


宇宙光通信における送受信技術の研究 と将来動向

情報技術総合研究所

原口 英介

三菱電機株式会社

1. 衛星間光通信の概要
2. 高感度光送受信技術
3. COTS品(民生品)宇宙適用に向けた開発
4. 捕捉追尾技術
5. 今後に向けた取り組みとまとめ

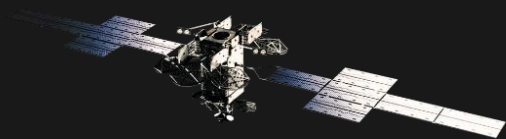


COTS : Commercial Off-The-Shelf

1

衛星間光通信の概要

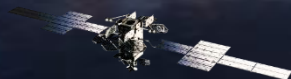
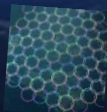
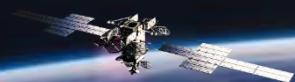
GEO(静止軌道) ≡ 36,000 km 地上から常に同じ位置に見える



大型衛星が主
ひまわり、スーパーバード
ETS-9など

分類	重さ	電力
大型衛星	1,000kg以上	～数10kW
中型衛星	500～1,000 kg	～kW
小型衛星	100 ～ 500 kg	～100W
超小型	～100 kg	～数10W

LEO(低軌道) 200 ～ 2000 km 約90分で地球を一周
国際宇宙ステーション、ALOS-4、Starlinkなど



観測衛星のデータ伝送容量の増大に対応して数Gbpsレベルの通信を衛星軌道上で小型・低消費電力の光衛星間通信機器が求められている。



電波による高速大容量通信(Ka:3.6Gbps※)

- 周波数資源の枯渇
- アンテナ大型化

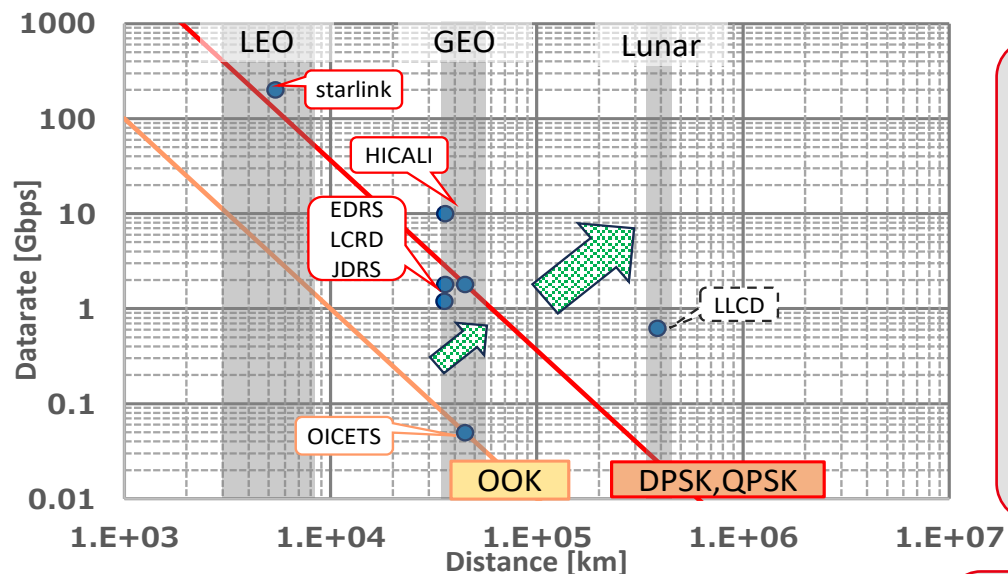
光空間通信のメリット

- 通信の大容量化 (広帯域性)
- 小型・軽量化(高周波数性)
- 秘匿性の高さ (高指向性)
- 周波数調整不要

地上との違い(環境)

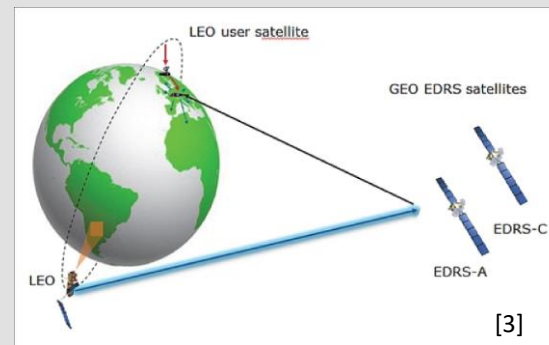
- 耐放射線
- 熱真空下(排熱、アウトガス)
- 修理不可
- 電力制限
- 厳しいEMC条件(電磁環境適合性)
- 重量制限

