} を 370mm としたときの、空間光変調器のアクティブな素子の位置とアンテナ放射主ビーム方向との関係を示す。図より、主ビームを 10 度 方向に向けるには、光軸からの距離 400 μm の素子 (中心より 20 番目の素子) をアクティブにする。

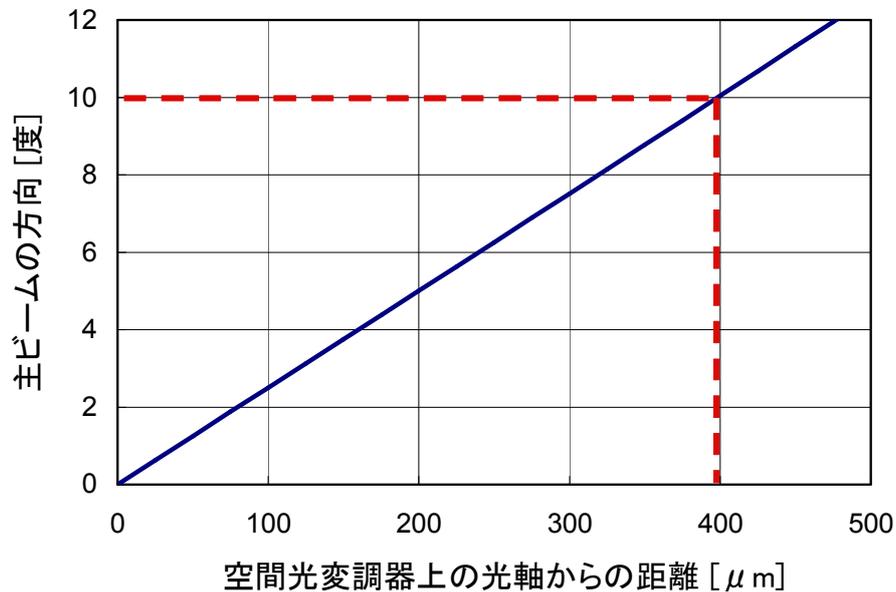


図 4-1-4 空間光変調器上のアクティブ素子位置と主ビーム方向の関係

・光信号処理回路の損失

FT 型光信号処理回路では、空間光変調器により、所望のビームの方向に対応する位置の素子のみを明るくし、その他の大部分の素子は暗くするため、空間光変調器に入力した光のごく一部しか利用していない。空間光変調器への入力ビームをガウスビームとすると、ビームサイズ (強度 $1/e^2$ で定義) が、空間光変調器の最外周部 (前項で求めた距離 400 μm , 中心から 20 番目の素子) と一致する場合に、最外周部の強度は最大となる。このとき、空間光変調器への入力光強度で規格化した、空間光変調器の各素子の出力光強度 (挿入損失に相当) を図 4-1-5 に示す。なお、各素子の開口率は 100% と仮定した。グラフ中のメッシュは、空間光変調器の各素子に相当する。図 4-1-5 より、損失最小となる中心の素子で -31.0dB, 中心から 20 素子目 (-10 度方向にアンテナ放射ビームを向ける場合) で -35.3dB となる。この様に空間光強度変調器は、所望の素子以外に入射したビーム光は損失となるため、エネルギーの利用効率が悪く、さらに、損失となる光は熱となるため、熱対策も必要となる。

これらの見積りは、空間光変調器での光の損失に関するものであるが、これ以外にも、ビーム走査角が大きな時には、空間光変調器を出射したビームは、サンプリング用光ファイバーアレーに斜め方向から入射するため、光ファイバとの結合効率の劣化も生じる。

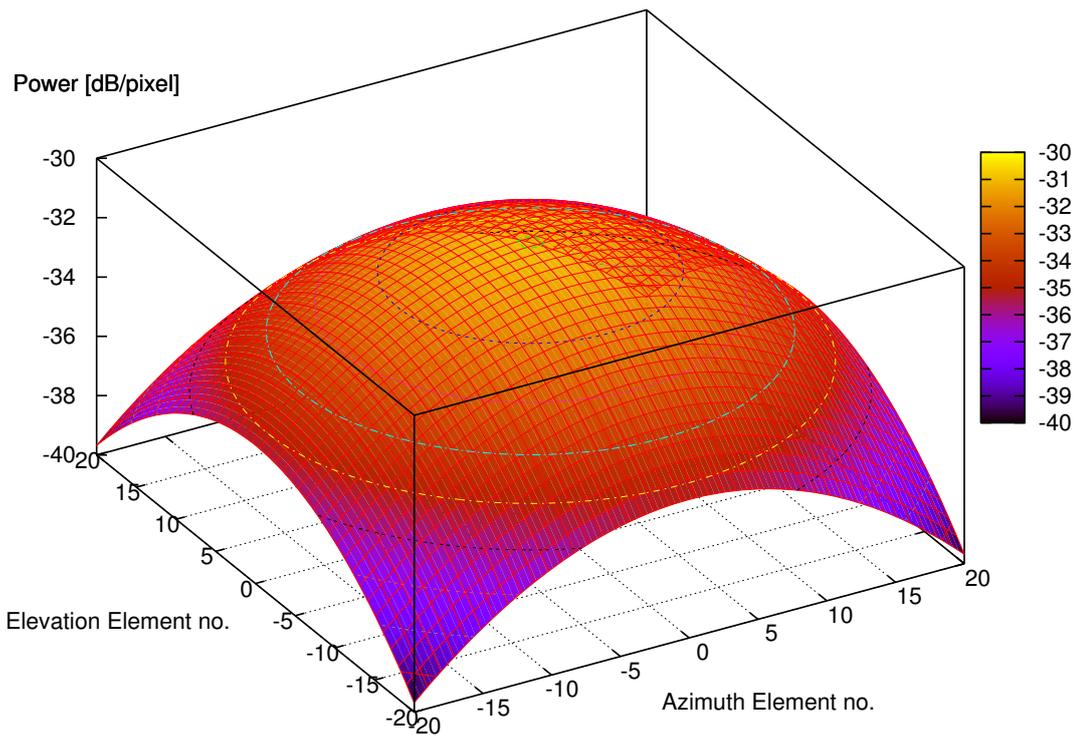


図 4-1-5 空間光変調各素子の出力光強度 (全入力光で規格化)

・アンテナ素子数

FT 型の場合，光学系部分はアンテナ素子数に依存せずに設計できるため，素子数に応じて，サンプリング用光ファイバーアレーのファイバの本数を増やせばよい。ただし，空間光変調器の駆動領域が広い(太いアンテナ放射ビームに相当)場合，サンプリングアレー面上へのフーリエ変換光のビーム径は細くなるため，結果として中心付近の素子のみが支配的となり，素子数が少ないものと同等になる。一方，駆動領域が狭い場合，フーリエ変換光のビーム径は大きくなるため，ファイバーアレーの数が増えても，有効に利用できる。ただし，前項で示したように空間光変調での駆動領域の割合が小さいと損失が大きくなるため，システムとしてのトレードオフが重要となる。

(b) 空間光位相制御型ビーム形成回路

本方式の概略構成を図 4-1-6 に示す。マイクロ波信号源からの入力信号で周波数がオフセットされた 2 光を光マイクロ波発生装置より空間に放射する。空間光変調器は、図のように微小なミラーがアレー状に配置され、各ミラーの反射面を変えることで、各ビーム光の波面（隣接光ビーム光との相対位相）を制御する。この位相が、ローカル光と光電変換器でヘテロダイン検波されると、光の位相と同一の位相分布を持つマイクロ波が発生する。本方式では、通常マイクロ波の移相器で構成するビーム形成回路(BFN)に比べ、光の波長オーダーでの位相制御することから小型化が可能である。また、デジタル移相器ではビット数が増えるに従い、挿入損失が増大するが、本方式では挿入損失は位相の分解能によらず、制御信号によりアナログ制御も可能である。

以下、FT 型の光信号処理回路と比較した、サイズ、損失などの検討結果を示す。

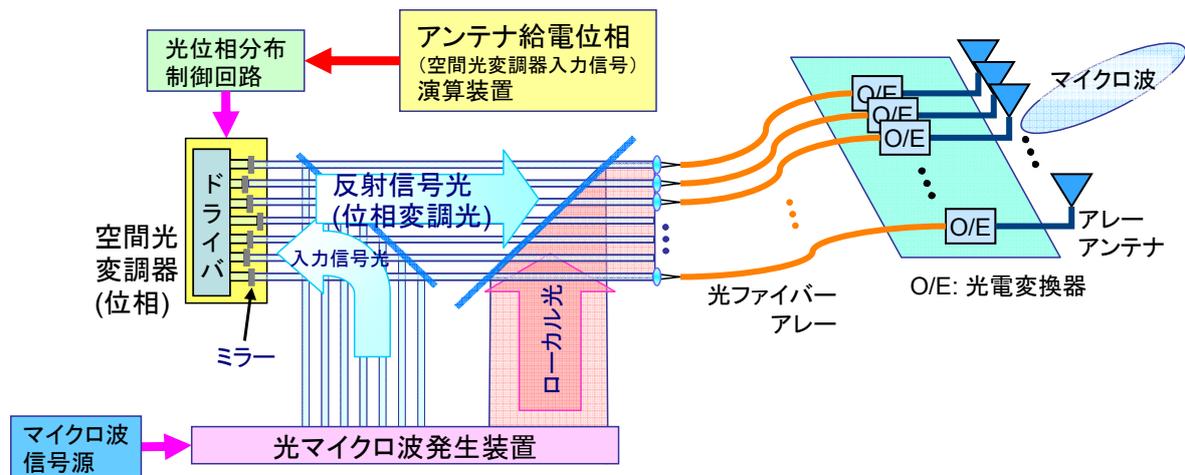


図 4-1-6 空間位相制御型光制御ビーム形成回路の構成図

・ビーム走査角と光学系の関係

空間光位相変調器にて素子毎に、アナログ的に光の波長(μm)オーダーで位相制御が行えるため、分解能(位相制御の分解能)を高めても、装置サイズは肥大化しない。

光学系のサイズは、図 4-1-6 のように空間光変調器とサンプリング用光ファイバーアレーの間隔で決まるが、ビーム走査の性能は間隔に依存せず、ビームスプリッタなどの光学部品が挿入できるサイズがあればよい。空間光変調器の開口を $D \times D$ とすると、図 4-1-6 のようにビームスプリッタを 2 点挿入するためには、光学系の全長は $2 \times D$ 以上が必要である。

空間光変調器及び、サンプリング用の光ファイバーアレーの素子間ピッチが共に $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ とすると、 30×30 のアレーを想定しても、空間光変調器の開口は $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ となる。したがって、全長は 60 mm 以上となる。各光学部品の保持機構などを見込むと、光学系は全長 100 mm 程度で実現可能と考える。

・アンテナ励振振幅・位相演算

空間光変調器にて生成する位相分布を別途計算する必要がある。入力位相分布は、生成すべきアンテナパターンをフーリエ変換したものであることから、前項で示したような、レンズのフーリエ変換の出力信号を用いて、空間光変調器への入力信号を生成してもよい。

・光信号処理回路の損失

光学系内の最大の損失要因は、空間位相変調器の各ミラーで反射したビーム光と、光サンプリングアレーの各光ファイバとの結合効率である。反射光のモードと、光ファイバのモードが完全に一致している場合は、原理的に損失はないが、現実には、ビーム光の拡がり、空間位相変調器の各ミラーの傾き、軸ずれなどにより結合効率は劣化し、損失となる。ビームの結合効率は、ビームの傾き角に大きく依存することから、ミラーの傾き角に対する、結合効率(損失)の計算結果を図 4-1-7 に示す。図中の各ラインはそれぞれビームサイズ ω を変化したときの計算結果である。ビームはミラー反射面でビームウエストとし、ミラーとサンプリングファイバ間の距離は 100mm とした。図 4-1-7 より、ミラーの傾き角 1mrad を見込むと、ビーム径 2ω が $\omega=300\mu\text{m}$ の場合に最も結合効率が高く、約 -2dB となり、ローカル光との合成時のビームスプリッタの損失 3dB を含めれば、約 5dB となる。この値から、前出のフーリエ変換型の光信号処理回路に比べて、低損失に光信号処理回路を実現できることが分かる。

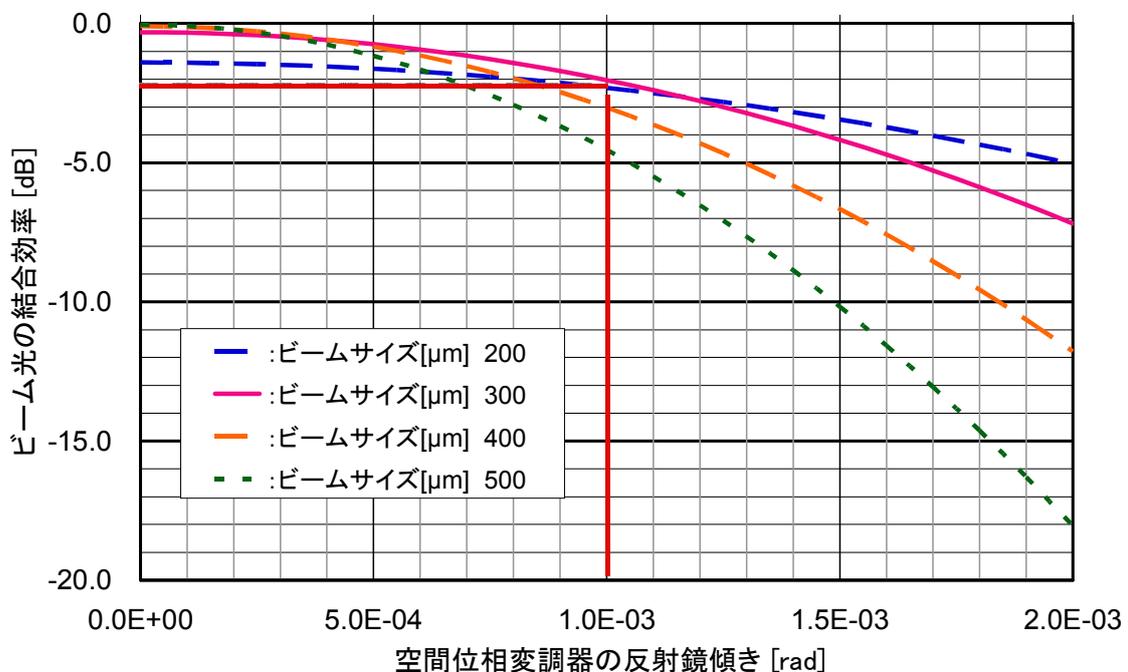


図 4-1-7 空間位相変調器の傾きにより、反射光と光ファイバの結合効率の計算値

・アンテナ素子数

空間位相変調器のサイズ、サンプリング用光ファイバアレーのサイズが大きくなるが、1 素子あたりの素子サイズは 1mm×1mm 程度であるため、素子数が増えても装置サイズに対するインパクトは小さい。

・トレードオフの結果

表 4-1-2 にトレードオフの結果をまとめる。以上の検討結果より、搭載サイズ、重量、エネルギーのリソースが限られた衛星搭載環境を想定すると、空間位相制御型の方が適していると考えられる。したがって、今後本研究では、空間位相制御型のビーム形成回路の開発を行うものとする。

