

衛星通信用空間光通信機器の光学設計

作田博伸, 村上宏輔, 島 直究

Optical Design of Free Space Optical Communication Devices for Satellite Communications

Hironobu SAKUTA, Kousuke MURAKAMI and Naoki SHIMA

カスタムプロダクツ事業部では、宇宙を利用した空間光通信の光学系開発に携わっている。

フライト品は、開発後打上げて運用に至るまで長い期間を要する。2025年1月に、先進レーダ衛星「だいち4号」(ALOS-4)の大容量画像が静止軌道の光データ中継衛星を経由してダウンリンクに成功している。これら2つの衛星には、弊社で設計製作した光アンテナ（望遠鏡）が搭載されている。

一方、量子暗号通信の地上局について光通信機器の開発にも協力させていただいている。光通信では送信局・受信局で追尾が必要になるが、今回、衛星-地上局間通信における地上局の精追尾光学系を設計製造した。

本報告は、空間光通信の概要と開発した光学系の設計について解説する。

The Customized Products Business Unit is involved in the development of optical systems for space-based optical communications.

Flight products require a long time to be launched and operated after their development. In January 2025, large-volume images from the advanced radar satellite "Daichi-4" (ALOS-4) were successfully downlinked via an optical-data relay satellite in geostationary orbit. These two satellites are equipped with optical antennas (telescopes) designed and manufactured by our company.

Additionally, we are developing optical-communication equipment for the ground stations of quantum cryptography communications through a collaborative effort. Optical communications require tracking at the transmitting and receiving stations. Thus, we have designed and manufactured an optical system for precise acquisition and tracking at the ground station for satellite-to-ground station communications.

This report provides an overview of free-space optical communications and the design of the optical system developed.

Key words 空間光通信, 光アンテナ, 3枚鏡, 精追尾, ファイバー結合
free-space optical communication, optical antenna, three mirrors, fine tracking, fiber coupling

1 はじめに

近年、光を用いた宇宙通信の実用に向け、様々なプロジェクトが計画・実行されている。宇宙通信では、①大容量のデータをリアルタイムで通信すること、②情報伝達をセキュアに行うことが大きな課題といわれている。

課題①に対しての一例は、光衛星間通信システム LUCAS で、すでに運用が始まっている。地球低軌道 (LEO) から大容量データを直接地上へダウンリンク (DL) する場合、地上局から衛星が見える時間が短いため交信時間が短くなる。一度 LEO から静止軌道 (GEO) の中継衛星を経由してデータを送ると通信時間を長くでき、中継衛星から地上局は常時交信できるため、通信のリアルタイム性向上が可能になる。LEO-GEO 間は $1.5\ \mu\text{m}$ 帯のレーザー光を用いた通信が行われ、GEO-地上間は電波で通信されている。

LEO 衛星コンステレーションについても国家プロジェク

トで光通信研究が進められている。地球観測コンステレーションのデータを LEO-LEO 間の光通信コンステレーション間で常時繋ぎ、地上局へ迅速に DL するネットワークの構築が進められている。地上局への DL は、光の透過の問題で悪天候での交信がかなわない問題があり、複数の地上局 (サイトダイバシティ) の中から好天のサイトを選択して通信する方法や、天候のよい場所へ移動する可搬型地上局 (以下、可搬局) を利用して DL するなどの研究が行われている。

課題②に対しては、衛星を利用して量子暗号を用いた鍵配送を行う研究が、総務省主導で情報通信研究機構 (NICT) を中心に進められている。この研究では通信路の確保に可搬局を利用している。

このように宇宙光通信の実用に向けて、さまざまな取り組みがなされており、このようなシステムの実現のため光通信機器に対する需要も増加傾向にある状況であろう。

カスタムプロダクツ事業部では、お客様からいただく特注の仕様に基づいた設計、製造を行ってきた。宇宙、天文関係の製品に長年携わっており、人工衛星に搭載する光学系や天体観測用の光学機器を開発してきた。こういった経験をもとに、最近では光通信に関わる光学製品を官公庁や企業様向けに提供させていただいている。