観測衛星等の大容量データ伝送の要求から、光衛星通信は世界的潮流であり、100Gbps超の衛星間光通信、衛星-地上通信についても、実証されてきている。



EDRS

GEO, Data Relay

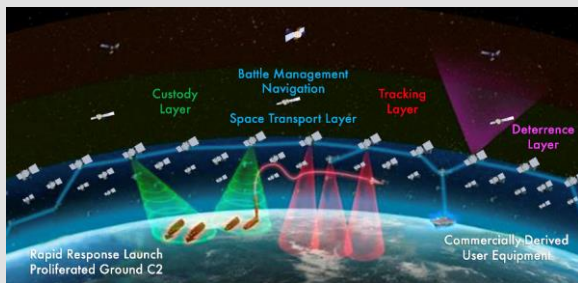


[3]

Starlink [1]



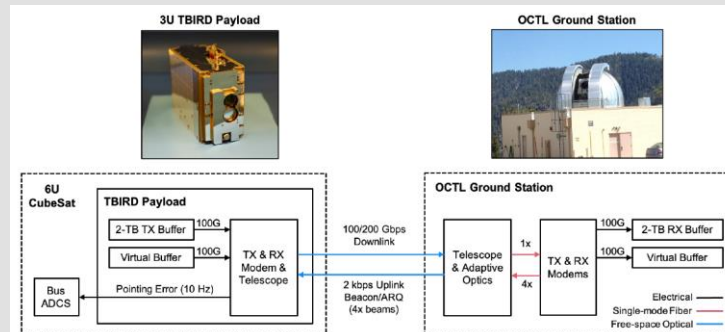
PWSA [2]



LEO

TBIRD [4]

Satellite to Ground



[1]SpaceX Reveals Operation of Over 8,000 'Space Lasers' Across Starlink (tesmanian.com)

[2]Space Development Agency's satellite plan gets new name, but focus on speed stays – Space Development Agency (sda.mil)

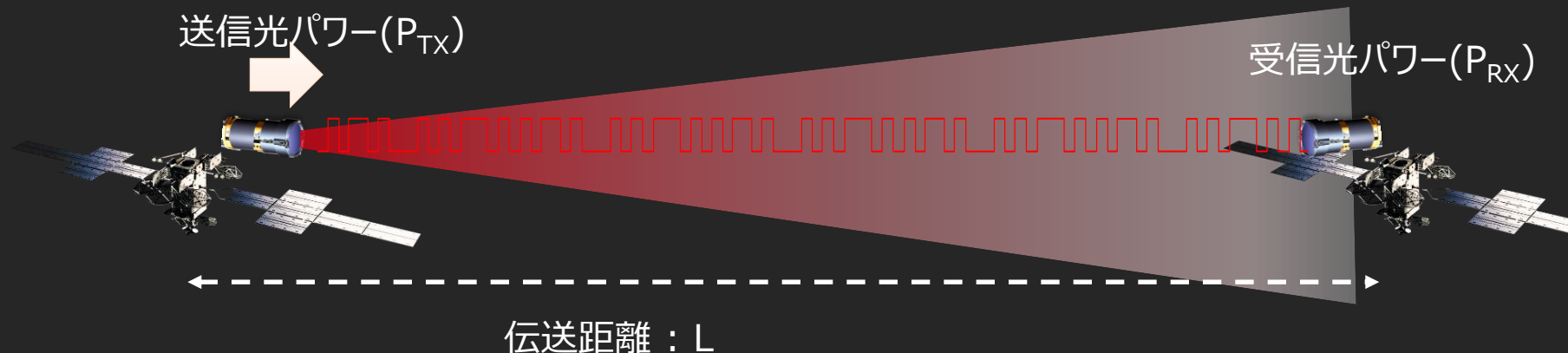
[3]EDRS - eoPortal

[4]On-orbit demonstration of 200-Gbps laser communication downlink from the TBIRD CubeSat (spiedigitallibrary.org)

OOK: On-Off Keying, DPSK: Differential Phase Shift Keying

BPSK: Binary Phase Shift Keying, PWSA : Proliferated Warfighter Space Architecture

基本となる回線検討はRF通信での伝播方程式と同じ



距離L伝播時の

受信光パワー

$$P_{RX} = L_R \underbrace{\left[\frac{4\pi(\pi(D_{RX})^2)}{\lambda^2} \right]}_{\text{受信アンテナ利得}} \underbrace{\left[\frac{\lambda^2}{(4\pi L)^2} \right]}_{\text{空間伝播損失}} \underbrace{\left[\frac{4\pi(\pi(D_{TX})^2)}{\lambda^2} \right]}_{\text{送信アンテナ利得}} \underbrace{\exp \left[- \left(\frac{\pi D_{TX} \theta_p}{\lambda} \right)^2 \right]}_{\text{指向角度誤差による損失}} L_T P_{TX}$$