表 4-1-2 光信号処理回路のトレードオフ結果

	FT 光学系型		空間位相制御型	
小型化 (光学系全長)	△	740 mm 光学系の短尺化の工夫が必要	○	～100 mm
アンテナ励振 振幅, 位相演算	○	光学的フーリエ変換出力を直接光電変換し使用	△	波面演算信号を, 空間光変調器に入力
光損失	×	< -38.3 dB	○	< -5dB
ビーム走査の 最小分解能	△	0.5 度。空間光変調器(強度)の空間分解能に依存	○	アナログ制御が可能
アレーアンテナ 素子数	○	サンプリング用光アレーの素子数のみに依存	△	サンプリング用光アレーの素子数と空間位相変調器の素子数に依存
総合判定	△		○	

4-1-2-2 技術課題

(a) 出力信号のハイパワー化

前記の光制御型ビーム形成回路を実現するにあたり、特に信号の S/N を高めるためには、光検出器に入射する信号光の強度を高めることが必要である。光ファイバ増幅器を適用することにより、 $>10\text{W}$ の信号光を発生させることも可能である。この場合、ハイパワー光入力に対応できる空間位相変調器が重要となる。空間位相変調器としては液晶を用いたものが既に実用化されているが、液晶ではハイパワーな光入力に耐えられないという課題がある。

本研究開発では、上記課題を解決するために、アレー状に配したミラー位置をアクチュエータで制御する構成の空間位相変調器を検討する。

(b) 位相雑音の低減

光波の位相をマイクロ波に変換する、ヘテロダイン検波を利用したシステムにおいて、信号光とローカル光の時間差(光路長差)が大きくなると、信号光とローカル光間の相関が低くなるため、ヘテロダイン検波により発生するマイクロ波信号の位相変動により、位相雑音が増加する。図 4-1-8 に線幅 50kHz (ファイバーレーザ)、5MHz(DFB-LD)の光源を用いたとき、マイクロ波キャリア周波数から 100kHz オフセット周波数における位相雑音の計算値を、信号光ーローカル光の光路長差 Δl を横軸にして示す。図中 $\Delta\lambda$ は光源の線幅を変えたときの計算値である。例えば、100kHz オフセットにおける位相雑音のシステム要求が -115 dBc/Hz 以下の場合、図より、線幅 50kHz のレーザを使用した場合、光路長差 Δl は 12 mm 以下、線幅 5 MHz の場合、光路長差 Δl は 0.56 mm 以下とする必要がある。

光源から光信号処理回路間の形態として、図 4-1-9(a)のように、信号光とローカル光を異なる光ファイバで伝送するタイプと、図 4-1-9(b)のように、信号光とローカル光を同一の光ファイバで伝送し、光信号処理回路内で分波するタイプがある。(a)の場合、信号光用、ローカル光用の 2 つの光ファイバ長を図 4-1-8 で示した精度で等長化する必要があり、製造が困難である。さらに、温度変化などにより、各光ファイバで異なる位相変動が生じると位相雑音の劣化となる。さらに、前項に示したような高ダイナミックレンジ化をはかるために光ファイバ増幅器を片側の光路に挿入した場合には、光ファイバの長さ(特に、高出力になるほど光ファイバは長くなる)の等長化はさらに困難となる。

本研究開発では、前記の課題を解決する為に、信号光、ローカル光を同一の光ファイバで伝送し、その後、光信号処理回路内でビーム光として空間に放射させた後、光バンドパスフィルタにて、信号光成分と、ローカル光成分を分波する、光分波回路を適用する。

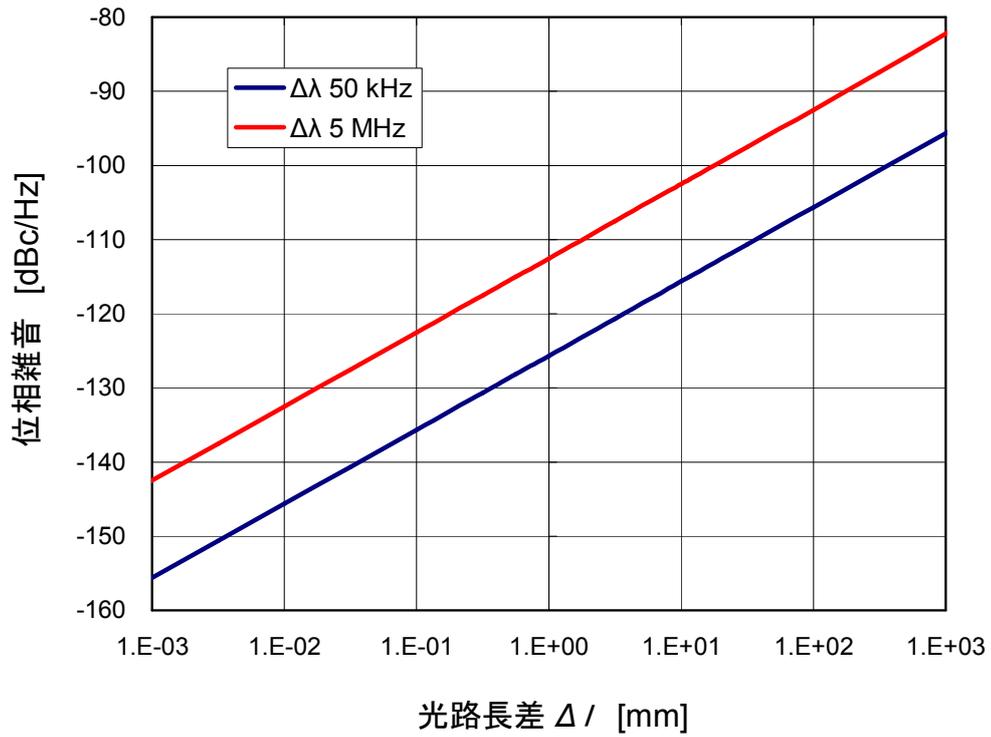
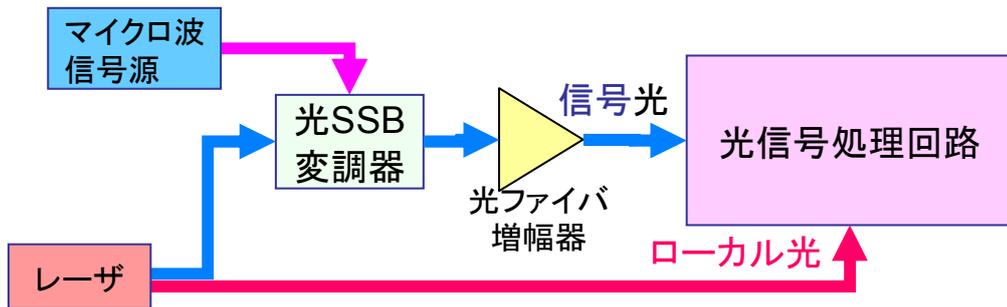
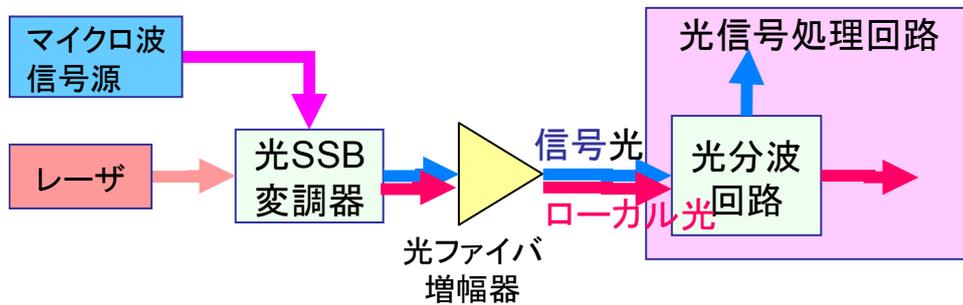


図 4-1-8 光路長差 Δl と位相雑音の関係



(a) 信号, ローカル光を異なる光ファイバで伝送



(b) 信号, ローカル光を同一光ファイバで伝送

図.4-1-9 信号光, ローカル光の伝送方法

4-1-3 要素技術の開発

4-1-3 (a) 反射型空間光変調器

位相変調器としては、液晶などの媒質透過により位相を制御するタイプと、反射鏡を機械的に移動させる方法とがある。前項で述べたように、ダイナミックレンジを高めるためには、光のエネルギー密度を高くすることが望ましいが、一般に液晶などはハイパワーな光で使用できないため、本開発では反射型の光変調器を適用することとした。

このとき、位相(光路長)制御範囲、反射鏡サイズなどの点から、アレー状に配したセグメントミラーとアクチュエータを接合した方式を採用する。以下に、試作中である反射型の光変調器について説明する。

目標性能

- 素子数: 10 x 10 以上
- 空間分解能(素子間のピッチ): 1mm ピッチ
アンテナ素子数が増えると装置サイズが大きくなるが、1mmピッチであれば、例えば900素子(30×30)アレーでも空間位相変調器の反射面のサイズは3cm×3cm程度である。
- ミラーの開口: 0.6mmx0.6mm (図 4-1-7 より)
- 反射鏡の角度精度 (ストローク時のミラー面の傾き) <1 [mrad] (図 4-1-7 より)
- 位相変化量: 2π 以上 (波長 1.5 μm にて)

(1) ミラーとアクチュエータの接合方式検討

反射型空間光変調器において、難易度の高いミラーとアクチュエータの接合技術につき、接合方式のトレードオフを実施した。トレードオフ結果を表 4-1-3 に示す。

トレードオフ結果より、メリットが多いアクチュエータとミラーを接触結合する方式を採用する。

表 4-1-3 接合方式トレードオフ

	アクチュエータ上にミラーを積層	ミラーの外周にアクチュエータを一体成形	アクチュエータとミラーを接接触結合
ミラーピッチ誤差	アクチュエータ精度に依存	ミラー精度に依存	ミラー精度に依存
ミラー傾斜ばらつき	アクチュエータ精度に依存 アクチュエータ直進性の影響大	ミラー精度に依存	ミラー精度に依存 アクチュエータの直進性の影響極小
ミラー高さばらつき	アクチュエータ精度に依存	ミラー精度に依存	アクチュエータ精度に依存
ミラー製作性・加工性	困難	困難	容易
駆動ストローク	アクチュエータ精度に依存	アクチュエータ形状に依存	アクチュエータ精度に依存
接合難易度	ミラー厚さ管理が困難	製造プロセス開発が必要	容易(接着層なし)
経時変化	接着層無し	形成方法に依存	接着層なし
温度変化の影響	熱変形の影響大	熱変形の影響大	熱変形の影響小さい
組立て性	非常に困難	形成方法に依存 新規開発が必要	位置合わせに工夫が必要
量産性	困難	形成方法に依存	工夫必要
総合評価	×	△	○
模 式		<p>エルジー電子(株)特許 特開2000-339725より</p>	

(3) マイクロミラー変形 FEM 解析

1) 解析モデル

解析モデルは、図 4-1-13 に示すようにマイクロミラーの 1 素子をモデル化した。境界条件は、枠の 4 角端を完全拘束し、反射面中央部分に強制変位を与えた。標準変位負荷位置は $(X,Y)=(18\mu\text{m}, 36\mu\text{m})$ と中心 $(0,0)$ からずらした位置とした。材料は異方性も考慮した。

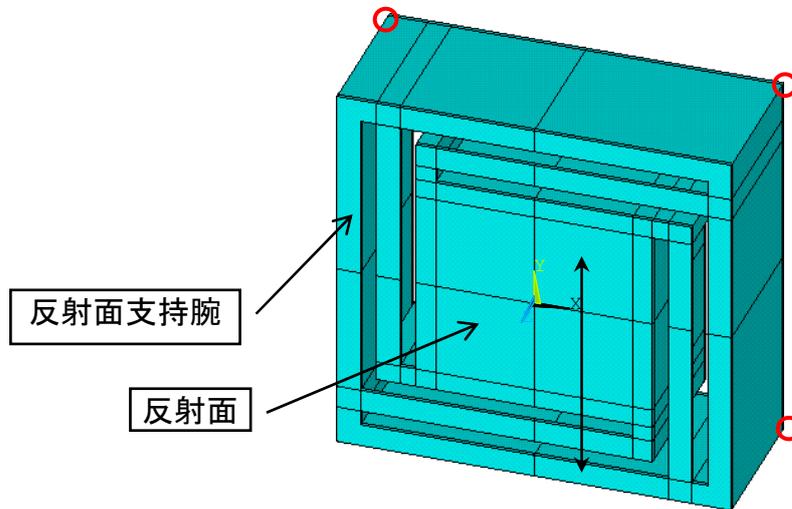


図 4-1-13: 解析モデル(標準モデル)

2) 解析結果

・変形

変形分布を図 4-1-14 に示す。解析例では、反射面の傾斜変形が見られる。これは、荷重点が反射面中心からずれたために生じたものである。反射面の傾斜変形が許容値以内に収まるようにするためには、荷重点をコントロールする必要、又は、反射面の傾斜を抑えるように反射面支持腕の構造を最適化する必要があることが判った。

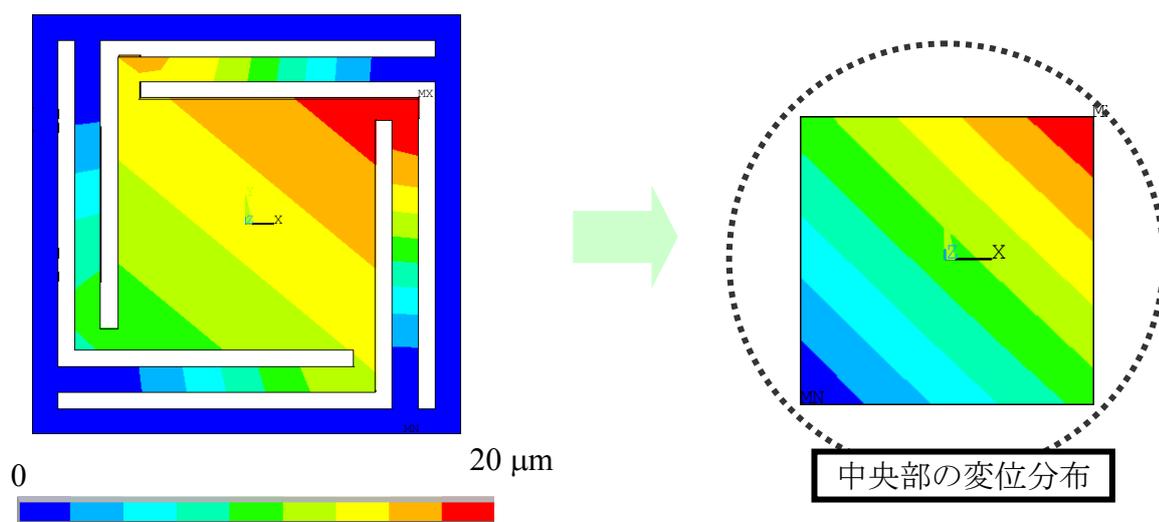


図 4-1-14 解析結果 (z 方向位分布)

・感度解析(変位負荷位置)

