HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 二重位相共役鏡による光衛星間通信システムの高性能化に関する研究 |
| Author(s) | 西牧, 可織 |
| Citation | 北海道大学. 博士(情報科学) 甲第11757号 |
| Issue Date | 2015-03-25 |
| DOI | 10.14943/doctoral.k11757 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/58886 |
| Type | theses (doctoral) |
| File Information | Kaori_Nishimaki.pdf |

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博士論文

# 二重位相共役鏡による光衛星間通信システムの高性能化に関する研究

***Study on performance improvement of optical inter-satellite communication systems by using a double phase conjugate mirror***

北海道大学大学院情報科学研究科
情報エレクトロニクス専攻
先端エレクトロニクス講座
光エレクトロニクス研究室
西牧　可織

# 目次

**第 1 章　序論 ---------- 1**

**第 2 章　光衛星間通信の概要 ---------- 5**

2.1.　光衛星間通信の研究動向

2.2.　フォーメーションフライング

2.3.　通信方式

2.4.　光衛星間通信における課題

2.4.1.　高精度な捕捉・追尾

2.4.2.　背景光雑音の影響

**第 3 章　フォトリフラクティブ結晶を用いた二重位相共役鏡---------- 17**

3.1.　フォトリフラクティブ効果

3.2.　二重位相共役鏡（DPCM）

3.3.　$Sn_2P_2S_6$ 結晶

**第 4 章　二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システム---------- 30**

4.1.　二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムによる衛星間リンク形成

4.2.　二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムの利点

**第 5 章　二重位相共役鏡の動作特性を利用した追尾性能の向上---------- 36**

5.1.　$Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いた二重位相共役鏡の動作特性

5.1.1 数値解析

5.1.2 実験

5.2.　追尾性能の評価

**第 6 章　2 値位相板を用いた背景光低減手法の評価---------- 58**

6.1.　背景光低減手法の動作原理

6.2.　数値解析

6.3.　背景光低減効果の評価

6.4.　2 値位相板の最適化

**第 7 章　位相共役技術の地上光無線通信システムへの応用---------- 75**

第 8 章　結論 ---------- 77

謝辞 ---------- 79

参考文献 ---------- 80

著者の研究業績一覧 ---------- 85

# 第1章　序論

20 世紀初期における相次ぐ大戦などをきっかけとし，世界各国は地球の大気圏外である宇宙空間の研究・開発を，軍事利用目的を中心として活発に進めてきた．その後，軍事目的のみならず，惑星探査や気象情報の取得など人工衛星を介した多様な情報収集を目的とした宇宙空間の開発・利用が急速に発展してきた．特に衛星通信の分野に着目すると，テレビの衛星放送や GPS などに利用されており，我々にも身近な宇宙開発技術となっている[1-3]．さらに地上の通信施設が災害などで損害を受けた場合に，地上の災害の影響を受けない衛星を介することで，災害時であっても通信ネットワークを構築することができるため，衛星通信は非常に重要な通信手段となっている．衛星通信は地上から数百 km 離れた低軌道上および数十万 km 離れた高軌道上，そして 36000km 離れた静止軌道上に人工衛星を打ち上げ，衛星を中継基地として地球上の離れた場所同士で通信を行う手法である．しかし，地上の通信基地からは見えない位置に衛星がある場合は，通信を行うのが難しい．その場合，地上から見える位置にある衛星をもう一つの中継点とし，衛星間でも通信を行う必要がある．このように，衛星通信は衛星と地上間における通信，そして衛星間における通信の二つに分類することができる．

現在まで，衛星間を繋ぐ搬送波として電波を用いたものが一般的であった．しかしながら近年，電波に代わりレーザ光を搬送波として用いた光衛星間通信技術の研究開発が活発に行われている[4-6]．光衛星間通信は，高速・大容量通信が可能であるほか，レーザ光の指向性が高いことから，自由空間における搬送波の拡散が抑制され消費電力の低減が可能となる，また電磁干渉の影響がなく，搬送波の送受信アンテナの小型化も達成できる．また，衛星間通信は大気の影響のない宇宙空間で行われるため，雨や雲による通信光の吸収や散乱等は考慮しなくてもよく，高品質で安定的な通信環境を実現することができる．

しかしながら，光衛星間通信の技術開発において主に 2 つの課題が挙げられる．一つ目の課題は，衛星の捕捉・追尾の難しさである[7]．通常の衛星間通信においては，まず衛星 A が衛星 B に向けて，予め衛星の位置を予測した上で要求光を射出し走査を行う．この走査によって衛星 B に要求光が入射すると（捕捉），次に，要求光の伝搬方向から予測した衛星 A の位置に向けて衛星 B から信号光を射出し（追尾）．この信号光を衛星 A が受光すれば通信が成立する．しかし，指向性の高いレーザ光を数 100～1000km も距離の離れた衛星のアンテナに入射させるのは非常に難しく，そのためには高精度な捕捉・追尾を行うことのできる機能の搭載が不可欠となる．このような機能の搭載によって衛星は大型化・複雑化することとなり，結果的には打ち上げコストの増大やメンテナンスの難航化を招くため，光衛星間通信の発展の大きな足枷となってしまう．

二つ目の課題は，太陽光を主とした背景光の低減である[8,9]，信号光とともに背景光を受光すると，信号を判定するしきい値処理において，ビットエラーが生じてしまい，その結

果，信号の再送が必要となり，通信速度が大幅に低下してしまう．この対策として，信号光のパワーを増幅させることが考えられるが，消費電力が増大するため光衛星間通信の利点を生かすことができない．現在までに，背景光と信号光を分離するフィルタ（波長フィルタ，偏光フィルタ，遮光板など）を適用することで背景光のカットを行ってきた．しかし，波長フィルタは同波長，偏光フィルタは同じ偏光成分，遮光板は通信方向と同方向からの背景光成分を透過してしまうことから十分とは言えない[10]．したがって，小型で簡易な光学系でありながら捕捉や追尾を行うことができ，さらに背景光を効率よく低減できる光衛星間通信システムが必要とされている．

本論文では，これらの問題点を解決するためにフォトリフラクティブ効果による二重位相共役鏡（DPCM）を用いた光衛星間通信システムを新たに提案する．DPCM とは，互いにインコヒーレントな二本の入射光ビームに対して，それぞれの位相共役波を回折するデバイスのことである[11-18]．本システムでは， DPCM を用いて信号が要求光の位相共役波になるように変換し，位相共役波の波面特性・伝搬特性を利用することで，自動追尾や背景光の分離を同時に可能とする．具体的には，フォトリフラクティブ結晶を送信機衛星の内部に設置し，送信機衛星内部のレーザからの信号光と受信機衛星から出射された要求光を結晶に入射させることによって DPCM を形成する．DPCM によって信号光は要求光の位相共役光として回折される．位相共役光は時間反転波の性質を有することから，信号光は拡散することなく波面補正されながら要求光の伝搬経路を正確にたどり受信機へ入射する．このとき，衛星間の相対位置のずれや衛星の振動等が発生し，DPCM へ入射する要求光の入射角度が変化しても，それに応じて DPCM 内の回折格子が動的に書き換えられて信号光が回折される．このため，高精度な捕捉・追尾機能が不要となり，光衛星間通信システムにおける一つ目の課題である捕捉・追尾の難しさが緩和できる．

また，要求光と信号光の波面を位相共役関係にすることで，背景光波面との間に波面差異を生み出すことができ，背景光を効率的に分離することを可能にする．本研究では，まず，背景光と通信光の波面に差異を生み出すために，波面歪みを与える位相板を受信機アンテナ開口に設置する．次に，位相板を透過させた要求光を送信機へ向けて伝搬させると，DPCM において要求光の位相共役波として回折される信号光は，波面歪みを有して受信機へ入射する．しかし，信号光は受信機に設置した位相板を透過することにより，平面波に復調される．一方で，信号光とともに受信機へ入射する背景光は，位相板によってランダムな波面に変調される．この二つの波面を，レンズによる縮小光学系とピンホールで構成される空間フィルタに通過させると，平面波である信号光は損失なくピンホールを通過するが，ランダムな波面分布の背景光はレンズで集光しきれずにピンホール上で広がるためカットできる．この手法は，位相共役光の性質を利用し，空間的に通信光と背景光を分離するため，波長や偏光によらず背景光をカットすることができる上，従来のフィルタと組み合わせることによってより効率的に背景光を低減することが可能となる[19]．

これらに加えて，DPCM において回折される位相共役波のパワー（位相共役反射率）は，

DPCM に用いるフォトリフラクティブ結晶の種類や結晶への光波の入射条件に応じて向上することが明らかとなっている[20]．したがって，背景光の低減効果に加え，高い位相共役反射率の実現により，光増幅器など機械的な制御を必要とせずに，小型ながら，長距離通信に必要とされるパワーを確保することができる画期的な衛星間通信システムを実現することが期待できる．

第 2 章では，光衛星間通信の現在までの研究動向について述べるほか，光衛星間通信の変調方式，光衛星間通信における問題点についても説明する．

第 3 章では，フォトリフラクティブ結晶を用いた位相共役波の生成手法（二重位相共役鏡）について述べるほか，フォトリフラクティブ結晶の一つである $Sn_2P_2S_6$ 結晶の特徴についても述べる．

第 4 章では，二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムを提案し，提案手法の動作説明を行う．第 3 章で述べた二重位相共役鏡を用いて，光衛星間通信における通信リンクを形成するための要求光および信号光の両波面を互いに位相共役関係になるように変換する．その結果，波面の拡散を抑えて効率的に通信光を伝搬することが可能になる．また，提案システムでは，衛星の自動的な追尾が可能となるほか，背景光と通信光の間に波面差異を生み出すことに基づき，空間的なフィルタリングを行うことができる点などについても述べる．

第 5 章では，第 4 章で提案した光衛星間通信システムにおける衛星の自動追尾機能を検証する．自動追尾機能を検証するためには，二重位相共役鏡によって信号光が要求光の位相共役波として時間的・空間的にどのように回折されるかを明らかにする必要がある．本章では，二重位相共役鏡におけるビームの伝搬過程を数値解析により求めるほか，実際に $Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いて二本のビームにより二重位相共役鏡を形成する実験も行う．数値解析・実験の双方より，二重位相共役鏡によって回折される位相共役波のパワーおよび時間変化を評価する．さらに，この結果に基づいて従来の光衛星間通信における時間的・空間的な追尾性能と比較し，追尾精度を大幅に緩和できることを明らかにする．

第 6 章では，第 4 章で提案した光衛星間通信システムにおける背景光の低減効果について検証する．本章では，背景光と信号光を空間的に分離するために重要となる空間フィルタにおいて，位相板を搭載することを提案した上で，より効果的に背景光を分離するために 2 値位相マスクの設計を行った．数値解析によって，2 値位相マスクを用いた場合の送受信機衛星間の通信光伝搬シミュレーションを行い，受信機において受信される背景光パワーを評価することによって，背景光低減率および許容伝送速度を明らかにした．また，ガウシアン型ディフューザを用いた場合，および，波長フィルタのみを用いた場合に達成される許容伝送速度との比較を行うことで，2 値位相マスクを用いる方法によって許容伝送速度が大幅に向上することを明らかにする．さらに，衛星間の各種パラメータにおける 2 値の位相マスクの最適化についても検討する．

第 7 章では，今後の研究課題として，位相共役技術の地上における光無線通信システム

への応用について検討する．地上における光無線通信では，大気中に含まれる水分や塵などの通信光波面への影響も問題となる．そこで，位相共役技術を用いることによって大気中を伝搬する通信光の波面補正を行うこと，および，中継器への応用に関する今後の展望などを述べる．

第 8 章では，本研究で得られた成果の総括を行う．

# 第 2 章　光衛星間通信の概要

本章では，まず 2.1 節で衛星間通信の研究動向について説明する．次に 2.2 節において近年注目を集めているフォーメーションフライングと呼ばれる衛星通信技術について説明する．2.3 節では光衛星間通信における通信方式について述べた後，2.4 節において光衛星間通信における技術面の課題について説明する．

## 2.1. 光衛星間通信の研究動向

20 世紀以降活発に行われている宇宙空間の研究・開発技術のなかで，衛星通信技術は，人工衛星を中継点として利用し，遠く離れた地上の 2 つの通信局を結ぶ技術である．この技術において重要となるのが，地上局と衛星の位置関係である．地上局と衛星の間で通信を行うためには，両方の地点から衛星が見えている必要があるが，高度 1000km 以下の低軌道(LEO: Low Earth Orbit)や中軌道(MEO: Middle Earth Orbit)衛星と地上局の間で通信を行う場合には，通信可能な時間が十数分程度と制限されてしまう．高度がおよそ 36000km の静止軌道(GEO: Geostationary Orbit)では，高軌道であることから衛星を見渡せる地上の範囲が広く，また，軌道上にある衛星は地上から見るとあたかも上空で静止しているように見えるため，中継用の衛星として利用しやすい．しかし GEO を用いた通信は回線距離が非常に長く通信時間が大幅にかかるので，地上における災害情報の取得・送信など緊急性が求められる通信には適さない．よって一つの衛星の軌道上の位置に左右されずに通信を行うために，衛星と地上を一対一で結ぶのではなく，別の衛星を中継点として介した衛星間通信(Inter Satellite Link: ISL)が必要となる．衛星間通信の実証例としては，NASDA(現 JAXA)が打ち上げたデータ中継衛星 DRTS(和名: こだま)によって，2003 年 2 月に日本で初めてデータ中継を成功している．

従来の衛星間通信は，前節で取り上げた「こだま」によるデータ中継も含め，搬送波として S 帯(2~4GHz)および Ku 帯(12~18GHz)などのマイクロ波を使った通信が行われている．しかしながら近年の半導体レーザ LD (Laser Diode) と光ファイバの開発によって光を用いた通信が注目され，さらに自由空間光通信の技術進展により，宇宙通信においても搬送波を従来のマイクロ波から光波に置き換えた光宇宙通信の研究が進展している[21-26]．レーザ光の宇宙通信への応用の可能性についての検討は 1960 年代に米国で始まり，日本では 1980 年代より盛んに研究されている．衛星による光通信の研究開発が活発化した要因には，光源として小型・軽量かつ高出力の LD や固体レーザ，受光素子として光ファイバ通信に用いられるシリコンアバランシェフォトダイオード (Si-APD) が開発され使用できるように

なったことが挙げられる．

光衛星間通信の特長は，従来のマイクロ波を搬送波とするシステムに比べ，小型・軽量の光送受信機による高速かつ大容量通信が可能な点である．レーザ光の周波数は電波に比べ $10^4$~$10^5$ 程度高い．よって小型のアンテナで極めて細いビームを射出でき，エネルギーを非常に小さなスポットサイズに集中して相手衛星に送ることができるため，消費電力を大幅に抑えることができる．光衛星通信に用いるアンテナの形状は，レンズと反射鏡を組み合わせた望遠鏡のようなタイプ（カセグレン式）などが用いられている．さらにはビーム間の干渉をほとんど考慮する必要がない．また，光の周波数帯は現在の国際的な周波数規制帯に含まれていないことも大きな魅力の一つである．よってこのシステムは現在の電波にかわる新たな通信システムとして期待されており，地球上をグローバルに結ぶ広域な高速衛星通信ネットワークにおける通信インフラとしての役割が期待されている．さらには，観測衛星で取得した多量のデータ伝送のための通信システムの構築や，人類の本格的な宇宙進出に向けた宇宙空間におけるベース基地と地上とを結ぶ通信網の構築など，様々な役割を担うシステムとしても考えられており期待が高まっている．

これまでに光宇宙通信の衛星は，高度数万 km の GEO もしくは高度数百 km から数千 km の LEO に打ち上げられており，異なる軌道上の衛星間や同じ軌道上の衛星間，あるいは衛星—地上間で通信実験が実際に行われている．表 2-1 に実証例の年表を示す．宇宙光通信自体は, 1994 年日本の NASDA が打ち上げた静止衛星 ETS-VI と光地上局の間で世界で初めて実証に成功した．この通信実験では双方向の通信に成功し，GEO と地上 (GND) 間における初の双方向通信成功例となった．さらにその後 1995 年に，米国の NASA/JPL (ジェット推進研究所，Jet Propulsion Laboratory) の地上局との間で実証実験が行われた．この実験においては, 地上から衛星への搬送波には 515nm, 衛星から地上には 830nm の波長が用いられ，信号の変復調方式として強度変調直接検波 (IM/DD) 方式が採用された．このときのデータ伝送速度は 1Mbps であった．2001 年には ESA が静止衛星 ARTEMIS を打ち上げた．この衛星は ESA の地上局との間で通信実験を成功させたほか，同年にはフランスの CNS (フランス国立宇宙研究センター, French Space Agency) の低軌道衛星 SPOT4 からのデータ受信に成功し，LEO から GEO への初の片方向光通信の成功例となった．2005 年には，日本が低軌道衛星 OICETS を打ち上げ，ARTEMIS との間で初の衛星間の双方向通信に成功した．またこれは同時に LEO と GEO を結ぶ初の双方向通信の成功例となった．さらには 2006 年に NICT の地上局との間で通信実験を行い，LEO と GND を結ぶ初の双方向通信の成功例となった．また同年，ARTEMIS が航空機との双方向通信に成功し，初の地球上の空間における移動体との双方向通信に成功した．さらには 2007 年，信号変復調方式としてこれまで主流であった IM/DD 方式ではなく，コヒーレント方式を採用した低軌道衛星 NFIRE 及び TerraSAR-X が，米国の MDA (ミサイル防衛局, Missile Defense Agency) 及びドイツの DLR (ドイツ宇宙航空研究センター, German Aerospace Agency) から打ち上げられ, 2008 年に初の LEO 間での双方向通信に成功した．

このような宇宙光通信が実証例から，地球と宇宙空間を繋ぐ広大な通信ネットワークの構築が着々と進んでいる．今後，これまでの軌道上衛星間及び衛星—地上間の通信実験の成功を踏まえ，様々な宇宙光通信の計画が予定されている．例えば，数 Gbps の高い伝送速度でのデータ通信計画や，深宇宙通信のためのパルス位置変調による光通信の検討などが進められており，宇宙通信技術のさらなる発展の必要性に拍車がかかっている．

## 2.2. フォーメーションフライング

衛星間通信技術の開発や実証が進む中，一対の衛星同士によるデータ中継に加え，近年では図 2-1 に示すような複数の衛星間でデータ中継を行うフォーメーションフライングと呼ばれる衛星の飛行形態が注目されている[27-31]．フォーメーションフライングとは，マスター衛星と呼ばれる親機衛星の周りに，複数のスレイブ衛星と呼ばれる子機衛星を，非常に近距離で相対位置を保持したまま群をなして飛行させ，全体で一つの大きな通信網を築くシステムのことである．このシステムでは，各スレイブ衛星にそれぞれ機能を分散させることによって衛星を小型化できる上，一つの衛星に不具合が生じても他の衛星で機能をカバーすることも可能である．また小型であることで代わりの衛星を打ち上げるコストも低減できるなど通信網の構築を柔軟に行える．機能面においては，位置の異なる複数の衛星から地上を撮影することによって，地上の隆起などを立体的に観測できるほか，時間変化の様子も確認できる[32]．光衛星通信の技術発展において注目されている事柄の一つに衛星の小型化が挙げられる．現在，ナノサットやマイクロサットと呼ばれる直径十数センチ四方程度の超小型衛星が活発に研究・開発されている．これらの超小型衛星をフォーメーションフライングに適用することで，レーザ光を用いた高速・大容量通信とフォーメーションフライングの柔軟性を兼ね備えた画期的な通信網を構築することができると考えられる．

## 2.3. 通信方式

光衛星間通信においては，通信光の変調方式として，主に強度変調/直接検波方式とコヒーレント方式の 2 種類が採用されている．本節では，この二つの変調方式について，それぞれの特長を説明し比較を行う．

### [1] 強度変調/直接検波方式(IM/DD: Intensity Modulation/Direct Detection)

強度変調方式/直接検波方式は，所定の送受信タイミングにおける光電力の有無で 01 信号を判別する方式である．光強度のみに依存するため光搬送波の位相変動の影響を受けないという特長がある．そのため位相雑音を有する半導体レーザ(Laser Diode)を変調信号の光源として利用でき，また，送受信機における装置構成が簡単で高速化に適していることから，自由空間光通信や光ファイバ通信など多くの分野で採用されている．

IM/DD 方式の中で最も一般的なのは NRZ(No Return to Zero)や RZ(Return to Zero)符号化方式であり，本方式ではデータの 1/0 の直接所定のタイミングにおける光信号の有無で表わす.

図 2-2 に NRZ 方式の構成図を示す． NRZ 方式では送信機に半導体レーザ LD，受信機にアバランシェフォトダイオード(APD)と増幅器からなる受光部と，クロック再生部とデータ判定部からなるデジタル部でそれぞれ構成される．送信機では，情報を変調して得られる入力データ列で直接半導体レーザを駆動し，入力データに応じて断続した光信号を射出する．受信機では，この光信号を APD で直接検波して受光電流をデジタル部に送り，そこでデータクロックを再生し，クロックタイミングでの受光電力の有無でデータの ON/OFF 判定する．NRZ 方式は，基本的な装置構成は極めて簡単となるものの，長距離間光衛星間通信においては通信光のパワーの減衰が大きくなるため，通信光の高電力化や受信機の高感度化が要求される．さらに，光アンテナ装置の指向・捕捉・追尾誤差によって受信信号レベルの変動が生じるため，これを補償するための自動利得制御とデータ判定閾値の最適化が必要になるなど，高く安定した受信電力を得るための装置外における通信システムの工夫が必須であることが難点である．

その他にもパルス位置変調 PPM(Pulse Position Modulation)方式があり，この方式は一定のタイミングで信号データを分割し，位置情報に変換する．PPM 方式は，NRZ 方式の構成に送信機にはパルス位置符号器が，また受信機にはフレーム再生部がそれぞれ加わる．送信側では，パルス位置符号器で連続する 2 ビットデータを倍速の 4 タイミングスロットで規定される PPM フレームの 1 つのスロット位置で表す．この位置符号化されたデータ列で半導体レーザを駆動し光信号を射出する．受信側では，受光電流からクロックと PPM フレームタイミングを再生しデータ判定を行う． 4 値 PPM 方式の送信平均電力はピーク電力の 1/4 になる．ランダムな入力データ列に対する NRZ 方式の平均電力がピーク電力の 1/2 である

ことと比較すると，4 値 PPM 方式は送信電力効率と半導体レーザの寿命の改善に効果がある．また，フレーム中のパルス位置でデータ判定を行うことから，各タイミングスロットでの受信電力レベルの相対比較でパルス位置を検出する最尤判定が適用可能であり，受信信号レベルの変動に強い． しかし，PPM 方式では伝送速度がデータ情報速度の倍になり，かつフレーム再生が必要になる．

**[2]　コヒーレント通信方式**

コヒーレント方式は，レーザ光の搬送波成分の位相や周波数に信号を乗せて伝送する方式である．受信機では受信光に参照光を掛け合わせるヘテロダイン検波により信号を復調する． これは従来の電波の周波数領域を用いた衛星通信の変復調方式と同じである． また，周波数領域での多重分離を容易に行える． しかし，光搬送波の位相成分で信号を表すには，搬送波の位相雑音が十分小さい必要がある． また，受信光を光ファイバにて掛け合わせる際に，追尾誤差によって著しい結合効率の低下が生じるので，これを避けるため IM/DD 方式と比較して高精度な追尾制御機構が必要である． さらに，高速で互いに移動する衛星間通信では，相対位置変化によって光搬送波のドップラーシフトが生じるので，その補正も考慮する必要がある．このコヒーレント方式の光衛星間通信への応用は，IM/DD 方式に比べまだ研究報告は少ないが，雑音成分の要素が少ないので光信号の低消費電力化が見込まれ，さらに送受信機の小型化も期待できるので，実証研究が着実に進められている．

コヒーレント方式では，光源の位相雑音が問題となるが，それを防ぐために 2 つの手法が検討されている． ひとつは，半導体レーザの持つ位相雑音を許容した上で，位相雑音の影響を抑える変調を行う手法である．半導体レーザへの注入電流の変化によってレーザの出力周波数が変化する特性を生かした周波数シフトキーイング(FSK: Frequency Shift Keying)や，ビームを円偏波で出力し，その偏波の回転方向で信号を表す(例：右旋は 1，左旋は 0)偏光変調が該当する． もうひとつは，位相雑音の小さい光源を用いる手法で，位相シフトキーイング(Phase Shift Keying)変調を行う． ここで，復調では受信光に参照光を掛け合わせて受信信号を得るいわゆるヘテロダイン検波を行うが，その中に受信光と参照光の周波数と位相を一致させる ホモダイン検波がある． ホモダイン検波では，直接信号を得ることができる．

コヒーレント方式の一例として，図 2-3 に FSK ヘテロダイン方式の構成を示す． この方式では，送信機に信号用半導体レーザ(LD)と，受信機に参照用半導体レーザ(LD)，フォトダイオード(PD)および増幅器からなる受光部と，信号に応じた周波数成分を調べるフィルタ，判定回路，そして参照光との差周波を一定にするための自動周波数制御 AFC(Automatic Frequency Control)回路から構成される． 送信機では，送信情報に応じた電流を半導体レーザに注入し，この注入電流で周波数を制御してデータに対応した所定の周波数で光信号を

送信する． 受信機では，受信光に参照光を掛け合わせヘテロダイン検波を行う． このヘテロダイン検波により，受信光と参照光との差周波が得られ，これをそれぞれの信号に対応した帯域フィルタを通してその出力レベルを比較して信号の 0/1 判定をし，出力する．AFC 回路では，衛星の相対位置の変化によるドップラーシフト量を衛星の軌道計算から予測し，補償を行う．