P_{TX} : 送信光パワー

P_{RX} : 受信光パワー

L : 空間伝播距離

D : 望遠鏡開口径

L_R : 受信光学系損失

L_T : 送信光学系損失

λ : 通信波長

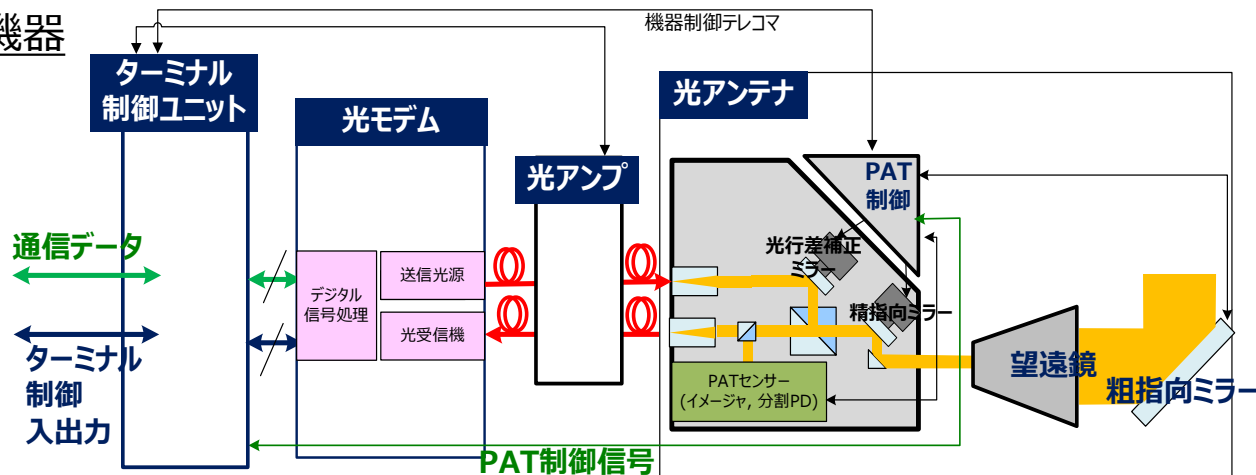
θ_p : 指向誤差

ビットレート(R_b)の
所要受信光パワー

$$P_{RX} = N[\text{photon/bit}] \times R_b \times h\nu$$

衛星間光通信機器はターミナル制御、光モデム、光アンプ、光アンテナの4つのユニットから構成される。

【衛星間光通信機器 の全体構成】



PAT: Pointing Acquisition and Tracking
(指向・捕捉・追尾)

L/N	機器名称	機能	取り組み
1	ターミナル制御ユニット	<ul style="list-style-type: none"> 光機器の動作モードの制御、テレメトリ・コマンド処理を行う。 自衛星・相手衛星軌道情報および姿勢情報に基づき、指向方向の演算を行い、アンテナに指示する。 	
2	光モデム	<ul style="list-style-type: none"> 送信光に通信信号を重畳する。 受信光をコヒーレント検波し、電気信号に変換する。 通信信号の変復調を行う 	<ul style="list-style-type: none"> ドップラ周波数シフト補償 デジタルコヒーレント光通信の宇宙適用 高感度化
3	光アンプ	<ul style="list-style-type: none"> 送信光の増幅を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 高出力化、耐放射線性向上
4	光アンテナユニット	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙空間に対して、光の送信および受信を行う。 通信相手からの光よりの到来角を検出するセンサ、その情報を用いた捕捉追尾 通信相手の位置情報に基づいた初期捕捉 	<ul style="list-style-type: none"> 捕捉追尾センサ高感度化 初期捕捉時間短縮 信頼性