前述の通り, 反射面の傾斜変形が許容値以内に収まるようにする必要があり, 荷重点をコントロールすることにより, 傾斜変形を許容値内に納められるか調べた。

変位負荷位置とミラーの傾きの関係を知るため, 感度解析を実施した。FEM 解析結果を図 4-1-15 に示す。

変位負荷位置が中心から離れるほど, ミラー面の傾きが大きくなることわかる。また, 図 4-1-15 に示すように, ミラー面の傾きは変位負荷位置の中央からの距離と比例関係となった。

図 4-1-15 より標準寸法の場合, ミラーの表面精度を満足するためには, 変位負荷位置(ミラーとアクチュエーターの接触点)を中心から $250\mu\text{m}$ 以内とすれば良いことが分かる。

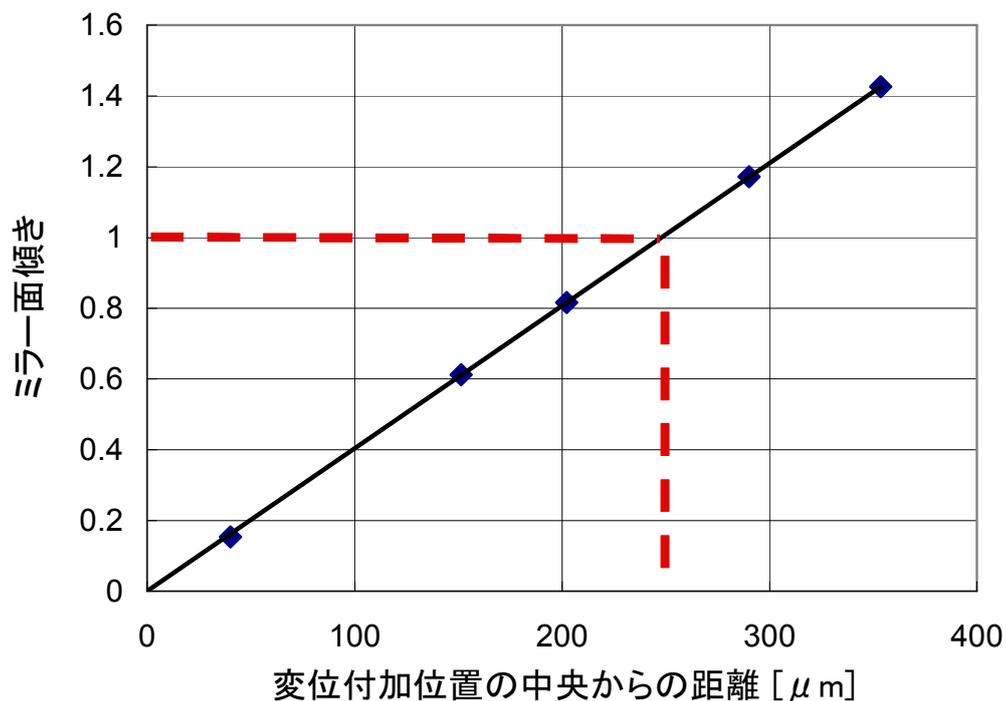


図 4-1-15 変位負荷位置とミラー面傾きの関係

(4) 駆動部特性調査

駆動部の方式として、ピエゾ素子を用いた場合の駆動特性を調査した。

1) 駆動特性

一般的なピエゾ素子に駆動電圧を印加したときの駆動変位量を図 4-1-16 に示す。

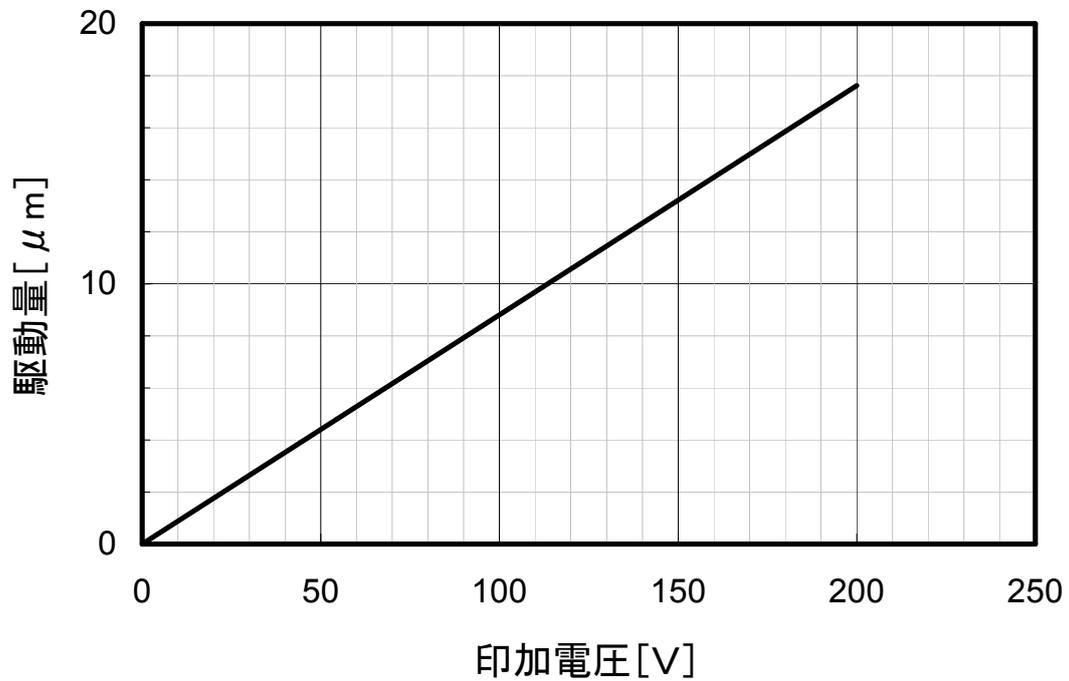


図 4-1-16 ピエゾ駆動特性

2) 振動特性

光位相変調器を高速で駆動した場合に、ピエゾ素子が振動に耐えられることが必要である。ピエゾ素子に振動試験を実施した際の試験結果を図 4-1-17,18 に示す。測定結果から振動に十分耐えられると考える。

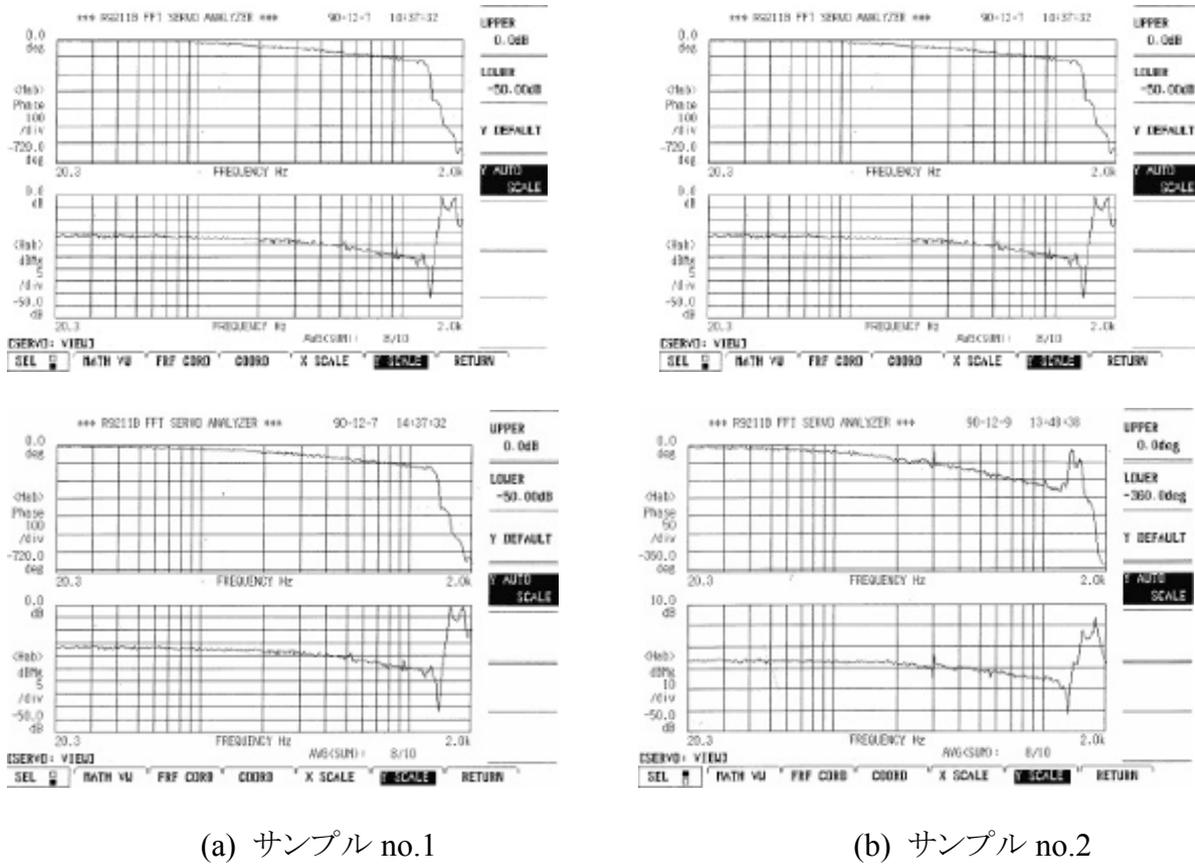


図 4-1-17 ピエゾ振動試験結果(無負荷時)

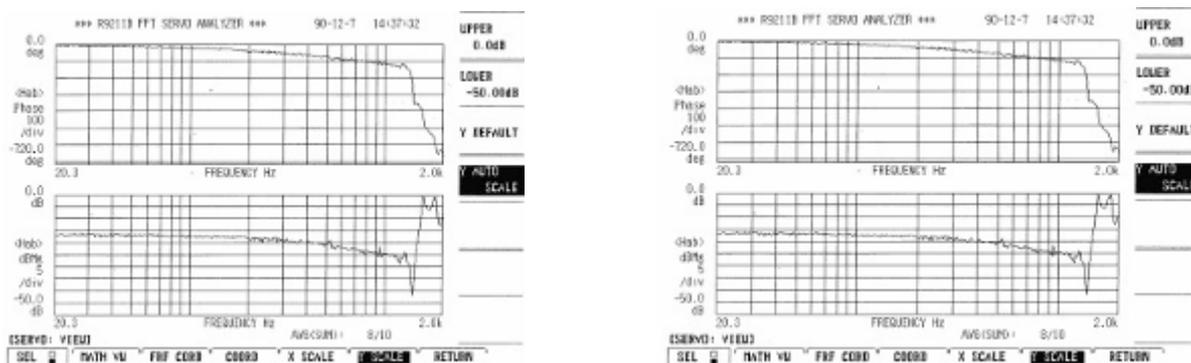


図 4-1-18 ピエゾ振動試験結果(負荷有り)

4-1-3 (b) 空間光分波回路

信号光とローカル光の周波数差は、マイクロ波周波数を S~Ku 帯とすると、2~14GHz となる。光の波長を $1.5\mu\text{m}$ とすると、周波数は約 190THz となり、光の周波数領域で信号光とローカル光を分離するには、非常に急峻なバンドパス又は、バンドリジクションフィルタが必要となる。このようなフィルタとしては、エタロン、FBG、AWG などがありえるが、非常に急峻なフィルタを実現できること、光ファイバを含む構成では、前述のような位相雑音の劣化がありえることから、ここでは、エタロンを採用した。さらに、温度によるフィルタの透過・反射波長の変動を抑えるために、エアギャップエタロンを採用した。

エタロンを用いた光分波回路の構成を図 4-1-19 に示す。以下に動作原理を示す。

- (1) 信号光, ローカル光は同一方向の直線偏光状態で PBS(偏波ビームスプリッタ)に入力する。
- (2) 信号光, ローカル光は $\lambda/4$ 波長板により, 同一の回転方向の円偏光に変換する。
- (3) 信号光エタロンにより反射し, ローカル光はエタロンを透過する。
- (4) エタロンで反射した信号光は, 反射前と逆方向の円偏光となる。
- (5) 信号光は $\lambda/4$ 波長板により, (1)から 90 度傾いた直線偏光に変換される。
- (6) 信号光は PBS により, 反射し, 光分波回路から出力される。
- (7) 一方, エタロンを透過したローカル光は, $\lambda/4$ 波長板により, (1)から 90 度傾いた直線偏光となり, 光分波回路から出力される。

以上の構成により、信号光、ローカル光の分離が可能である。

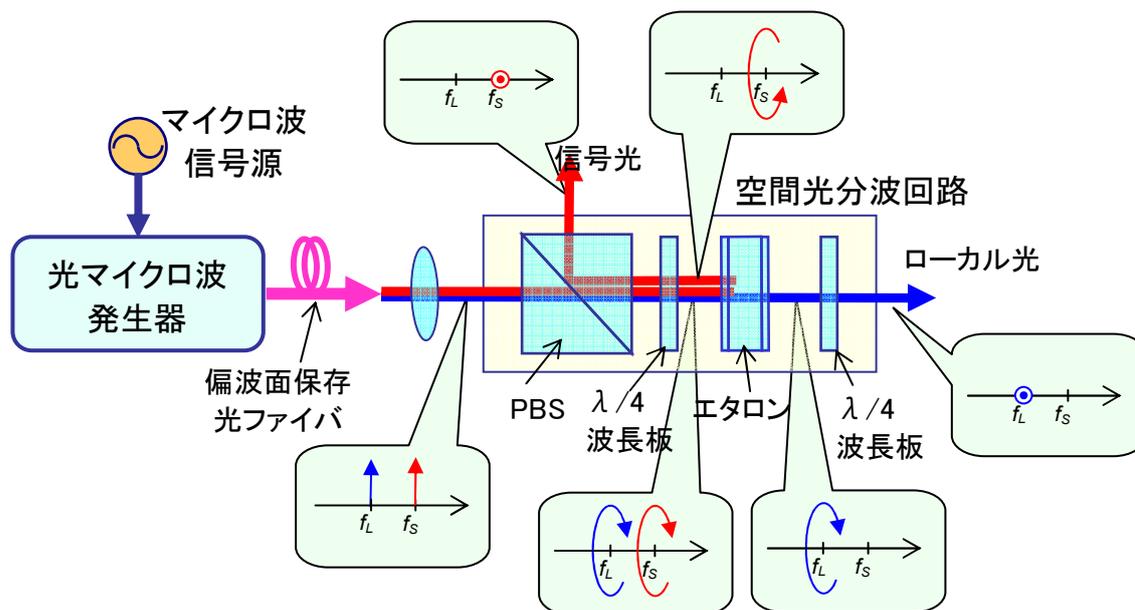


図 4-1-19 光分波回路の構成

・エタロンの設計結果

図 4-1-20 に透過、反射特性の設計値を示す。図のように、S~Ku 帯の周波数差をとる信号光、ローカル光をアイソレーション 20dB 以上で分離できるように設計した。