**[3] IM/DD 方式とコヒーレント方式の比較**

IM/DD 方式は，コヒーレント方式と比較して簡易な構成で光学系を実現できることから日本の OICETS や欧州の ARTEMIS などの多くの光衛星通信の実証実験において採用されている．しかしながら，信号の判定は光強度の有無で行うため，背景光の照射や伝送途中および光学系における電力損失が大きい場合にはしきい値処理においてビットエラーが生じてしまう．そのため，光源として用いる半導体レーザの高出力化や背景光の低減手法が検討されている（背景光の問題については次節で説明する）．

一方，コヒーレント方式は IM/DD 方式に比べ受信機にて参照光を強くすることによって信号受信時の高感度化を達成することができる．しかしながら，ヘテロダイン方式では衛星間の相対位置ずれによるドップラーシフトを補償する機能の搭載が必須となる．さらに，光アンテナの追尾誤差によって受信光のスポット位置変動が生じることから，受信光と参照光を掛け合わせる際のスポット位置を調合する必要があり，同時に追尾誤差を低減する高精度な捕捉・追尾機能も求められる．また，PSK ホモダイン方式では参照用光源の光周波数と位相を受信光に合わせる必要があるため，そのための光位相同期回路(Phase Locked Loop)が必要である．このように，コヒーレント方式は IM/DD 方式に比べ理論上では優っているものの，実際には光学系が複雑化するなど実装に向けては課題が多く光衛星間通信にあまり採用されていない．

## 2.4. 光衛星間通信における課題

レーザ光を用いた光衛星間通信はマイクロ波を用いた通信手法と比較して利点が多数あることを説明してきたが，一方でレーザ光の指向性の高さに起因した衛星間の高精度な捕捉・追尾の必要性が生じる．また，宇宙空間は大気による通信光への影響はないものの，太陽光を主因とした背景光雑音が通信光とともに受信されることによってエラーが引き起こるという問題も存在する．次に，高精度な捕捉・追尾および背景光雑音の影響について説明する．

### 2.4.1 高精度な捕捉・追尾

レーザ光はマイクロ波と比較して高周波数であり，非常に指向性が高いため長距離伝搬してもビームが拡がりにくいという特徴がある．しかし，それゆえに数 100~1000km 離れた場所にある直径 20cm 程度のアンテナにビームを入射させるのは非常に難しく，光衛星間通信における最大の課題といえる．図 2-4 に示すように，通常の衛星間通信においては，衛星 A が衛星 B に向かって予め予測した位置に要求光を射出し走査を行う. 走査によって衛星 B に要求光が入射（捕捉）すると，衛星 B はその要求光の伝搬経路から衛星 A の位置を予測し，信号光を射出（追尾）する．その信号光を衛星 A が受信すると通信が成立する．しかし，そのためには互いの衛星に向けてピンポイントでビームを射出し，受信する側はビームの伝搬方向に向けて正確にビームを射出するための高精度な捕捉・追尾システムの搭載が不可欠となる．また，衛星は常に高速で移動し続け，振動することもあるため，姿勢を保つための制御システムも搭載しなければならない．しかしながら，これらの機能を搭載することによってシステムは複雑化・大型化してしまい，光衛星間通信の利点を生かすことができない．よって，簡易かつ小型な系で捕捉・追尾を行えるシステムが求められている．

### 2.4.2 背景光雑音の影響

宇宙空間におけるレーザ光の送受信は，地上で行う場合と比較して大気による通信光の吸収・散乱の影響を考慮する必要がないため，比較的安定した通信環境の下で行うことができる．しかしながら，図 2-5 に示すように宇宙空間において太陽から放出されるスペクトルが衛星の受信機に信号光とともに入射することによって，信号判定のしきい値処理においてビットエラーを引き起こしてしまう背景光雑音の問題がある．太陽は約 6000K の黒体放射と考えられ，波長 0.5μm 帯に放射のピークを持ち，光衛星間通信で主に用いられている通信波長帯である 0.8μm 帯の地球の大気圏外における光強度スペクトルは約 $0.2\mathrm{W/cm^2\mu m}$ である．この背景光雑音を除去するために，これまで波長フィルタ，偏光フィルタ，遮光

板などが研究・開発され用いられてきたものの，波長フィルタは通信光と同波長の雑音，偏光フィルタでは通信光と同偏光の雑音がフィルタを透過してしまうため十分とはいえない. 例として, 受信系のフィルタの帯域幅を 0.001μm, 受信機光学系のアンテナ口径を 20cm, 受信系の視野角を 1mrad とすると，波長 0.8μm 帯における背景光による受信電力の最大値はおよそ 0.06W となる[1]. 一方で，光衛星間通信に用いる受信機の最小感度は，強度変調・直接検波方式の場合，$2\times10^{-5}$W 程度（SILEX）であるため，通信光は背景光の強度を考慮した高パワーのレーザを用いる必要がある．また，通信光のパワーが小さい場合でも太陽と受信機との角度（離角）が大きい時間帯では太陽光の影響は比較的小さいため通信が可能となるが，離角が小さい時間帯では太陽光を多く受信してしまうため通信時間が制限されてしまう．なお，地球・月による太陽反射電力は $6\times10^{-10}$W と，地球・月を黒体放射と見立てたときの電力は 5 ケタ以上も小さいため，この影響は無視することができる．また，大気圏外における光衛星間通信においてはシャトルグローも無視することができる．よって，太陽光による背景光を効率的に除去できる技術の実現が求められており，それによって省電力かつ安定した高品質な通信が可能となると考えられる.

表 2-1　宇宙空間における光通信の実証例

| 実施年 | 通信を行った衛星名及びその軌道 | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| | **GEO** | **LEO** | **GND** | **その他** | |
| **1994** | きく6号ETS-VI<br>(日本) | | CRL-OGS<br>(日本) | | GEO ⇔ GND<br>双方向初 |
| **1995** | きく6号ETS-VI<br>(日本) | | JPL-OGS<br>(米国) | | |
| **2001** | GeoLite<br>(米国) | | OGS | | 米国軍に関する情報のため，詳細は不明 |
| **2001** | ARTEMIS<br>(欧州) | | ESA-OGS<br>(欧州) | | |
| **2001** | ARTEMIS<br>(欧州) | SPOT4<br>(フランス) | | | LEO → GND<br>片方向初 |
| **2003** | ARTEMIS<br>(欧州) | | LUCE-EM<br>(日本) | | |
| **2005** | ARTEMIS<br>(欧州) | OICETS<br>(日本) | | | GEO ⇔ LEO<br>双方向初 |
| **2006** | | OICETS<br>(日本) | NICT-OGS<br>(日本) | | LEO ⇔ GND<br>双方向初 |
| **2006** | ARTEMIS<br>(欧州) | | | Aircraft<br>(フランス) | GEO ⇔ 航空機<br>双方向初 |
| **2007** | | TerraSAR-X<br>(ドイツ) | ESA-OGS<br>(欧州) | | |
| **2007** | | NFIRE<br>(米国) | ESA-OGS<br>(欧州) | | |
| **2008** | | TerraSAR-X<br>(ドイツ)　NFIRE<br>(米国) | | | LEO ⇔ LEO<br>双方向初 |

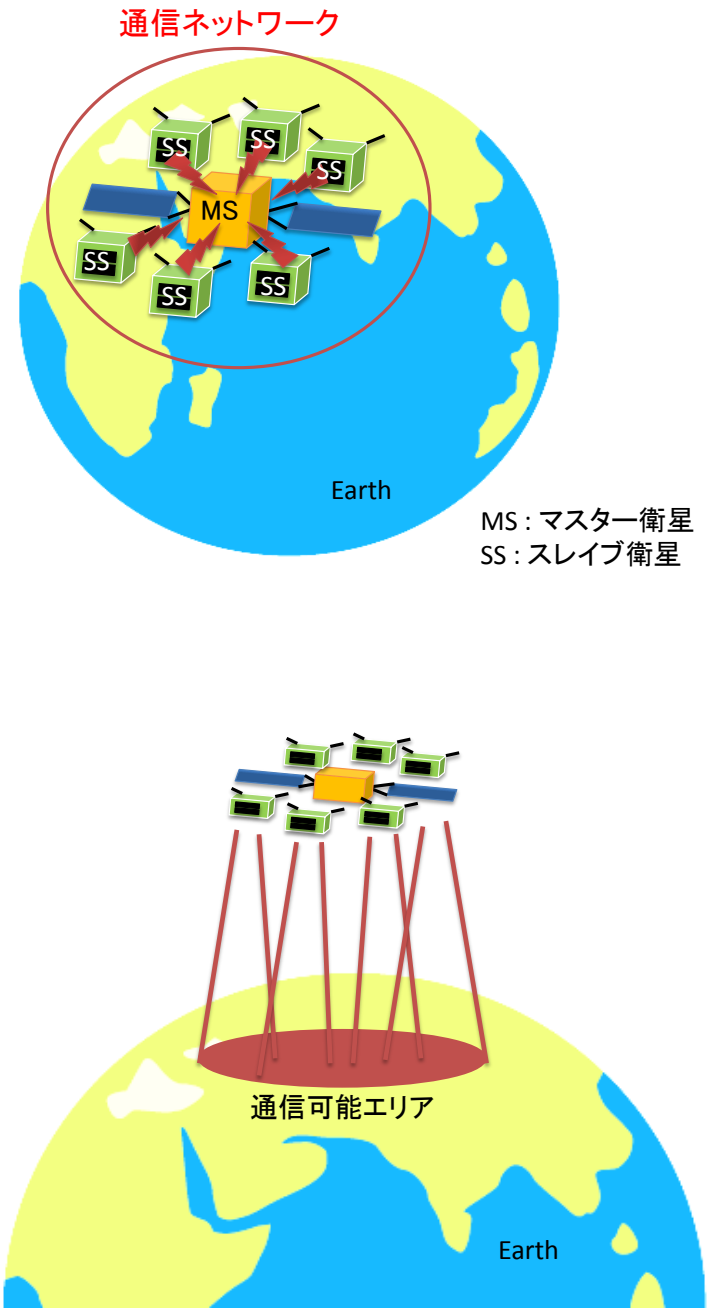



図 2-1　フォーメーションフライングを行う光衛星間通信システム

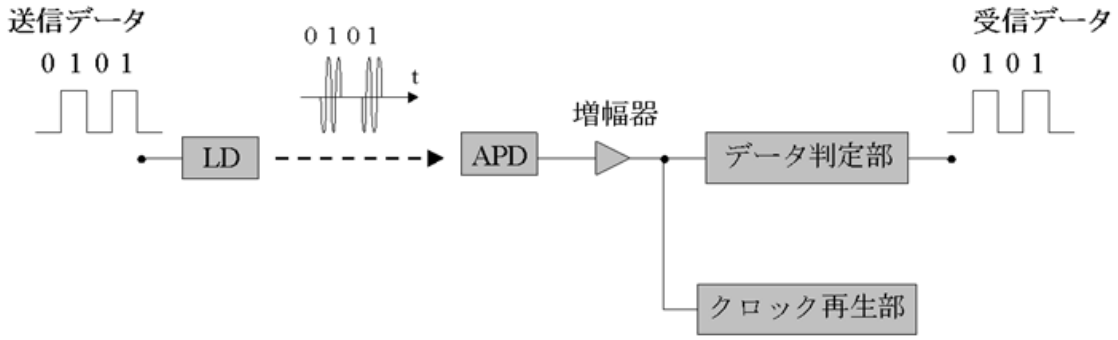



図 2-2　IM/DD 方式の送受信機構成(NRZ 方式)

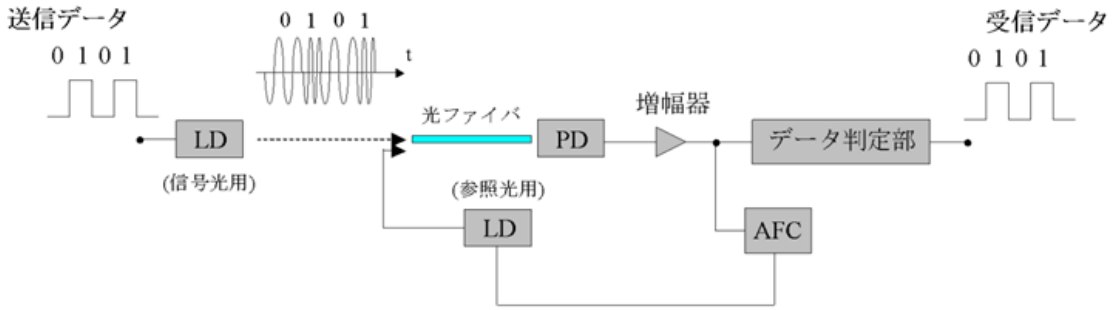



図 2-3　コヒーレント方式の送受信機構成(FSK ヘテロダイン方式)

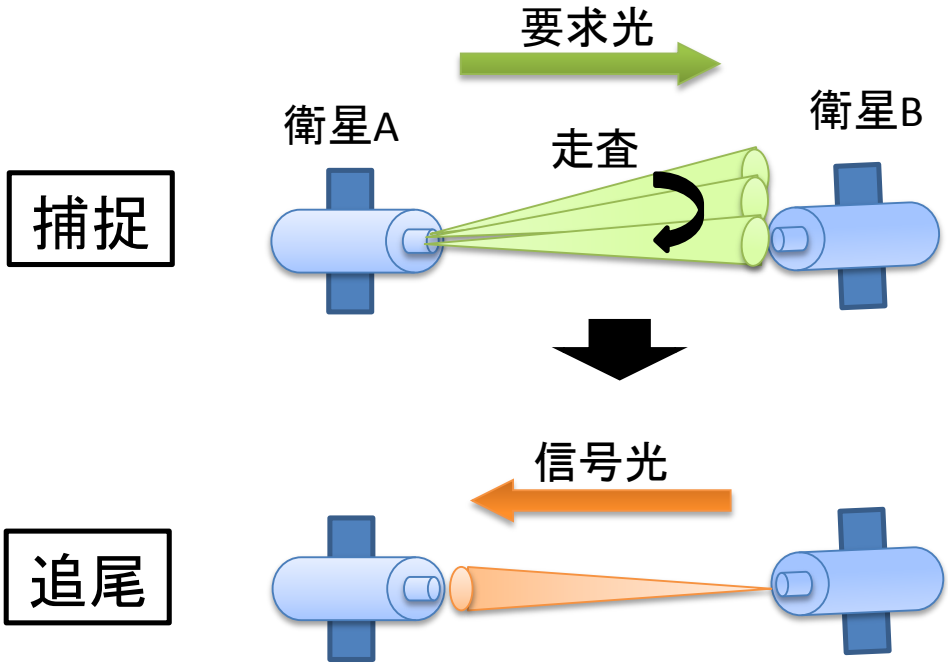



図 2-4　衛星間通信における捕捉・追尾

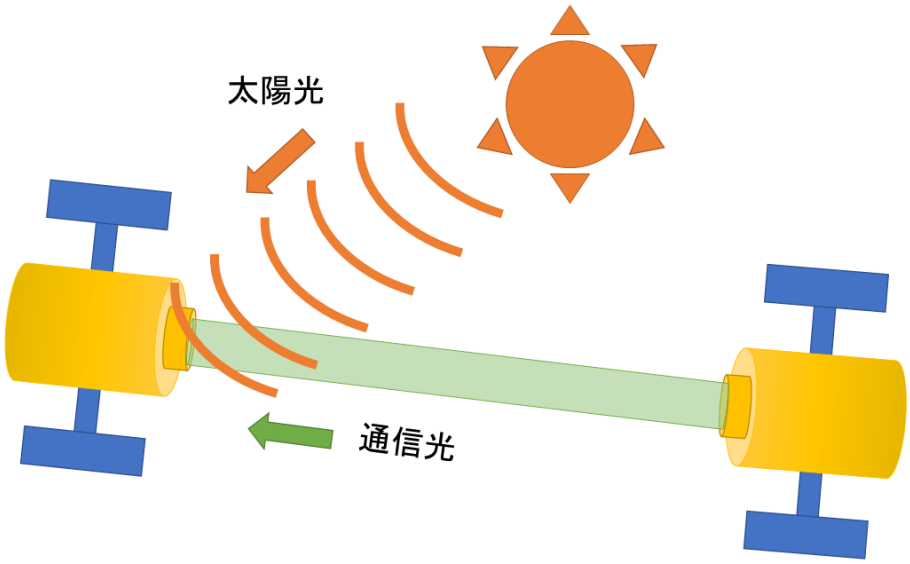



図 2-5 衛星への背景光の入射

# 第 3 章　フォトリフラクティブ結晶を用いた二重位相共役鏡

本章では，次章で述べる光衛星間通信システムの鍵となるフォトリフラクティブ結晶を用いた二重位相共役鏡の形成について説明する．初めに，3.1 節でフォトリフラクティブ効果について説明する．3.2 節では，フォトリフラクティブ効果を応用した二重位相共役鏡の原理について説明する．3.3 節では，二重位相共役鏡形成のために用いるフォトリフラクティブ結晶として優れた特徴を持つ $Sn_2P_2S_6$ 結晶について説明する．

## 3.1.　フォトリフラクティブ効果

二重位相共役鏡はフォトリフラクティブ効果を応用したデバイスである．フォトリフラクティブ効果とは，非線形性の強い媒質に光を照射したとき，光強度の空間分布によって電荷分布が生じ，それにより空間電界が形成され，1次の電気光学効果であるポッケルス効果を介して局所的な屈折率変化が生じる現象である．本節では，このフォトリフラクティブ効果を図3-1に示すバンド輸送モデルを用いて説明する． Kukhtarevらによって提唱された本モデルでは，フォトリフラクティブ媒質は不純物及び不均質性を持つものと仮定する．また，説明を簡易なものとするため，全てのドナー不純物はバンドギャップの中間付近に同じエネルギーレベルで存在するものとする．このドナー不純物は光を吸収してイオン化し，電子が伝導帯に生成される．従って，ドナー不純物は電子が欠乏した状態となる．ここで，ドナー不純物の密度を$N_D$，イオン化されたドナー不純物の密度を $N_D^i$ とすると，電子生成レートは $(sI+\beta)(N_D-N_D^i)$，捕獲レートは $\gamma_R N N_D^i$ と表される．この生成・捕獲レートにおいて，$N$は電子密度，$s$は光励起断面積，$I$は光強度，$\beta$は電子の熱励起レート，$\gamma_R$は電子とイオン化ドナーの再結合レートである．熱励起が無視できる場合（すなわち$\beta$<<$sI$），$N^i_D$ についてのレート方程式は以下の式で表される．

$$\frac{\partial N_D^i}{\partial t} = sI(N_D - N_D^i) - \gamma_R N N_D^i \tag{3-1}$$

ドナー不純物のイオン化によって生成された電子は，伝導帯を移動し，電子が不足しているイオン化されたドナー不純物に充填される．従って，電子の生成レートは，イオン化したドナー不純物の生成レートに等しい．電子の輸送は電子密度に影響を及ぼすので，電子密度に対するレート方程式は以下の式で表される．

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{\partial N_D^i}{\partial t} = \frac{1}{q}\nabla \cdot \mathbf{j} \tag{3-2}$$

ここで，$\mathbf{j}$ は電流密度，$-q$ は電荷量である．電子の移動による電荷密度変化によって，空間電場が誘起される．この空間電場はキャリア輸送に影響を及ぼす．電流密度は電場によるキャリアのドリフトによる寄与と，キャリア密度の空間分布から生じる拡散による寄与からなる．従って，電流密度は以下のように記述される．

$$\mathbf{j} = qN\mu\mathbf{E} + k_B T\mu\nabla N \tag{3-3}$$

ここで，$\mu$ は移動度テンソル，$\mathbf{E}$ は空間電場，$k_B T$ は Boltzmann 定数と温度の積である．電場は次の Poisson 方程式に従う．

$$\nabla \cdot \varepsilon\mathbf{E} = \rho(\mathbf{r}) = -q(N + N_A + N_D^i) \tag{3-4}$$

ここで，$\varepsilon$ は誘電率テンソル，$\rho(\mathbf{r})$は電荷密度，$N_A$はアクセプタ不純物密度である．このアクセプタ不純物密度は電界の中和条件のために必要である．光照射がない場合，電荷の中和条件は以下の式で表される．

$$(N + N_A - N_D^i) = 0 \tag{3-5}$$

いま，図 3-2(a) のようにフォトリフラクティブ媒質へ 2 本のレーザービームが入射する場合を考える．空間電場は以下の式で表される．

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_a \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_a \cdot \mathbf{r}) + \mathbf{E}_b \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_b \cdot \mathbf{r}) \tag{3-6}$$

ここで，ビームの周波数は同一であると仮定しており，$\mathbf{E}_a$ と $\mathbf{E}_b$ は振幅，$\mathbf{k}_a$ と $\mathbf{k}_b$ は波数ベクトルである．この 2 本のビームの偏光が平行である場合，強度の干渉パターンは以下の式で表される．

$$I(\mathbf{r}) = I_0 + \mathrm{Re}\{I_1 \exp(-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{r})\} \tag{3-7}$$

ここで，

$$I_0 = |E_a|^2 + |E_b|^2 \tag{3-8}$$

$$I_1 = 2\mathbf{E}_b \cdot \mathbf{E}_a^* \tag{3-9}$$

であり，格子波数ベクトル $\mathbf{K}$ は次のように定義される．

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_b - \mathbf{k}_a \tag{3-10}$$

その大きさは干渉パターンの周期(Λ)に関係し，

$$\mathbf{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{3-11}$$

である. 2 本のビームの偏光方向と振幅の大きさが同じ場合, 干渉縞の可視度が最大となり，このときの干渉縞の強度は以下のように与えられる．

$$I = I_0(1 + \cos\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}) \tag{3-12}$$

暗い縞は $\mathbf{K}\cdot\mathbf{r} = (2m+1)\pi$ のときに起こり，そこでは $I = 0$ である．

上記の光強度がフォトリフラクティブ媒質中に照射されると，$\cos\mathbf{K}\cdot\mathbf{r} = 1$，つまり $I = 2I_0$ 付近の明るい領域では，光子の吸収によって電子が励起される．これらの電子は明るい領域から拡散し，正に帯電したイオン化不純物をそこに残す．もし，これらの電子が暗い領域で捕獲されると，そこでは励起されるのに必要な光が存在せず，電子はその場所に留まったままとなるため電荷の分布が生じる．フォトリフラクティブ媒質に周期的強度分布の光が照射された結果として，上記の過程により，暗い領域は負に帯電し，明るい領域は正に帯電する．空間電荷密度の基本成分は以下の式で表される．

$$\rho = \rho_0 \cos\mathbf{K}\cdot\mathbf{r} \tag{3-13}$$

ここで，$\rho_0$ は定数である．そこで Poisson 方程式 (3-4) を積分すると，

$$E = \rho_0 \frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}\cdot\varepsilon\mathbf{K}} \sin(\mathbf{K}\cdot\mathbf{r}) \tag{3-14}$$

となる．ここで，空間電場が光強度パターンに対して$\pi/2$だけ空間的にシフトしていることに注目する．この空間電場は，Pockels効果を介して屈折率の変化を誘起する．従って，屈折率もまた光強度パターンに対して$\pi/2$だけシフトすることになる．図3-2(b)~(e)に光強度，空間電荷密度，空間電場，および誘起される屈折率の空間分布を示す．このフォトリフラクティブ効果はマクロな物理現象であり，多量の（典型的には$10^{15}$cm$^{-3}$オーダーの）荷電キャリアの生成と輸送を必要とする．以上をまとめると，フォトリフラクティブ効果は電気

光学結晶中で生じる以下の5つの過程からなる．

(1) 不純物の光イオン化と荷電キャリアの生成
(2) 荷電キャリアの輸送
(3) 荷電キャリアの捕獲と空間電荷分布の発生
(4) 光誘起された空間電場の発生
(5) Pockels 効果を介した屈折率の変化

## 3.2. 二重位相共役鏡（DPCM）

次に二重位相共役鏡(DPCM)について説明する．DPCM とは，フォトリフラクティブ結晶(PRC) に入射する 2 本の光波に対して，相互に位相共役光を回折させるデバイスであり，上述したフォトリフラクティブ効果を応用したデバイスの一つとして知られている．DPCM の形成には，フォトリフラクティブビームファニングと呼ばれる光散乱現象が重要となる．そこで，まずこのビームファニングについて説明する．

光波が PRC に入射し透過する際，結晶端面の粗さや結晶内部における不純物などによる屈折率の非均一性から光波の散乱が生じる．この散乱光は，元の入射光と干渉する．このとき，散乱光は多数の空間周波数成分を有するため，多数の干渉パターンが形成されることになる．これらの干渉縞はフォトリフラクティブ効果を介して回折格子に変換されるため，結晶中には多数の波動ベクトルを持つ回折格子が形成される．その回折格子によって入射光は回折されるため，また新たな角度成分を持つ散乱光が生じて，それによって回折格子が上書きという形で形成されていく．この散乱光の空間周波数成分の一部は，結晶の c 軸方向に依存した 2 波混合による非相反的なエネルギー移動を介して，入射光により増幅される．多くの PRC は強い結合係数を有するため，入射時には非常に弱い散乱光も，時間経過とともに増大し，最終的には著しい散乱パターンとなる．これがビームファニングと呼ばれる現象である．この現象は，2 波混合や 4 波混合などのフォトリフラクティブ効果の応用現象を用いたアプリケーションにとってノイズとなってしまうため，空間フィルタなどによって取り除かれる措置がとられることが多い．しかしながら，DPCM など多くの位相共役鏡生成においては，その形成過程で重要な役割を果たす．

上記に説明したビームファニングを踏まえた上で，DPCM の形成原理を説明する．図 7 に DPCM の形成過程を示す．図 3-3(a)で 2 本のインコヒーレントなビーム（$I_1$,$I_2$）を PRC のそれぞれ異なる端面から入射すると，それぞれのビームに対してビームファニング現象が生じる．よって PRC 中には無数の回折格子が次々と書き換えられていくという状態が生じる．しかし，散乱光の成分と一方の入射光が対向伝搬となるとき，位相整合条件を満足する回折格子のみが強く書かれ，それ以外が消去される．その結果，一定時間が経過する