■ 捕捉追尾技術

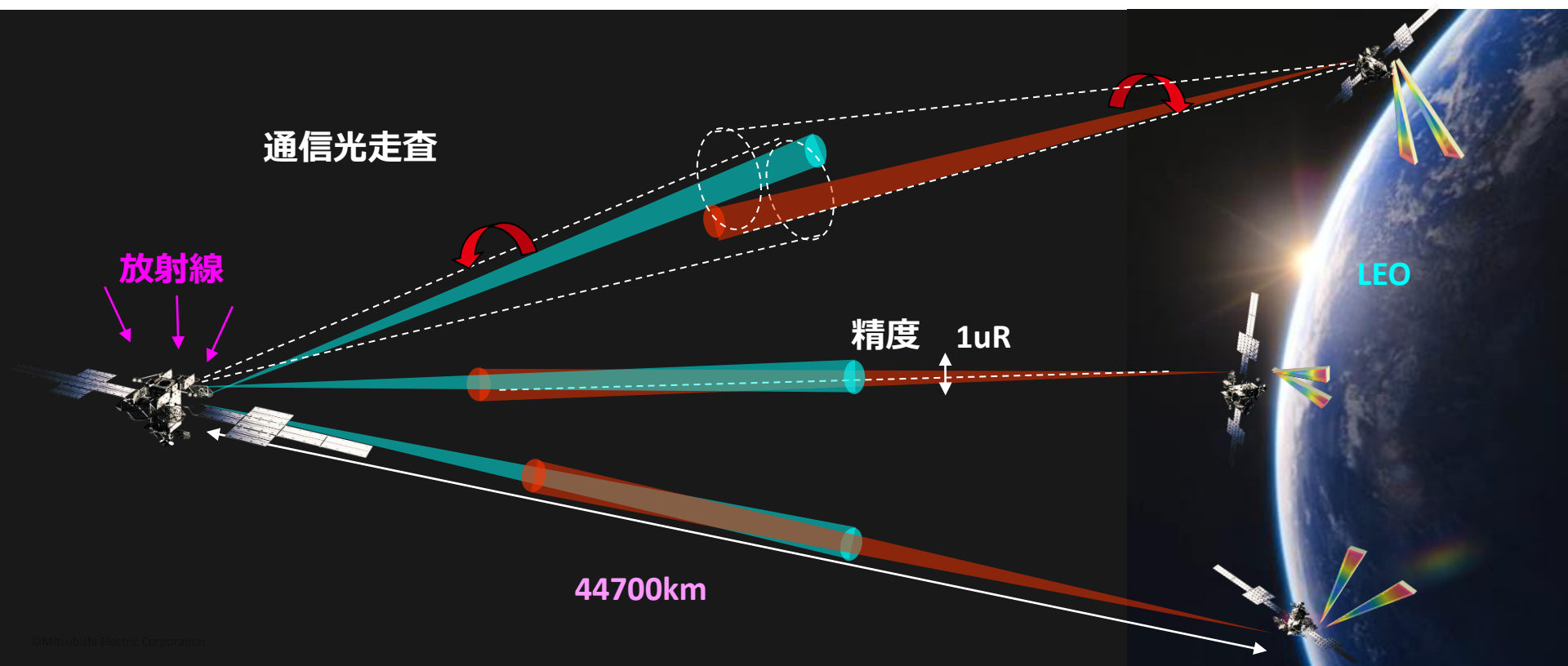
初期捕捉(1 mrad)から精追尾($\sim 1\mu\text{rad}$)

■ 衛星軌道上(放射線環境下)安定動作する光増幅技術

放射線環境下で長期運用(10年 \sim)できる高出力(\sim 数W)な光増幅

■ 高感度光送受信技術

ドップラ周波数シフト下でのコヒーレント通信



■ 高精度ポインティング制御技術

衛星の振動やポインティング精度を吸収できる高度なポインティングが必要

■ 通信路切替技術

衛星間の通信リンクの頻繁な切り替えに対応

■ 小型・軽量・低コスト化技術

小型衛星搭載や、複数台搭載のため必要

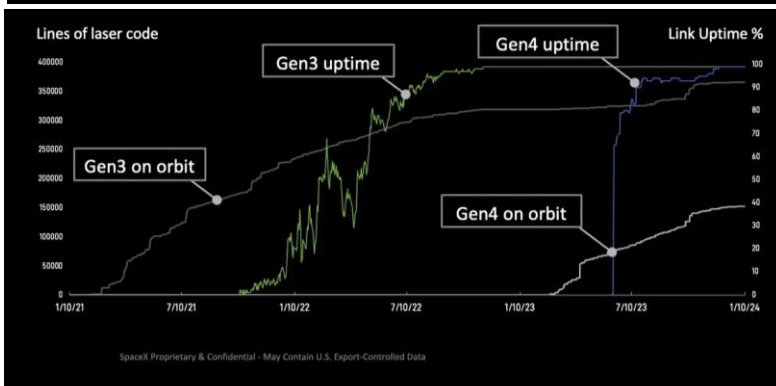
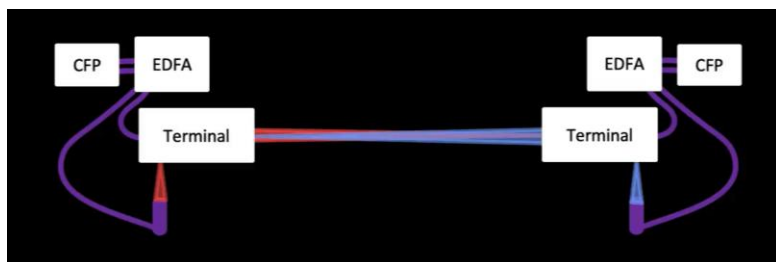