FSR: 25GHz

フィネス: 77

透過帯域幅(FWHM): 325MHz

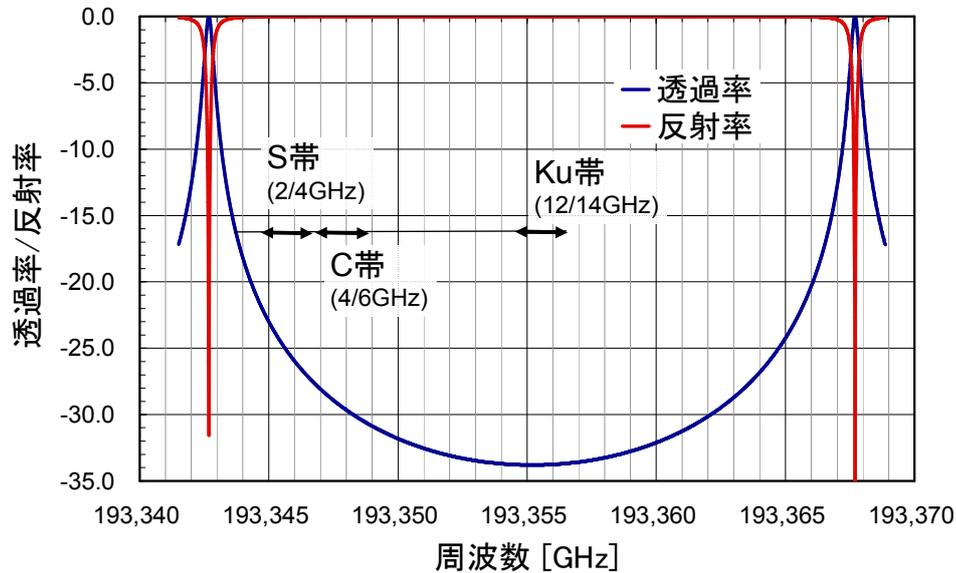


図 4-1-20 エタロンの分光透過/反射率の設計値

・光分波回路の評価結果

光分波回路の透過特性の測定結果を図 4-1-21 に示す。図のように、FSR は設計通りの性能が得られた。透過帯域幅(FWHM)に関しては、設計値より広い値となっている。これは、測定に使用した光スペクトラムアナライザの波長分解能が透過帯域幅に対して粗いことによる測定誤差と思われるため、測定系の改良を行い再評価する予定である。

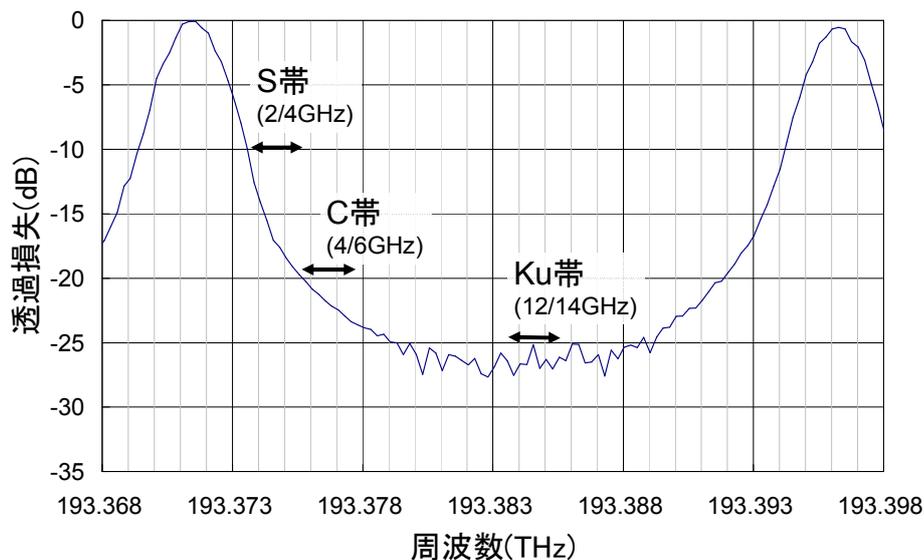


図 4-1-21 光分波回路の分光透過率の測定結果

4-1-4 まとめ

光制御型ビーム形成回路の開発を行うにあたり、衛星搭載に重要な小型化、軽量化、及び低消費電力化から、方式トレードオフを行った。その結果、反射型の空間位相変調器を用いた位相制御方式が最適であると選定した。本方式を実現させるにあたり、以下の技術課題に対し、各要素技術の開発を行った。

1. 出力マイクロ波信号のハイパワー化

- ・ 課題: 光電変換されたマイクロ波信号レベルを高めるために、耐光入力パワーに優れた空間光変調器が必要である。

- ・ 要素技術の開発: 空間光変調器の構成を検討し、アレー状のミラーをアクチュエータに接合した、反射型空間光変調方式を検討した。本構成にてアクチュエータの変位によるミラー反射面の傾き変動、変形の解析、アクチュエータとして用いるピエゾ素子の振動試験を行い、所望の性能が得られる見込みを得た。今後、詳細設計を行い、空間光変調器の試作を行う。

2. 出力マイクロ波信号の位相安定化

- ・ 課題: 信号光、ローカル光間の光路長差(時間差)による、位相の変動、位相雑音の増加を抑制する必要がある。

- 要素技術の開発: 信号光、ローカル光を同一の光ファイバで伝送し、光信号処理回路内で分波する方式を検討した。エタロンを用いた光分波回路を設計、試作した。評価の結果、信号光、ローカル光間に所望のアイソレーションが得られることを確認した。

・ H17年度の開発課題:

反射型空間光変調器の試作、光学的評価を実施し、光波面生成技術を確立させる。

また、アンテナ励振信号である空間光変調器で生成する光波面となる、空間光変調器への入力信号を演算、生成する光波面制御技術の検討、開発を行い、光信号処理回路技術を確立させる予定である。

4-2 光信号処理回路技術(E/O,O/E 変換技術)の研究開発

4-2-1 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に最適化されているものが多い。このため一般的な光デバイスは、本開発目標であるアナログ通信の光信号処理型ビーム形成回路に用いるには、ダイナミックレンジ、スプリアスなどの特性が必ずしも適していない。ここでは、本開発における光信号処理回路技術のうち、アナログ光通信のマイクロ波伝送部分、特に、マイクロ波／光変換及び、光／マイクロ波変換技術(E/O,O/E 変換技術)について、装置のトレードオフを行い、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SSB光源、高出力PDについて検討を行った。以下にこれらの内容を示す。

4-2-2 E/O,O/E 変換装置のトレードオフ

ここではE/O, O/E 変換装置におけるトレードオフ、及び、技術課題を述べる。

4-2-2-1 方式トレードオフ

アナログ光通信である光マイクロ波伝送の方式については、大きく直接変調方式とヘテロダイン変調方式に分けられる。ここでは、本開発の装置に適した方式として、これら両者の比較を行う。

(a) 強度変調・直接検波方式

図4-2-1に直接変調方式の光マイクロ波伝送装置を示す。

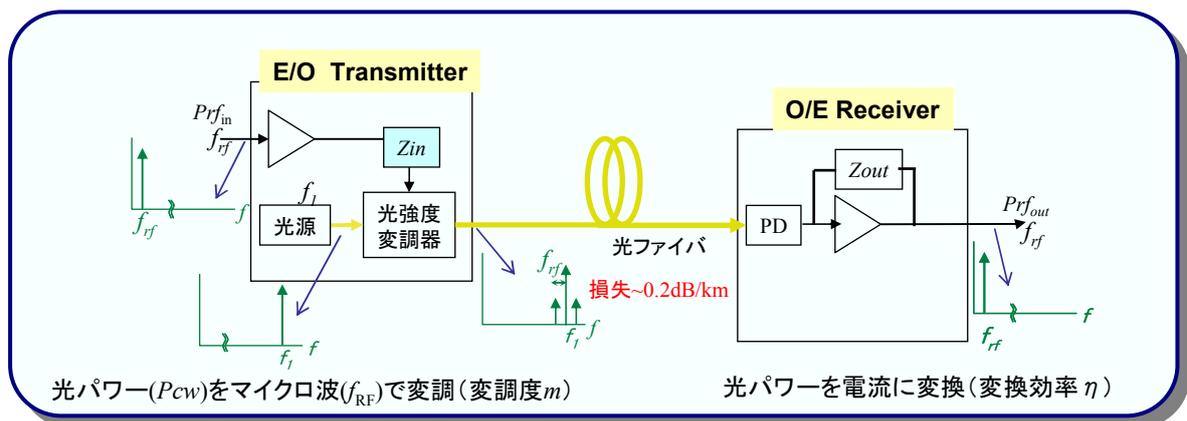


図 4-2-1 強度変調・直接検波方式

直接変調方式のE/O変換部では、光源から放射された光に光強度変調器を用いてマイクロ波の変調を行う。強度変調された光は光ファイバを伝送し、O/E変換部のフォトダイオード(PD)で再びマイクロ波に変換される。いま変調するマイクロ波信号を周波数 f_{rf} の正弦波とし、変調度を m とする。また、光の周波数 f_c とすると、E/O変換部で変調された光の電界は次のような式で表される。

$$E(t) = \sqrt{P_{CW}} \left(1 + m \cos(2\pi f_{rf} t + \phi_{rf}(t)) \right) e^{-i(2\pi f_c t + \phi_c(t))} + c.c. \quad (4-2-1)$$

ここで、 P_{CW} は光のパワーの平均値、 ϕ_{rf} はマイクロ波の位相、 ϕ_c は光の位相であり、 $c.c.$ は複

素共役を表す。ファイバを伝送した変調光は O/E 変換部のフォトダイオード (PD)においてマイクロ波に変換される。PD の量子効率を η とすれば、PD に流れる電流は次のようになる。

$$I(t) = \eta |E(t)|^2 = \eta P_{CW} (1 + m \cos(2\pi f_{rf} t + \phi_{rf}(t))) \quad (4-2-2)$$

したがって、PD に負荷として抵抗 Z_{OUT} が接続されているとき、PD から発生する RF のパワーは次のようになる。

$$P_{RF} = \left(\frac{I(t)}{\sqrt{2}} \right)^2 Z_{out} = \frac{\eta^2 P_{CW}^2 m^2}{2} Z_{out} \quad (4-2-3)$$

式(4-2-3)から分かるように RF パワーは光入力パワー P_{CW} の二乗に比例する。したがって、光入力パワーを増加することにより PD での受信能力は飛躍的に増加する。また、受信能力は変調度 m に依存することが分かる。しかし、直接変調方式では、出力 RF の位相は入力マイクロ波の位相により決定され、光の位相には依存しない。したがって、出力信号の位相を制御するには E/O 変換部に入力する前のマイクロ波、又は O/E 変換部で取り出した後のマイクロ波の位相を制御する必要がある。

例えば、変調度 m が 1、PD の量子効率 η が 1mA/mW、負荷抵抗 Z_{OUT} が 50Ω の時の PD 入射光強度に対する RF 出力電力の計算値を図 4-2-2 に示す。

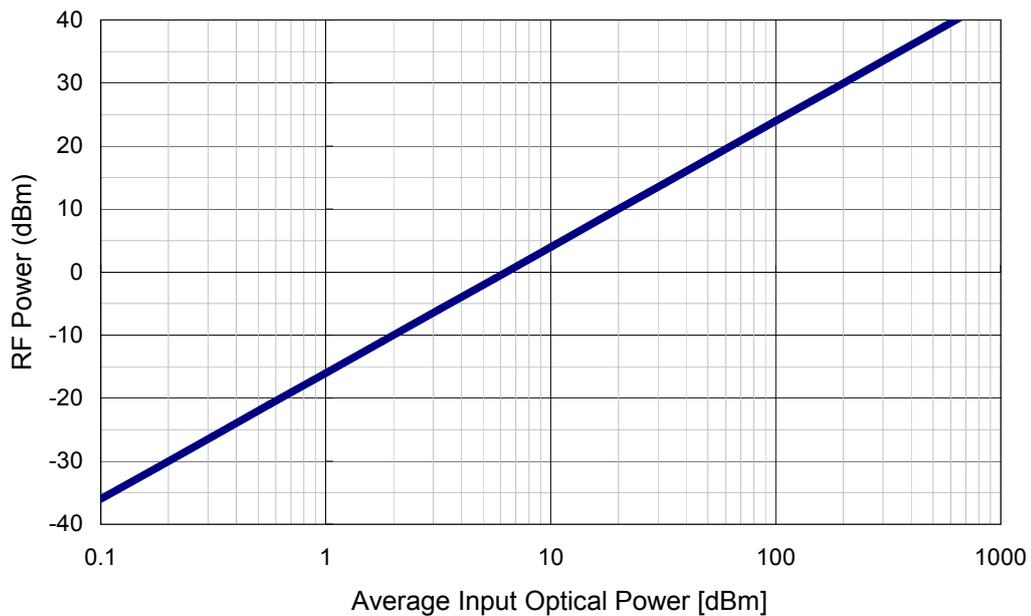


図 4-2-2 PD 入射光強度に対する RF 出力強度

図のように、入射光の強度に対して、RF 出力パワーは二乗で増加し、200mW の光入力でも、1W の RF 信号を取り出すことができることになる。しかしながら、通常の高速度 PD では数 10mW 程度で飽和が生じるため、PD 単体で十分大きなパワーを得ることは困難である。

(b) ヘテロダイン変調方式

図 4-2-3 にヘテロダイン変調方式の光マイクロ波伝送装置を示す。

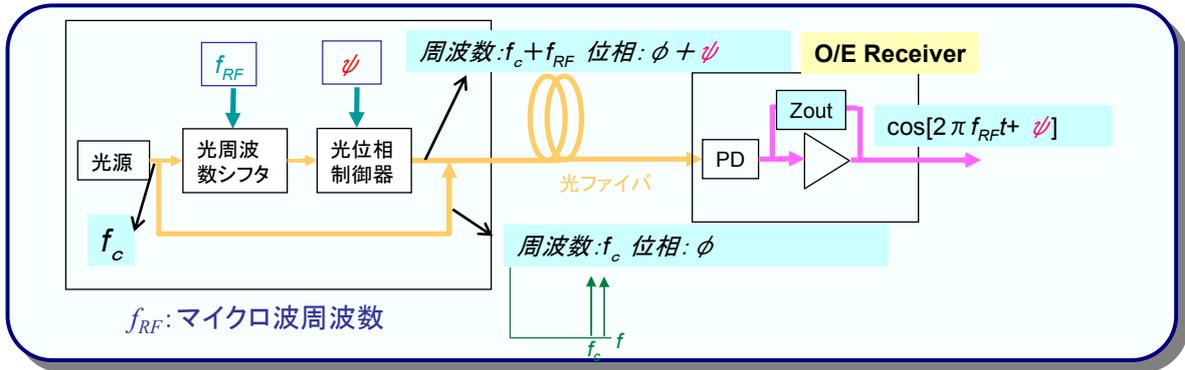


図 4-2-3 ヘテロダイン変調方式

ヘテロダイン変調方式では直接変調方式と異なり、E/O 変換部において光源のレーザ光をローカル光と信号光の 2 つに分け、そのうち信号光に周波数シフト及び位相制御を施す。これら 2 つの光を合波して光ファイバで伝送し、O/E 変換部では直接変調方式と同様な検波を行う。このとき E/O 変換部で行った周波数シフト分と同じ周波数のマイクロ波が出力される。

ヘテロダイン変調方式において、E/O 変換部でのローカル光の電界は次のような式で表される。

$$E_l(t) = \sqrt{\frac{P_{CW}}{2}} e^{-i(2\pi f_c t + \phi_c(t))} + c.c. \quad (4-2-4)$$