と図 3-3(b)のように 2 本の入射光は共有する一つの回折格子によって，互いの位相共役光（$I_1^*$,$I_2^*$）として回折される．

回折された位相共役光は，もう一方の入射光に対する時間反転波として位相を補正しながら入射光の伝搬経路を正確に辿る．さらに，PRC 中の回折格子は，結晶の時定数程度 ($BaTiO_3$ 結晶で秒オーダー，$Sn_2P_2S_6$ 結晶でミリ秒オーダー) で，動的に書き換えることができる（$Sn_2P_2S_6$ 結晶については次節で説明する）．よって光波の入射条件（角度，位置，波面分布）に変化が生じたとしても，新たな入射条件の下で DPCM が再構築され，位相共役波も入射条件に応じて回折される．また DPCM は，数 mW 程度の比較的弱いパワーのビームで形成することができ，さらには入射光間のコヒーレンスを考慮しなくてもよいので，位相共役光を非常に容易に発生させることができる手法である．よって，DPCM を用いる様々なアプリケーションが通信分野・光記録など幅広い分野においても提案され研究が活発に行われている．

## 3.3. $Sn_2P_2S_6$ 結晶

DPCM を形成する上で，その形成速度やビームの回折効率などの値は用いるフォトリフラクティブ結晶に大きく依存する．また，結晶によって DPCM 形成のためのビーム入射可能範囲や利用可能な光源波長などの特性が異なるため，利用目的に応じた結晶を選ぶ必要がある．本節では提案手法に有用とされる $Sn_2P_2S_6$ 結晶の特性と優位性を述べる．

$Sn_2P_2S_6$ 結晶は，1974 年に C. D. Carpentier，R. Nitsche ，Dittmar，Schafer 等によって結晶の成長法とその構造が報告された[33-35]．その後，Gurzan 等によって光学特性が報告された後， A. A. Grabar 等によって熱光学特性が報告された[36,37]．1991 年にはフォトリフラクティブ効果が初めて観測され，1996 年に S. G. Odoulov 等によって 1.06μm 波長のフォトリフラクティブゲインが白色光を事前に照射する事で大幅に高められるという事が報告された[38-40]．これ以降，$Sn_2P_2S_6$ 結晶のフォトリフラクティブ現象についての詳しい研究がされ始め，2001 年には brown と呼ばれる改良 $Sn_2P_2S_6$ 結晶が，2003 年には $Sn_2P_2S_6$ 結晶にテルルをドープした結晶が作られ，いずれも従来の yellow と呼ばれる $Sn_2P_2S_6$ 結晶と比べてゲインと応答速度が大幅に改善された[41,42]．その後も，様々なドーピングが試され，その中でアンチモン（Sb）をドープする事で 633nm 波長に特化した $Sn_2P_2S_6$ 結晶も作成された．

$Sn_2P_2S_6$ 結晶は，530-1550nm の広い波長帯において大きな結合強度を有し，近赤外波長でよく用いられる Rh:$BaTiO_3$ 結晶と比べて数十から数百倍の速い応答速度を示す[43]．また，電気光学係数が大きく，近赤外波長帯において分散がほとんどない．例えば，$\lambda$=1313 [nm] での対角電気光学係数は $r_{111}$=166±8 [pm/V]であり，この値は一般的な PR 媒質である $LiNbO_3$ 結晶より半波長電圧が 15 から 20 倍小さい事を意味する．ここで水蒸気輸送法を用いて作

成された $Sn_2P_2S_6$ 結晶の基礎物理特性を表 3-1 に，$Sn_2P_2S_6$ 結晶のドープごとの PR パラメータを表 3-2 にそれぞれ示す．ここで，$\alpha_x$ はビームが $x$ 軸向に偏光している場合の吸収係数，$\Gamma_{max}$ は 2 波混合によって得られる最大のゲイン，$L_D$ は拡散距離，$r_{eff}$ は実効電気光学係数，$\tau_{die}$ は誘電緩和時間，$\tau(\Gamma_{max})$は$\Gamma_{max}$ 時の立ち上がり時間，$N_{eff}$ は実効ドナー密度である．代表的なフォトリフラクティブ結晶である $BaTiO_3$ や $LiNbO_3$ の応答速度が分～秒オーダーであることに比べ $Sn_2P_2S_6$ 結晶の応答速度はミリ秒オーダーと非常に早い．また，$BaTiO_3$ は 480-1060nm，$LiNbO_3$ は可視光域の波長帯にしか感度がないが，$Sn_2P_2S_6$ 結晶は 1550nm 付近の波長に対しても感受性がある[44].

以上のことから $Sn_2P_2S_6$ 結晶は，実際に光衛星間通信で用いられている波長帯である 830nm に適用できるほか，衛星―地上間通信において大気揺らぎの影響が少なくギガビットクラスの光通信が容易に行える通信波長 1.5μm 帯にも適用できるため，宇宙光通信への応用に向けて有用な結晶であると言える．第 5 章において，この結晶を用いた DPCM 形成の動作特性の検証を行う．なお，検証には近赤外波長への利用には適してないものの，可視光源（波長 633nm）を用いた原理実験を行うことができ，高速応答と高い回折効率を示す $Sb:Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いている．

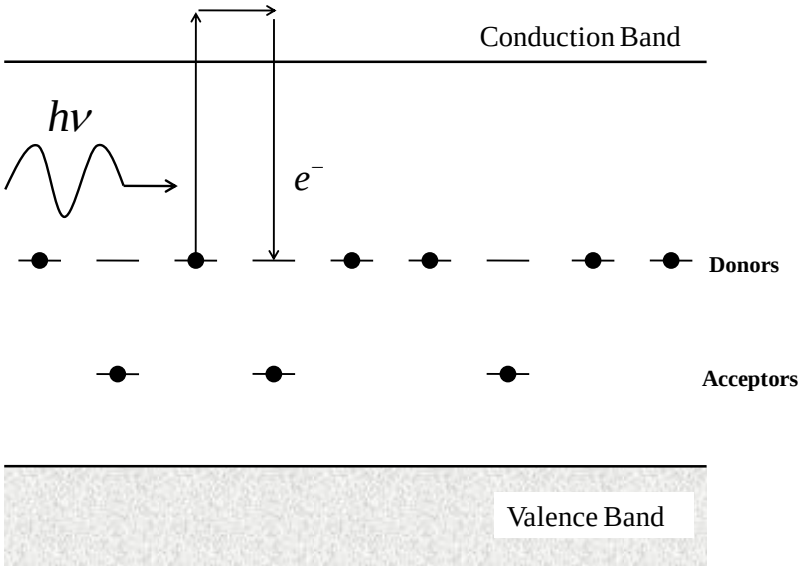
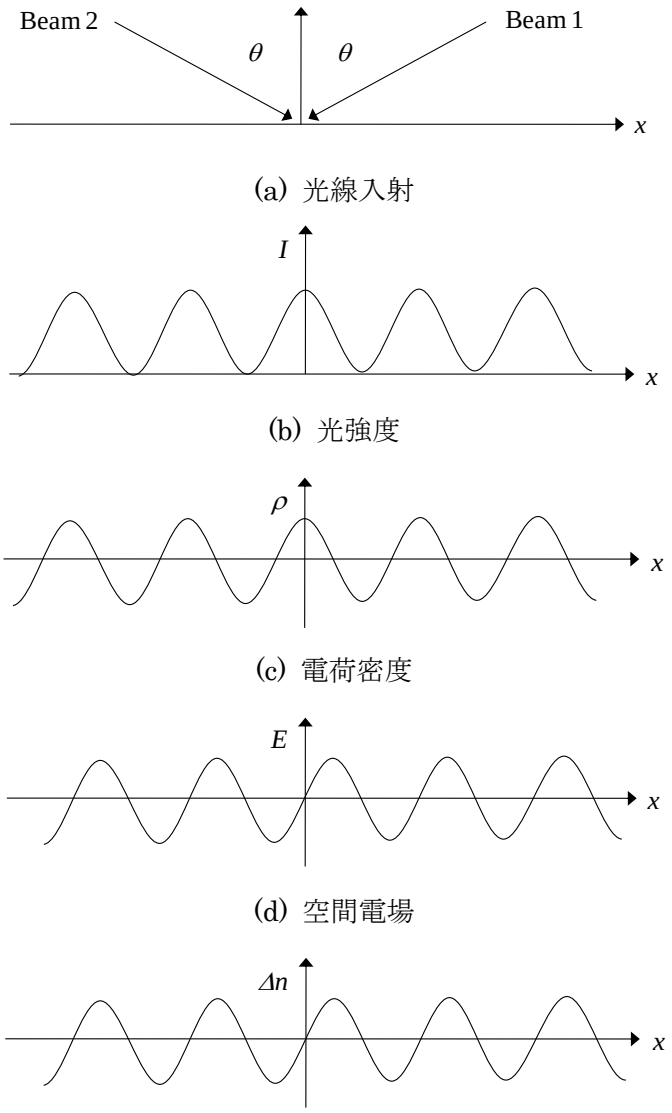



図 3-1　フォトリフラクティブ効果のバンド輸送モデル




*I*: 光強度　　*ρ*: 電荷密度　　*E*: 空間電場　　⊿*n*: 屈折率変化

図 3-2　2 光波の干渉により生じるフォトリフラクティブ効果

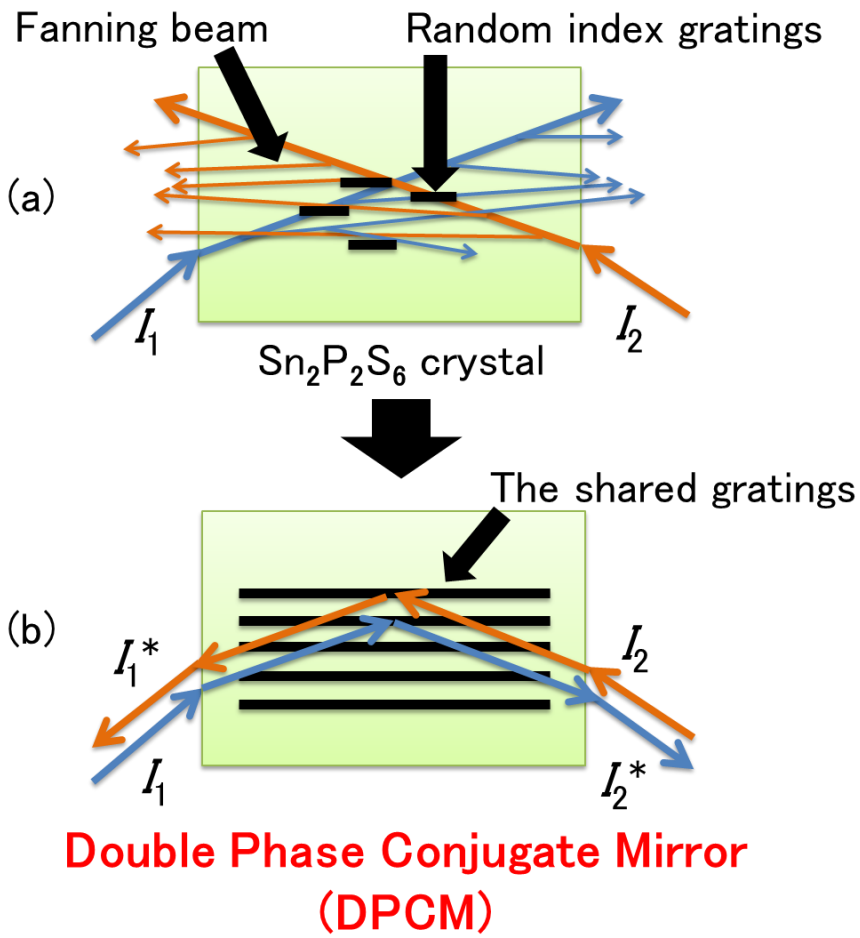



図 3-3　二重位相共役鏡の形成過程.

(a)　　2 本の入射光に対するビームファニングの発生.

(b)　　位相共役光の発生.

表 3-1 室温における $Sn_2P_2S_6$ 結晶の物理特性

| | |
|---|---|
| Spontaneous polarization $P_s$ | 15 [μC/cm$^2$] |
| Transparency range | 530-8000 [nm] |
| Main refractive indices[a] | $n_1$ = 3.0256 |
| | $n_2$ = 2.9309 |
| | $n_3$ = 3.0982 |
| Dielectric constant $\varepsilon_{11}$ | 230-300 |
| Electrooptic coefficient $r^T{}_{111}{}^a$ | 174 [pm/V] |
| Piezoelectric coefficient $d^{111}$ | 244 [pC/N] |
| Density $\rho$ | 3.54*10$^3$ [kg/m$^3$] |
| Elastic constant $C_{1111}$ | 4.2*10$^{10}$ [N/m$^2$] |
| Pyroelectric coefficient $p_1$ | 7*10$^{-4}$ [C/(m$^2$K)] |
| Coercive field $E_c$ | 7.5*10$^4$ [V/m] |
| Heat capacity $C_p$ | 240 [J/(mol K)] |
| Thermal conductivity $\lambda_1$ | 0.5 [J/(s m K)] |
| Nonlinear optical susceptibility [b] | $\chi^{(2)}{}_{111}$ = 24 [pm/V] |
| | $\chi^{(3)}{}_{1111}$ = 17*10$^{-20}$ [m$^2$/V$^2$] |

[a]at 632.8nm

[b]at 1907nm

表 3-2　$Sn_2P_2S_6$ 結晶の PR パラメータ

| Samples | $\lambda$ [nm] | $a_x$ [$cm^{-1}$] | $\Gamma_{max}$ [$cm^{-1}$] (±10%) | $L_D$ [μm] (±50%) | $r_{eff}$ [pm/V] (±15%) | $\tau_{die}$ at 10W/$cm^2$ [ms] (±20%) | $\tau(\Gamma_{max})$ at 10W/$cm^2$ [ms] (±20%) | $N_{eff}$ [$10^{16}cm^{-3}$] (±15%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nominally pure | 633 | 0.5 | 4-7 | 0.2 | | | 1-5 | 0.7 |
| (type II) yellow | 780 | 0.20 | 2.5 | | 41 | | 10 | 0.2 |
| | 860 | 0.16 | 1.8 | 0.9 | 48 | 9 | 12 | 0.08 |
| | 980 | 0.12 | 1.6 | 1.4 | 40 | 15 | 44 | 0.11 |
| | 1064 | 0.10 | 0.9 | | 38 | | | 0.044 |
| Brown | 633 | 5.7 | 38 | 0.1 | | 0.2 | 0.4 | 2.5 |
| | 780 | 0.9 | 18 | | 180 | 0.4 | 1 | 0.7 |
| | 860 | 0.3 | 14 | | 190 | | | 0.48 |
| | 980 | 0.14 | 11 | 0.5 | 190 | 29 | 33 | 0.39 |
| | 1064 | 0.09 | 8.6 | | 160 | | | 0.04 |
| SPS:Te 1.0% | 633 | 1.0 | 10 | 0.5 | 60 | 0.1 | 0.3 | 0.9 |
| | 780 | 0.34 | 6 | 2.3 | 50 | 0.2 | 1.3 | 1.0 |
| | 860 | 0.19 | 6.5 | 0.5 | 89 | 6 | 10 | 0.44 |
| | 980 | 0.11 | 6 | 0.3 | 75 | 8 | 13 | 0.62 |
| | 1064 | 0.09 | 4.5 | | | | | |
| | 1550 | <0.1 | 6.0 | | | τ(Λ=6.2μm, 440W/$cm^2$) = 10 | | |
| SPS:Te 1.5% | 860 | 0.8 | 8 | 0.5 | 89 | 7 | 15 | 0.44 |
| | 980 | 0.42 | 6 | 0.5 | 83 | 10 | 13 | 0.57 |
| | 1064 | 0.36 | 4.5 | 0.6 | 73 | 11 | 25 | 0.53 |
| SPS:Te 2.0% | 633 | 1.8 | 10 | 1.1 | 57 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |
| | 780 | 0.6 | 6 | 0.8 | 47 | 0.5 | 1.6 | 0.8 |
| | 1064 | 0.10 | 2.2 | 0.9 | 54 | 17 | 32 | 0.22 |
| SPS:Te 3.0% | 633 | 2.7 | 12 | 2.6 | 81 | 0.1 | 0.4 | 0.8 |
| | 780 | 0.9 | 7 | 0.7 | 56 | 0.6 | 1.3 | 0.8 |
| | 1064 | 0.20 | 2.5 | 0.8 | 49 | 14 | 20 | 0.34 |
| SPS:Sb 1.0% | 633 | 1.4 | 20 | 0.7 | 110 | 0.2 | 0.4 | 1.0 |
| | 780 | 0.08 | 0.4 | | | | | |
| SPS:Sb 1.5% | 633 | 2.4 | 20.0 | 0.46 | | τ(Λ=1.1μm, 0.3W/$cm^2$) = 6.8 | | |

A. A. Grabar, et al., "Photorefractive Effects in $Sn_2P_2S_6$," *Springer Series in Optical Sciences* **114**, 327-362 (2007).

# 第 4 章　二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システム

本章では，フォトリフラクティブ結晶を用いた二重位相共役鏡の特性を利用した光衛星間通信システムを提案し，その動作原理およびシステムの利点について説明する．第 3 章で述べたように，二重位相共役鏡はフォトリフラクティブ結晶に 2 本のインコヒーレント光を入射することで形成される．そして，2 本の入射光はそれぞれもう一方の入射光の位相共役光として回折する．本手法では，衛星間通信において，送信機衛星および受信機衛星の 2 つの衛星間で通信リンクを形成する．このとき，送信機衛星内にフォトリフラクティブ結晶を搭載し，受信機衛星から送信される要求光と送信機衛星内部から出力される信号光の 2 本のレーザ光をフォトリフラクティブ結晶に入射させることで，二重位相共役鏡を形成する．すると，二重位相共役鏡によって信号光が要求光の位相共役光として回折されるため，位相共役光の性質である時間反転性により，要求光の伝搬経路を正確に逆伝搬して受信機へと入射する．位相共役光は時間反転性および波面補正効果を有しているため，伝搬における通信光の波面を収束させることができる上，衛星の自動追尾を可能にする．さらに，通信エラーを引き起こす背景光雑音と通信光を波長や偏光に依らず空間的に分離することもできる．4.1 節では，二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムにおける通信リンク形成過程について説明する．4.2 節では，本手法を用いることによる衛星間通信技術における利点について述べる．

## 4.1. 二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムによる衛星間リンク形成

本節では，二重位相共役鏡（DPCM）を用いた光衛星間通信システムの動作原理および通信リンクの形成過程について述べる．図 4-1 に DPCM を用いた光衛星間通信システムの概念図を示す．　図 4-1(a)は本手法における DPCM の形成過程を，　(b)は通信リンクの形成過程を示している．また，図 4-1(c)は受信機内部の構成を，(d)は送信機内部の構成をそれぞれ示し，(e)は，位相共役波の伝搬の概念図を示している．

はじめに，基本的な衛星間におけるリンク形成方法について説明する．提案手法は受信機衛星と送信機衛星によって構成されている．従来の光衛星間通信における衛星の捕捉において，まず，要求光が受信機衛星からおおよそ予測される送信機衛星の位置に向けて射出される．そして，送信機衛星の位置を特定するために要求光による走査が行われる．送信機衛星が要求光を受信したとき，要求光の入射角度や入射位置などのパラメータが送信機内部の機器によって計測される．さらに，このパラメータにしたがって，受信機衛星の位置が計算され，信号光の射出角度および射出位置が可動ミラー等により厳密に調整され

る．この調節が行われた後，信号光が受信機衛星に向けて射出される．信号光が受信機衛星に正しく入射したとき，この一連の要求光による走査を終了することができ，捕捉プロセスが完了する．その後，通信リンクを維持する過程においては，要求光による走査は不要となるものの，常に通信相手の衛星を捕捉・追尾する必要があるため，要求光や信号光の計測が双方の衛星で行われる必要がある．

一方で，本手法における捕捉プロセスは，要求光が送信機衛星に入射するまでの過程は，従来のシステムとほぼ変わらない．しかしながら，要求光による走査で，送信機衛星が要求光を受信した後は，以下に説明するように従来のシステムの動作とは異なる．図 4-1(a)に示すように，要求光が送信機衛星内のフォトリフラクティブ結晶（PRC）へ入射するとき，信号光も同時に PRC に入射させることで，第 3 章で説明した DPCM が形成され，信号光を回折させる．この信号光は，図 4-1(b)に示すように要求光の伝搬経路を自動的に逆伝搬し，受信機衛星へ入射する．信号光が受信機衛星に入射するとき，要求光を用いた走査は中止することができ，捕捉プロセスは完了する．通信リンクを維持するためには，後に詳しく説明するが，送信機衛星の PRC へ要求光を入射できればよいため，送信機衛星内部において要求光パラメータの計測，受信機衛星の位置の計算，そして，信号光の出射パラメータの計測は大幅に簡略化することができる．したがって，提案手法は，計測器や可変ミラーなどの機器の搭載を減少することができ，衛星の小型化に貢献することが可能となる．

DPCM を用いた本手法の動作を以下に詳しく説明する．図 4-1(a)に示すように，要求光が受信機衛星内部の laser 1 より出力される(STEP1-1). この STEP 数は, 図 4-1(c),(d),(e)の STEP 数と一致する．次に，要求光のビーム径が L1 で拡張され（STEP1-2A），ビームスプリッター(BS)を透過する(STEP1-2B). 自由空間伝搬にむけて，要求光のビーム径はセンチメートルオーダーとなるように L2 および L3 の縮小光学系によって調節され(STEP1-2C)，送信機衛星のアンテナに向けて受信機アンテナより射出される(STEP1-3). 受信機アンテナおよび送信機アンテナはカセグレン型を想定している．要求光のビーム径は，送信機衛星内の PRC のサイズが 1cm 程度であるため，L5 と L6 で構成される縮小光学系によって縮小され(STEP3-2)，それから，PRC へ入射する(STEP3-3). ここで，強度変調(STEP4-1A)が送信機衛星内部の laser 2 から出力されるレーザ光に加えられた後(STEP4-1B)，信号光として，要求光とは反対の位置から PRC へ入射する．

これらの入射光によって，第 3 章で述べたフォトリフラクティブ効果によって DPCM が形成される．DPCM 形成後，図 4-1(b)のように送信機から受信機へ向けた通信ラインを形成することができる．信号光は要求光の位相共役波として DPCM によって回折され(STEP4-1C)，要求光が伝搬してきた経路を時間反転波として正確に辿る．したがって，要求光と同じ波面を持った信号光が自動的に縮小光学系および送信機アンテナを透過し(STEP4-2)，そして自由空間を伝搬する(STEP5). 位相共役波の波面補正効果によって，図 4-1(e)に示すように，信号光は自由空間を伝搬しても広がらず，自由空間伝搬損失をほとんど受けることなく受信機アンテナに入射する(STEP6-1). STEP6-1 の後，信号光は，縮小光

学系を透過し(STEP6-2A)，要求光と分離される(STEP6-2B)．そして，L4 によって集光される(STEP6-2C)．集光された信号光はフォトディテクター(PD)によって検出され(STEP6-3)，信号が復調される(STEP6-4).