LEO : Space-Xが9000機の光端末を用いて100Gbps運用。COTS品適用、軌道上SW更新。[1]
 GEO : だいち4号(ALOS4)とJDRSの間で1550nm帯世界最速となる1.8Gbps通信実証。[2]

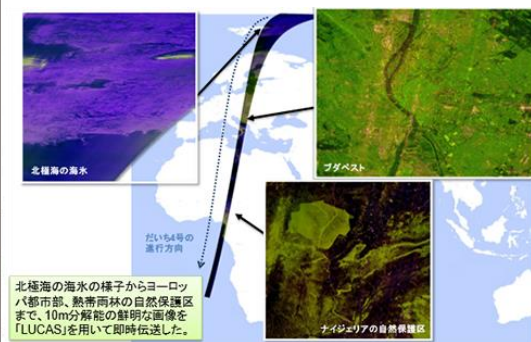
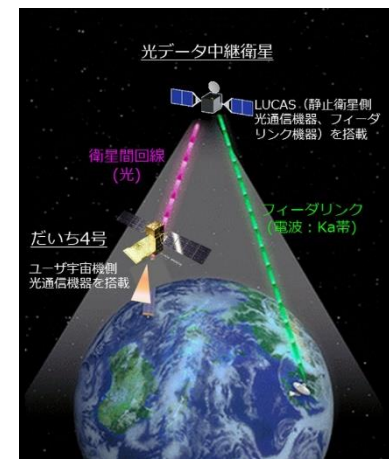
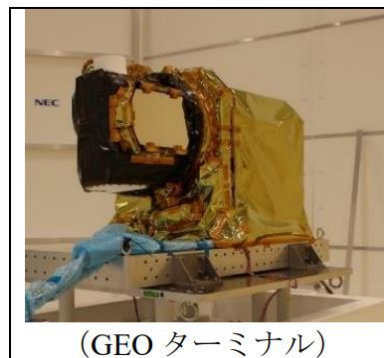
Space-X

Laser Capability Highlights

Longest Link Distance: 5400km
 Number of Acquisitions per Day: 266,141
 Longest Link Duration: Weeks
 Max Data Rate: 200Gbps
 Fastest Acquisition: 12 seconds
 Min Altitude Link: 122km



LUCAS



[1] : https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12877/1287702/Achieving-99-link-uptime-on-a-fleet-of-100G-space/10.1117/12.3005057.full#_