また、信号光の電界は次のような式で表される。

$$E_s(t) = \sqrt{\frac{P_{CW}}{2}} e^{-i(2\pi(f_c + f_{RF}(t))t + \phi_c(t) + \varphi(t))} + c.c. \quad (4-2-5)$$

ここで、 φ は信号光に施した位相制御の位相量である。また、ここではローカル光と信号光のパワーを等しいものとしている。ローカル光と信号光を共にファイバに伝送し、O/E 変換部のフォトダイオードにおいて再びマイクロ波に変換する。この時 PD に流れる電流は、次のようになる。

$$I(t) = |E_l(t) + E_s(t)|^2 = \eta P_{CW} (1 + (\cos(2\pi f_{RF}(t) + \varphi(t)))) \quad (4-2-6)$$

したがって、PD に負荷として抵抗 Z_{OUT} が接続されているとき、PD から発生する RF のパワーは次のようになる。

$$P_{RF} = \left(\frac{I(t)}{\sqrt{2}} \right)^2 Z_{out} = \frac{\eta^2 P_{CW}^2}{2} Z_{out} \quad (4-2-7)$$

式(4-2-7)から分かるように、ヘテロダイン変調方式においても、RF パワーは光入力パワー P_{CW} の二乗に比例する。したがって、光入力パワーを増加することにより PD での受信能力は飛躍的に増加する。また、受信能力は直接検波方式よりも大きく、

$$\frac{1}{m^2} \quad (4-2-8)$$

倍になる。したがって、直接変調方式よりもヘテロダイン変調方式の方が効率の良い伝送方式であるといえる。さらに、式(4-2-6)で分かるように、PD から取り出されるマイクロ波の位相は信号光に施す位相制御の位相量であることから、位相の制御は光の波長に対する制御を行うことで可能である。これは、直接変調方式のマイクロ波に行う位相の制御に比べ長さが数桁小さいオーダであり、しかも、光の経路上での制御が可能であることから、本開発の光信号処理型ビーム形成回路には最も適した方式であると考えられる。

以上の検討結果により、ヘテロダイン変調方式が、受信能力が大きく、光での位相制御が可能な点で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に適している。

4-2-2-2 技術課題

次に、E/O、O/E 変換装置における技術課題を述べる。

(a) 変調時の課題

光変調方式としてヘテロダイン方式を採用した場合、キャリア光とローカル光を独立の光源とした場合、光の位相雑音そのまま PD で検波され、RF 信号に変換されてしまう。このため、非常に大きな雑音成分が生じてしまう。これを避けるため、キャリア光とローカル光は同一光源を用いて発生させ、キャリア光とローカル光の光路長を一致させて、光源自身の位相雑音をキャンセルすることが必要になる。このため装置の E/O 変換部には、SSB(Single Side Band)光変調器等を用いた SSB 光源が必要になる。この SSB 光源としては、レーザ光を変調して得られる側帯波光の付加雑音が小さくなる構成が求められる。

(b) 受信能力

4-2-2-1 節にも示したように、直接検波方式とヘテロダイン検波方式との比較では、ヘテロダイン検波方式が受信能力に関して優れている。しかし、式(7)に示した値は、光の入力パワーに対して PD (Photo Diode)が飽和しないという条件でのみ成り立つ。実際の PD では出力電力レベルは限られており、大きな電力を得ることは難しい。このため、PD で出力されたマイクロ波をさらにマイクロ波増幅器等で増幅し、アンテナ等の後段回路に供給する必要がある。しかし、本マルチビームアンテナ装置ではアレーアンテナを用いているため、アレーアンテナ素子の一つ一つにマイクロ波増幅器を接続する必要が生じ、装置の大型化、高消費電力化が避けられない。このため、より小さな増幅器で済むように、高いパワーでも飽和しない、高出力 PD が望まれる。

4-2-3 要素技術の開発

ここでは、E/O、O/E 変換装置における主な要素技術である、SSB 光源及び高出力 PD の開発について述べる。

(a) SSB 光源

E/O 変換部に必要な SSB(Single Side Band)光源では、SSB 変調及び検波に伴って生じる雑音小さくなる構成の検討を行う必要がある。図 4-2-4 にこのような SSB 光源の一構成法を示す。

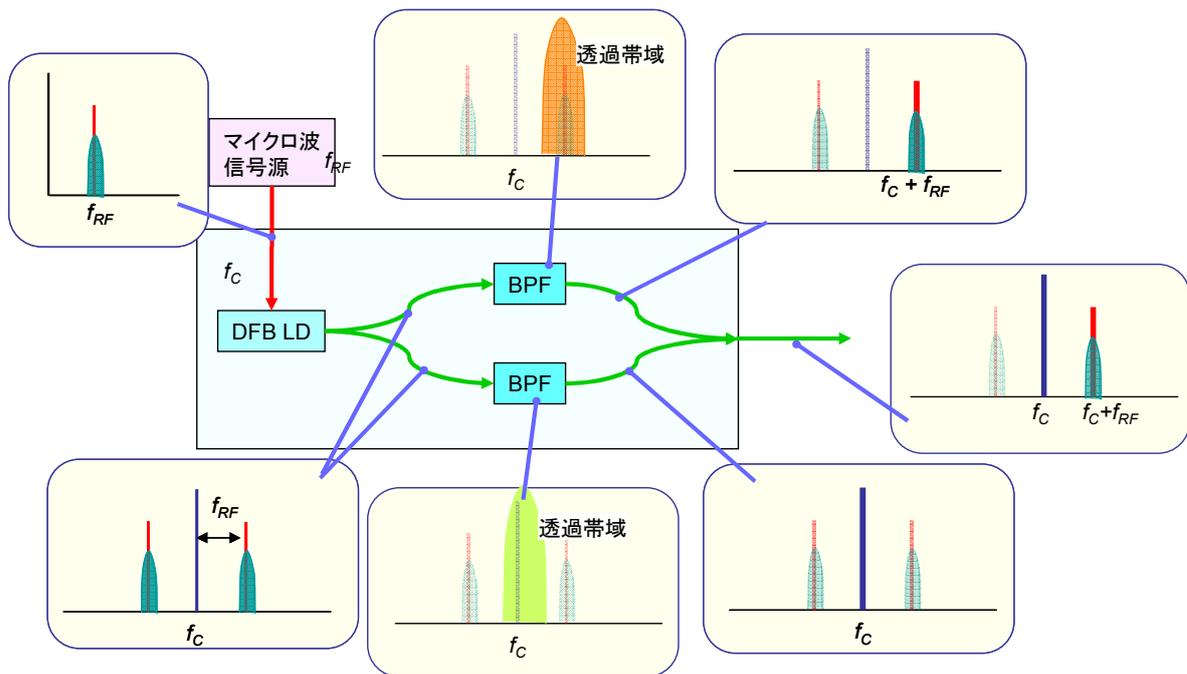


図 4-2-4 SSB 光源 (SSB フィルタモジュール)

図において、LD をマイクロ波で直接変調し変調光を出射している。この変調光は光のキャリア周波数 f_c とともに、この周波数に対して変調マイクロ波周波数 f_{RF} だけ離れた両側波帯のスペクトルを有している。この出力光を光カップラで 2 つに分岐し、それぞれを狭帯域バンドパスフィルタに入力する。バンドパスフィルタの通過帯域は、それぞれ光のキャリア周波数、及び、片側の側波帯の周波数に設定されており、他の信号を全てカットする。この光を再び光合波器で合成することにより、キャリア周波数と片側の単側波帯のみを有する SSB 信号が得られる。

このような SSB 光源では、一般的な SSB 信号が得られることはもちろんであるが、それに加えて、変調時に生じる高調波ひずみを十分抑圧することができるメリットもある。高調波ひずみはキャリア周波数 f_c から変調マイクロ波周波数 f_{RF} の整数倍離れた周波数の信号であり、受信時に他の信号と干渉してひずみを生じる成分である。このため、この構成は低ひずみ受信に適した構成である。

また、狭帯域フィルタを用いるため、LD の相対強度雑音や熱雑音等の広帯域にわたる雑音成分をほとんどカットすることができる。これらの雑音成分も他の周波数の信号と干渉して RF の雑音を生じる。したがって、この構成は低雑音、高 S/N 比を得るためにも適した構成であると言える。今後、より具体的な構成法につき検討予定である。

(b) 高出力 PD

O/E 変換部で必要となる高出力 PD については、大きな光入力に対しても出力マイクロ波電力が飽和しない特性が望まれる。このための一構成として、次のような PD アレーを考える。

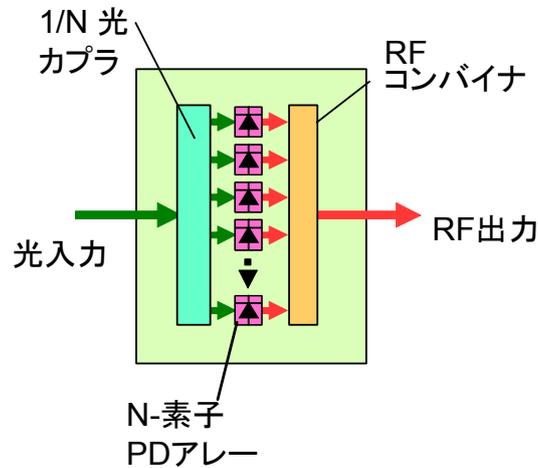


図 4-2-5 PD アレー

図 4-2-5 の PD アレーでは、入力する光をカプラで N 分割し N 個の PD 素子にそれぞれ入力する。それぞれの PD 素子で生じたマイクロ波を、コンバイナにより合成し RF 出力とする。この構成により、各 PD 素子で取り出すことのできる最大パワーをさらに N 倍することができ、ハイパワーの出力が可能である。また、式 (4-2-6) で示したように、それぞれの PD からは、入力光パワーに比例した電流を取り出すことができる。すなわち、1つの PD 当たりに入力する光のパワーを P_{C0} とすれば、PD 単体で生じる電流は、

$$\overline{I}(t) \propto \eta P_{C0} \quad (4-2-9)$$

となる。一方、RF コンバイナの構成として電流加算型の構成をとることにより、出力電流を N 倍にすることができるので、PD アレー全体から出力される RF パワーは、

$$P_{RF} \propto \{\overline{NI}(t)\}^2 \propto N^2 P_{C0}^2 \quad (4-2-10)$$

となり、出力パワーは単体 PD に対して N の二乗倍となる。このように、高出力電気信号を得るために PD をアレー化することは非常に有効と考えられる。

このような構成の PD アレーでは、光の分波、及びマイクロ波の合波では、各 PD 素子から生じるマイクロ波の位相を合わせる必要があるが、あくまでマイクロ波の波長で合成すれば良いので、伝送長の調整は比較的容易である。今後、最も効率のよい構成法、素子数 N の決定などの検討を、その実現性をふまえながら行う予定である。

4-2-4 まとめ

光信号処理回路における E/O, O/E 変換装置における検討を行った。変調・検波方式におけるトレードオフを行い、ヘテロダイン検波方式が有効であることを示した。また、E/O, O/E 変換装置における技術課題を述べた。さらに、これらの課題に着目して SSB 光源及び高出力 PD といった個々の要素技術の開発について検討結果を示した。

4-3 指向性合成技術の研究開発

4-3-1 はじめに

光制御型ビーム形成回路は基礎研究段階であるため、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関して、指向性合成技術が確立されていないのが現状である。今年度は、前章にて示したフーリエ光学系の光信号処理ビーム形成回路に適した解析技術の開発として、ビーム形成技術について検討した。

4-3-2 指向性合成における技術課題

フェーズドアレーアンテナのビーム形成技術としては、アンテナ各素子にマイクロ波移相器で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パターンを制御するデジタルビームフォーミング (DBF)などがある。これらの構成での指向性合成技術については数多く検討されているが、フーリエ光学系の光信号処理ビーム形成回路を用いた構成ではほとんど検討されていないのが現状である。そのため、空間光変調器による強度分布とアンテナ放射パターン間の解析について検討する必要がある。本報告書では光信号処理ビーム形成回路によるビーム形成の要素技術開発として、空間光変調器により形成する光強度分布とアンテナ放射パターンのビーム幅・ビーム走査との関係について検討する。

4-3-3 要素技術開発

(a) ビーム幅検討

フーリエ光学系の光信号処理ビーム形成回路において、空間光変調器の駆動セル形状を変化させた場合について検討した。空間光変調器の駆動セル開口径を $D \times D$ 、FT(フーリエ変換)レンズの焦点距離を f とすると、アレーアンテナ放射パターンのビーム幅 Θ は解析的に与えられ式(4-3-1)のように表される。ただし、アレーアンテナの素子数を無限大として近似している。

$$\Theta = 2\sin^{-1}\left(m \cdot \frac{D}{2f}\right) \quad (4-3-1)$$

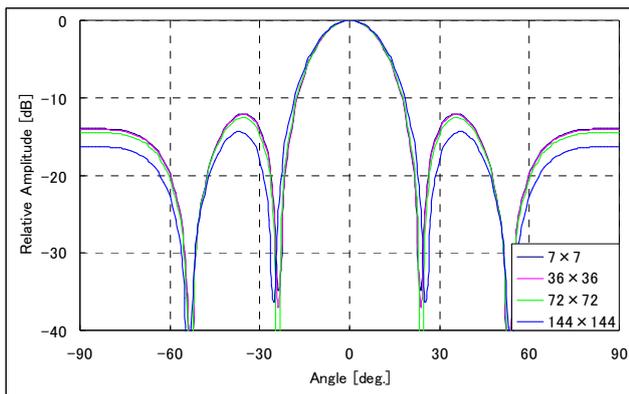
上式より、空間光変調器の駆動セル開口径 $D \times D$ と FT レンズ 焦点距離 f との比 D/f が大きくなると、ビーム幅 Θ は D/f に比例して増大する。

空間光変調器の駆動セル開口径を変化させた場合についてシミュレーションを実施した。計算条件を表 4-3-1 に示す。図 4-3-1 の(a)~(d)にアレーアンテナの素子数を 5 素子, 11 素子, 21 素子, 31 素子とし、空間光変調器の駆動セルを 7×7 , 36×36 , 72×72 , 144×144 とした場合の放射パターンを示す。

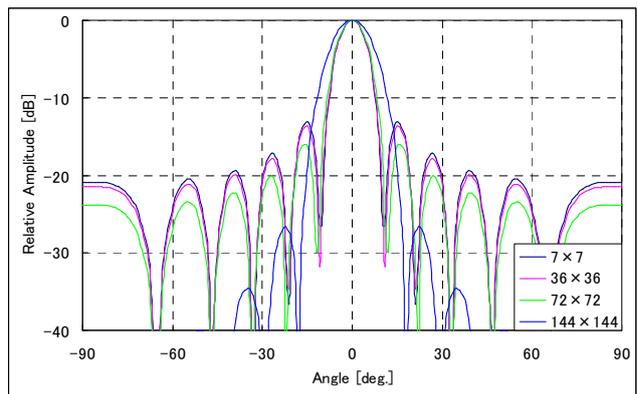
計算結果より、5 素子アレーでは光サンプリングアレーによりサンプリングする範囲が小さいため、信号光のマスクを大きくしても放射パターンにそれほど大きな違いは見られないが、11 素子アレーでは、信号光のマスクを大きくするにしたがってビーム幅が広がっていく様子が分かる。また、さらに素子数を多くするとビーム幅が広がると同時に放射パターンは矩形ビームへと近づいていく様子が分かる。これは光サンプリングアレー上の電力分布において、素子数が小さい場合は電力分布の上側部分のみをサンプリングし、素子数が多くなるにしたがって裾のほうまでサンプリングするようになるためである。したがって、光サンプリングアレーが無限に広がっている場合には放射パターンは矩形ビームとなる。