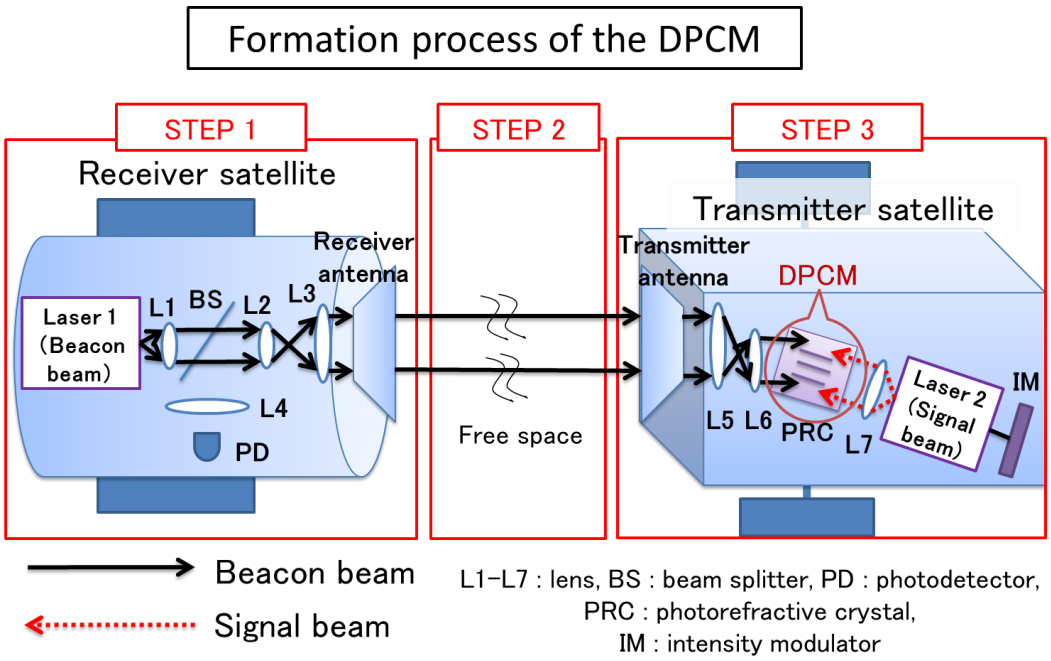
これに対して，図 4-1(e)に示すように位相共役技術を用いない従来の通信手法では，信号光が送信機衛星から受信機衛星へ向けて射出されるとき，出射角度や位置が調整されたとしても，要求光と同様に自由空間伝搬において拡散してしまう．その結果，受信される信号光パワーはこの拡散の影響を受けて大幅に減少してしまう．加えて，衛星間の光軸がずれてしまった場合，信号光の出射角度や位置は新たに計算し，調整する必要がある．これらの高精度な捕捉・追尾のための機器も従来の通信手法には必要とされており，衛星間通信システムを複雑化する要因の一つになっている．

## 4.2. 二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムの利点

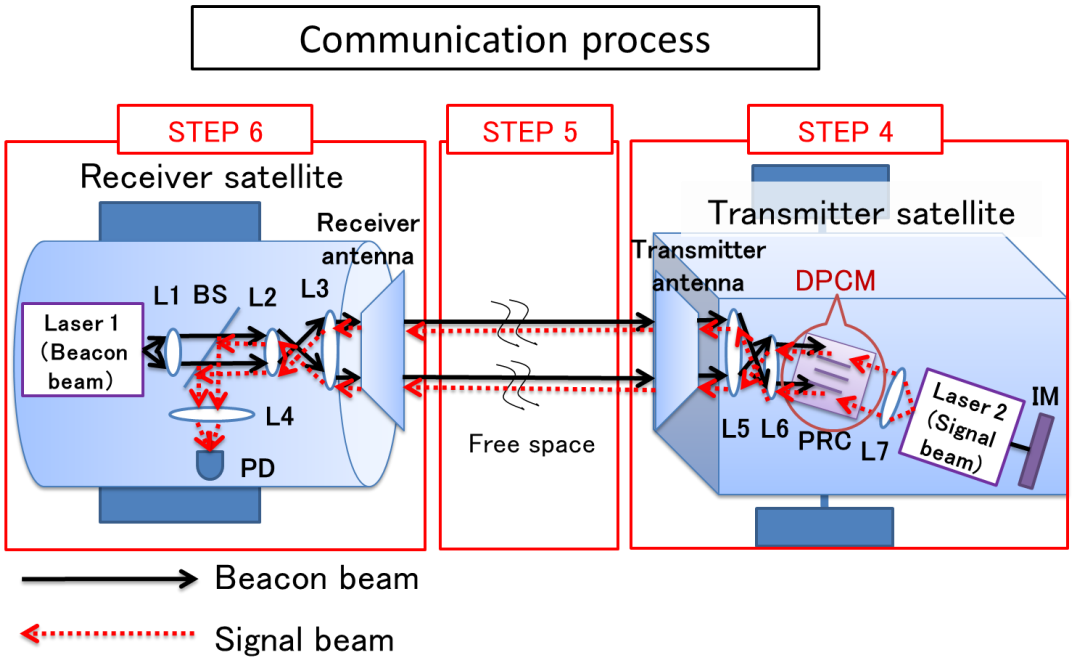
位相共役技術を用いることによる本手法には主に 3 つの利点がある．利点の 1 つ目が，追尾が自動的に行えることである．衛星の振動などにより衛星間の相対位置がずれ，同時にアンテナに入射する通信光の光軸がずれた場合であっても，DPCM は新しい光軸に応じて自動的に再構築され，位相共役波を回折することができる．加えて，信号光波面を補償光学に基づいた高精度な機器がなくても補正することができる．したがって，波面補正された信号光を自動的に受信機衛星へ伝搬する自動追尾を行うことができ，衛星間の通信リンクの維持を電気的な検出器や正確な機械的再調整を必要とせずに形成することができる．さらに，詳しくは第 5 章で述べるが，位相共役波を回折することができる DPCM への入射角度の許容範囲が広いため，捕捉精度の緩和も可能となる．

2 つ目の利点が，消費電力の低減である．第 5 章で詳しく説明するが，DPCM へ入射するビーム強度を調整することによって，要求光の入射パワーよりも高いパワーを持つ信号光を回折することができる（つまり，位相共役反射率が 100%を超えることができる）．この性質と波面補正効果により，従来の光衛星間通信と比較し，消費電力を大幅に低減することが可能であることを示している．伝搬などによる電力消費が大きい場合，長距離通信を行うためには，高出力レーザを搭載することや，光増幅器を搭載する必要があり，システムの大型化を招いてしまう．一方で，この技術は光増幅器がなくても長距離通信・高速通信を実現できる可能性を秘めている．

3 つ目の利点が，背景光の低減である．これは第 6 章で詳しく説明する．DPCM によって通信光は位相共役波の関係とすることができる．この関係を利用して，通信エラーを引き起こす背景光雑音の波面との間に波面差異を生み出すような空間フィルタを受信機衛星内に搭載することによって，通信光と背景光を効果的に分離することができる．



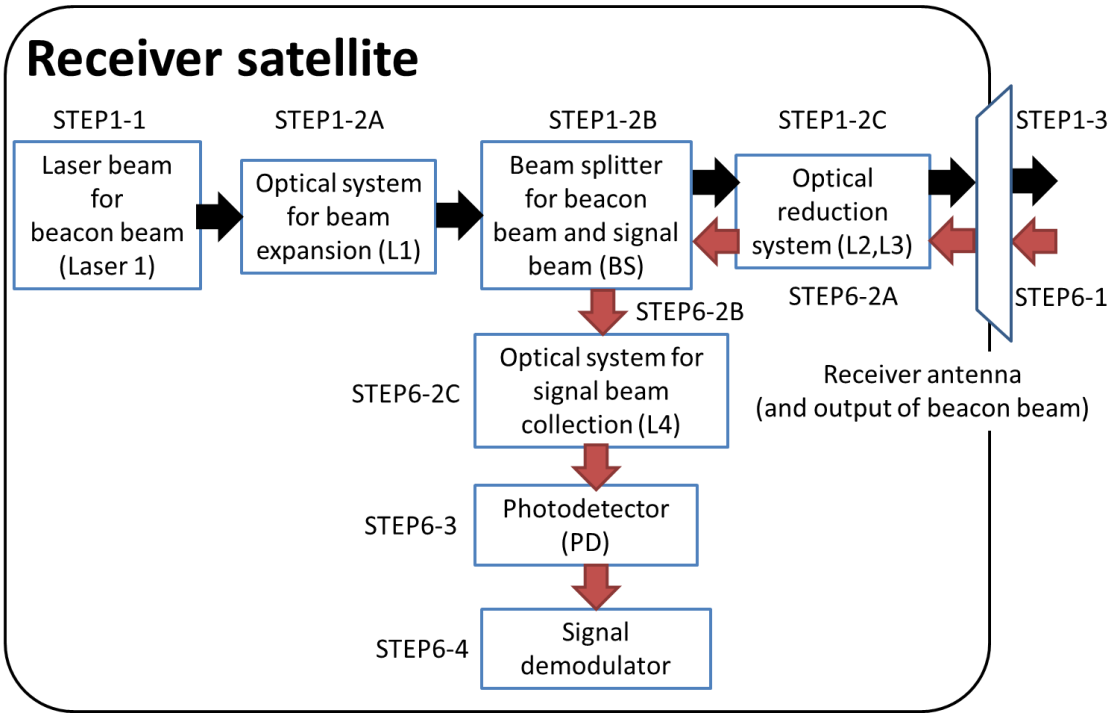

(a)



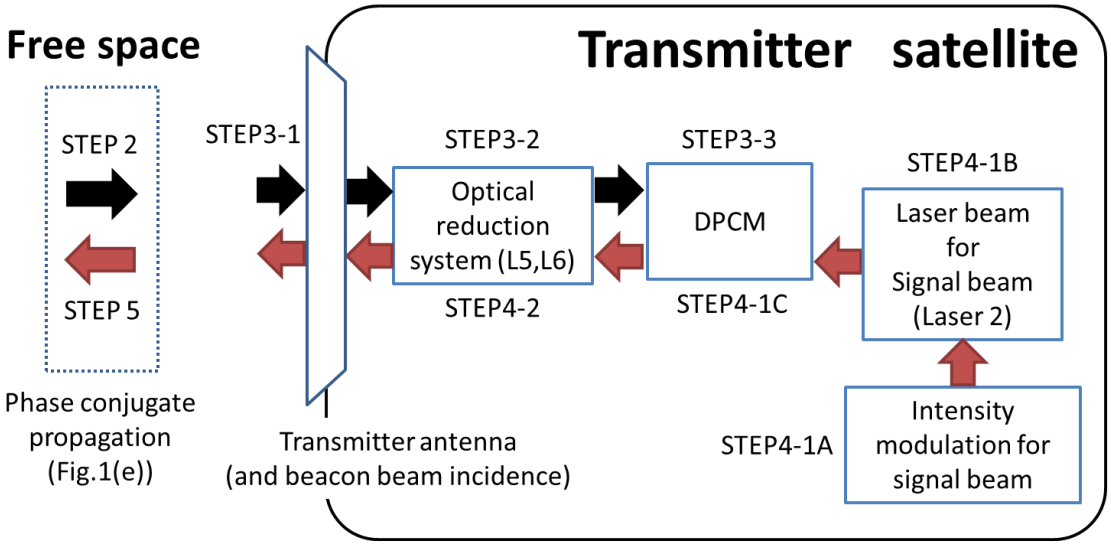

(b)

図 4-1　DPCM を用いた光衛星間通信システムの概念図

(a) DPCM の形成過程(b) 通信過程



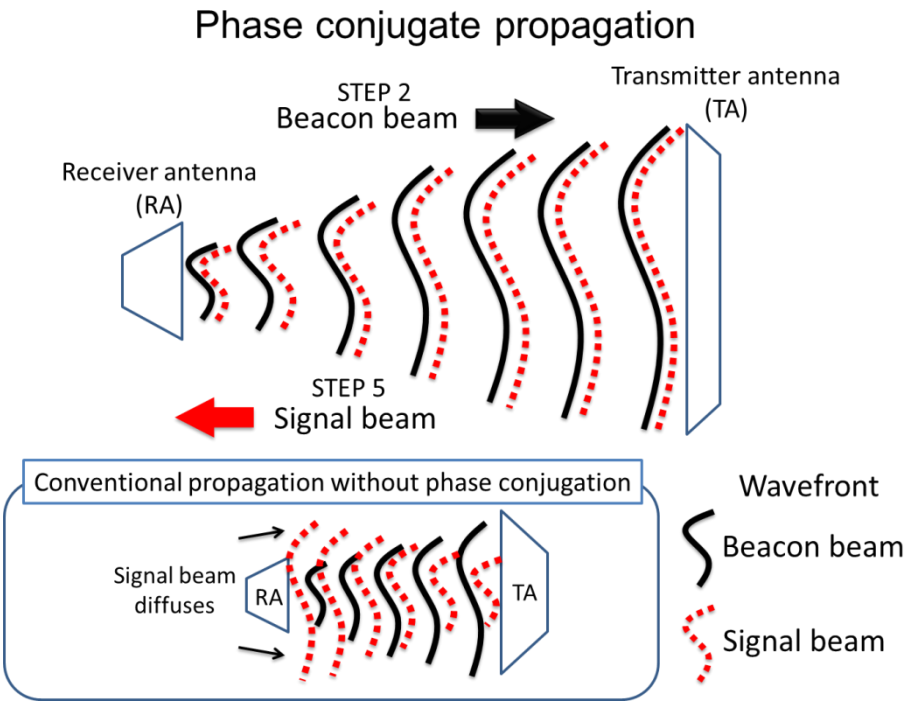

(c)




(d)

図 4-1 DPCM を用いた光衛星間通信システムの概念図

(c) 受信機衛星内部の機能図,　(d) 受信機衛星内部の機能図




(e)

図 4-1 DPCM を用いた光衛星間通信システムの概念図

(e) 位相共役波の伝搬

# 第 5 章　二重位相共役鏡の動作特性を利用した追尾性能の向上

本手法では，DPCM で生成した位相共役波の時間反転性を利用して自動的な追尾を実現できる上，捕捉時においても PRC 内部において，ビームの入射条件に応じて回折格子が動的に書き換えられることによって要求光の捕捉精度を緩和することができる．また，PRC として第 3 章で述べた $Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いることで，その高速応答性と高い回折効率からより高速な自動追尾，時間的な捕捉精度の緩和および省電力化を実現することが可能であると考えられる．

ここで重要となるのが結晶内の回折格子の形成過程である．具体的には，ビームが PRC に入射してから回折格子が形成されるまでの時間および回折される信号光のパワーを評価する必要がある．また，動的に回折格子が形成されるためのビームの入射条件を明らかにすることによって，従来の捕捉機能で必要とされる精度からどれだけ緩和されるかを定量的に求めることができる．

本章では，$Sn_2P_2S_6$ 結晶を衛星間通信に用いるために，通信を行う上で衛星間に生じると考えられる二つの状況を想定し，その状況下において回折格子が形成される時間と回折される信号光のパワーを位相共役反射率で評価する．5.1.1 節では，初めに，送信機衛星を初期に捕捉することを想定し，結晶内に回折格子が形成されていない状況から回折格子が立ち上がる時間および位相共役反射率を，有限差分ビーム伝搬法を用いた数値解析により評価する．次に，衛星間リンクが形成された後に，衛星の振動等で相対位置が変化することを想定した．それに基づき，数値解析によって結晶において位相共役反射率が定常状態を示してから要求光の入射角度が変化した場合の回折格子の再構成時間および位相共役反射率を評価する．5.1.2 節では，数値解析に対して，実際に $Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いた実験を行い，定常状態からの角度変化における位相共役反射率の時間推移を計測し，数値解析結果との比較を行う． 5.2 節では，5.1 節で明らかにした DPCM の動作特性に基づいて光衛星間通信システムに応用した場合に想定される追尾性能について議論する，数値解析によって，衛星間の通信光のビーム伝搬シミュレーションを行い，許容伝送速度と位相共役反射率の関係を明らかにする．その上で，従来の追尾機能と比較してどれだけ性能の向上が見込まれるかを算出する．

## 5.1. $Sn_2P_2S_6$結晶を用いた二重位相共役鏡の動作特性

第 4 章で述べたように，捕捉とは一方の衛星 A から衛星 B に向けて予め予測した位置に要求光を射出し走査を行い，それを衛星 B が捉えることである．そのため，衛星 B に対して要求光をピンポイントで決まった角度で入射させるのは難しく，要求光が決められた入射角度から大きくずれて衛星 B に入射することが多いに考えられる．

よって本節では，衛星間の相対位置のずれを想定した DPCM の応答特性を数値解析および実験により明らかにする．DPCM は，第 3 章で述べた $Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いて形成する．初めに，$Sn_2P_2S_6$ 結晶において最も回折効率が高くなる入射角度である 22°でビームを入射させた後，ビームの入射角度を変化させ，回折格子の再形成における速度や角度依存性を，位相共役反射率を算出することで評価する．

### 5.1.1 数値解析

$Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いる場合の DPCM の時間的・空間的特性を調査するために，動的なフォトリフラクティブ現象を考慮した有限差分ビーム伝搬法(FD-BPM)を用いた数値解析により，DPCM の再構成特性を明らかにした[45]．図 5-1 に DPCM の解析における FD-BPM の適用概念図を示す．有限解析空間はフォトリフラクティブ結晶内にあり，格子状の空間として離散化されている．$z$-axis へのビーム伝搬角は$\theta_1$ と $\theta_2$である． $z$-axis は結晶の$c$-axis に一致しており，結晶の自発分極は$x$-axis に沿っている．$x$-axis の格子間隔は $\Delta x$，$z$-axis の格子間隔は$\Delta z$である．そして，$x$-$z$面における格子点$p = 1$ から $M$ そして $l = 0$ から $N$である．

結晶内部でファニング光を生成するために，入射光と散乱光の間の干渉が必要となる．散乱光は，ビームファニングを生み出す鍵となる屈折率の分布を有した結晶に光が入射したときに発生する．この解析では，ビーム伝搬計算前において屈折率の初期値はランダムな分布を持っていると仮定している． この初期の屈折率を基にした散乱光である$I$ のビーム強度分布の計算後，屈折率分布は$I$ の分布を用いて更新される．計算の具体的な手順を以下に説明する．

最初に，ビーム$I_1$をランダムな屈折率変調を持つ $Sn_2P_2S_6$ 結晶の左側から入射する．そして散乱光とともに$+z$軸方向に伝搬させる．ビーム$I_1$と同様に，ビーム$I_2$ も結晶の右方向から入射し，$-z$ 軸方向へ散乱光とともに伝搬させる．

次に，ビーム$I_1$とビーム$I_2$の強度分布が一つ一つの格子点で足しあわされ，この干渉パターンに近似した空間的変化を伴う強度分布がフォトリフラクティブ効果の数値計算に基づいた空間電場を誘導する．空間電場は次式を用いることで導出できる．

$$E - \frac{1}{(k_{\mathrm{D}})^2}\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}\left(1 + \frac{1}{k_{\mathrm{D}}}\frac{\partial E}{\partial x}\right)^{-1} = -\frac{1}{k_{\mathrm{D}}}\frac{\partial}{\partial x}\ln I\,, \qquad (5\text{-}1)$$

E は$E \equiv E_{\mathrm{sc}}/E_{\mathrm{D}}$で定義されている規格化された空間電場であり，$E_{\mathrm{sc}}$は空間電場，$E_{\mathrm{D}}$は$E_{\mathrm{D}} \equiv k_{\mathrm{B}}Tk_{\mathrm{D}}/e = eN_{\mathrm{eff}}/\epsilon k_{\mathrm{D}}$で決定されている．$N_{\mathrm{eff}}$ は効果的トラップ密度，$e$ は電気素量，$T$ は室温，$k_{\mathrm{B}}$ はボルツマン定数，$\epsilon$ は比誘電率，$k_{\mathrm{D}}$ はデバイ波数である．空間電場はビーム強度分布の時間的変化に依存する． 空間電場の時間的進化は次のように示すことができる．

$$E^{t+\Delta t} = E^{t-\Delta t}\exp\left(\frac{-\Delta t}{\tau}\right) + E^{t}\exp\left(1 - \frac{-\Delta t}{\tau}\right). \qquad (5\text{-}2)$$

右式の初項が消去の項, 2 項目が書き込みの項である. 上付きの $t-\Delta t$, $t$, および $t+\Delta t$ は時分割のための計算ステップに用いられる． $\Delta t$ は時間ステップ幅， $\tau$ は実効的な時間定数であり，これは光強度に対するキャリア応答時間で決定づけられている．
最後に，屈折率変調が$n^2 = \epsilon + \Delta\epsilon$の式を用いた空間電場$E$を基に計算される．$n$ は屈折率である．$\Delta\epsilon$ は$\Delta\epsilon = \gamma E$を用いた比誘電率の変化であり，$\gamma$ はフォトリフラクティブ結合定数の実部である．結果的に，ビーム伝搬解析とともに更新された屈折率分布を得ることができる．この過程を繰り返すことで，屈折率格子分布が収束し，入射光に対する互いの位相共役光$I_2^*$ と $I_1^*$を回折する．

衛星間通信において，入射光の角度が衛星間の相対位置の変化に基づいて変化することが想定される．このような角度変化に応じた DPCM の時間的・空間的応答を明らかにするために，位相共役反射率$I_1^*/I_1$ が定常値に届いた後，ビーム$I_1$の入射角度を固定された角度から変化させた．この計算では，2 本の入射光に対して，入射角度が変化しても結晶の中心を通過するように設定している．

シミュレーションパラメータを表 5-1 に示す．$I_1$の入射角度$\theta_1$と$I_2$ の入射角度$\theta_2$ は 22°に設定した．この角度は屈折率変調の振幅を最大にすることができる角度である．結晶長は $z$-axis 方向に 4.0mm である． 最適な結晶の長さは DPCM における高い回折効率を得るための結合波動定理の解析を用いて明らかにされている．結晶のパラメータは波長 633nm において計測されている． $Sn_2P_2S_6$:Sb 結晶の実効屈折率は 3.06 である．これは，テンソル計算により求められている．また，結晶の時定数は第 3 章の表 3-2 に基づいて，6.8（入射強度 0.3W/cm$^2$ における時定数）と設定している．ビーム$I_1$とビーム $I_2$はより効率よくフォトリフラクティブ効果を得るために，波長 633nm において P 偏光と仮定している．

図 5-2 にビーム$I_1$の入射角度を 22° から 8°, 18°, 26°, そして 28°に変化させた場合の位相

共役反射率の時間変化を示す．この結果より，ビームの入射を開始してから数 100ms 以内に位相共役反射率が定常値に達していることがわかる．さらに，どの場合も，700ms において入射角度が変化した後，回折格子がわずか数 100ms 以内に急速に書き換えられ，再構築されている．しかしながら，18°と 26°の場合で位相共役反射率の定常値に差があることがわかる．これは，フォトリフラクティブ結晶の結合係数の角度依存性により生じている．

さらに，位相共役反射率は入射角度だけではなく，ビーム $I_1$に対する ビーム$I_2$の入射強度比にも依存している．入射強度比が 1:1 そして 1:10 の場合の位相共役反射率の時間応答を図 5-3 に示す．ここで，ビーム$I_1$の初期の入射角度はいずれの強度比の場合でも 22°であり, 700ms で 26° に変化させている．図より，ビーム $I_2$の入射強度がビーム $I_1$より高い場合, 入射強度比が同じ場合と比較して位相共役反射率が高くなることがわかる．位相共役反射率がわずか数 10ms で 100%を超え，最終的に，わずか数 100ms でビーム$I_1$ の 2 倍の強度を有したビーム$I_2$が回折される．したがって，入射強度比を調整することで，入射角度が 22°より離れてしまったとしても，ビーム $I_2$をすばやく回折させることが可能である．

次に，衛星間の相対位置が不安定であり，常に DPCM への入射光の角度が変化してしまう状況を考える．初めに，ビーム$I_1$が 22° を中心にして連続的に変化する場合の位相共役反射率の時間応答について述べる．図 5-4 に示すように，ビーム$I_1$の入射角度が入射直後から変化する場合について考える．Case A は 0ms の時点において 22° で PRC へ入射するが, 即座に角度がマイナス方向に変化し，75ms の時点において 21.75° まで角度が変化する．その後，入射角度がプラス方向に変化し，225ms の時点で 22.25° に達する．その後，再び入射角度がマイナス方向に変化し，300ms の時点で 22° となるケースを想定した．このときビーム$I_1$とビーム $I_2$の入射強度比は 1:1 とする．Case B では，比較のために 0s 以降も入射角度が 22° のまま変化しない状況を想定している．Case C は，Case A と同じ角度の時間変化を想定しているが，ビームの入射強度比は 1:10 としている．さらに，Case D は、Case A および Case C よりもゆっくりと角度が変化することを想定している．

図 5-5 に Case A から Case D までの状況における位相共役反射率の時間応答を示す．Case B は角度が一定であるため，位相共役反射率は 0%にはならないが，連続した角度変化が生じる他の Case の場合であっても位相共役反射率が 0%になることはなく，DPCM 内の回折格子が動的に書き替えられ続けていることがわかる．Case A と case C を比較すると，入射強度比が 1:10 である case C の場合では，位相共役反射率が大幅に高く，なおかつ，case B の入射角度が 22° より変化しない状況と比較しても高い反射率を保つことができる．また, case D は，Case A および Case C と比較して入射角度の変化速度が遅いため，位相共役反射率は case C と比較して高く安定していることがわかる．

次に，図 5-6 に示すように，変化する角度の幅の違いによる位相共役反射率の時間応答について調査する．Case E は，21.75° から 22.25° の幅で変化し，Case F は，Case E よりも角度の振れ幅が小さく，21.97° から 22.03° の幅で変化すると想定する．図 5-7(a)より，角度の振れ幅が小さい case F の方が Case E と比べて高い位相共役反射率を保っていることがわ

かる．また，反射率が図 5-5 で示した Case A, Case C, Case D よりも安定しており，Case B の角度変化が生じない場合に近い反射率となっていることがわかる．

最後に，入射角度が，位相共役反射率がほぼ定常状態に達してから Case E または Case F のように変化し始める状況について議論する．図 5-6 に示すように，Case E'は 22°の入射角度で入射し続け，位相共役反射率が定常状態となった 400ms の時点で．Case E の状況に変化する状況とする．Case F'も同様に，400ms の時点で Case F の状況になると想定した．図 5-7(b)より，角度が変化した 400ms を境にして Case E'および Case F'ともに図 5-7 と同じ値まで低下することがわかる．ただし，図 5-2 および図 5-3 のように位相共役反射率が 0%まで低下することはない．したがって，急激な角度変化が生じない場合は，角度が連続的に変化し続けても常に位相共役波を回折することが可能であることが明らかとなった．

### 5.1.2. 実験

本節では，前節の数値解析の結果を検証するために，実際に $Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いて入射ビームの角度に対する位相共役反射率の時間推移を明らかにする実験を行った．図 5-8 に本実験の実験系を示す．まず，波長 633nm の He-Ne Laser を要求光および信号光として用いる．要求光を半波長板（HWP）および偏光ビームスプリッタ(PBS)に透過させた後，ミラー（M1）で反射したビームをレンズ L1,2 で構成される 4f 光学系に透過させる．そして，ビームを 22°の角度で $Sn_2P_2S_6$ 結晶の側面から結晶の中心部を伝搬するような位置から入射させる．同時に信号光を結晶の反対側の側面から 22°の角度で入射させる．このとき，要求光，信号光ともに 6mW のパワーで入射し強度比が 1:1 となるように調節した．二つのビームで DPCM を形成した後，要求光の位相共役光として回折された信号光をビームスプリッタ(BS)で分離しフォトダイオード（PD）で受光する．信号光の受光パワーが安定した後に，M1 を動かすことで，要求光の結晶への入射角度を 16°から 28°の範囲で変化させ位相共役反射率の時間推移を計測した．

図 5-9 に 0s において 22°から入射角度を変化させた場合の位相共役反射率の時間推移結果を示す．図 5-9(a)は 23°から 28°の範囲で変化させた場合，図 5-9(b)は 21°から 16°に変化させたときの結果を示す．図より，いずれの角度に変化した場合でも変化後すぐに回折格子が再形成され，18°から 28°の範囲では，数 100 ms 以内に位相共役反射率がほぼ安定していることがわかる．また，角度が 22°より大きい角度に変化する方が小さな角度に変化する場合と比較し，位相共役反射率が安定していることがわかる．理由としては，入射角度により結晶内部において信号光との相互作用領域が変化し，結合強度が変化したためと考えられる．

## 5.2 追尾性能の評価

本節では，5.1 節で述べた結果をもとに，DPCM を第 4 章で説明した光衛星間通信システムに適用した場合における性能について評価・議論を行う．初めに，本章では，提案システムをフォーメーションフライングに用いることを想定している．第 2 章でも述べたが，フォーメーションフライングは衛星間の距離が最大でも数 100km の比較的短距離間通信であり，親衛星と複数の子衛星で通信ネットワークを構築して一つの大型衛星のようなふるまいをする．フォーメーションフライングにおいては，隊形を崩さないこと，また，新規に打ち上げられる子衛星とのリンクを柔軟に形成することが求められる．なおかつ，光を用いる場合，高速大容量通信も実現できなければならない．本手法をフォーメーションフライングに適用することを考えると，DPCM へ入射する要求光の入射角度が従来のシステムではエラーを起こしてしまうほど大きくなったとしても，所望の伝送速度を実現するための信号光パワーが素早く回折されることを明らかにする必要がある．

そこで，数値解析により衛星間のビーム伝搬を計算することで伝送速度と位相共役反射率の関係について明らかにした．数値解析において，図 5-10 の衛星間のビーム伝搬計算の手順を示すフローチャートおよび表 5-2 のパラメータに基づいて行った．図 5-10 の各 STEP 番号は，第 4 章の図 4-1(c)および(d)に対応している．表 5-2 はこの計算に用いるパラメータを示している．最初に，STEP1-1 において，表 5-2 に示すパワーを持った要求光が laser 1 より射出される．これまでの光衛星通信実験において，数 10mW から数 100mW のレーザパワーが用いられている．そして，これまでの実験より短距離の通信に適用される提案手法に関しては，最大で 50mW のパワーが現実的であると仮定している．50mW を用いる理由に関しては後で述べる．レーザの種類に関して，5.2 節の実験では，10mW の出力を持つ He-Ne レーザを用いている．しかしながら，本手法では，レーザの種類に関しては特に定めていない．例えば，He-Ne レーザは最大 50mW の出力が可能であるが，小型で高性能であるレーザダイオードも十分適用可能である．波長は 633nm に設定しており，これは 5.2 節の実験と同様である．次に，STEP1-2 において，要求光パワーに光学損失が加えられている．これは，STEP1-2A,B,および C における伝搬でレンズやビームスプリッターなどで光学損失が生じるためである．STEP1-3 において，要求光は受信機アンテナから射出される．受信機および送信機アンテナの開口径は ARTEMIS や OICETS のアンテナ径に準じている．ここで，受信機アンテナ利得が要求光パワーに加えられる．利得を加える理由は，カセグレンアンテナは高い指向性を有しているためである．

STEP2 においては，要求光は自由空間を伝搬し，同時に自由空間伝搬損が生じる．アンテナ利得と自由空間伝搬損失は，アンテナ開口径や衛星間距離になどに従って計算することができる[46].