[2] : https://jpn.nec.com/press/202501/20250123_01.html

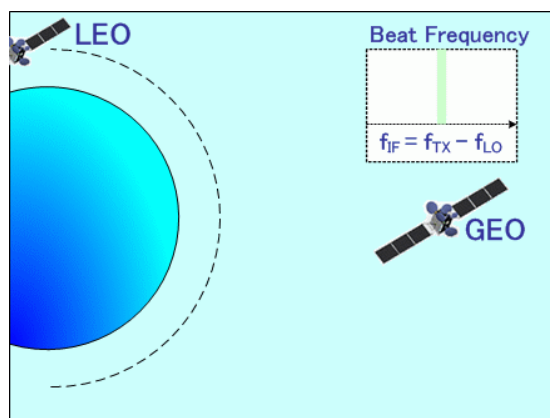
2

高感度光送受信技術

ドップラシフト補償から光位相同期、復調までの一連のシーケンスの妥当性を検証。

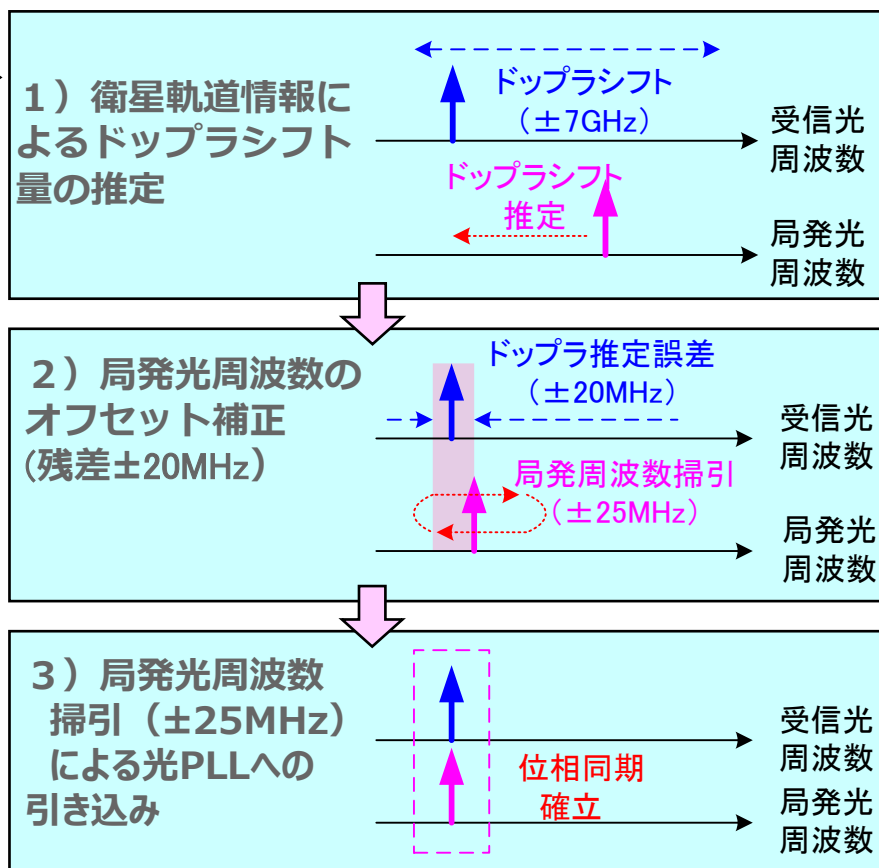
- ・LEO-GEO間の距離変化に伴うドップラシフト（±5GHz）を補償して光位相同期確立を実証。
- ・伝送速度7.2Gbpsまでの光信号のホモダイン復調を実証（目標値≥2.5Gbps）。