本稿では、弊社の取り組んできた光通信機器の光学設計と実際について述べる。

2 光通信機器の構成と光学系仕様

光通信は、電波通信と同じように送信局から光信号を相手側光通信局（以下、相手局）へ向けて空間的に伝搬させ、相手局である受信局で光信号を受け取る。Fig. 1 に送信局～受信局間の回線を概念図で示した。用いられる光源はレーザーで、通信が成り立つためには、発信したレーザーが受信局の検出部で検知できなければならない。そのため、送信から受信までの回線が成り立つように送信レーザー光が受信に至るまでのパワーの利得・損失を計算し、検出部の受信感度に対して余裕があるように各パラメーターを設計する回線設計が行われる。送信されるレーザーは、送信機内のアンテナで拡大して受信局に指向する。ビームはアンテナ開口が大きいほど拡がり小さくゲイン（利得）が得られる。伝搬距離が長いほど回折損失が大きくなり、指向方向の誤差によっても強度プロファイルにより損失を生じる。受信アンテナも開口が大きいほど取り込める光が多いため利得が上がる。使用するセンサー、レーザーパワー、アンテナ利得など各要素のパラメーターは実現性を考慮してシステムとして最適に設計が行われる [1]。

Fig. 2 に光通信機器の光学部構成要素概念図の例を示す。受信系は、送受信光の開口面である光アンテナを支持し、目標とする相手局を指向する粗捕捉追尾機構及び粗捕捉追尾センサー CPS による粗捕捉追尾制御と、精捕捉追尾センサー FPS 及び精捕捉追尾ミラー FPM による精捕捉追尾制御により、FPS の視野中心と軸の一致する受信器 RX へ受

信レーザー光を伝送する。粗捕捉追尾と精捕捉追尾におけるセンサーで観測される視野の関係を Fig. 3 に示す。

一方、送信系は、送信器 TX より発するレーザー光が自局から相手局に到達するまでに相手局が相対的に動くため、それを補正する光行差補正ミラー PAM を介して送信する (Fig. 4)。図は衛星-衛星間の例を示したが、衛星-地上間でも同様である。

光通信機器の光学系は通信光を減衰させず、相手局に効率的にレーザー光を伝送する必要がある。Fig. 1 に示したアンテナの利得は、次式のように波長 λ と開口の面積 A と