表 4-3-1 計算条件

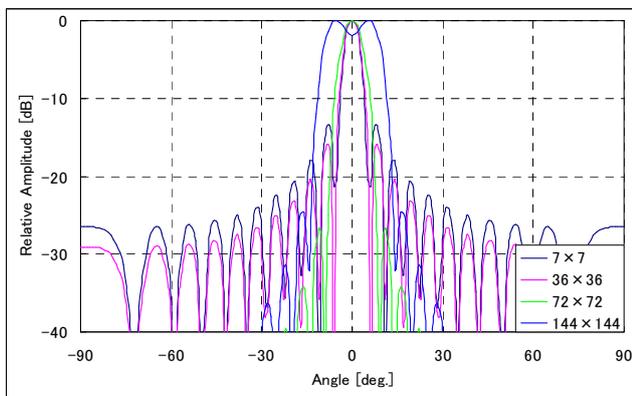
アレーアンテナ	計算周波数 素子数 素子間隔 素子パターン	10 GHz 5,11,21,31 素子(リニアアレー) $0.5 \lambda_m$ (λ_m はマイクロ波の波長) 点波源
空間光変調器	同時駆動セル	7×7 36×36 72×72 144×144
信号光	波長 空間光変調器上での電力分布 FT レンズ焦点距離	$1.55 \mu\text{m}$ 均一分布 805 mm
参照光	波長 光サンプリングアレー上での電力分布	$1.55 \mu\text{m}$ 均一分布
光サンプリングアレー	間隔	$125.0 \mu\text{m}$



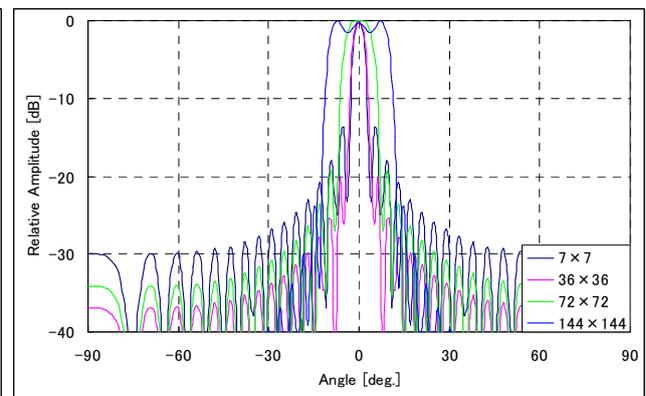
(a) 5 素子リニアアレー



(b) 11 素子リニアアレー



(c) 21 素子リニアアレー



(d) 31 素子リニアアレー

図 4-3-1 放射パターン

(b) ビーム走査検討

フーリエ光学系の光信号処理ビーム形成回路において、空間光変調器の駆動位置を変化させた場合について検討した。計算条件を表 4-3-2 に示す図 4-3-2 に空間光変調器の駆動セルの座標を、図 4-3-3 に光サンプリングアレーの素子間隔、図 4-3-4 にアレーアンテナの素子間隔を示す。

空間光変調器の駆動セル(19×19 セル)の位置を光軸中心から +x 方向へシフトさせ、そのときのアレーアンテナのビーム走査を確認する。アレーアンテナのビーム走査角と空間光変調器の駆動セルとの関係は式(4-3-2)～式(4-3-4)より表 4-3-3 のように表される。ビーム走査角 0°, 20°, 40°, 60° に相当する空間光変調器の駆動セルの位置 (x 方向シフト量)を 0 セル, 140 セル, 265 セル, 355 セルとした場合について放射パターンを計算した。

$$\Theta = \sin^{-1}\left(m \cdot \frac{r_0}{f}\right) \quad \left(0 \leq \Theta \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (4-3-2)$$

$$\Phi = \phi_0 \pm \pi \quad (-\pi \leq \Phi \leq \pi) \quad (4-3-3)$$

$$m = \frac{d_x/\lambda_0}{d_{ax}/\lambda_m} = \frac{d_y/\lambda_0}{d_{ay}/\lambda_m} \quad (4-3-4)$$

ただし、式(4-3-2)～式(4-3-4)の各要素は以下の通りである。

- (r_0, ϕ_0) : 空間光変調器の駆動セルの位置
- f : FT(フーリエ変換)レンズの焦点距離
- d_x, d_y : 光サンプリングアレーの x_1, y_1 方向の配列間隔
- d_{ax}, d_{ay} : アレーアンテナの各素子の X, Y 方向の配列間隔
- λ_m : マイクロ波の波長
- λ_0 : フーリエ変換光 P_1 の波長

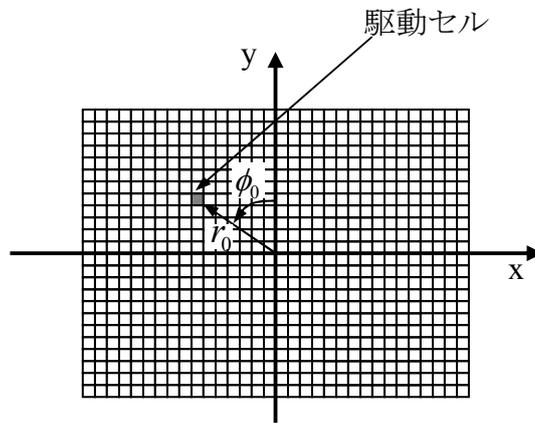


図 4-3-2 空間光変調器の駆動セル

表 4-3-2 計算条件

アレーアンテナ	計算周波数 素子数 素子間隔 素子パターン	10 GHz 61 素子 (正三角配列) $d_{ax}=8.50 \text{ mm}$, $d_{ay}=14.71 \text{ mm}$ 点波源
空間光変調器	セルサイズ セルピッチ 同時駆動セル セル反射率	$13.0 \times 13.0 \mu\text{m}^2$ $13.8 \times 13.8 \mu\text{m}^2$ 19 × 19 1.0
信号光	波長 空間光変調器上での電力分布 FT レンズ焦点距離	1.55 μm 均一分布 805 mm
参照光	波長 光サンプリングアレー上での電力分布	1.55 μm 均一分布
光サンプリングアレー	間隔	$d_x=62.50 \mu\text{m}$, $d_y=108.25 \mu\text{m}$

表4-3-3 ビーム走査角と空間光変調器の駆動セルとの関係

ビーム走査角 Θ ($\Phi=0^\circ$)	空間光変調器の駆動セル x 方向シフト量 (y 方向=0)
0°	0 セル
20°	140 セル
40°	265 セル
60°	355 セル

図 4-3-5～図 4-3-8 に空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 0 セル, 140 セル, 265 セル, 355 セルとした場合のアレーアンテナの励振分布計算結果を示す。(a)は振幅分布, (b)は位相分布を表している。図 4-3-9～図 4-3-12 に空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 0 セル, 140 セル, 265 セル, 355 セルとした場合の放射パターン計算結果を示す。(a)は 2 次元放射パターン, (b)は $\phi=0^\circ$ カット面放射パターンを表している。

計算結果より, 空間光変調器の駆動セルの位置を変えることで, 光サンプリングアレーにおける位相波面が傾き, アンテナ放射パターンにおいてビーム走査していることが確認できた。

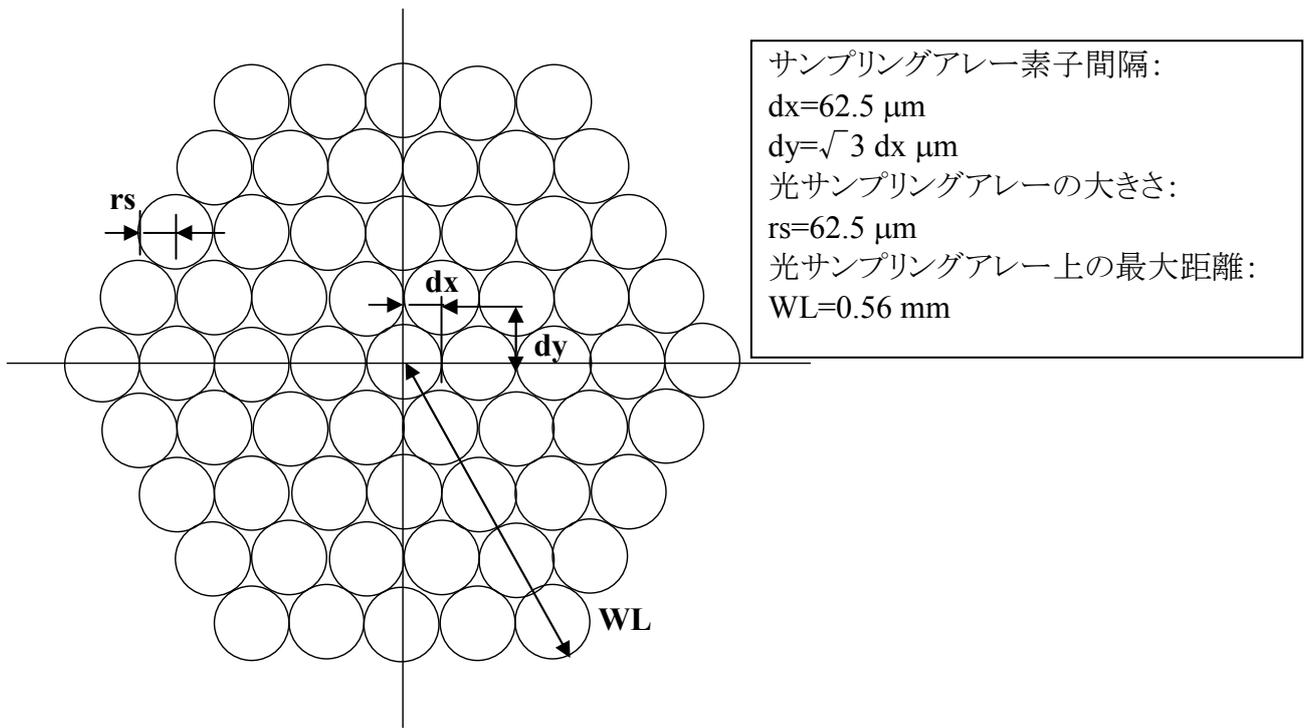


図4-3-3 光サンプリングアレー素子間隔

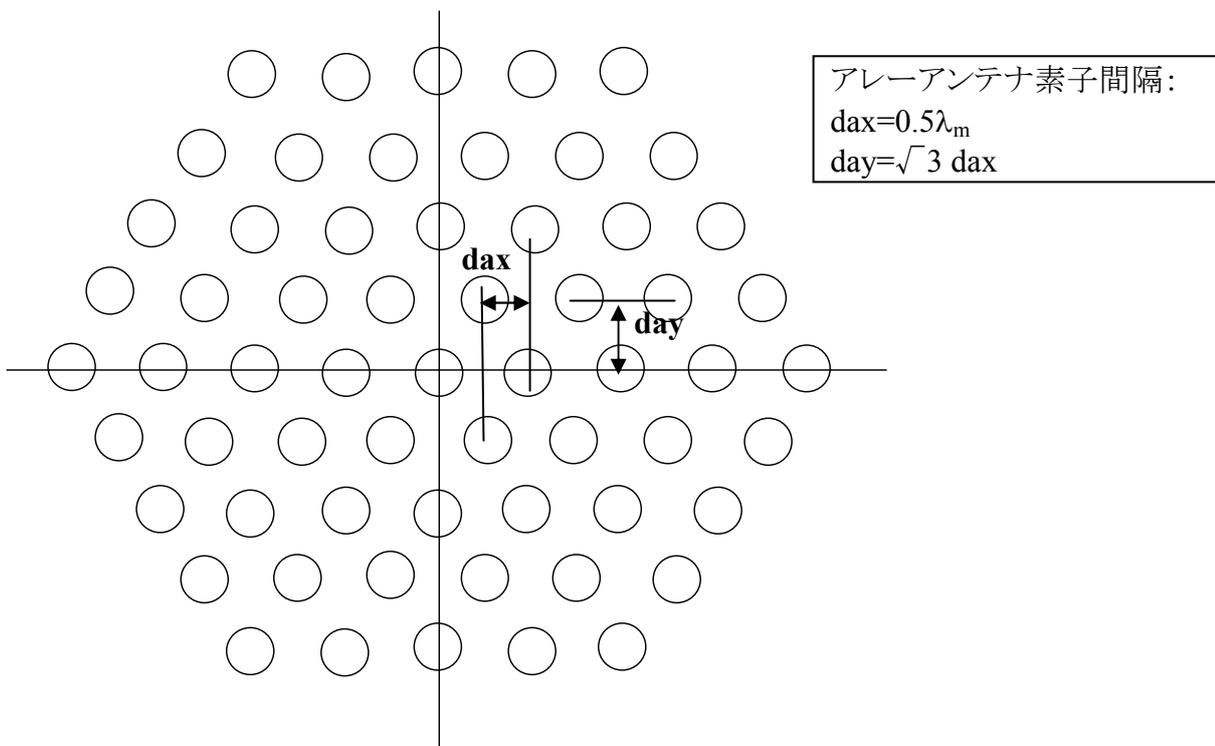
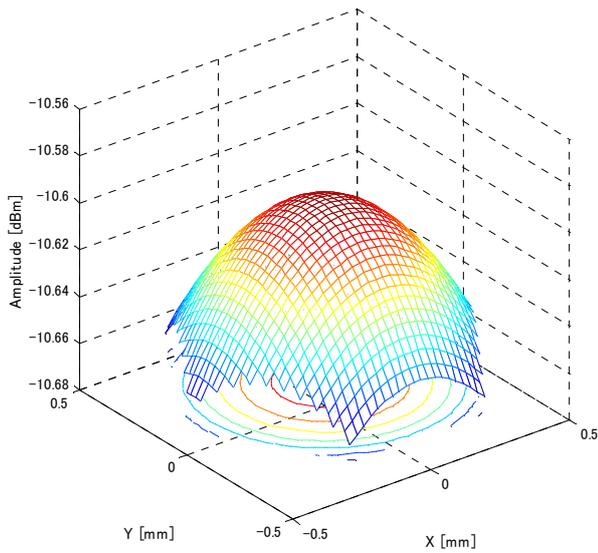
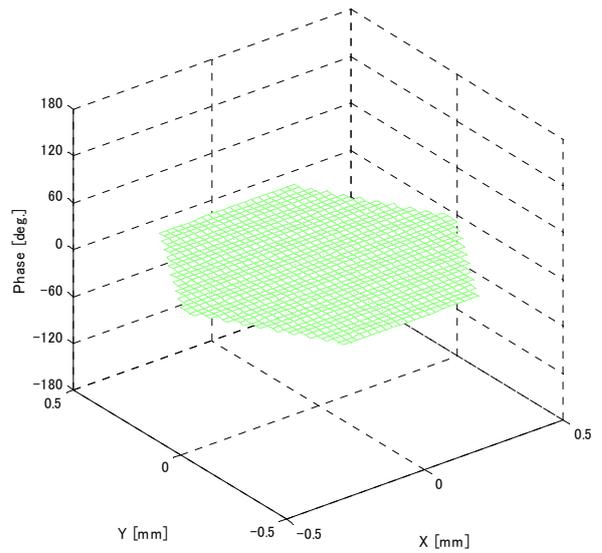