STEP3-1 では，要求光は送信機アンテナに入射し，送信機アンテナ利得が加えられる．STEP3-2 では，レンズ等による光学損失が，要求光に STEP1-2 と同様に加えられる．STEP3-3

では，要求光が DPCM 形成のために PRC へ入射する．ここで，計算の簡単化のため，5.1 節のような DPCM 内部のビーム伝搬計算をする変わりに，DPCM において回折される信号光パワー(STEP4-1C)は DPCM へ入射する要求光パワーに位相共役反射率を乗じた値とした．位相共役反射率は表 5-2 の値とする．

信号光は，STEP4-2 を経て伝搬し，STEP3-2 と同様に光学損失が加えられる．次に，信号光は送信機アンテナより射出される.ここで，送信機アンテナ利得は信号光に対して加えていない．なぜならば，信号光は要求光の位相共役光であり，送信機アンテナの指向性による伝搬を考慮する必要がないと考えたためである．さらに，STEP5 において，信号光は自由空間伝搬損失を受けない．これもアンテナ利得を付加しないのと同様に，信号光は位相共役波であり，伝搬により拡散が起こらないと仮定したためである．位相共役波の伝搬に関しては図 4-1(e)に示している．

STEP6-1 では，信号光は受信機アンテナに入射し，受信機アンテナ利得を受ける．次に，信号光のビーム径が縮小され(STEP6-2A)，要求光から分離された後(STEP6-2B)，集光される(STEP6-2C)．STEP6-2 では，信号光パワーが STEP6-2A,B,C においてレンズやビームスプリッターなどにより光学損失を受けて減少する．最後に，STEP6-3 において，信号光が PD によって受光される．

さらに，背景光が信号光とともに入射することを想定した．背景光は 633-nm 帯における太陽の照射強度の最大の入射パワーとした[47]．提案システムでは第 4 章で述べたように背景光の低減手法として応用することも可能であるが，本章の解析では割愛し，第 6 章にて詳しく述べる．

ここで，要求光が 50mW の理由について説明する．許容伝送速度の計算において，ビットエラーが $10^{-9}$ 以下となった場合は, エラー訂正を必要とせずに良好な通信環境を構築できると仮定している．その場合，Gbps のオーダーの伝送速度を実現するためには，送信機アンテナから射出される信号光パワーが 100μW オーダーである必要がある．ここで，信号光は要求光の位相共役波として受信機アンテナに向かって収束するため，送信機アンテナから射出される信号光がすべて受信機に入射すると仮定している．送信機から射出される信号光パワーは DPCM に入射する要求光のパワーと位相共役反射率を掛けたものである．したがって，もし DPCM における位相共役反射率が 10%から 15%である場合，送信機アンテナに入射すべき要求光パワーが数 mW オーダー必要となる．この場合，5.2 節の DPCM におけるビーム伝搬の実験結果から，位相共役反射率が信号光として用いる laser 2 の出力が送信機アンテナにおける要求光の入射パワーと等しい場合，位相共役反射率が最大となる．したがって，laser 2 の出力は数 mW オーダーが適切である．要求光が送信機アンテナに入射する前, 要求光は表 5-2 に示すように受信機･送信機の両方のアンテナ利得 (+117 dB × 2), 自由空間伝搬損失(-244 dB)を受ける．なぜならば，要求光が受信機から送信機へ伝搬するときは，位相共役波ではないため，アンテナ開口径や衛星間距離に起因した回折現象の影響を受けるからである．このことにより，受信機アンテナにおける要求光パワーは，送信機

アンテナにおける要求光パワー（数 mW）のおよそ 10 倍のパワーが必要となるため，laser 1 における要求光の出力は 50mW が適していると考えた．

図 5-11 に伝送速度の位相共役反射率依存性を示す．許容伝送速度が位相共役反射率および要求光の出力の増加に伴って向上していることがわかる．近年，地表調査や惑星探査が進み，大量のデータ伝送を行うために，Gbps オーダーの伝送速度の実現が望まれている．図 5-11 より，DPCM による Gbps オーダーの通信は要求光の出力が 10mW で位相共役反射率が 30%以上の場合，もしくは，要求光の出力が 50mW で位相共役反射率が 9%以上の場合に達成される．位相共役反射率が 15%以上を達成することは，図 5-9 における実験結果で明らかとなっているため，実験結果より Gbps オーダーの通信を達成可能とする結晶への入射角度は 19° から 27° の間であると見積もることができる(tolerance A)．これに基づいて，具体的な捕捉精度の緩和および・追尾性能の向上に関して議論を行う．

初めに，捕捉精度に関する考察を述べる．図 4-1 に示す通信システムにおいて，送信機アンテナによって受信される要求光のビーム径は L5 および L6 を含む縮小光学系によりおよそ 40 倍縮小されると仮定する．ここで，近軸近似を用いることができるとすると，要求光の $Sn_2P_2S_6$ 結晶上における角度がおよそ 40 倍になる．したがって，tolerance A に基づくと，22°から-3° または +5° の範囲の結晶上の角度変化は，送信機アンテナ上では，0.075° から 0.125°の角度変化となる．従来の送信機では，$10^{-5}$ オーダーの捕捉精度が受信機へ向けて要求されていた．これと比較すると，提案手法は入射角度範囲に対して $10^3$ から $10^4$ 倍大きな許容範囲を確保することができる．さらに，図 5-3 の解析結果より，強度比を調整することで反射率が向上するため，結晶とともに搭載されている内部の光学系に起因する電力の損失をカバーできることが期待される．したがって，tolerance A よりも大きな角度許容範囲が期待でき，提案システムは捕捉精度の大幅な緩和の実現が可能と言える．

次に，衛星の追尾に関して議論する．数値解析および実験より，回折格子が結晶への入射角度変化に応じて急速に再構築され，信号光が要求光の位相共役波として自動的に回折される．このことによって， MEMS mirror などの機械的なシステムを必要とせずに自動追尾を実現することができる[48]．追尾速度に関して，OICETS-ARTEMIS の通信で必要とされる追尾エラー調整時間が 300ms 以内であるが，図 5-9 に示すように，回折格子の書き換えから定常状態に達するまでは 500ms 程度要する．しかしながら，回折格子の形成速度はビーム強度に大きく依存しているおり，ビーム強度に比例している．したがって，結晶への入射ビームのパワーが一定であっても，入射ビーム径を狭めて入射させることで，高いビーム強度で結晶へ入射させることができ，回折格子を素早く形成することができる．さらに， ビーム強度自体を増加させる余地もある．なぜならば衛星通信は図 5-9 での実験で用いたレーザ光より高いパワーをもつレーザ光を用いているからである．これらの方法は図 5-9 の実験時間と比較して DPCM の形成速度を早める可能性をもっている．さらに，この実験では，DPCM の形成速度が結晶の応答速度と比較して 100 倍遅いが，結晶内部での吸収や反射を抑えることで緩和することができる．このように，衛星の追尾性能の向上は，DPCM

を形成するためのフォトリフラクティブ結晶の向上に依存している．本章で用いた $Sn_2P_2S_6$ 結晶はあらゆるドーパント素子を添加することができる[49,50]．　例えば，位相共役反射率が 800%を超える Te-doped $Sn_2P_2S_6$ 結晶がすでに報告されており，追尾性能の向上も大いに期待することができる．

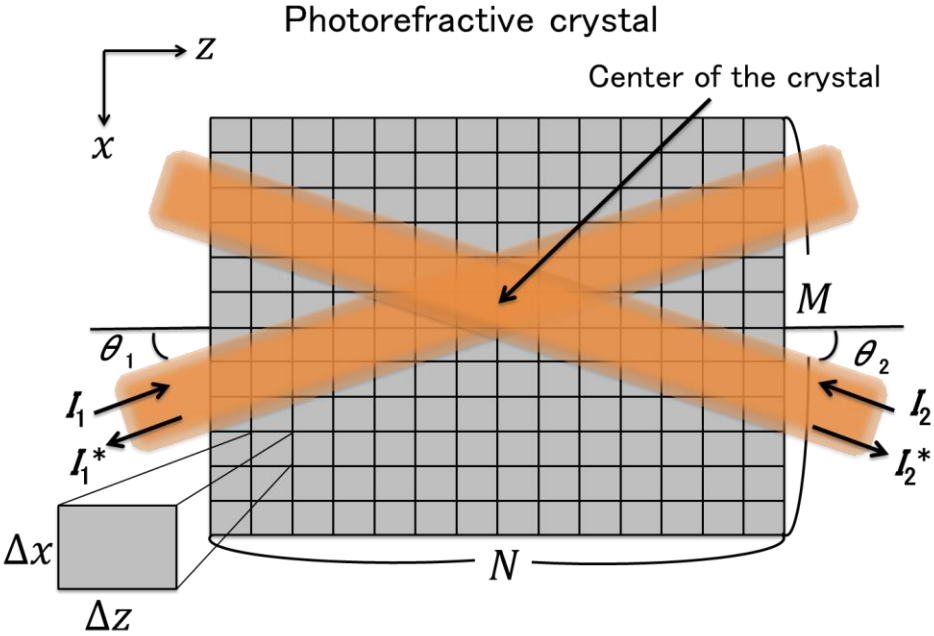



図 5-1 DPCM のための FD-BPM を用いた解析空間の概念図

表 5-1　FD-BPM におけるシミュレーションパラメータ

| | |
|---|---|
| ***Analysis area*** | |
| Grid-size on *x*-axis (μm) | 0.2 |
| Grid-size on *y*-axis (μm) | 0.2 |
| Grid-size on *z*-axis (μm) | 4 |
| Grid-size on *t*-axis (ms) | 0.2 |
| Number of grids on *x*-axis | 10000 |
| Number of grids on *y*-axis | 1000 |
| Number of grids on *z*-axis | 1000 |
| **$Sn_2P_2S_6$:Sb crystal** | |
| Crystal thickness (mm) | 4 |
| Coupling coefficient ($cm^{-1}$) | 20 |
| Effectively refractive index | 3.06 |
| Optical absorption (cm) | 0.25 |
| Response time (ms) | 6.8 at 0.3W/$cm^2$ |
| Optical absorption coefficient ($cm^{-1}$) | 2.4 |
| **Incident beams** | |
| Wavelength (nm) | 633 |
| Polarization of beam $I_1$ and beam $I_2$ | *p*-polarization |
| Incident beam radius (μm) | 400 |
| Total beam intensity (W/$\mu m^2$) | $2.0\times10^{-8}$ |
| Initial incident angle of beam $I_1$ $\theta_1$(°) | 22 |
| Varied incident angle of beam $I_1$ $\theta_1$(°) | 8.0 to 28.0 |
| Incident angle of beam $I_2$ $\theta_2$(°) | 22 |

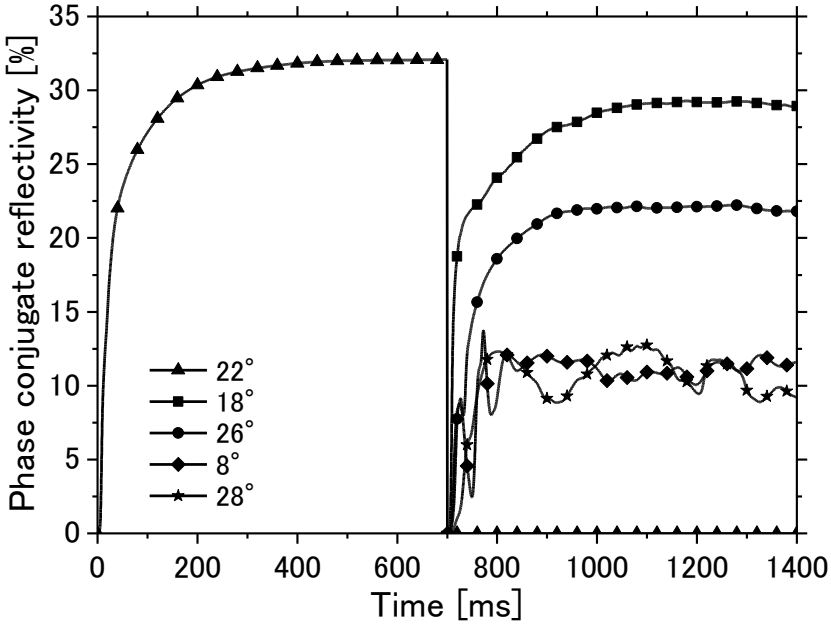



図 5-2 強度比が 1:1 の場合の位相共役反射率の時間応答

ビーム$I_1$の入射角度は 0 から 700 ms の間は 22° であり，その後 8–28°に変化している

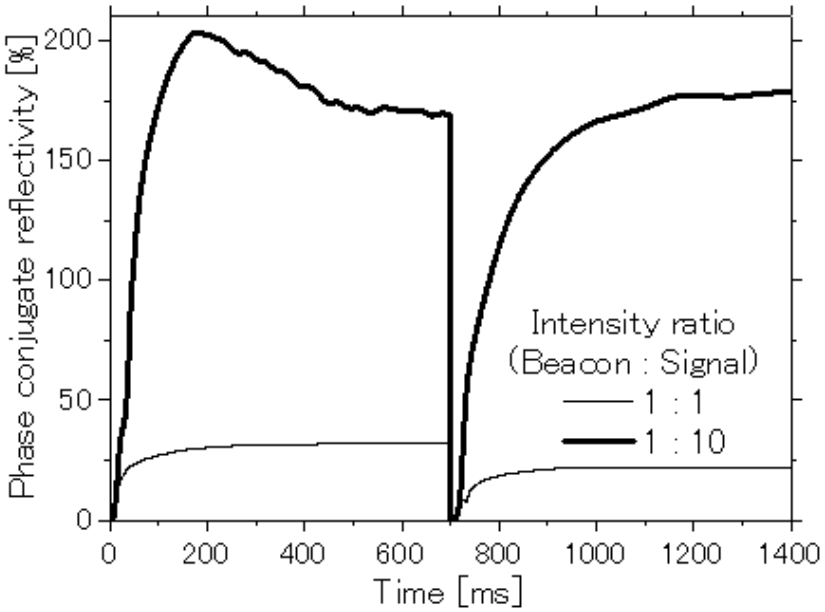



図 5-3 位相共役反射率の時間変化.

入射強度比は 1:1 (narrow curve)と 1:10 (bold curve). ビーム$I_1$の入射角度は 0 から 700 ms の間は 22° であり，その後 26°に変化している.

| | Incident angle of the beacon beam | Intensity ratio (Beacon : Signal) |
|---|---|---|
| Case A | 21.75° ~ 22.25° at 300ms | 1:1 |
| Case B | 22° | 1:1 |
| Case C | 21.75° ~ 22.25° at 300ms | 1:10 |
| Case D | 21.75° ~ 22.25° at 1200ms | 1:10 |

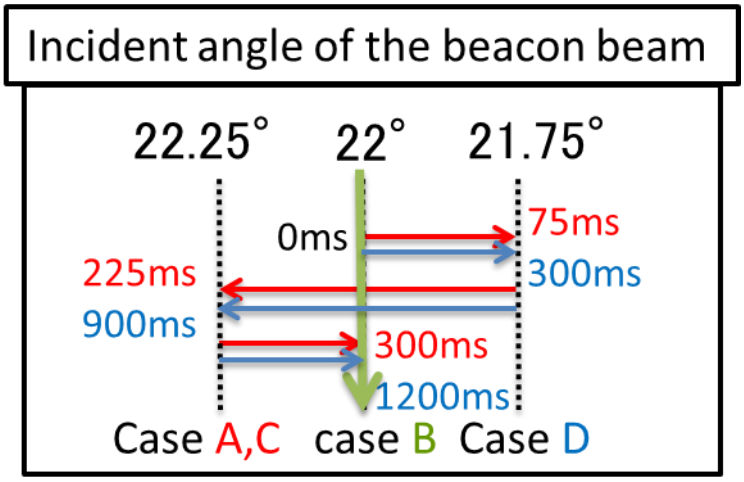
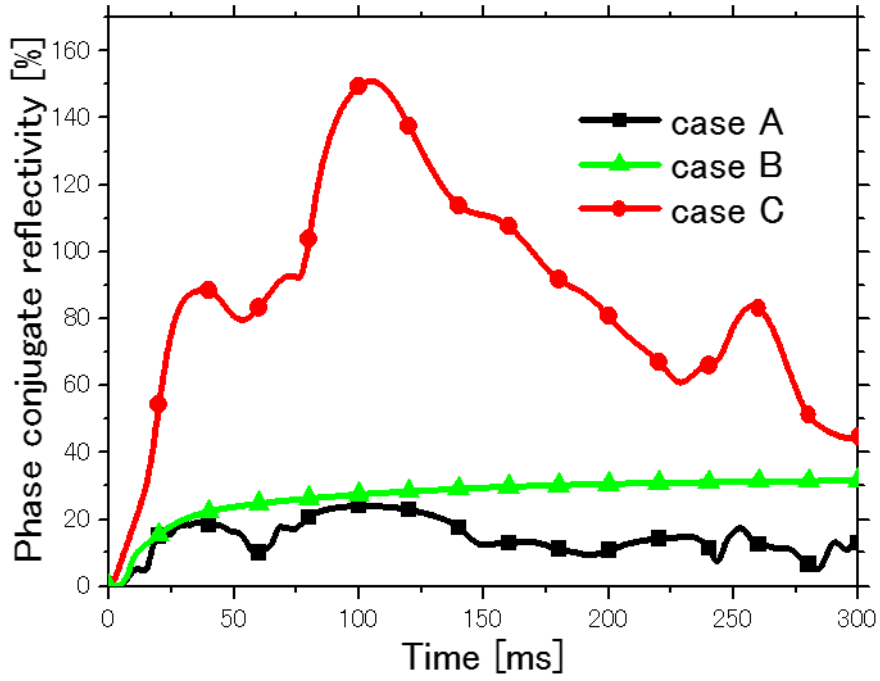
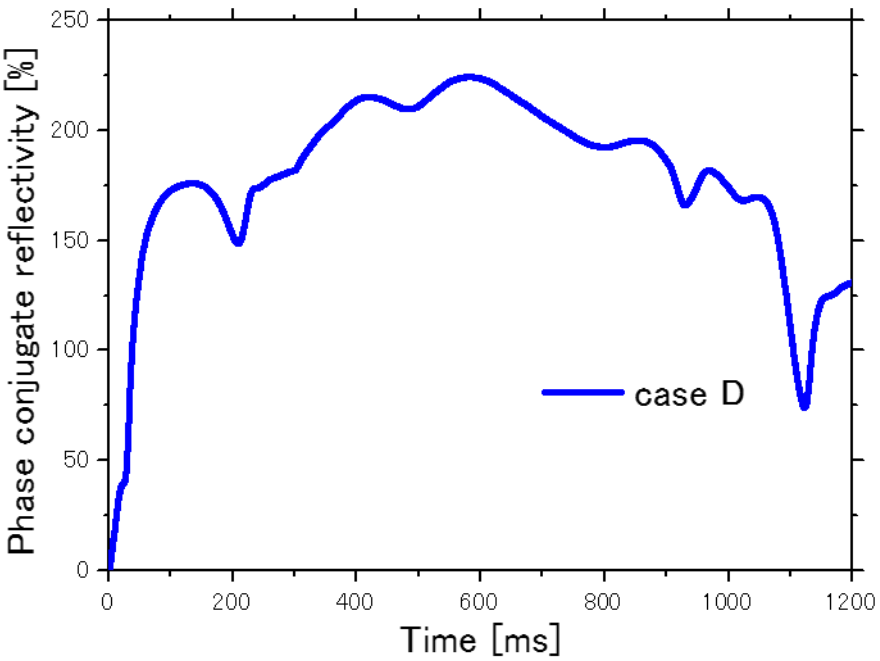



図 5-4　入射角度の連続的変化 1




(a)




(b)

図 5-5 入射角度の連続的変化における位相共役反射率の時間応答 1

| | Incident angle of the beacon beam | Intensity ratio (Beacon : Signal) |
|---|---|---|
| Case E | 21.75° ~ 22.25° (±0.25° at 0.2ms) | 1:10 |
| Case F | 21.97° ~ 22.03° (±0.02° at 0.2ms) | 1:10 |
| Case E' | 22° (~400ms)→ case E | 1:10 |
| Case F' | 22° (~400ms)→ case F | 1:10 |