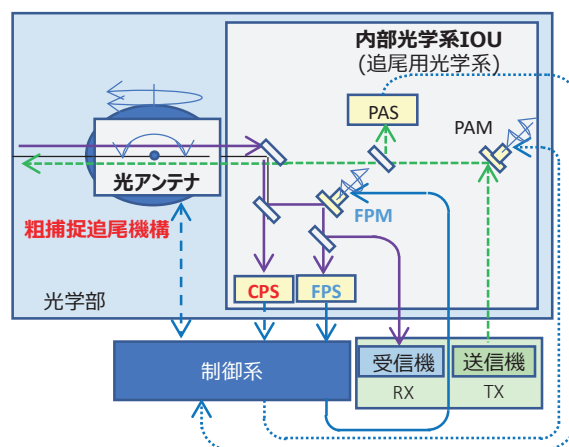


Fig. 2 光通信機器の光学部構成要素概念図

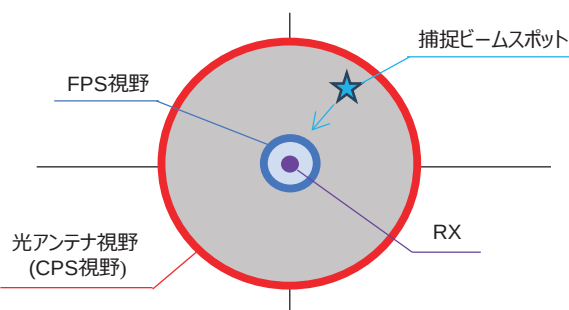


Fig. 3 センサー視野とビームスポットの制御概念図

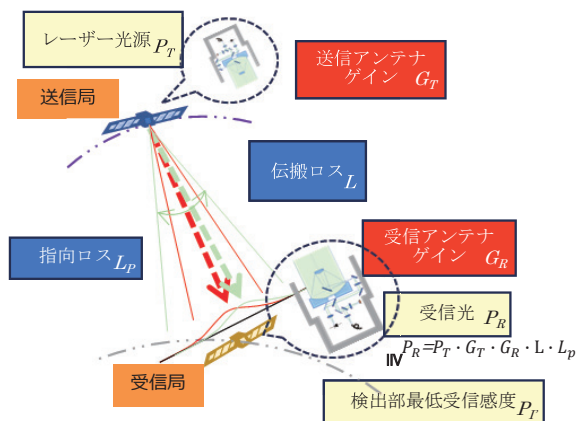
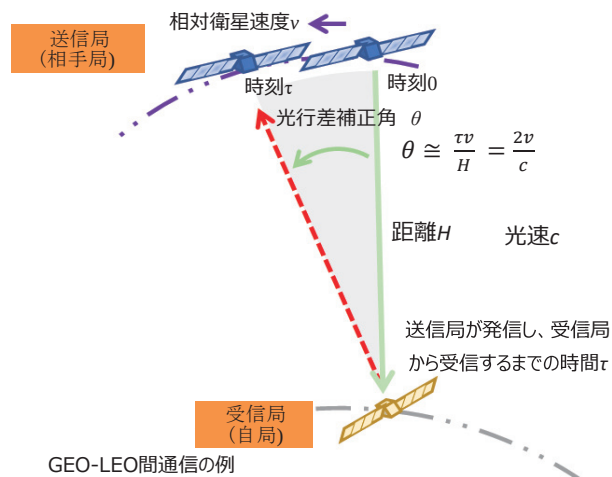


Fig. 1 送信局～受信局間の回線を示す概念図



GEO-LEO間通信の例

Fig. 4 光行差補正

効率 η で決まる。

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A \cdot \eta$$

効率 η に関わる内容が利得を減衰させ、遮蔽率、透過率、偏光損失、波面収差など光学系の仕様となる。また、送信光／受信光のノイズ特性（迷光）も η に関わる重要な項目となっている。

光アンテナと内部光学系 IOU は担当が異なることもあり、各々の仕様は再配分され、それに基づいて各光学系の設計が行われる。

3 光衛星間通信システム LUCAS の光アンテナ

ここでは、LUCAS の光衛星間通信機器を構成する光アンテナ光学系について述べる。

光データ中継衛星と地球観測衛星に搭載の光衛星間通信機器の光アンテナは、共通のアーキテクチャーで、開口径をそれぞれのシステム配分に従ってサイジングしている。光衛星間通信システム開発を担当した NEC に対し、ニコンでは光アンテナの光学設計・光学部品製造・光学系組立を担当させていただいた。本項では、ニコンの担当内容について紹介する。

3.1. 光学系の設計

光アンテナ光学系の主な諸元を Table 1 に示す。これらの項目は、システム配分値を受け、ニコンでの光学系検討に基づいて確定させた。光アンテナは、20x の角倍率を有するアフォーカル望遠鏡系である。受信時は光アンテナの開口に光が入射し、光束を縮小して後段の IOU に光を導く。

送信時は、IOU からの送信光の光束を光アンテナで拡大して射出する。受信光と送信光は波長が異なり、光アンテナの共通光路をとる。Fig. 5 に、GEO 用光アンテナの光路図を示す。図示のように、3 枚の軸外し鏡と後段の IOU へ導く平面の折返し鏡で構成され、小型に設計されている。3 枚鏡は凹凸凹の構成で、各々の形状は放物面・双曲面・楕円面である。この構成によって像面湾曲を抑え、波面精度を小さくし広角化に対応している。光学系は、中心

遮蔽がなく鏡面には高反射膜を使用することにより透過率も高く損失が極めて少ないこと、IOU から発する送信光束の戻り光が問題にならないことが利点である。一方、歪曲収差を補正できる構成ではなく、視野内で歪曲に伴う倍率分布を持つ欠点もある。そのため、到来光を視野中心に合わせるには、追尾機構の角度調整を非線形制御してポインティングする必要がある。