図 4-3-4 アレーアンテナ素子間隔

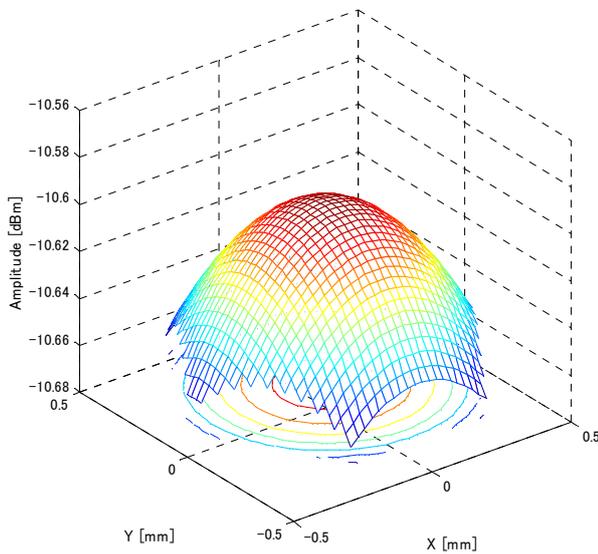


(a) 振幅分布

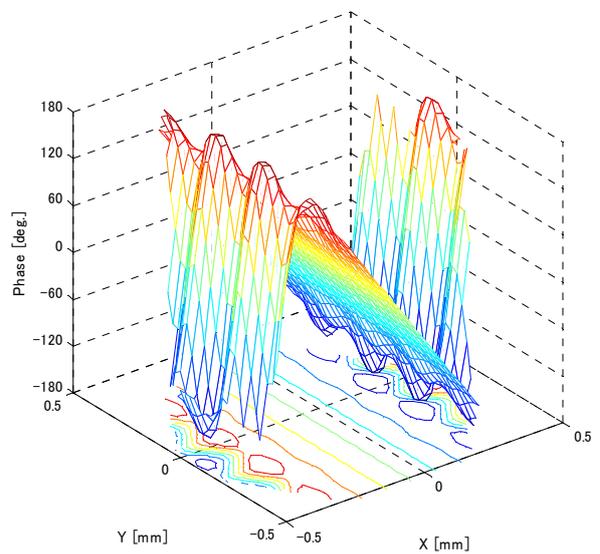


(b) 位相分布

図 4-3-5 アレーアンテナ励振分布
空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 0 セル(ビーム走査角 0° に相当)

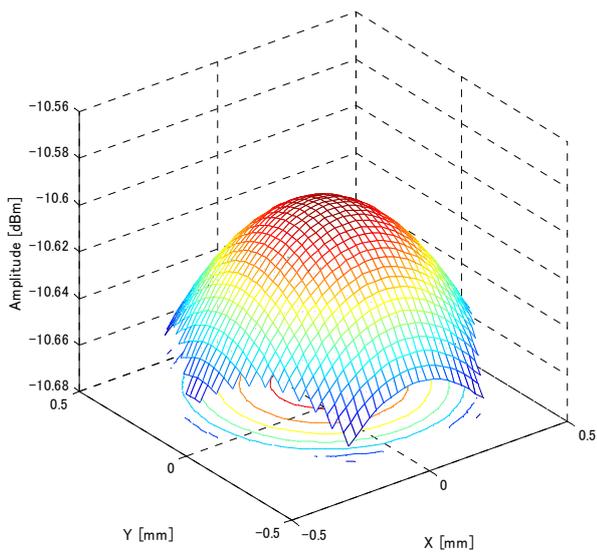


(a) 振幅分布

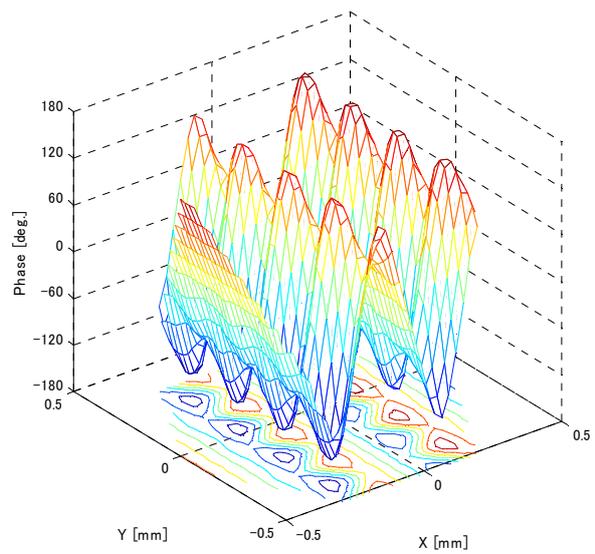


(b) 位相分布

図4-3-6 アレーアンテナ励振分布
空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 140 セル(ビーム走査角 20° に相当)



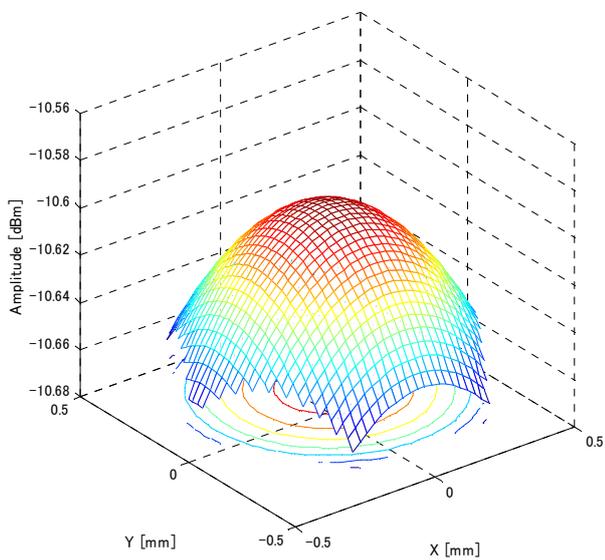
(a) 振幅分布



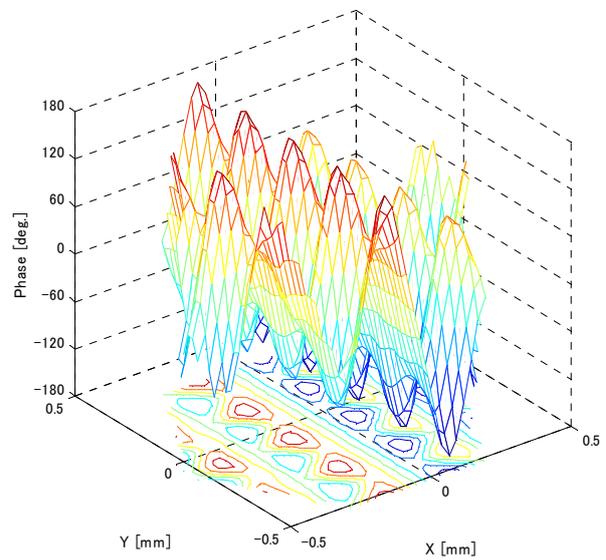
(b) 位相分布

図4-3-7 アレーアンテナ励振分布

空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 265 セル(ビーム走査角 40° に相当)



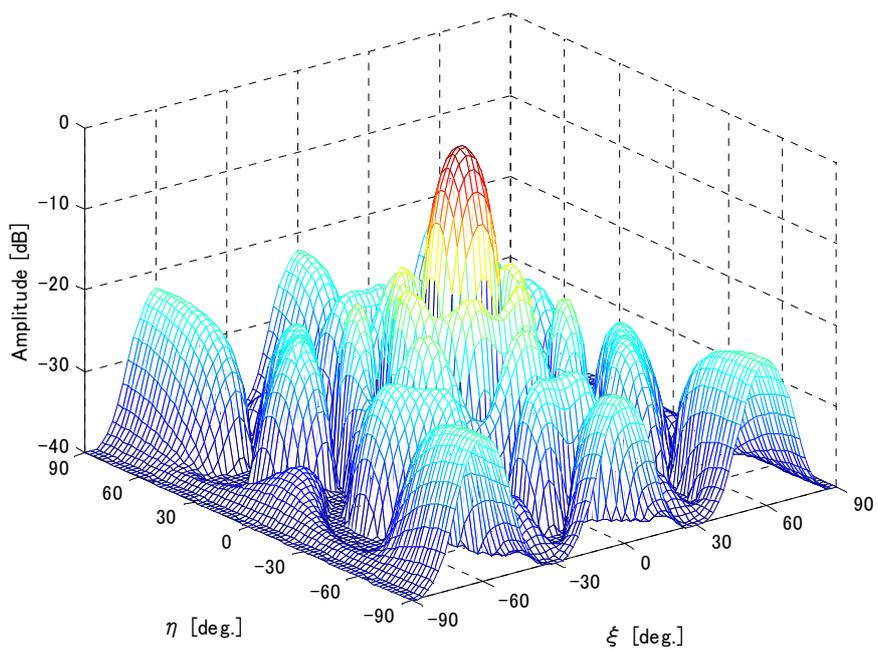
(a) 振幅分布



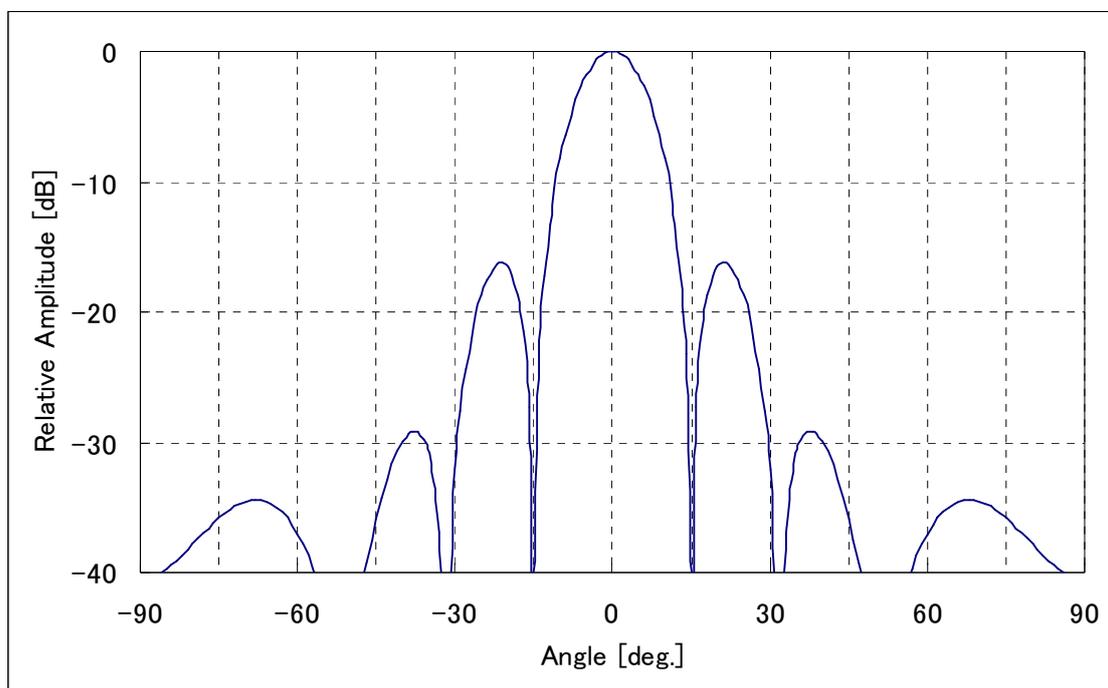
(b) 位相分布

図 4-3-8 アレーアンテナ励振分布

空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 355 セル(ビーム走査角 60° に相当)

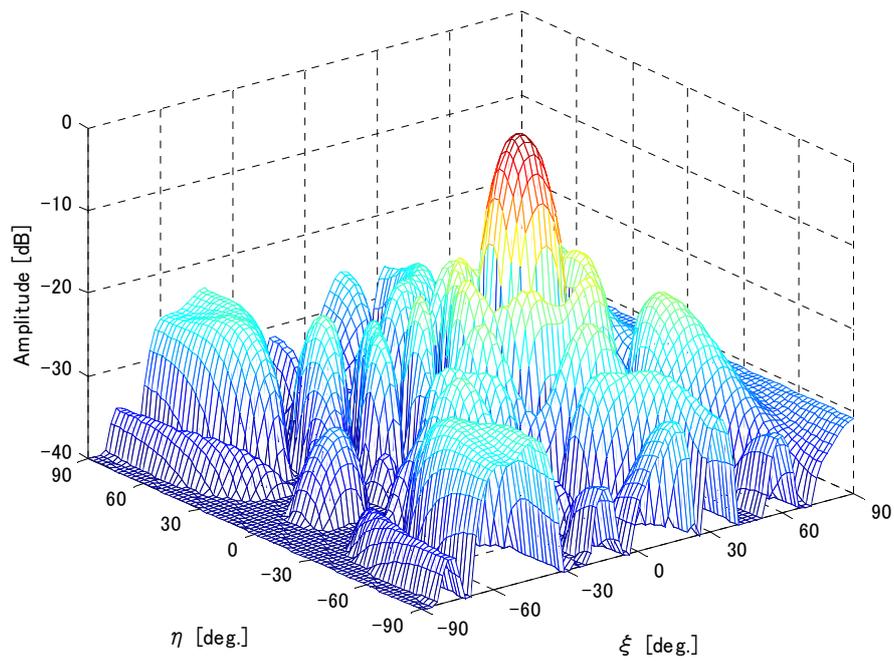


(a) 2次元放射パターン

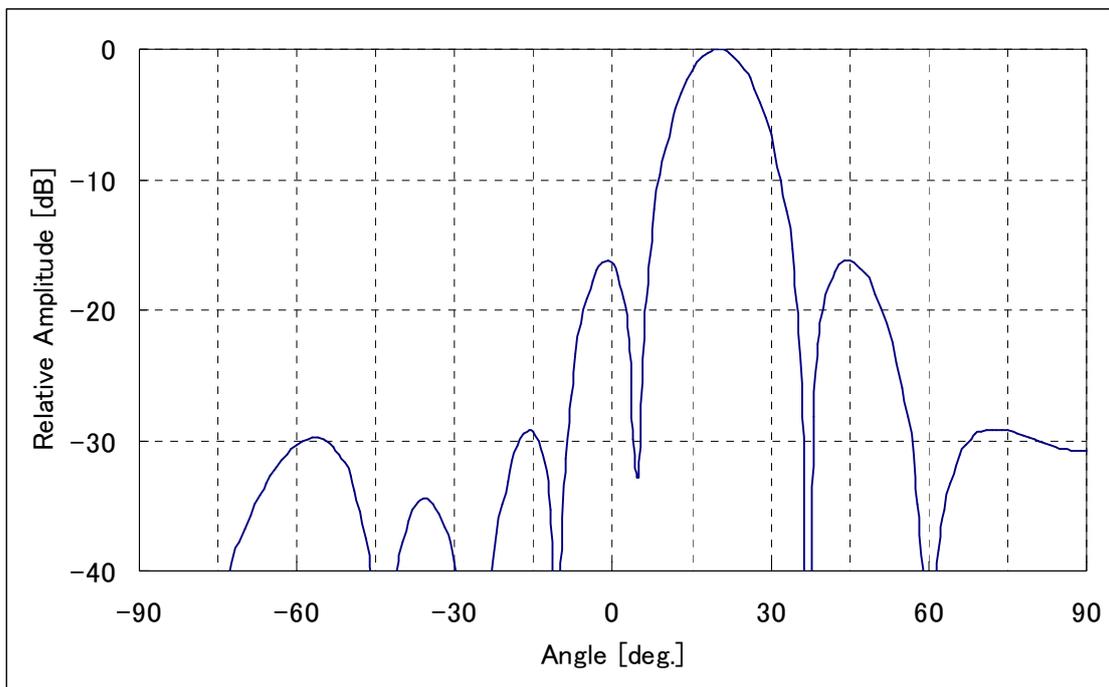


(b) カット面パターン ($\phi = 0^\circ$)