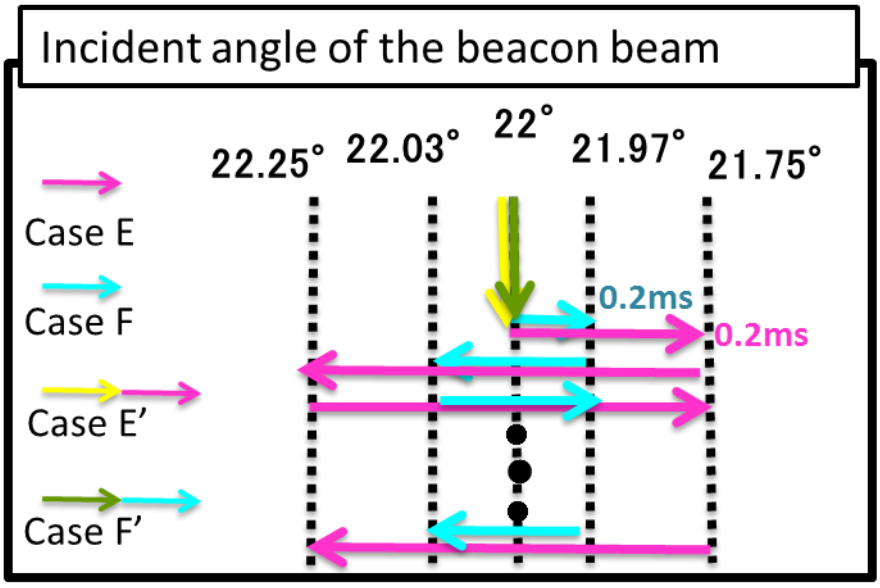



図 5-6　入射角度の連続的変化 2

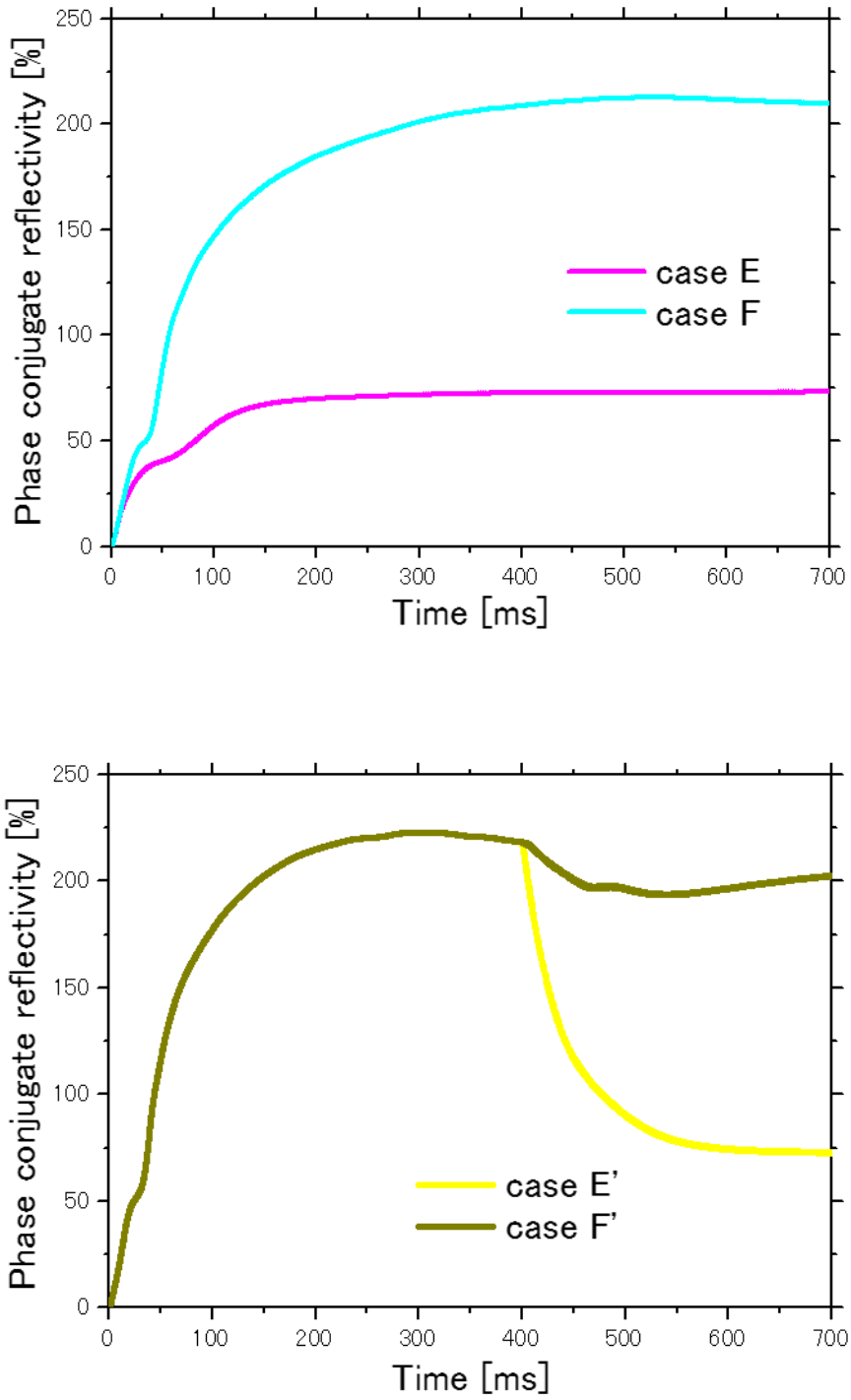
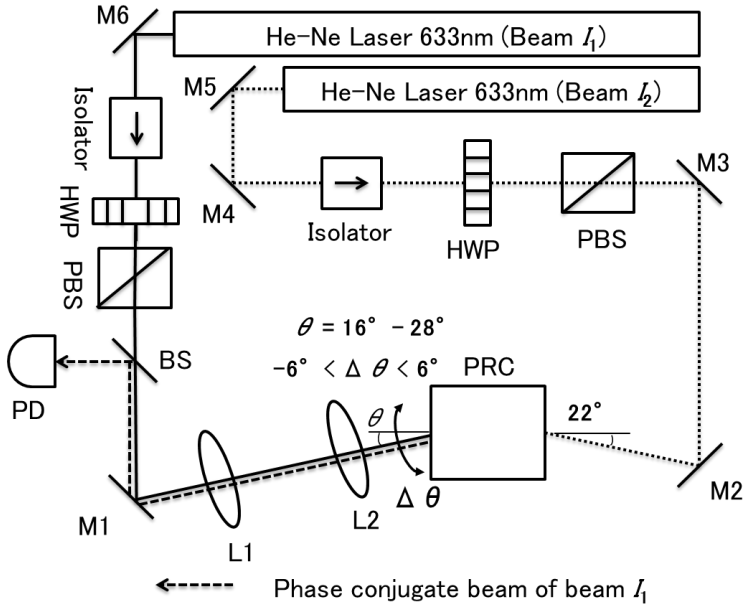
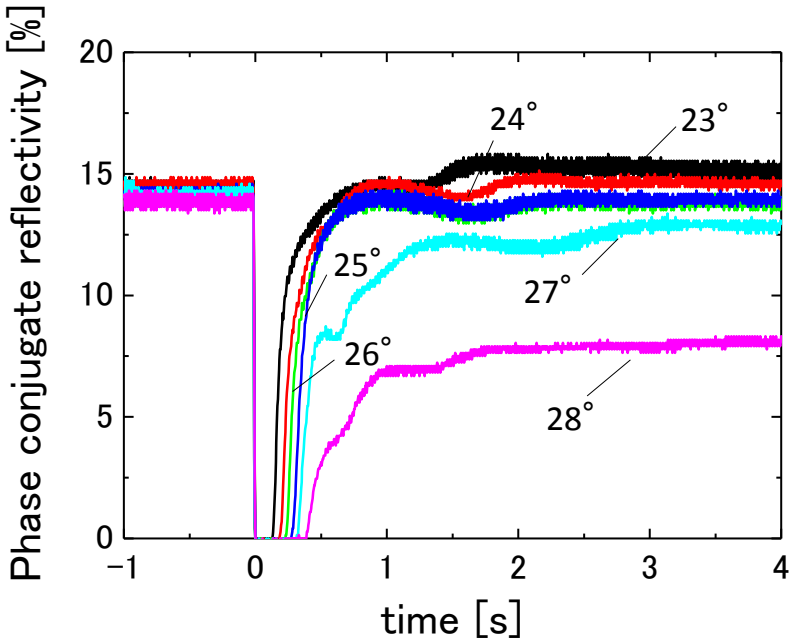



図 5-7 入射角度の連続的変化における位相共役反射率の時間応答 2

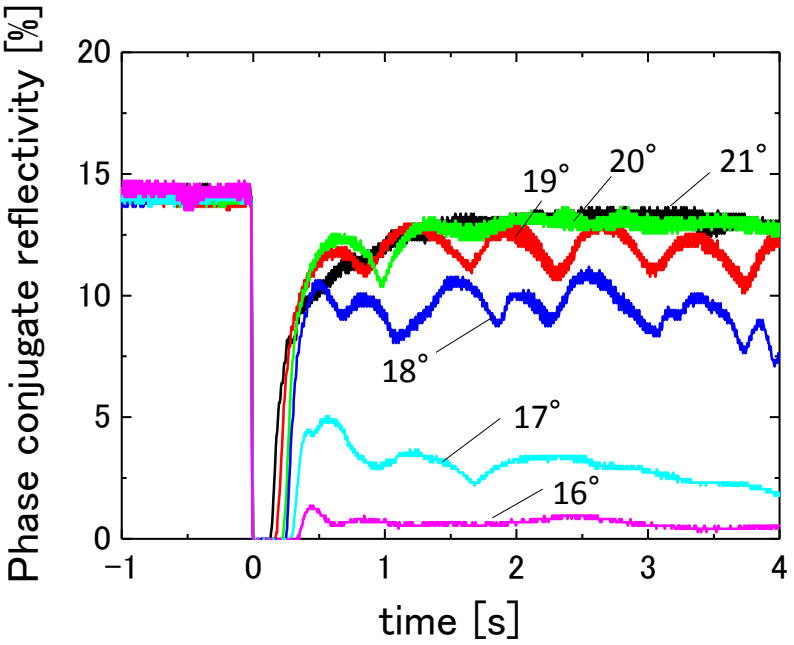



M1−5 : mirror, L1−2 : lens( f = 100mm), HWP : half wavelength plate,
BS : beam splitter, PBS : polarizing beam splitter, PD : photo detector,
PRC : photorefractive crystal($Sn_2P_2S_6$ : 1.5% Sb−doped)

図 5-8 位相共役反射率計測のための実験系




(a)




(b)

図 5-9 位相共役反射率の実験的時間応答

強度比は 1:1 であり, ビーム$I_1$の入射角度は 0s より以前は 22°でその後(a) 23°–28° and (b) 16°–21°にそれぞれ変化している.

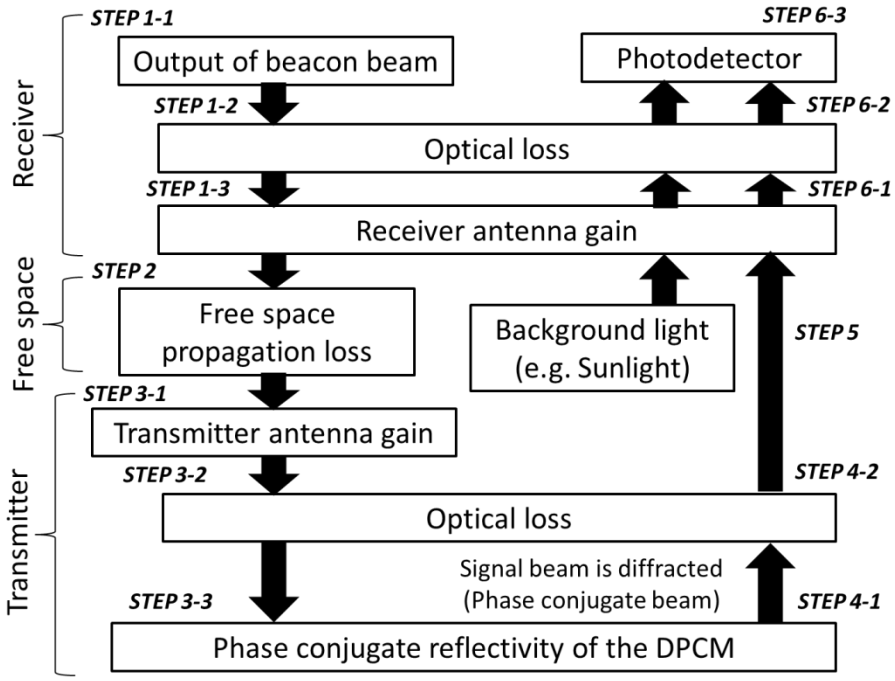



図 5-10 衛星間のビーム伝搬計算におけるフローチャート

表 5-2　衛星間ビーム伝搬解析のためのシミュレーションパラメータ

| | |
|---|---|
| ***Receiver and transmitter*** | |
| Aperture diameter (m) | 0.2 |
| Optical loss (dB) | 3 |
| Antenna gain (dB) | 117 |
| **Link propagation** | |
| Output beacon beam power (mW) | 5,10,30,50 |
| Wavelength (nm) | 633 |
| Link distance (km) | 100 |
| Free space propagation loss (dB) | 244 |
| Phase conjugate reflectivity (%) | 2 – 100 |
| Background light (mW) | 15.7 |
| Bit error rate | $1 \times 10^{-9}$ |

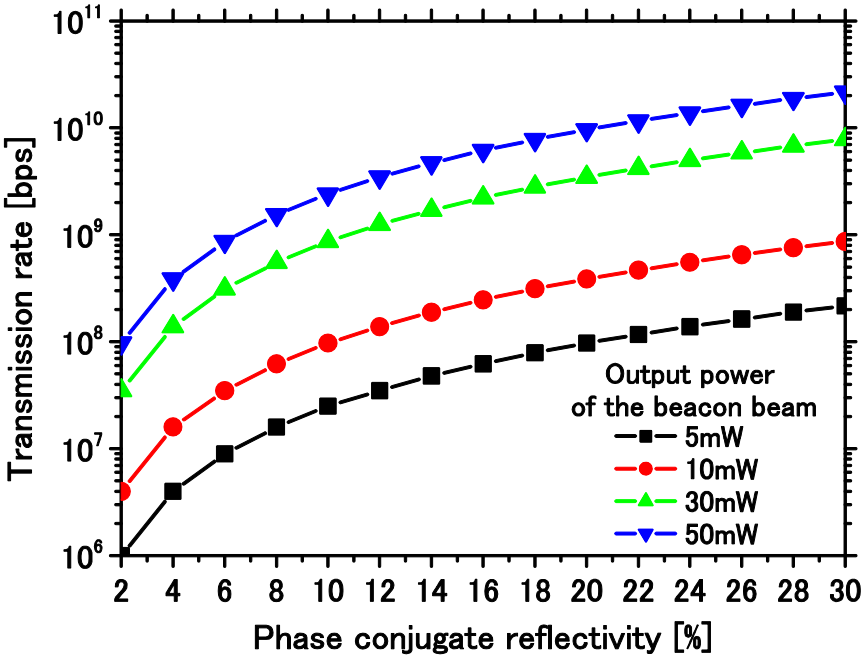



図 5-11 伝送速度の位相共役反射率依存性

# 第 6 章　2 値位相板を用いた背景光低減手法の評価

第 4 章で提案した光衛星間通信システムでは，第 5 章で述べた捕捉・追尾性能の向上に加え，背景光の効果的な低減も行うことができる．本章では，背景光低減効果を，数値計算を行うことにより明らかにする．提案システムは，送信機衛星内に設置した DPCM を用いることにより，要求光と信号光の両波面を位相共役関係に変換することができる．一方で，受信機衛星内に空間フィルタを設置することで，信号光（位相共役波）と通信エラーの原因となる背景光に対して波面差異を生み出すことができ，両ビームを空間的に分離することができる．

空間フィルタの中でも，とりわけ信号光と背景光の波面差異を生み出すための位相板の設計が重要となる．本章では， 2 値の位相分布を有する位相板を提案することで，従来の背景光低減フィルタと比較してより効果的に背景光を低減し，かつ伝送速度も向上できることを示す．初めに，6.1 節では，提案手法に空間フィルタを組み合わせた背景光低減手法の動作原理を説明する．6.2 節では，背景光低減効果を明らかにするための数値解析について説明すると同時に，空間フィルタにおける 2 値位相板の設計について述べる． 6.3 節では，6.2 節で実施した数値解析による背景光低減効果について，従来の背景光低減フィルタとの比較を行う．6.4 節では，2 値位相板の最適化について述べる．

## 6.1. 背景光低減手法の動作原理

本節では，光衛星間通信システムにおける背景光低減に関する動作過程を説明する．通信リンクの形成過程など基本的な動作は第 4 章で述べた動作手順とほぼ変わらない．一方で，背景光低減のためには，受信機衛星のアンテナ面において通信光および受信機に入射することが予想される背景光に対して波面差異を与える位相板を新たに設置する．位相板による波面歪み生成効果と DPCM における波面補正効果を組み合わせることにより，背景光を空間的に効率よくフィルタリングすることができる．通信光と背景光の 2 つの光波の波面差異を位相板によっていかに生み出すかが背景光低減における重要なポイントとなる．

図 6-1 に光衛星間通信システムにおける背景光低減手法の概念図を示す. 既に第 4 章および 5 章で提案手法の通信プロセスについては説明してあるので，本章では位相板を用いる点を中心に説明する．初めに，図 6-1(a)に示すように，送信機内部に設置したフォトリフラクティブ結晶内において DPCM を形成する．このとき，背景光低減手法においては，受信機から射出される要求光は予め，受信機アンテナ面に設置された位相板を透過し，波面歪みを受ける．その後，波面が歪んだ要求光が送信機へ向かって伝搬した後，送信機衛星の

PRC に入射後に，信号光とともに，DPCM を形成する．

次に図 6-1(b)に示すように, 背景光がフィルタリングされる過程について説明する. DPCM 形成後は，信号光は要求光の位相共役波として要求光の波面歪みを有して回折され，受信機へ向かって伝搬する．ここで，信号光は受信機アンテナへ入射する際，受信機アンテナに設置した位相板を透過することで，平面波に復調される．一方で，背景光が受信機アンテナに入射すると，受信機アンテナに設置した位相板によって波面歪みを受けて受信機内部に入射することになる．このようにして信号光と背景光の間に波面差異を生み出す．その後，受信機内部では，平面波（信号光）と空間スペクトルの広がった波面（背景光）の集光スポット径の大きさの違いを利用して，ピンホールを用いて両波面を分離することができる．

## 6.2. 数値解析

本節では，提案手法である光衛星間通信システムに新たに位相板を組み合わせることにより，背景光が空間的にフィルタリングされ，伝送速度が向上することを明らかにする目的で数値解析を行う．解析モデルとパラメータを図 6-2，表 6-1 にそれぞれ示す．信号光の変調は第 2 章で述べたような IM/DD 方式を用いている．許容伝送速度は，フォトディテクター(PD)における背景光と信号光の受光パワーに基づき計算している．この計算では，IM/DD 方式におけるビットエラーレート(BER)の計算に基づいて得られる信号雑音比(SNR)の関係式を用いている. 図 6-2 の解析モデルにおける衛星間のビーム伝搬解析の手順を説明する．

最初に，平面波の要求光に位相板の空間位相分布を乗じる．要求光の初期複素振幅分布 $E_{b0}(x)$ は以下の式で定義されている．

$$E(x,y,0)=\left(\frac{2P_0L_r}{\pi w_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}\exp\left(\frac{-(x^2+y^2)}{w_0^2}\right)\exp\left(\frac{jk(x^2+y^2)}{2R}\right) \tag{6-1}$$

ここで，$P_0$ は要求光の送信電力，$L_r$ は受信機内の光学系損失，$w_0$ はビームウエスト，$k$ は波数，$R$ はビームの曲率半径を表す．なお，本解析では，ビームウエストは位相板の面に位置すると仮定し，曲率半径は無限大であると仮定する．そして，変調された要求光の受信機から送信機へ向けた自由空間伝搬を角スペクトル方法(ASM)を用いて計算する．ここで，計算量を減らすために本解析では平面波展開を用いた方法により数値計算を行う．例として，$xy$ 平面の距離 $z_0$ における光波の複素振幅を $f(x,y,z_0)$，それに対応した空間周波数スペクトルを $F(\nu_x,\nu_y,z_0)$ とすると，距離 $d$ 伝搬した点( $z=z_0+d$ ) における空間周波数スペクトル

$F(\nu_x,\nu_y,z_0+d)$ は，伝達関数 $H(\nu_x,\nu_y,d)$ を用いて以下の式で表される．

$$F(\nu_x,\nu_y,z_0+d)=F(\nu_x,\nu_y,z_0)\cdot H(\nu_x,\nu_y,d) \tag{6-2}$$

但し，

$$H(\nu_x,\nu_y,d)=\begin{cases}\exp\left(jkd\sqrt{1-(\lambda\nu_x)^2-(\lambda\nu_y)^2}\right) & \sqrt{\nu_x^2+\nu_y^2}\le\dfrac{1}{\lambda}\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{6-3}$$

したがって光波の自由空間伝搬計算は，まず光波面を FFT (Fast Fourier Transform)し，得られた空間周波数スペクトルに上記の伝達関数を積算，新たに得られた空間周波数スペクトルを IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) することで行うことができる．この伝搬計算法により，距離 $d$ 離れた開口面における要求光の複素振幅分布が算出できる．

その後，変調された要求光が送信機アンテナに入射する．ここで，DPCM は要求光に対して完全な位相共役波を回折すると仮定し，位相共役反射率は 100%とする．図 6-2 のように結晶がレンズの後ろ焦点面にあると仮定すれば，レンズ前の焦点面の複素振幅を FFT することで結晶端面での複素振幅を求めることができる．本解析モデルでは，通信距離を $d$ とすると，レンズの焦点距離 $f$ に対して $d>>f$ であるため，$z=d-f$ の面における複素振幅は $z=d$ の面における複素振幅にほぼ近似できると仮定する．この複素振幅を $E_{b2}(x,y,d)$ とすると，結晶端面における複素振幅 $E_{b3}(x,d+f)$ は以下のように表される．

$$E_{b3}(x,y,d+f)=\mathrm{FFT}\left[E_{b2}(x,y,d)\cdot p_t(x,y)\right] \tag{6-4}$$

但し，$p_t(x)$ は送信機側のレンズ開口関数を表し，開口径を $a_t$ とすれば

$$p_t(x)=\begin{cases}1 & \sqrt{x^2+y^2}\le a_t\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{6-5}$$

で表される．なおここでは簡単のため，レンズを透過した光はすべて結晶に入射すると仮定する． (6-4)式で得られた結晶端面の複素振幅に位相共役反射率の平方根を掛け合わせることで，結晶端面における位相共役光の複素振幅を決定する．さらに簡単のため，結晶端面における要求光のすべての空間周波数成分に対して，位相共役反射率は一定であると仮定する．すると，結晶端面における位相共役光である信号光の複素振幅 $E_{pc}(x,y,d+f)$ は，以下式で表すことができる．

$$E_{pc}(x,y,d+f)=\sqrt{\rho}\cdot E_{beac3}(x,y,d+f) \tag{6-6}$$

但し，$\rho$ は位相共役反射率を表している．この式を IFFT することにより，レンズ前焦点面の複素振幅を算出する．このとき指向・捕捉過程同様，$z=d-f$ 及び $z=d$ の面における複素振幅がほぼ等しいと近似すれば,

$$E_{pc}(x,y,d)=IFFT\left[E_{pc}(x,y,d+f)\right]\cdot a_t \tag{6-7}$$

が得られる．

送信機から受信機へ向けた位相共役波（信号光）の自由空間伝搬は ASM によって計算する. 自由空間伝搬計算を行うことで, 受信機の開口面( $z=0$ ) における複素振幅 $E_{pc}(x,y,0)$ を得る．その分布に開口径 $a_r$ のレンズ開口関数,

$$p_r(x,y)=\begin{cases}1 & \sqrt{x^2+y^2}\le a_r\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{6-8}$$

を積算することにより，受信機に入射する信号光の複素振幅分布を求めることができる．受信機内部では，信号光の分布と位相板の分布を乗算する．その結果，信号光の波面は平面波に復調される．

ここで，背景光も信号光とともに受信機へ入射することを仮定する．また，従来の波長フィルタは提案手法と組み合わせることを想定して，通信光と同じ波長帯の太陽光のみが入射すると仮定した．要求光と信号光の通信波長帯域はどちらも DPCM に用いるフォトリフラクティブ媒質の感度に基づいて 830nm に設定した．この媒質の感度はフォトリフラクティブ媒質の種類によって変化する．本手法では，特に，第 5 章で述べたような $Sn_2P_2S_6$ 結晶か，あるいは $BaTiO_3$ 結晶を用いることを想定している．太陽光の 830nm 帯域における入射パワーはスペクトル照射強度分布より計算することができる．具体的に，波長フィルタの帯域幅が 0.001μm, 受信機アンテナの開口径が 10 cm で，視野角が 1 mrad の場合，波長フィルタを透過する背景光パワーは最大で 16mW となる．このパワーを持った背景光が信号光とともに受信機アンテナに入射した後，背景光分布と位相板の空間位相分布が乗算される．

次に Lens3 及び Lens2 で構成される縮小光学系透過後の複素振幅を求める．その後，位相板が Lens3 の焦点面に位置していると仮定すれば，Lens3 透過後の焦点面における複素振幅 $E_{s1}$ は，FFT することで求めることができる．さらにこの焦点面が Lens2 に一致し，さらに光波のすべての成分が Lens2 に入射すると仮定すれば，縮小光学系透過後の複素振幅 $E_{b2}$ 及び $E_{s2}$ は以下式で与えられる．

$$\begin{cases} E_{b2} = \mathrm{FFT}\left[\mathrm{FFT}\left[E_{b0}^{'}(x,y)\cdot p_{l1}\right]\right] \\ E_{s2} = \mathrm{FFT}\left[\mathrm{FFT}\left[E_{s0}(x,y)\cdot p_{l1}\right]\right] \end{cases} \tag{6-9}$$

次に空間フィルタを通過し，PD に入射する複素振幅を求める．Lens2 の焦点面に Lens1 の焦点面に一致しているとのとし, さらに光波のすべての成分が Lens1 に入射すると仮定すれば，Lens1 透過後の焦点面における複素振幅は式(6-9)を FFT することにより求められる．さらにピンホールがこの面に位置すると仮定し，ピンホール径を $D_{\mathrm{pin}}$ とすれば，ピンホールを透過直後の複素振幅 $E_{b3}$ 及び $E_{s3}$ は

$$\begin{cases} E_{b3} = \mathrm{FFT}\left[E_{b2}(x,y)\cdot D_{\mathrm{pin}}\cdot L_r\right] \\ E_{s3} = \mathrm{FFT}\left[E_{s2}(x,y)\cdot D_{\mathrm{pin}}\cdot L_r\right] \end{cases} \tag{6-10}$$

で与えられる．ここで，$L_r$ は受信光学系損失である．

最後に受光電力を求める．ピンホールを透過した光波はすべて PD によって捕捉されると仮定すれば，信号光及び背景光の電力 $P_s$，$P_b$ は以下式で求めることができる．

$$\begin{cases} P_s = \iint \left|E_{s3}(x,y)\right|^2 dxdy \\ P_b = \iint \left|E_{b3}(x,y)\right|^2 dxdy \end{cases} \tag{6-11}$$

これに基づいて，最終的に許容伝送速度を計算する．ここで，予め，一時的に設定した伝送速度を用いて受信帯域を設定する．受信パラメータ（量子効率や雑音温度など）と上記で算出した PD における信号光と背景光のパワーを用いて，受信信号電流，ショット雑音，暗電流，熱雑音，そして背景雑音を見積もることができる．SNR は受信信号電流とこれらの雑音により計算される．この SNR に基づいて，BER が導かれる．ここで，BER はエラー訂正を行わずに良好な通信を行うために $10^{-9}$ 以下を基準として設定した．導出された BER が $10^{-9}$ 以下の時，一時的に設定した伝送速度と受信帯域を増加し，それから SNR と BER の導出計算を繰り返し行った．計算を繰り返していくと，BER が $10^{-9}$ に近似する．この解析では，BER が $10^{-9}$ の 90%に達したとき，設定した伝送速度を許容伝送速度とする．