受信時は、送信光が 2 項に示した損失要因により Fig. 6 のように微弱に減衰した P_R のパワーで IOU に入射する。一方、送信時はパワーの強いレーザーパワー P_T を送信し、本光学系の場合は散乱光パワー P_N が IOU 内の受信系光路に混入する。このノイズ光は、各ミラー部品の設計・加工で対応することができた。また、視野外から太陽光など強い迷光源も存在する。光学設計上存在する隙間をメカ構造、視野絞りや迷光カバーを設置して、IOU に混入することを防いでいる。Fig. 7 に製作した鏡を示す。衛星搭載用ハー

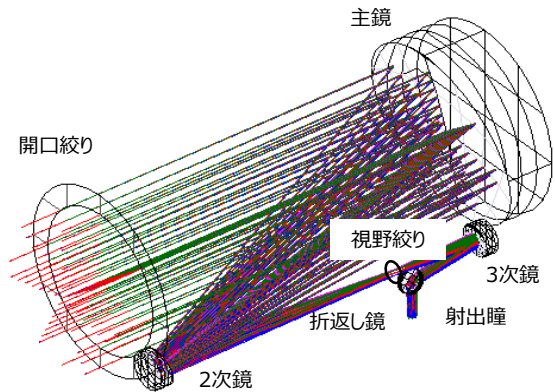


Fig. 5 光アンテナ部光路図

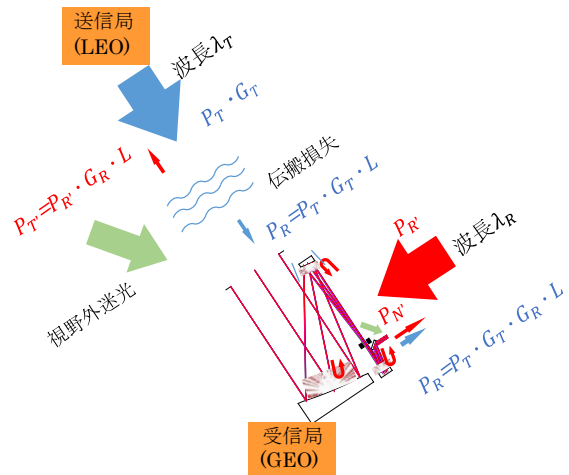


Fig. 6 受信光と散乱光ノイズ

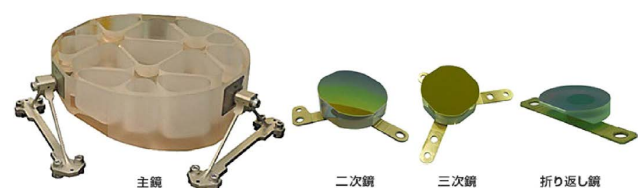


Fig. 7 製作した光アンテナの反射鏡

Table 1 光アンテナ部主要諸元

	GEO	LEO
開口径	φ150	φ100
角倍率	20x	20x
波面精度	$\lambda/30$	$\lambda/30$
視野角	± 0.1 deg	± 0.2 deg
偏波保存性	2 %	2 %
透過損失	0.3 dB	0.3 dB
バックリフレクション	65 dB	65 dB

ドウェアの構成要素は重量低減が求められ、光アンテナの主鏡はほかの部品に比べて口径が大きいので、裏面をくり抜いて軽量化を行っている。

鏡面は、研削・研磨により非球面に加工した。軌道上での光アンテナの波面精度は、波長 $\lambda=1530\text{ nm}$ で $\lambda/30$ と規定される。鏡面の精度も厳しくなるため、干渉計を用いたCGH等によるスル計測に基づいた研磨加工により所望の精度を達成した。

3.2. コート

光学系の透過損失や偏波依存性は、光学部品の反射膜の性能に依存する。透過損失の観点で各部品は高い反射率と偏波依存の少ない膜が必要であった。これらを両立する設計を行うために、入射角の小さい非球面鏡を金属+誘電体膜、入射角の大きい折り返し鏡は誘電体膜とした。製造実現性の高い設計とした。テストピースによる反射率の測定結果をFig. 8に示す。

Fig. 5 光路図のように、視野絞り～3次鏡の光束と折り返し鏡のクリアランスが狭く、折り返し鏡の形状は、Fig. 7に示すように円板の側面を平面取りし、裏面をテーパ状に落とした形状としている。折り返し鏡の製作時は、反射膜は多層膜で膜応力による面変化が大きく、平面鏡でありながら面精度を達成する難しさがあった。そのため、膜応力による変形を見越してミラーの形状補正を行い、透過波面精度を改善している。