■ 衛星間距離変化に伴うドップラシフト

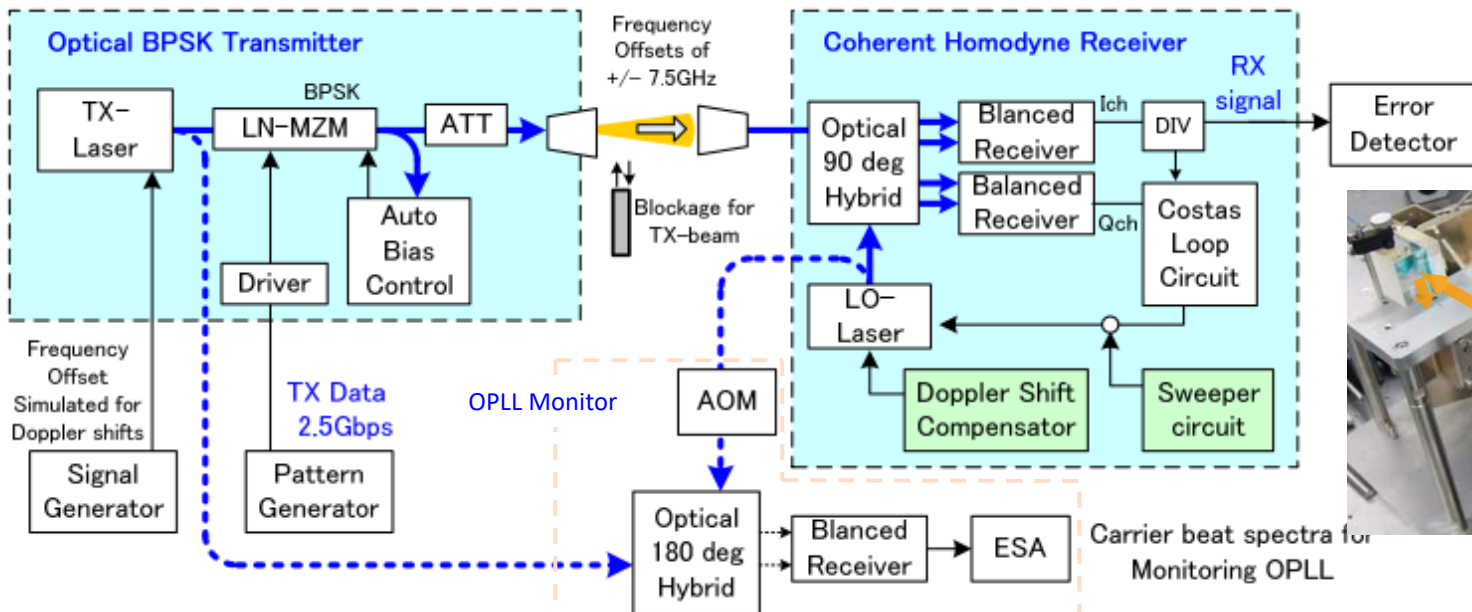


ドップラシフト
を衛星軌道情報
に基づき推定補償

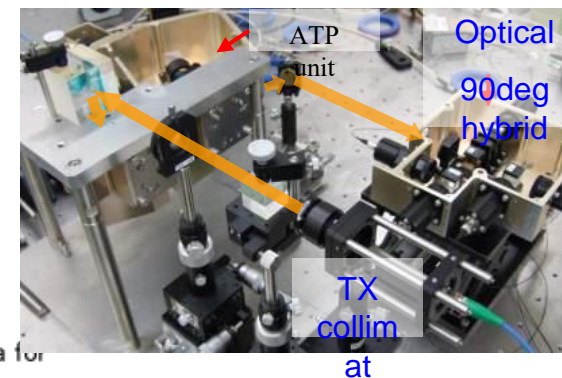
■ ドップラシフト補償～光位相同期の手順



Experimental system was prepared to evaluate the receiver sensitivity, optical phase locked and initial frequency acquisition.

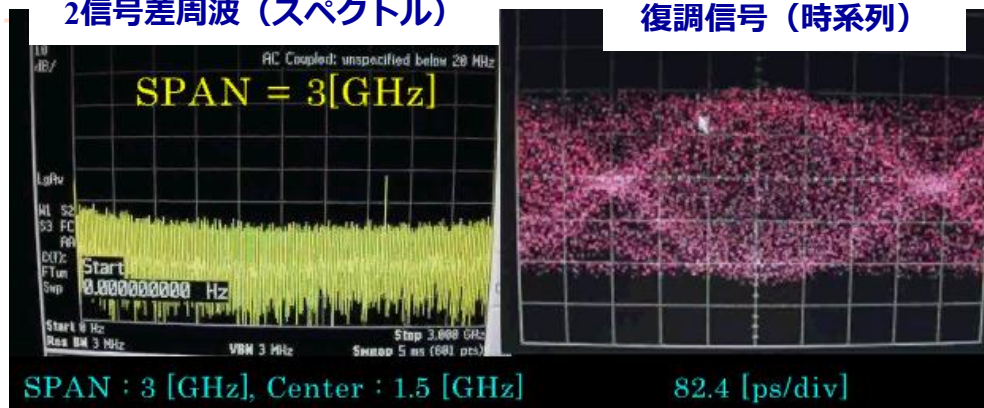


Snap shot of experimental setup

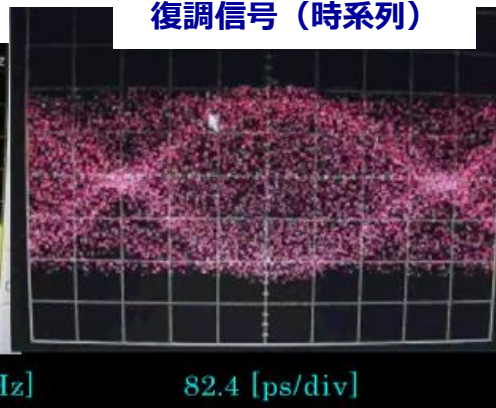


■ ドップラシフト補償 ～光位相同期の評価

2信号差周波 (スペクトル)