図 4-3-9 放射パターン
空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 0 セル(ビーム走査角 0° に相当)

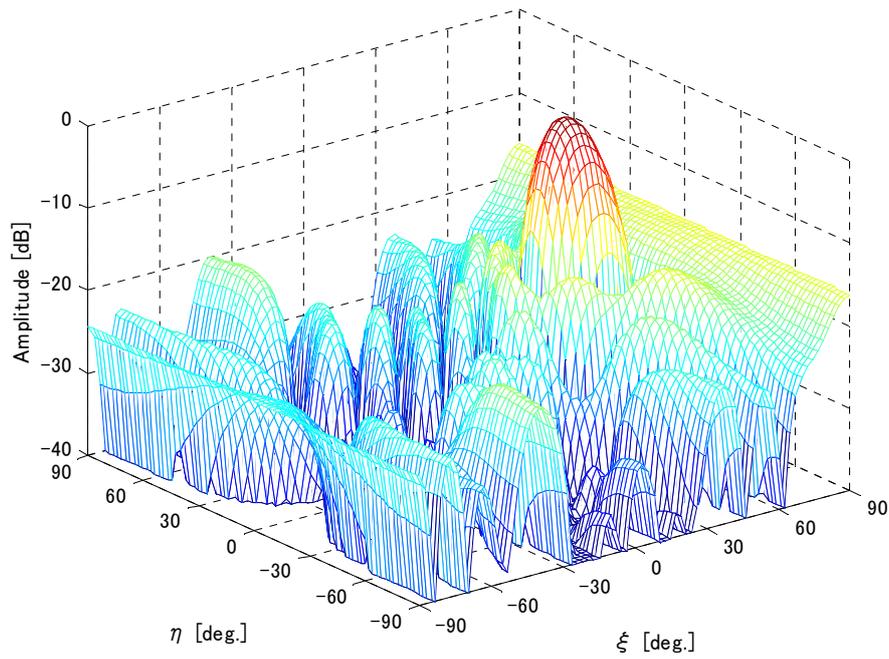


(a) 2次元放射パターン

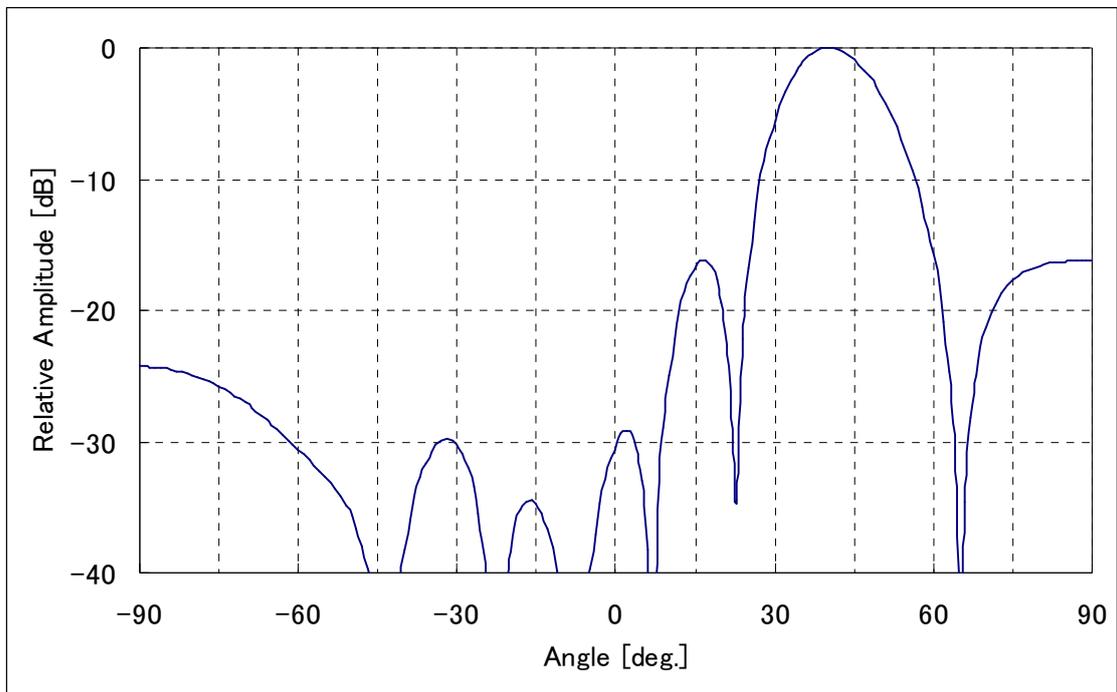


(b) カット面パターン ($\phi=0^\circ$)

図4-3-10 放射パターン
空間光変調器の駆動セルの位置(x方向シフト量)を140セル(ビーム走査角 20° に相当)

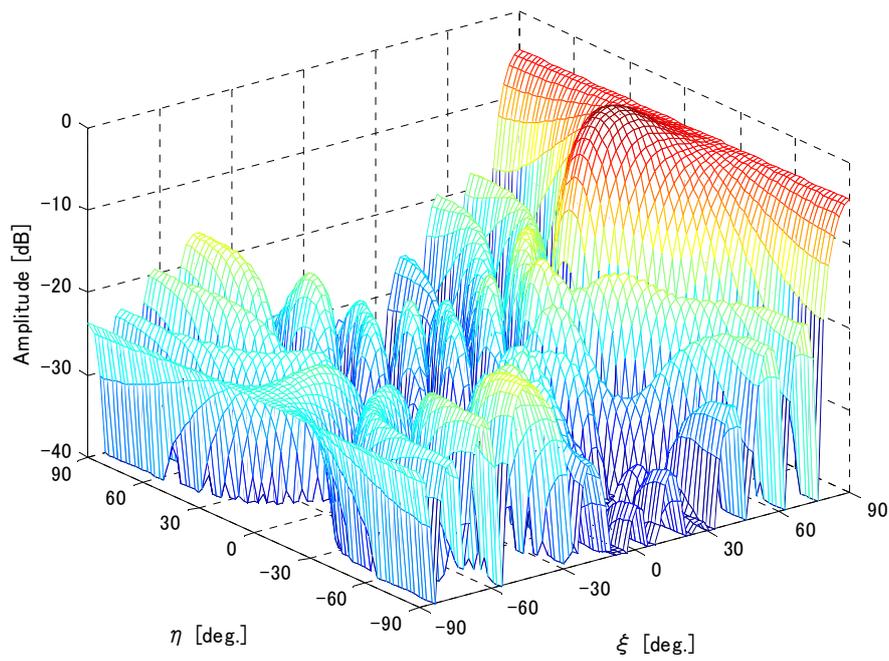


(a) 2次元放射パターン

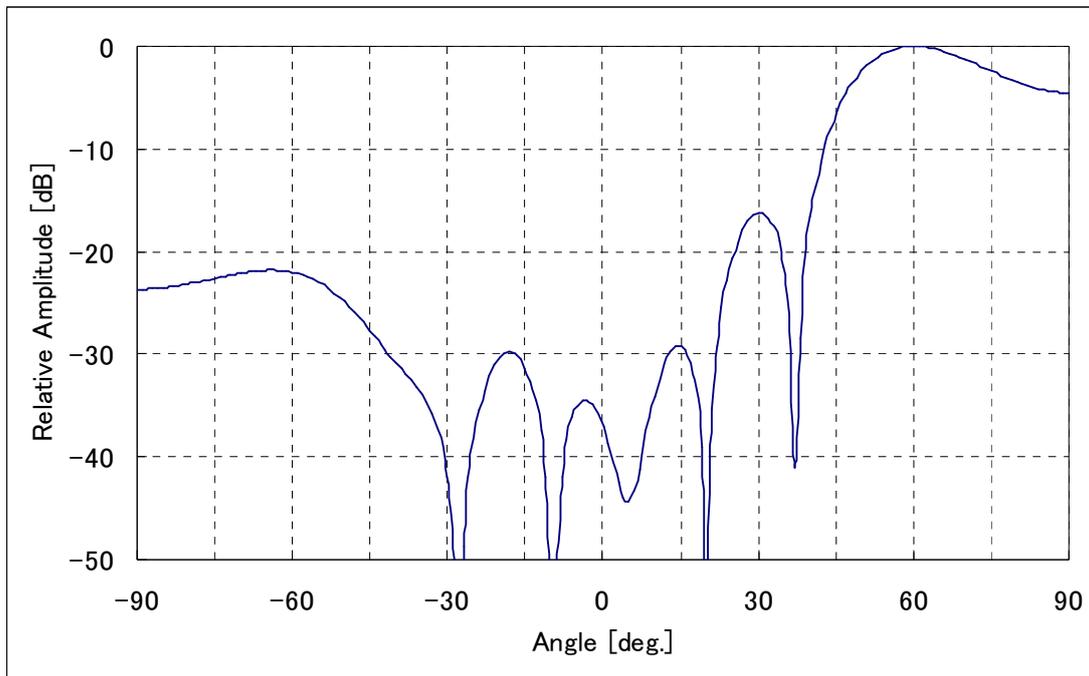


(b) カット面パターン ($\phi=0^\circ$)

図4-3-11 放射パターン (ビーム走査角 40°)
空間光変調器の駆動セルの位置(x方向シフト量)を265セル(ビーム走査角 40° に相当)



(a) 2次元放射パターン



(b) カット面パターン ($\phi = 0^\circ$)

図 4-3-12 放射パターン (ビーム走査角 60°)
空間光変調器の駆動セルの位置(x 方向シフト量)を 355 セル(ビーム走査角 60° に相当)

4-3-3 まとめ

光信号処理ビーム形成回路に適した解析技術の開発として、ビーム形成技術について検討した。空間光変調器による光強度分布と、アンテナ放射パターン間の解析、シミュレーション技術の研究開発を実施し、空間光変調器光強度分布形状による放射パターン形状の変化及び空間光変調器の駆動位置によるビーム走査について確認した。

前章におけるトレードオフの結果、今後は空間位相変調型の光信号処理ビーム形成回路について検討を進めるため、次年度以降に空間位相変調型における指向性合成技術検討としてビーム形成技術、サイドローブ低減化アルゴリズム、キャリブレーション技術の検討・開発を行う予定である。

4-4 総括

「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」における、H16年度の各課題の実施内容をまとめる。

1. 光信号処理回路技術(光面生成技術)

- (1) 光制御型ビーム形成回路の開発を行うにあたり、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、方式トレードオフを行った。その結果、反射型の空間位相変調器を用いた位相制御方式を選定した。
- (2) 位相制御方式を実現するための技術課題を下記のように整理した。
 - 光電変換されたマイクロ波信号レベルを高めるために、耐光入力に優れたセグメントミラーを用いた空間光変調器が必要である。さらに、セグメントミラー駆動時の反射面変動を抑える構成とする必要がある。
 - 信号光，ローカル光間の光路長差(時間差)による、位相の変動，位相雑音の増加を抑制する必要がある。
- (3) 技術課題に対して試作試験を含めた開発を下記のように行った。
 - ・高耐入力空間光変調器の開発
 - 空間光変調器の構成をトレードオフ検討し、アレー状のミラーをアクチュエータに接合した反射型空間光変調方式を選定した。本構成において、アクチュエータの変位によるミラー反射面の傾き変動，変形の解析，アクチュエータとして用いるピエゾ素子の振動試験を行い，所望の性能が得られる見込みを得た。
 - ・出力マイクロ信号の位相安定化方式の開発
 - マイクロ波信号伝送方式についてトレードオフ検討し，信号光，ローカル光を同一の光ファイバで伝送し，光信号処理回路内で分波する方式を選定した。分波装置としてエタロンを用いた光分波回路の試作試験を実施し，信号光，ローカル光間に所望のアイソレーションが得られることを確認した。
- (4) H17年度の開発課題の整理
 - ・反射型空間光変調器の試作試験を実施し，光波面生成技術を確立する。
 - ・空間光変調器で生成する所望光波面の光演算技術を確立する。
 - ・上記光波面生成技術，光演算技術を組み合わせた光信号処理回路を製作する。

2. 光信号処理回路技術(E/O, O/E 変換技術)

- (1) 光信号処理回路における E/O, O/E 変換装置の開発を行うにあたり，変調方式の受信能力，及び信号処理装置の小型化の観点から，トレードオフを行った。その結果，ヘテロダイン変調方式が有効であることを示した。
- (2) ヘテロダイン変調方式を実現するための技術課題を下記のように整理した。
 - 受信信号の位相雑音を低減するための SSB 光源が必要である。この光源において，光の雑音が電気信号に受信されない構成とする必要がある。
 - 受信能力を大きくし，アレーアンテナ装置の小型化を図るため，高出力 PD の開発が必要である。
- (3) 各技術課題に対して下記のような検討を行った。
 - ・SSB 光源の開発
 - 電気光変換部において，一つの LD 光源による変調光を2つに分岐し，キャリア光と信号光をそれぞれの光学フィルタで取り出し，これを合波する構成によって，LD 光の雑音をキャンセルでき位相雑音の少ない E/O, O/E 変換装置が得られることを示した。
 - ・高出力 PD の開発

-光電気変換部において、単体の PD では得られない高出力な RF 出力を得るため、PD をアレーにし飽和電力を高めることにより従来よりもハイパワーの出力が得られる可能性を示した

(4) H17年度の開発課題の整理

・本課題である SSB 光源及び高出力 PD の、より具体的な実現性、構成法について検討し、試作・検証を行う。

3. 指向性合成技術

(1) 光信号処理ビーム形成回路に適した解析技術の開発として、ビーム形成技術について検討した。

(2) 指向性合成技術の技術課題を下記のように整理した。

-空間光変調器による光強度分布と、アンテナ放射パターン間の解析技術の確立。

-空間光変調器の光強度分布形状による放射パターン形状の確認。

(3) 指向性合成技術の技術課題に対して下記のような検討を行った。

・解析シミュレーション技術の開発

- 空間光変調器による光強度分布と、アンテナ放射パターン間の解析、シミュレーション技術の開発を実施した。

・放射パターン形状の確認

-空間光変調器光強度分布形状による放射パターン形状の変化及び空間光変調器の駆動位置によるビーム走査について確認した。

(4) H17年度の開発課題の整理

・空間位相変調型における指向性合成技術検討としてビーム形成技術、サイドローブ低減化アルゴリズム、キャリブレーション技術の検討・開発を行う予定である。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

なし