次に，位相板の設計について述べる．位相板は背景光の低減量を決定づける重要なパラメータとなる．なぜならば，ピンホール上における背景光の拡散は透過する位相板の位相分布に依存しているためである．本章の解析では，2 値の位相板（binary PP）とランダムディフューザの 2 種類の位相板を設定した．

最初に，binary PP について説明する．図 6-2 の左下に示すように，本論文において新たに提案する binary PP は背景光の角スペクトルを効果的に広げることができ，より効率よく動作することが期待できる．なぜならば，平面波を binary PP に透過させた後，レンズにより集光すると，集光面の中心部分を境として強度ピークを分割させることが可能なためである．ここで，背景光は遠方の太陽からの光波が主であることから，平面波と仮定する．図 6-2 の解析モデルに従い，この背景光を，周期的な分布を持つ binary PP に透過させる．背景光がレンズによって集光されるとき，強度ピークは位相差の境界部分に沿って分割される．ピンホール前の背景光の強度分布を図 6-3 に示す．比較のため，信号光のピンホール前における強度分布も同様に示す．図より，背景光の強度分布が二つに分割されており，信号光の強度ピークとの位置が明確に異なっているのがわかる．この時，PD の前に設置するピンホールを binary PP の中心部に一致させることによって，背景光雑音の大部分をカットすることができる．一方で信号光は，平面波に復調されるため，binary PP の影響を受けずピンホールの中心部に集光される．

次に，ランダムディフューザについて述べる．図 6-2 の左下に示すように，本章で用いるディフューザはランダムな位相分布を有しており，ディフューザを透過した光の角スペクトルはガウシアン分布を持つように設定している [51-55]．このガウシアンランダムディフューザモデルは広角ディフューザとして一般的に用いられている．このディフューザモデルの特徴としては，任意のビーム拡散をディフューザの拡散角を調整することで生み出すことができる．

## 6.3. 背景光低減効果の評価

前節における数値解析に基づいて，図 6-4 に各種フィルタリングパターンごとの許容伝送速度を，図 6-5 に背景光低減率をそれぞれ示す．ここで図 6-5 の背景光低減率は，受信機アンテナに入射する背景光パワーに対する空間フィルタ透過後に最終的に受信される背景光パワーの比と定義する．フィルタリングパターンに関しては，比較のために，binary PP とランダムディフューザに加え，従来の波長フィルタのみを用いた場合の伝送速度および背景光低減率も明らかにしている．図 6-4 において，横軸はディフューザの拡散角を示している．許容伝送速度に関しては，binary PP を用いると，ディフューザや波長フィルタのみの場合と比較して最大で 11 倍も伝送速度が向上することが明らかとなった．さらに，背景光低減率に関しては，binary PP を用いた場合，入射する背景光パワーに対しておよそ 99%もカットできることが明らかとなった．これは，前節で述べたように，binary PP が背景光の強度ピークを集光面の中心部より離すことができたためであると思われる．ただし，ここで用いている binary PP の分布があらゆる光衛星間通信において最適であるとは限らず，衛星間通信の各種パラメータによって，より最適な分布が存在する．binary PP の最適化につ

いては次節で述べる．

一方で，ディフューザを用いた場合も背景光は効果的に低減できている．しかし，伝送速度の向上があまり見られない．さらに，伝送速度はディフューザの拡散角が増えるに従って低下している．この結果に関して次のように考察することができる．ディフューザの拡散角が増加したとき，背景光の角スペクトルはピンホール上で広がるため，背景光を効果的に低減することができる．この背景光の低減効果自体は伝送速度の向上に貢献する．一方で，拡散角が増加すると，要求光もディフューザで大きな位相歪みを受けるため，受信機から送信機へ向かって自由空間を伝搬する間に大きく広がってしまう．したがって，波面歪みを受けた要求光の波面は，送信機アンテナ面で大きく広がることとなる．拡散角の増加に伴って，要求光の送信機アンテナ面におけるビーム径は増々広がり，送信機アンテナへ入射する要求光パワーは大幅に減少する．ここで，DPCM の位相共役反射率が一定していると仮定すると，DPCM によって回折される信号光は DPCM へ入射する要求光パワーの減少に伴って減少してしまう．そして，受信機アンテナへ入射する信号光パワーも結果的に減少することとなる．したがって，ディフューザの拡散角が増加して背景光パワーが減少しても，信号光パワーもともに減少することとなる．拡散角が $3.0\times10^{-5\circ}$ を超えるとき，信号光パワーは背景光の低減率と比較して大幅に減少してしまうため，その結果，許容伝送速度が大きく減少する．

### 6.4. 2 値位相板の最適化

本節では，伝送速度の向上に向けた binary PP の最適化について議論する．前節のディフューザを用いた場合の許容伝送速度についての考察で述べたように，許容伝送速度の向上には，背景光の低減だけではなく，信号光パワーをより多く受光することが重要である．ここで，2 値位相板に限らない位相板の位相間隔 $\Delta$ とビームの拡散角 $\theta$ の関係は以下のように表すことができる．

$$\Delta = \frac{2\lambda}{\sin\theta} \tag{6-12}$$

$\Delta$ は $0$ と $\pi$ を 1 周期とした場合の 1 周期あたりの位相間隔である．したがって，要求光の拡散角は，位相板の位相間隔が狭まるに従って大きくなることがわかる．要求光が間隔の狭い binary PP を透過するとき，要求光は送信機アンテナ面で広がり，そして DPCM へ入射するパワーは減少する．図 6-6 に送信機アンテナ面における要求光の強度分布を示す．これらの解析手法は前節で述べたのと同じ手法を用いている．binary PP の位相間隔は変化させているが，周期パターンは一定としている．図 6-6 に見られるように，送信機アンテナ面に

おける要求光の強度ピークは binary PP の位相間隔が狭まるにつれて，アンテナ面の中心より離れていくのがわかる．位相間隔が，0.025m の時，強度ピークは送信機アンテナ径より外側に位置している．ここで，アンテナ面にすべての要求光パワーが入射するために許容される拡散角(θ)は以下のように表すことができる．

$$\theta \leq \tan^{-1}\frac{Antenna\ aperture\ size}{d} \tag{6-13}$$

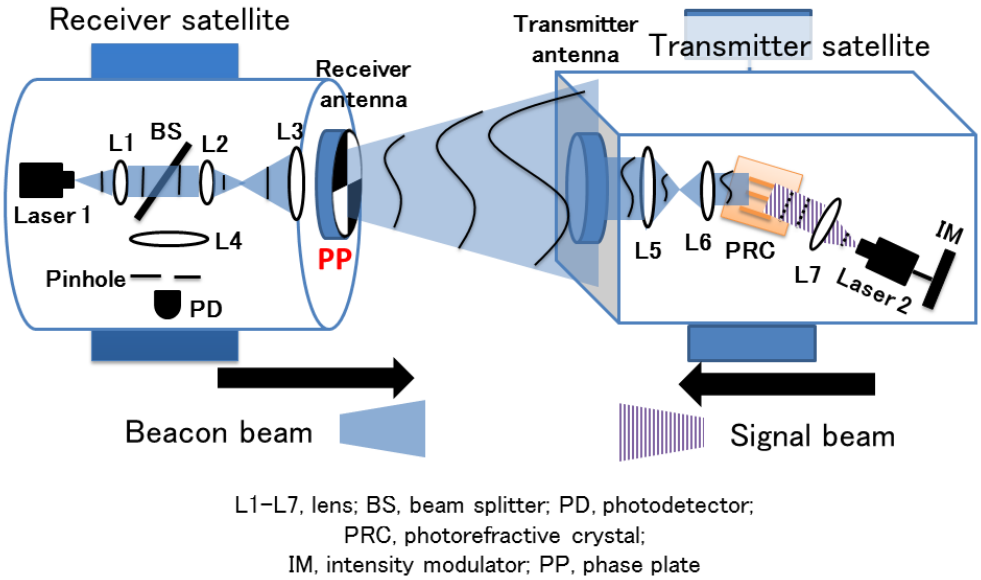
d は衛星間の距離である．したがって，式(6-12)および式(6-13)，そして表 6-1 より，要求光パワーが送信機アンテナにほぼすべて入射するためには，binary PP の位相間隔は少なくとも 0.06m でなければならない．ここで，次のことに注意しなければいけない．0.06m は位相分布に関して言及しておらず，位相間隔のみに着目した値である．提案手法の効果的な動作を実現するためには，位相間隔は，アンテナ径や衛星間距離だけではなく，binary PP の大きさや 0 と π の位相値の位置関係によっても決定づけられなければならない．本研究では，binary PP の位相分布の設定において，binary PP を透過する背景光がピンホールの中心において強度ピークを持たないようにすることが極めて重要である．したがって，前節で述べたように，ピンホールの中心部と binary PP の中心部が同軸上にあるとき，binary PP の中心は 0 と π の境目でなければならない．この数値解析では，binary PP の直径は 0.25m と仮定している．この条件に合わせると，図 6-6 に示すような不連続の位相間隔(0.25, 0.05, 0.036, 0.025 m)を設定する必要が生じる．

次に，位相板のパラメータが伝送速度に与える影響について述べる．図 6-7 に binary PP の位相間隔と許容伝送速度の関係を示す．位相間隔が，0.05m のとき，伝送速度が最も高くなることがわかる．しかし，上述したように，位相間隔が 0.25m のときは，全ての要求光成分が送信機アンテナに入射することができる．これは，位相間隔が 0.05m の位相板を用いた場合の方が，位相間隔が 0.25m の位相板を用いた場合と比較して，より効果的に背景光がカットすることができるためである．位相間隔が狭まるとき，送信機アンテナ面における要求光と同様に，背景光の強度ピークもピンホールの中心部より離れていく．さらに，位相間隔が 0.05m のとき，要求光のすべての強度ピークが送信機アンテナに入射していることが，図 6-6 より確認できる．したがって，位相間隔が 0.25m のときは，ほぼすべての要求光成分が送信機アンテナに入射するものの，背景光低減率は位相間隔が 0.05m の場合と比較して低くなることから伝送速度が最高値には至らなかった．一方で，位相間隔が 0.025m の場合，伝送速度は大幅に減少している．これは，図 6-6 で確認できるように，要求光の強度ピークが送信機アンテナに入射しないためであり，結果として DPCM で回折される信号光パワーが大幅に減少し，伝送速度が急激に低下した．

以上のことから，binary PP の位相分布は衛星間距離やアンテナ開口径などの通信機器のパラメータを考慮して設定する必要がある．例えば，衛星間距離が長距離となる場合，binary

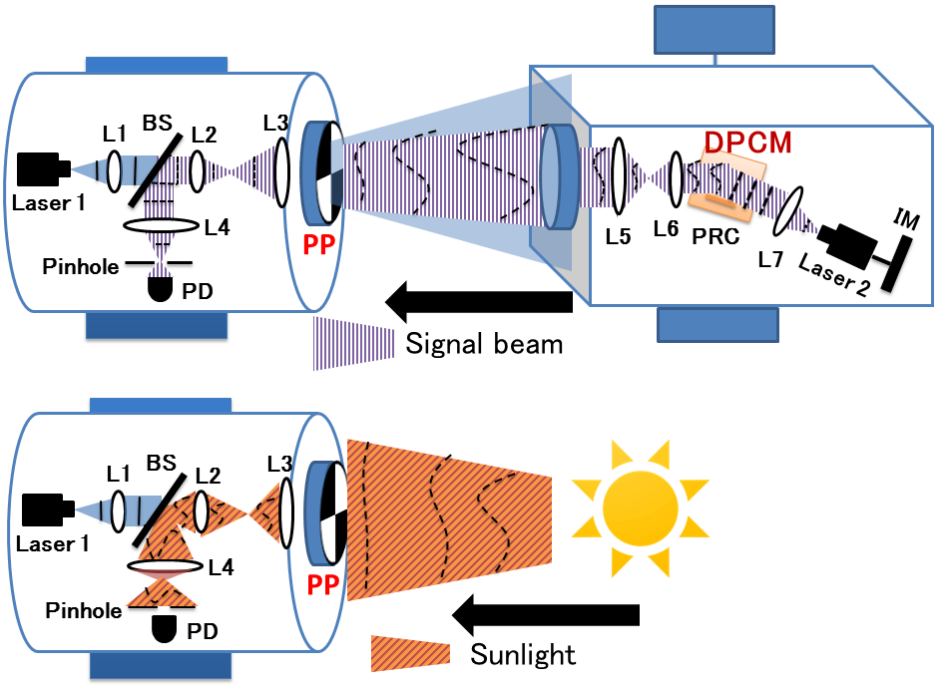
PP の位相間隔は広めに設定する必要がある．なぜならば，要求光パワーは，位相板の利用に関係なく，受信機から送信機へ伝搬する際に，自由空間伝搬により，$4 \times (\text{衛星間距離})^2$ に比例して減少してしまうためである[56]. 一方で, 送信機アンテナ径が大きい場合, binary PP の位相間隔を狭く設定することができる．なぜならば，広い角度スペクトルを有した要求光であってもアンテナ径が大きければ受信することが可能となるためである．

これらの通信機器のパラメータに加えて，位相共役反射率も提案手法にとって非常に重要なパラメータとなる．本章で行った解析では，位相共役反射率は一定としている．しかしながら，DPCM に入射する要求光が減少した場合でも，DPCM へ入射する信号光パワーを調節することによって，要求光より大きなパワーを持った信号光を回折することが可能である．これに関しては，第 5 章における DPCM の動作特性の数値解析でも明らかにしている．したがって，長距離の衛星間通信もしくは，送信機アンテナが小さい場合であったとしても，効果的な背景光低減を行える binary PP を用いることが可能であり，高い伝送速度の実現が可能となる．




L1–L7, lens; BS, beam splitter; PD, photodetector;
PRC, photorefractive crystal;
IM, intensity modulator; PP, phase plate

(a)




(b)

図 6-1 DPCM を応用した背景光低減手法
(a) DPCM の形成　(b) 背景光の低減

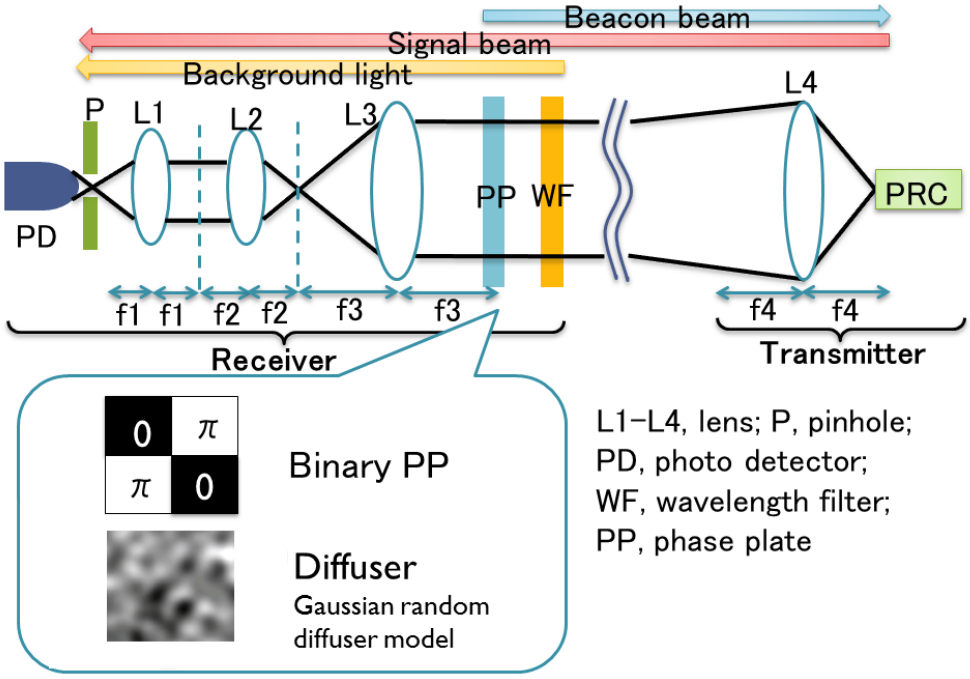
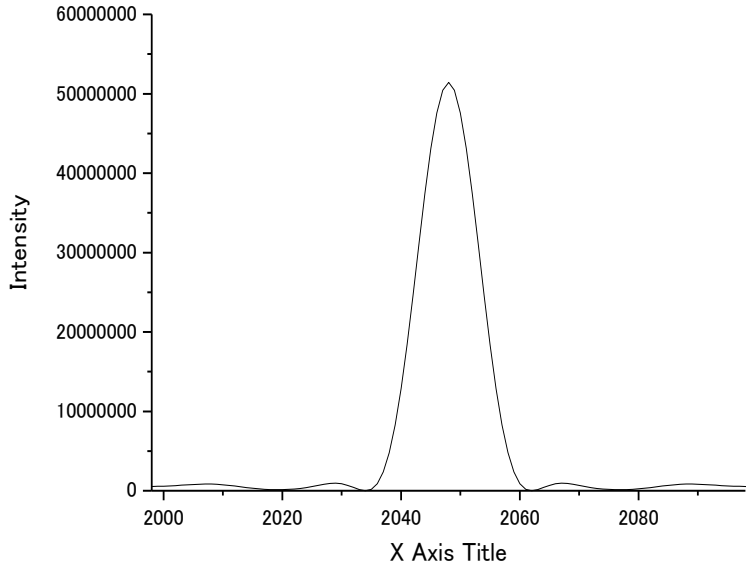


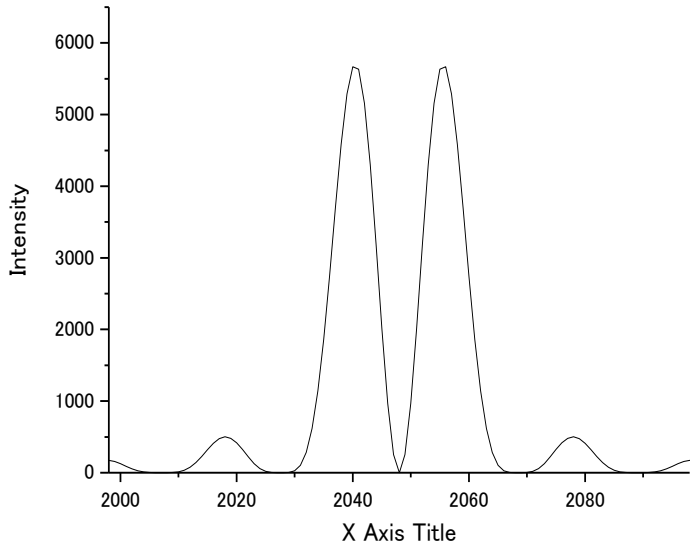

図 6-2 背景光低減手法の解析モデル

表 6-1 背景光低減手法のための解析パラメータ

| | |
|---|---|
| ***Common*** | |
| Analysis area : $N_x \times N_y$ ($m^2$) | $1.024 \times 1.024$ |
| Sample number | $4096 \times 4096$ |
| ***Receiver*** | |
| aperture diameter (m) | 0.1 |
| Focal length of lens 1 (cm) | 0.29 |
| Focal length of lens 2 (cm) | 0.5 |
| Focal length of lens 3 (cm) | 50 |
| Optical loss (dB) | $-3$ |
| ***Transmitter*** | |
| aperture diameter (m) | 0.25 |
| Optical loss (dB) | $-3$ |
| Phase conjugate reflectivity (%) | 1 |
| ***Link propagation*** | |
| Output beacon beam power (mW) | 10 |
| Wavelength (nm) | 830 |
| Link distance (km) | 3 |
| Background light on the receiver antenna (mW) | 16.4 |
| Required bit error rate | $1 \times 10^{-9}$ |
| ***Phase Plate*** | |
| Phase interval of binary PP (m) | 0.25 (Sect. 4.1)<br>0.025–0.25 (Sect. 4.2) |
| Divergence angle of diffuser | $1.0 \times 10^{-5}$–$1.0 \times 10^{-4}$ |




(a)




(b)

図 6-3 ピンホール前における強度分布

(a) 信号光（位相共役波）(b)背景光

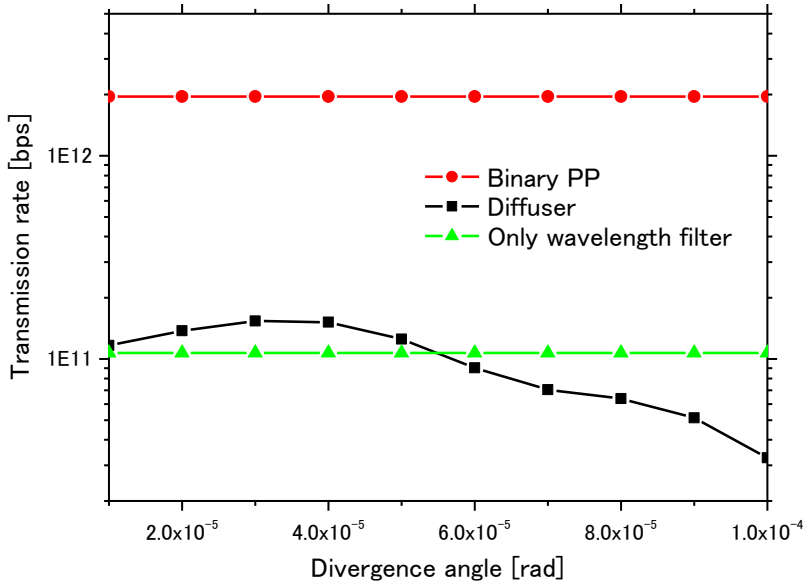



図 6-4 フィルタリングパターンに応じた伝送速度

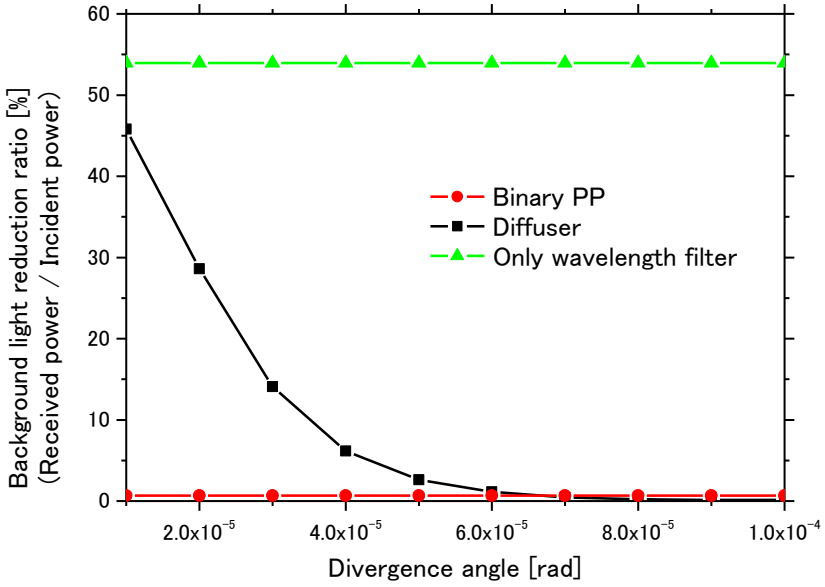

Background light reduction ratio [%]
(Received power / Incident power)
60
50
40
30
20
10
0
Binary PP
Diffuser
Only wavelength filter
2.0x10⁻⁵
4.0x10⁻⁵
6.0x10⁻⁵
8.0x10⁻⁵
1.0x10⁻⁴
Divergence angle [rad]

図 6-5 背景光低減率

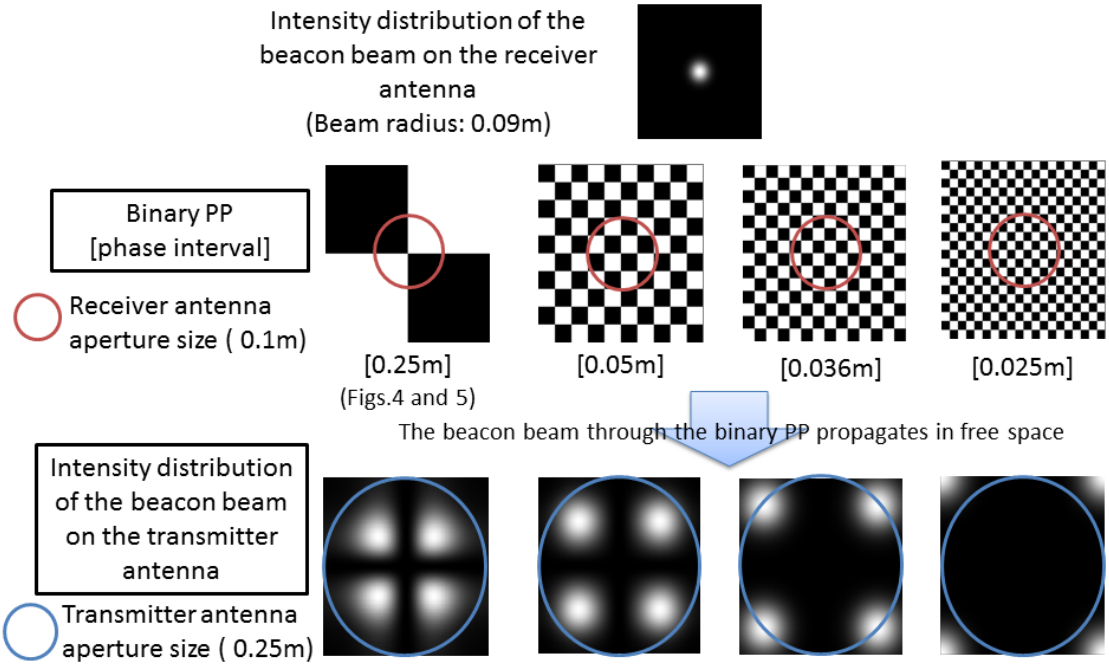



図 6-6　2 値位相分布に依存した要求光の強度分布

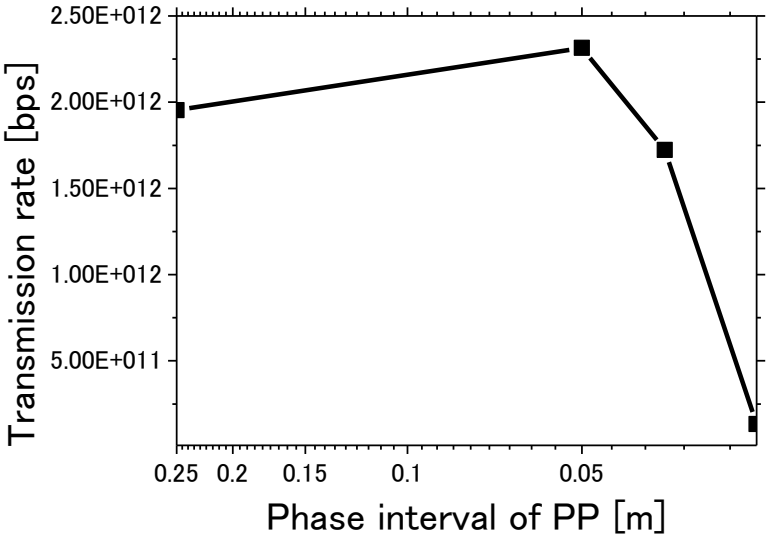



図 6-7 伝送速度の 2 値位相板の位相間隔依存性

# 第 7 章　位相共役技術の地上光無線通信システムへの応用

本章では，提案手法を地上における可視光通信へ応用することを検討する．近年，可視光を搬送波として用いた通信手法の研究・開発が活発に行われている[57]．一方で，地上における光通信には衛星間通信にはない「通信光に対する大気の影響」の問題が懸念される．大気中に含まれる塵やほこりや水分などの影響において大気中を伝搬する光波の吸収や散乱などが生じることによって，通信光の波面が歪み，十分な強度の通信光が受信できずに通信速度などが大幅に低下してしまう．しかも，通信光に影響を与えるこれらの不純物の分布は，風などの影響もあり時々刻々と変化する．そのため，通信性能を向上させるためには，通信光の波面歪みの変化に対して逐次対応する動的な波面補正機能が不可欠となる．