LUCASでは比較的パワーの強いレーザーが利用されるため、反射膜にレーザー耐性が備わっていることが必要である。レーザーの最大入射レベルの条件は5Wで、光束の小さいLEO用光アンテナの最大パワー密度 0.3 W/mm^2 での耐性が求められた。部品の製作前に、テストピースを用いて照射試験を実施した。照射前後の外観と反射率を測定し、いずれの評価項目とも有意な変化はなく問題ないことを確認して、製品に搭載している。

3.3. 組立

主鏡は側面3か所にスーパーインバーのパッドを配しフレクシャで保持する構造である。2次鏡・3次鏡・折り返し鏡は、裏面中心部をホルダーに接着接合してミラーに歪みができるだけ入らないように保持し、これらのユニットをNECから支給された支持構造に取り付け光アンテナ全

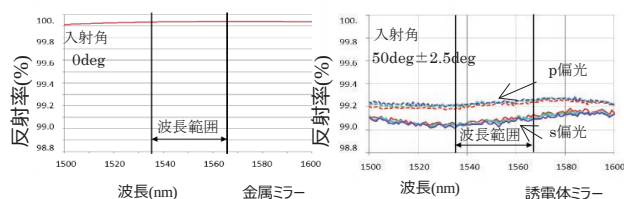


Fig. 8 ミラー反射率

体を組み上げた。光アンテナの波面精度測定を行うため、射出瞳の方向に干渉計を配置し、光アンテナの開口絞り側に平面反射鏡を置いて波面精度の測定系を構成し、主に主鏡と2次鏡間の偏心や間隔誤差を数 μm レベルで調整して必要な波面精度を達成した。

組立後は、振動試験などを行ってフライトや運用での性能を維持できるかを確認し、GEO用・LEO用それぞれの光アンテナをNECへ納めさせていただいた。

4 衛星量子暗号通信用地上局の光学設計

宇宙を利用したセキュリティの確保手段として、衛星量子暗号通信の開発が進められている。Fig. 9に示すように衛星から地上局に向けて信号光として量子鍵を配送するが、信号自体は非常に微弱な光である。捕捉追尾には衛星から信号光よりも強いビーコン光が送信され、ビーコン光を捕捉追尾しながら信号を受信する。この開発に、ニコンも設計・製造で協力した。

光学系の構成は前述のとおり光アンテナとIOUである。光アンテナは中心遮蔽のあるカセグレン望遠鏡、IOUが精追尾光学系で、精追尾光学系は受信機能のみでダウンリンクのみの実験が計画された。したがって、レーザー送信は行わない。

4.1. 可搬局光アンテナとの光学インターフェース

Table 2に可搬局光アンテナの仕様と光学インターフェースを示す。口径355mmのカセグレン望遠鏡で集光し、クーデ式の光路引き回しの後、精追尾光学系に導かれる。

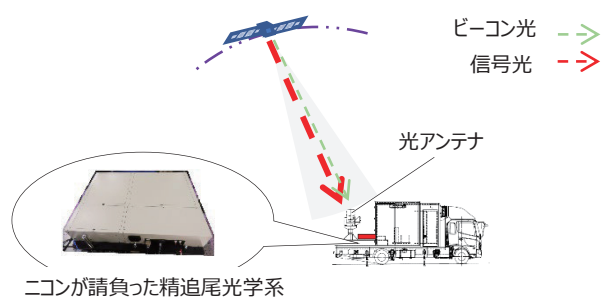


Fig. 9 衛星／可搬型地上局間光通信 概念図

Table 2 可搬局光アンテナと精追尾光学系の光学インターフェース

項目	仕様
望遠鏡形式	カセグレン型、クーデ式
有効口径	$\phi 355\text{ mm}$
倍率	17.75x
視野角	$\phi 1\text{ mrad}$
射出瞳径	$\phi 20\text{ mm}$
望遠鏡射出瞳位置	光学定盤端面～1774 mm