第 5 章において，DPCM の動作解析および実験において，DPCM への入射光の入射角度が変化しても，DPCM 内部の回折格子が動的に書きかえられて位相共役波が回折されることを明らかにした．この DPCM の動的再構成可能な性質は，動的な波面補正を必要とする地上における通信にも適応できると考えている．例えば，第 6 章までで述べた衛星間通信システムでは，一方向通信に用いることを想定してきたが，地上通信においては，建物間の双方向通信における中継器として DPCM を応用することが考えられる．建物間で無線通信を行う場合，通信光の波面は建物間の距離に応じて広がる上，大気の影響を大きく受けてしまう．ここで，図 8-1 に示すように，建物 A と建物 C の間にある建物 B に DPCM を応用した中継器を設置すると仮定する．DPCM を用いて，建物 A と建物 C からの通信光を位相共役関係に変換することで，建物 A からの通信光が建物 C からの通信光の時間反転波となり，建物 C に向かって収束して伝搬させることができる．さらに上述したように，DPCM の動的再構成可能な性質により，通信光の波面変化にも動的に対応することができ，大気による通信光波面の歪みなどの影響を低減できるのではないかと考えられる．加えて，DPCM は電気的な制御が不要であるため，通信設備の小型化・低コスト化も期待できる．地上の通信では，太陽光に加え，ビルや地面からの反射光なども背景光雑音となりうる．第 6 章で述べたように，DPCM を用いて通信光を位相共役関係に変換することで，背景光の空間フィルタリングも可能となる．

以上のことから，DPCM の地上無線通信への応用が期待できるほか，DPCM の動的再構成な性質を利用して地上―移動体間（衛星・航空機等）通信への適用も可能であると考えられる．これらを実現することで，将来的に，地上間・地上―衛星間の大規模かつ柔軟な通信ネットワークの構築に大きく貢献することを望んでやまない．

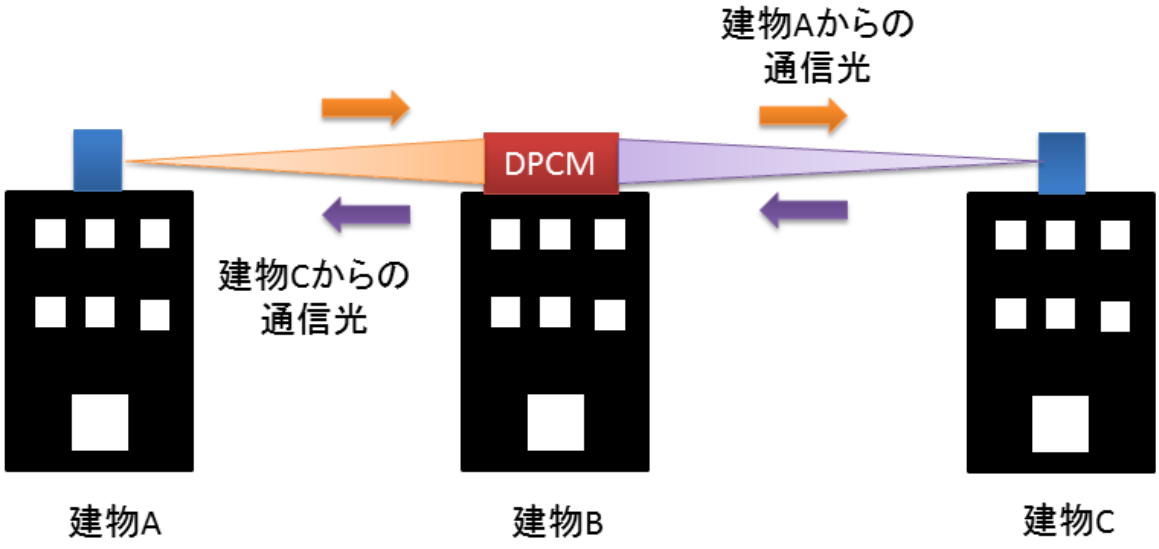



図 8-1 DPCM の地上通信への応用例

# 第 8 章　結論

光衛星間通信システムの高性能化に向けて，二重位相共役技術を用いた通信手法を提案した．本手法は，送信機衛星にフォトリフラクティブ結晶（PRC）を搭載し，受信機衛星からの要求光と送信機衛星内部からの信号光の 2 本のレーザ光を入射させることによって二重位相共役鏡（DPCM）を形成する．そして，DPCM によって通信光を位相共役波に変換して通信を行うことで，光衛星間通信システムの技術面における複数の問題点を同時に解決することができる．本手法の有意性の一つ目は，追尾性能の向上である．DPCM へ入射させた通信光（要求光・信号光）の入射角度や位置変化が生じた場合であっても，DPCM 内部の回折格子が動的に再構成され，信号光を位相共役波として回折することができる，したがって，機械的な制御を必要としない衛星の自動追尾を実現することができる．二つ目は，背景光雑音の低減である． DPCM によって生みだす通信光の位相共役関係を利用した上で，受信機内部に通信光と背景光の波面差異を生成する空間フィルタを搭載することで，従来手法では低減することのできなかった背景光成分を除去することができる．

第 1 章では，当該研究の背景について述べた．

第 2 章では，光衛星間通信の現在までの研究動向について述べた後．衛星間の通信形態として近年注目されているフォーメーションフライングと呼ばれる飛行形態について説明した．さらに，光衛星間通信における通信方式と通信技術における課題について説明した．

第 3 章では，フォトリフラクティブ結晶を用いた位相共役波の生成手法（二重位相共役鏡）について述べたほか，フォトリフラクティブ結晶の一つである $Sn_2P_2S_6$ 結晶の特徴について述べた．

第 4 章では，二重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムを提案した．そして，二重位相共役鏡を用いて，通信光波面を位相共役波に変換することによって，衛星の自動的な追尾が可能となるほか，背景光と通信光の空間フィルタリングを行うことができることを説明した．

第 5 章では，提案手法における衛星の追尾機能の高性能化に向けて二重位相共役鏡の時間的・空間的動作特性を，$Sn_2P_2S_6$ 結晶を用いた実験および数値解析によって明らかにした．数値解析において，衛星の初期捕捉時を想定し，PRC 内で回折格子が形成されていない状態からビームを入射すると，およそ数 100ms で定常状態に至ることが明らかとなった．また，衛星間リンク形成後に衛星の相対位置が変化する場合を想定し，回折格子形成後に PRC へのビームの入射角度を変化した．この場合，角度が変化してすぐに回折格子が書き換えられ，およそ数百 ms で定常値になることがわかった．また，PRC を実際に用いた数値解析と同様の実験においても，回折格子が動的に再構成され 1s 以内に定常値に至ることが明らかとなった．また，衛星間の通信光伝搬を想定した数値解析を行い，本手法では，従来手法と比較して $10^3$ から $10^4$ 倍程度も追尾性能が向上することを明らかにした．

第 6 章では，提案手法を基に 2 値位相板の組み合わせた場合における背景光低減効果について明らかにした．数値解析によって，送受信機衛星間の通信光の伝搬および背景光の受信シミュレーションを行い，本手法を用いた場合およそ 99%背景光をカットできることを明らかにした．また，ガウシアン型ディフューザ・波長フィルタのみを用いた場合との許容伝送速度の比較を行い最大で 11 倍許容伝送速度が向上することを明らかにした．

第 7 章では，今後の展望として，位相共役技術の地上における光無線通信システムへの応用について述べた．

以上の結果により，DPCM を用いて位相共役波を生成する技術を衛星間通信に応用することによって，機械的制御を必要とせずに簡易かつ小型な光学系で，衛星の追尾性能の向上および背景光低減を同時に実現可能であることが明らかとなった．さらに，本手法は通信光の波面補正に関して動的な対応が可能であることから，衛星間のみならず大気中を伝搬経路とした衛星—地上間通信および地上間通信における中継器としての利用など幅広い応用も期待され，光通信のさらなる発展に大きく貢献できると考えられる．

# 謝辞

本論文の執筆にあたり，非常に多くの方々のご指導・ご協力を頂きましたので，ここにお世話になった方々への御礼を申し上げます.

はじめに，博士論文審査会において副査を担当してくださいました北海道大学大学院情報科学研究科の富田章久教授には，日頃より有益なご意見を賜りましたことを深く感謝致します．また，博士論文審査会において副査を担当してくださいました北海道大学大学院情報科学研究科の髙橋庸夫教授に深く感謝致します．博士論文審査会において主査を担当してくださいました北海道大学大学院情報科学研究科の岡本淳准教授には，日頃からの熱心なご指導や暖かい励まし，研究の進め方に関する有益な助言などを数多く頂きましたことを深く感謝致します.

筆者の所属する光エレクトロニクス研究室を卒業し，現在各方面でご活躍されている諸先輩方に感謝申し上げます．著者が研究を進める上で疑問・質問等に専門的な面から的確かつ丁寧なご指導をいただきました，独立行政法人情報通信研究機構の高山佳久氏に厚く御礼申し上げます. また, 本研究に関して, 著者に大変御熱心にご指導くださいました KDDI 株式会社の藤田智広氏に重ねて厚く御礼申し上げます．KDDI 株式会社の若山雄太氏，日本学術振興会海外特別研究員の渋川敦史氏には，論文の書き方や数値シミュレーションの手法等，様々な研究指導を賜りました．ここに深く感謝申し上げます．九州工業大学情報工学研究院の髙林正典助教には，日々の研究において適切な助言を多くいただきましたことを深く感謝致します．また，北海学園大学工学部電子情報工学科の魚住純教授，佐藤邦宏教授，山梨大学大学院医学工学総合研究部の本間聡准教授，福岡大学工学部電子情報工学科の文仙正俊准教授，岐阜大学教育学部技術教育講座の舟越久敏准教授，北海道医療大学薬学部人間基礎科学講座の二瓶裕之教授には，特に国内外の会議等において，筆者の発表内容に対する多くの有益かつ的確な助言を頂きました．ここに，御礼申し上げます.

研究室の後輩である博士後期課程の中田賢佑氏，野澤仁氏，修士課程の王禹氏，後藤優太氏，平崎裕貴氏，関貴久氏，前田智弘氏，趙岩峰氏，小田友和氏，菅悠太氏，清水祥平氏，杉山建大氏，野水清貴氏，学部 4 年の廉澤悠氏，佐久間大樹氏，真吉寛氏，渡部佳祐氏には，日頃から暖かいご支援を頂き，お陰様で楽しい研究生活を過ごすことができました．ここに，御礼申し上げます.

# 参考文献


[1] 荒木 賢一，有本 好徳，稲垣 惠三，中條 渉，野原 光夫，藤瀬 雅行，“光衛星間通信，” オーム社, 1995.

[2] 豊嶋 守生, “光宇宙通信技術の研究開発動向,” Space Japan Review, no. 44, 2006.

[3] Allen S. Panahi and Alex A. Kazemi, “Inter-satellite communications using laser based optical links,” Proc. of SPIE, vol. 6758, 2007.

[4] 高山 佳久, 豊嶋 守生,“光 (レーザ) 通信技術の宇宙応用,” 電子情報通信学会誌, vol. 91, 2008.

[5] Takashi Jono, Yoshihisa Takayama, Koichi Shiratama, Ichiro Mase, Benoit Demelenne, Zoran Sodnik, Aneurin Bird, Morio Toyoshima, Hiroo Kunimori, Dirk Giggenbach, Nicolas Perlot, Markus Knapek and Katuyoshi Arai, “Overview of the inter-orbit and orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS,” Proc. of SPIE, vol. 6457, 2007.

[6] Yoshihisa Takayama, Takashi Jono, Morio Toyoshima, Hiroo Kunimori, Dirk Giggenbach, Nicolas Perlot, Markus Knapek, Koichi Shiratama, Junya Abe and Katsuyoshi Arai, “Tracking and pointing characteristics of OICETS optical terminal in communication demonstrations with ground stations,” Proc. of SPIE, vol. 6457, 2007.

[7] T. T. Nielsen: Proc. SPIE **2381** (1995) 194.

[8] E. L. Kerr, “An Integral Sunshade for Optical Reception Antennas,” TDA Progress Report, vol. 42, 1998..

[9] Hamid Hemmati, Gerardo G. Ortiz, William T. Roberts, Malcolm W. Wright, and Shinhak Lee, “*Flight Transceiver*,” NASA, JPL, Deep space communications and Navigation series, Monograph 7, chapter. 5, 2006.

[10] P. L. Flaugh, S. E. O'Donnell, and S. A. Asher, Appl. Spectrosc. **38**, 847, (1984).

[11] P. Yeh, “*Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics*, ” John Wiley & Sons, 1993..

[12] Kohei Shimayabu, Atsushi Okamoto, Motoki Kitano and Yoshihisa Takayama, “Link Budget Analysis for Optical Intersatellite Communication System with Double Phase Conjugate Mirror, ” Proceedings of 1st International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2009, 32, Tokyo, Japan, Feb. 2009.

[13] K. Shimayabu. A. Okamoto, Y. Takayama, K. Sato, and Y. Nakayama, IEEE 34$^{th}$ European Conf. Optical Communication, 2008 (ECOC 2008), p. 1.

[14] T. Bech, M. Fretz, M. Jazbinsek, and P. Gunter, Opt. Express **16,** 15415, (2008).

[15] Y. Kojima, A. Okamoto, A. A. Grabar, M. Takabayashi, and K. Shimayabu, Ferroelectrics **378**, 121, (2009).

[16] X. Sun, S. Luo, H. Shi, Q. Meng, and Y. Jiang, Opt. Commun. **282**, 3149, (2009).

[17] M. Kaczmarek, P. Hribek, and R. W. Eason, Opt. Commun. **136**, 277, (1997).

[18] T. Bech, M. Jazbinsek, G. Montemezzani, P. Gunter, A. A. Grabar, and Y. M. Vysochanskii, J. Opt. Soc. Am. B 24, 1535, (2007)

[19] P. L. Flaugh, S. E. O'Donnell, and S. A. Asher, Appl. Spectrosc. **38**, 847, (1984).

[20] Atsushi Okamoto, Yasunori Kojima, Masanori Takabayashi, A. A. Grabar and Kunihiro Sato, “Dynamically reconfigurable optical device with nanoscale dynamic self-organization in $Sn_2P_2S_6$ crystal,” *Proc. of the 7th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO-7),* p. 127, Jeju Island, Korea , 2009.

[21] H. Hemmati, M. Wright, B. Sanii, N. Page, G. G. Ortiz, A. Biswas, and K. Wilson, Proc. SPIE **4635,** 295, (2002).

[22] N. Kadowaki, T. Takahashi, M. Akioka, Y. Fujino, and M. Toyoshima, IEICE Trans. Commun. **E95-B**, 3378, (2012).

[23] M. Umehira, K.Kobayashi, Y. Yasui, M. Tanaka, R. Suzuki, H. Shinonaga, and N. Kawai, IEICE Trans. Commun. **E92-B**, 3290, (2009).

[24] R. Suzuki, IEICE Trans. Commun. **E87-B**, 2132, (2004).

[25] M. Toyoshima, Space Japan Rev. **70**, 1, (2010).

[26] T. Tolker-Nielsen and G. Oppenhauser, Proc. SPIE **4635**, 1, (2002).

[27] Jesse Leitner, "*FORMATION FLYING-THE FUTURE OF REMOTE SENSING FROM SPACE*," ESA-SP, vol.548, 2004.

[28] M. E. Campbell and T. Schetter, IEEE Aerospace Conf. Proc., 2000, Vol. 7, p. 117.

[29] K. Sarda, S. Eagleson, E. Caillibot, C. Grant, D. Kekez, F. Pranajaya, and R. E. Zee, Acta Astronaut. **59**, 236, (2006).

[30] G. Krieger, A. Moreira, H. Fiedler, I. Hajnsek, M. Werner, M. Younis, and M.Zink, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. **45,** 3317, (2007).

[31] F. Serène and N. Corcoral, Proc. Space Ops 2006 conf., AIAA-2006-5919.

[32] http://www.mitsubishielectric.co.jp/giho/0508/0508113.pdf.

[33] C. D. Carpentier, and R. Nitsche, "VAPOUR GROWTH AND CRYSTAL DATA OF THE THIO(SELENO)-HYPODIPHOSPHATES," *Materials Research Bulletin* **9**, 401-410, 1974.

[34] C. D. Carpentier, and R. Nitsche, "Ferroelectricity in $Sn_2P_2S_6$," *Materials Research Bulletin* 9, 1097-1100, 1974.

[35] G. Dittmar, and H. Schäfer, "Die Struktur des Di-Zinn-Hexathiohypo-diphosphats $Sn_2P_2S_6$," *Zeitschrift fuer Naturforschung* 29B, 312-317, 1974.

[36] M. I. Gurzan, A. P. Buturlakin, V. S. Gerasimenko, N. F. Korda, and V. Yu. Slivka, "Optical properties of $Sn_2P_2S_6$ crystals," *Soviet Physics Solid State* 19, 1794–1795, 1977.

[37] A. A. Grabar, Y. M. Vysochanskii, S. I. Perechinskii, L. A. Salo, M. I. Gurzan, and V. Y. Slivka, "Thermooptic investigations of ferroelectric $Sn_2P_2S_6$," *Soviet Physics Solid State* 26, 2087-2089, 1984.

[38] A. Grabar, R. I. Muzhikash, A. D. Kostyuk, and Yu.M. Vysochanskiy, “Investigation of the switching process in the domain structure of ferroelectric $Sn_2P_2S_6$ by the dynamic holographic method,” *Soviet Physics Solid State* 33, 1314-1316, 1991.

[39] Serguey G. Odoulov, Alexander N. Shumelyuk, Ute Hellwig, Romano A. Rupp, and Alexander A. Grabar, “Photorefractive beam coupling in tin hypothiodiphosphate in the near infrared,” *Optics Letters* 21, 752-754, 1996.

[40] Serguey G. Odoulov, Alexander N. Shumelyuk, Ute Hellwig, Romano A. Rupp, Alexander A. Grabar, and Ivan M. Stoyka, “Photorefraction in tin hypothiodiphosphate in the near infrared,” *Journal of the Optical Society of America B* 13, 2352-2360, 1996.

[41] A. A. Grabar, I. V. Kedyk, M. I. Gurzan, I. M. Stoika, A. Molnar, and Y. M. Vysochanskii, “Enhanced photorefractive properties of modified $Sn_2P_2S_6$,” *Optics Communications* 188, 187-194, 2001.

[42] A. A. Grabar, I. V. Kedyk, I. M. Stoika, Yu. M. Vysochanskii, M. Jazbinšek, G. Montemezzani, and P. Günter, “Enhanced photorefractive properties of Te-doped $Sn_2P_2S_6$,” *OSA Trends in Optics and Photonics* 87, 10-14, 2003.

[43] A. Okamoto, Y. Kojima, M. Takabayashi, A. A. Grabar and K. Sato: Proc. 7th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO-7), 2009, p. 127.

[44] Y. Furukawa, K. Kitamura, Y. Ji, G. Montemezzani, M. Zgonik, C. Medrano, P. Günter: Opt. Lett. **22** (1997) 501.

[45] 河野健治，鬼頭勤, “光導波路解析の基礎,” 現代工学社, 1999.

[46] M. Katzman: *Laser Satellite Communications* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987)

[47] http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/

[48] T. G. Bifano, J. Perreault, R. K. Mali, and M. N. Horenstein: IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron **5** (1999) 83

[49] A. Shumelyuk, D. Barilov, M. Imlau, A. Grabar, I. Stoyka, and Yu. Vysochanskii: Opt. Mater. **30** (2008) 1555.

[50] I. V. Kedyk, P. Mathey, G. Gadret, O. Bidault, A. A. Grabar, I. M. Stoika, and Y. M. Vysochanskii: J. Op. Soc. Am. B **25** (2008) 180.

[51] Lyle G. Shirley and Nicholas George, “Wide-angle diffuser transmission functions and far-zone speckle,” J. Opt. Soc. Am. A., vol. 4, 1987.

[52] Keith D. Bonin and M. A. Kadar-Kallen, “Simple diffuser for production of laser speckle, ” Appl. Opt., vol. 28, 1989.

[53] P. Beckmann and A. Spizzichino, “*The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*,” Pergamon Press, 1963.

[54] T. Fujita, A. Okamoto, A. Tomita, Y. Wakayama, Y. Takayama, and K. Sato, MOC’10 Tech. Dig, 2010, p. 176.

[55] B. E. A Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* (Wiley, New York, 1991).

[56] W. S. Rabinovich, G. C. Gilbreath, Peter G. Goetz, R. Mahon, D. S. Kazter, K. Ikossi-Anasatasious, S. Binari, T. J. Meehan, M. Ferraro, I. Sokolsky, J. A. Vasquez, and M. J. Vilcheck, Proc. SPIE **4489**, 190, (2002).

[57] K.-D. Langer, J. Gubor, "Recent developments in optical wirelesscommunications using infrared and visible light," Proc. ICTON, Vol. 3, pp.146-151, (2007).

# 著者の研究業績一覧

## 1. 論文（学位論文関係）

査読付学会誌等

(1) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Masanori Takabayashi, Akihisa Tomita, and Yoshihisa Takayama, ”Dynamically Reconfigurable Characteristics of a Double Phase Conjugate Mirror using $Sn_2P_2S_6$ Crystals and Their Application to Optical Inter-satellite Communication,” Optical Review, Vol.21, No.3, pp 415-424, (2014).

(2) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Akihisa Tomita, Yoshihisa Takayama, and Masatoshi Bunsen, ”Background light reduction method with a double phase conjugate mirror and a phase plate for optical inter-satellite communications,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.53, No.8S2, pp.08MB13.1 - 08MB13.6, (2014).

査読付国際会議プロシーディング

(1) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Tomohiro Fujita, Alexander A. Grabar, Masanori Takabayashi, Jun Uozumi, Akihisa Tomita, and Yoshihisa Takayama,” Optical Inter-Satellite Communication with Dynamically Reconfigurable Optical Device Using $Sn_2P_2S_6$ Crystal,” Proc. SPIE, Vol.7923, pp.79230N.1-79230N.9, (2011).

(2) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Masanori Takabayashi, Akihisa Tomita, and Yoshihisa Takayama, ”Background light filtering technique using a binary phase plate for optical inter-satellite communications with a double phase conjugate mirror,” The Tenth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering Technical Digest, p.95 - 96, (2013).

(3) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Akihisa Tomita, Yoshihisa Takayama, and Masatoshi Bunsen, ”EFFECTIVENESS OF DOUBLE PHASE CONJUGATE MIRROR FOR OPTICAL INTER-SATELLITE COMMUNICATION WITH LARGE SHIFT TOLERANCE,” Technical digest of the eighteenth microoptics conference, p.71, (2013).

2. 講演（学位論文関係）

(1) 西牧 可織，岡本 淳，藤田 智広，若山 雄太，富田 章久，高山　佳久，“光衛星間通信システムにおける二重位相共役鏡を用いた反射利得による伝送速度の向上,” 平成 22 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演予稿集 CD-ROM，108，(2010).

(2) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Yuta Wakayama, Akihisa Tomita, and Yoshihisa Takayama, “Acquisition and tracking in inter-satellite communication with dynamically reconfigurable optical device,” IEICE Tech. Rep., vol. 111, no. 336, SAT2011-62, pp. 137-140, (2011).

(3) 西牧 可織，岡本 淳，若山 雄太，富田 章久，高山 佳久，“2 重位相共役鏡を用いた光衛星間通信システムにおける 2 値位相板による背景光低減手法,” 平成 24 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演予稿集 CD-ROM，24，(2012).

(4) Kaori Nishimaki, Atsushi Okamoto, Atsushi Shibukawa, Akihisa Tomita, and Yoshihisa Takayama, “Dynamic wavefront compensation of signal beam in optical satellite communication system using phase conjugation technique,” IEICE Tech. Rep., vol. 114, no. 122, CAS2014-18, pp. 87-92, (2014).