クーデパスの射出瞳位置を光学的インターフェースとし、物理的に精追尾光学系が載せられる光学定盤の端面を機械インターフェースとした。

4.2. 精捕捉追尾光学系の機能構成

精捕捉追尾光学系の機能構成について Fig. 10 を参照しながら説明する。

光アンテナから入射するビームは、ビームスプリッタ B/S で粗追尾用の光路と精追尾用の光路に分岐する。Fig. 3 の CPS 視野を観察する役割が精追尾カメラに相当する。

精追尾の光路には FPM が配置され、FPM は擾乱によりビーコン光が傾いて入射するシーイングを止める役割を担う。

ビーコン光と信号光が $1.5\ \mu\text{m}$ 帯の異なる波長であるため、分岐するためのダイクロイックミラー DCM が FPM の後方に配置される。

ビーコン光は、B/S でマルチモードファイバー MMF と FPS に分岐する。MMF はビーコン光を受信し信号検出の同期に使われる。

信号光とビーコン光は同軸で送信される。FPS はシーイング検出するセンサーで、4分割センサー QD を用いた。QD にビーコン光を分岐し、ビームスポットを QD 上に形成させる。ビームスポットの QD 出力より重心演算を行い、それをもとに FPM にフィードバックし、傾きが制御される。

Fig. 11 に示すように、FPM で外乱除去され FPS の中心にビームスポットを止めると、ビーコン光と同軸の信号光はシングルモードファイバー SMF 端面に安定して集光されるため、高効率にファイバー結合することができる。

設計は、FPM、FPS、SMF、MMF といったデバイスの選定を行わなければならない。デバイスは基本的に市販品から選ばれる。精追尾光学系のシステム仕様からデバイスとして適切なものが選ばれ、光学系の要素の仕様を決定していくことになる。

光学配置上の FPM の設計条件としては、光アンテナの射出瞳を FPM にリレーし結像する。FPM は高速で傾きを制御する必要があるため小型・軽量であることが望ましいためである。また、市販品の FPM はチップチルトの駆動範囲が仕様上決まっているため、その範囲を逸脱できない。一方、リレー系の設計条件として、装置全体を小型にするためリレー系は全長を短縮することが求められ、前述した光路分岐の B/S やフィルタなど光学素子の配置ができなかった。

Fig. 12 に精追尾システムの光学系モデルを示す。構成 1 の最も基本的な構成では、光アンテナ射出瞳から f_1 レンズまでの距離が長くなると f_2 レンズから FPM を置く瞳の像位置は近づいてしまう。この問題を解消するために、構成 2 のように焦点位置に凹レンズのフィールドレンズを配置し

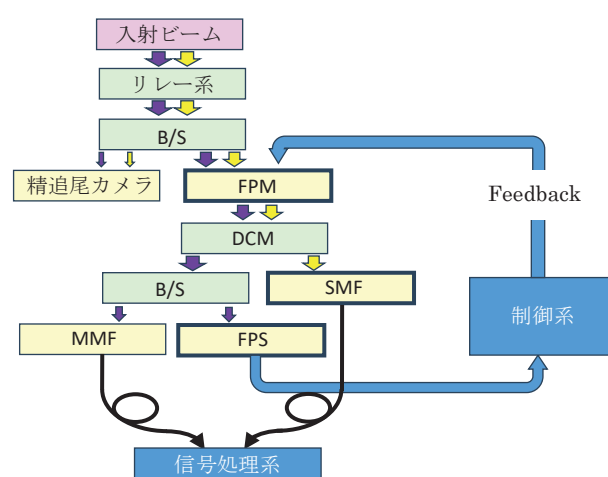


Fig. 10 精捕捉追尾光学系の機能構成

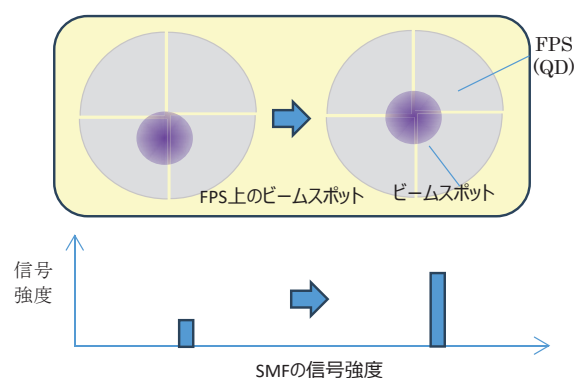


Fig. 11 Feedback 系のビームスポット制御と信号強度の効果概念図

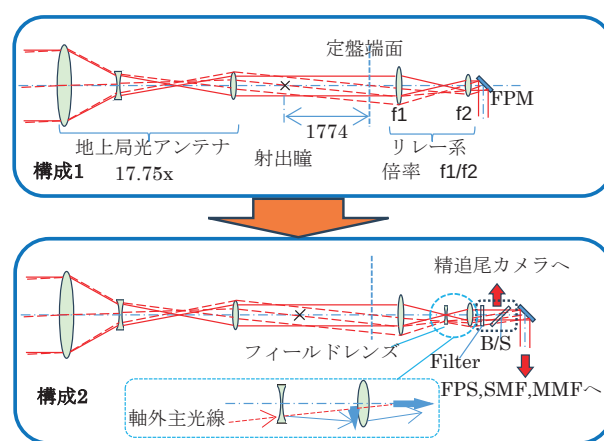


Fig. 12 精追尾システムの光学系モデル

て軸外光線の向きを変え、 f_2 レンズへの入射光線高を高くすると f_2 レンズで屈折する光線が光軸と交わる位置 (瞳) は後方に離れていく。原理的にはこのコンセプトによりリレー系の小型化を目指した。その結果、B/S やフィルタを配置するスペースを確保しつつ FPM を瞳の位置に置く配置が成り立ち、最低限のレンズ構成で低損失と収差低減もできた。レンズ系の保持構造を含めた構成図を Fig. 13 に示す。

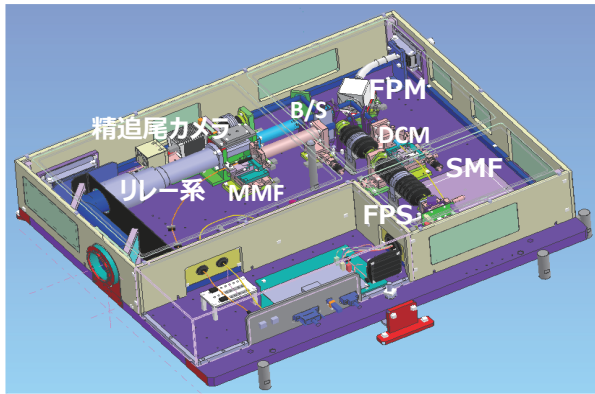


Fig. 13 精追尾光学系構成図

5 まとめ

最近弊社が携わった宇宙光通信に関わる製品として、LUCASの光衛星間通信機器用の光アンテナ、量子暗号通信の精追尾光学系の設計・製作内容などについて紹介した。

LUCASは、GEO-LEO間での光による通信が運用され、弊社の製作した光学系も貢献できた。

量子暗号通信システムの社会実装を目指して、ISS-地上局間で光による鍵伝送の実証が行われた。弊社の製作した可搬型地上局の精追尾光学系も実証に貢献することができた。

LUCASの光衛星間通信機器用光アンテナの開発はJAXA及びNECのご指導の下で進めた。また、可搬型地上局の精追尾光学系の開発はNICT、スカパーJSATと行わせていただいた。関係者のご協力に感謝する。

引用文献

- [1] J. Liang, A. U. Chaudhry, E. Erdogan, and H. Yanikomeroglu, "Link budget analysis for free-space optical satellite networks," arXiv:2204.13177, 2022.

作田博伸 Hironobu SAKUTA
カスタムプロダクツ事業部 開発部
Development Department
Customized Products Business Unit

村上宏輔 Kousuke MURAKAMI
光学本部第一設計部
1st Designing Department
Optical Engineering

島 直究 Naoki SHIMA
光学本部第一設計部
1st Designing Department
Optical Engineering



作田博伸
Hironobu SAKUTA



村上宏輔
Kousuke MURAKAMI



島 直究
Naoki SHIMA