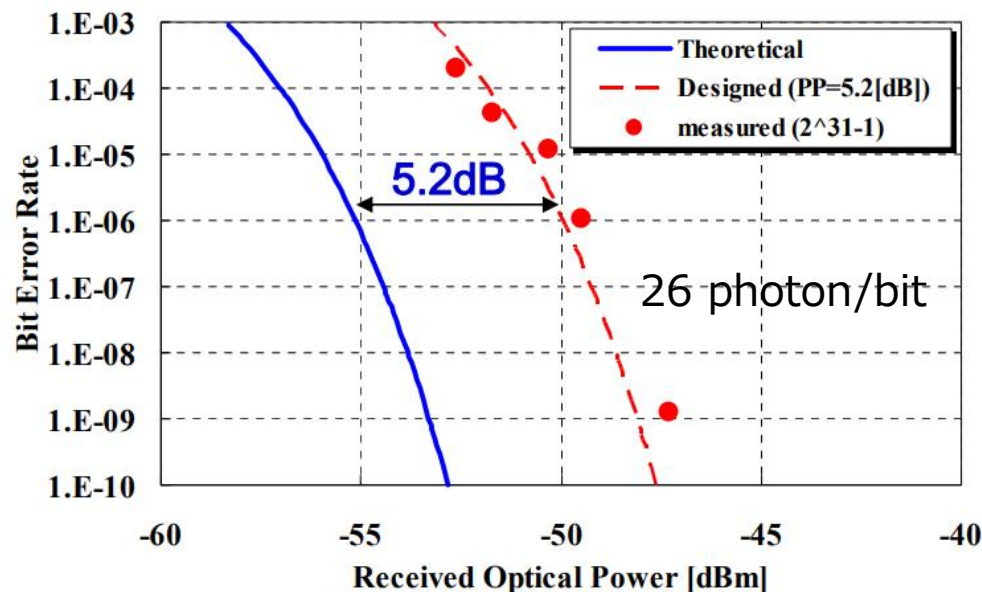
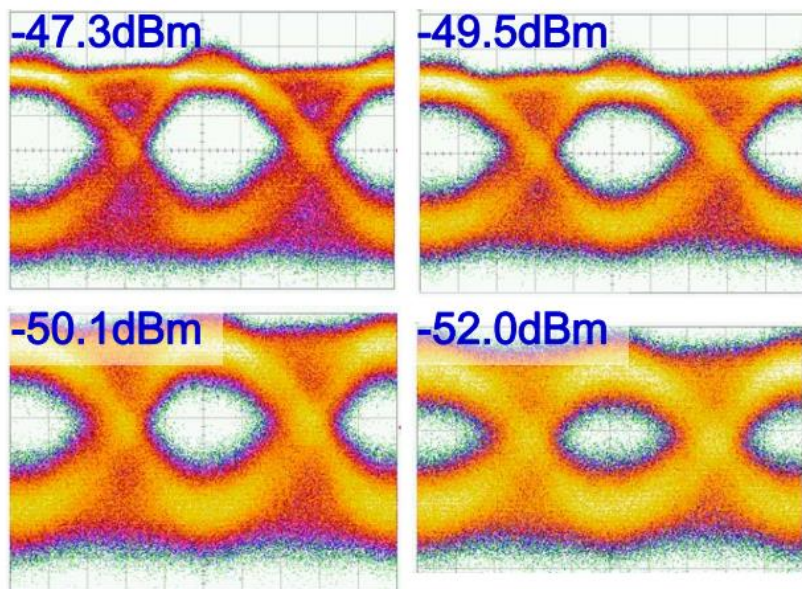
復調信号 (時系列)



The communication performance has been evaluated through bit error rate (BER) measurement versus incident power on balanced receivers.

Transmitting signal : 2.5Gbps pseudo-random bit sequence (PRBS) of $2^{31}-1$

OPLL is locked after compensation of $\pm 7.5\text{GHz}$ - frequency variation in TX-laser

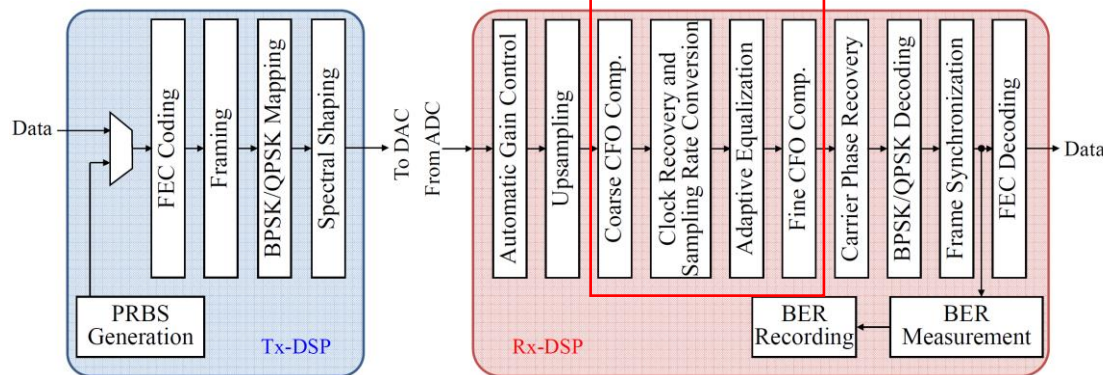
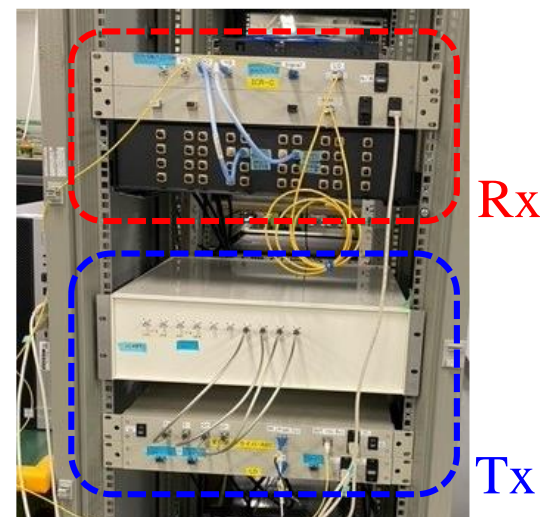
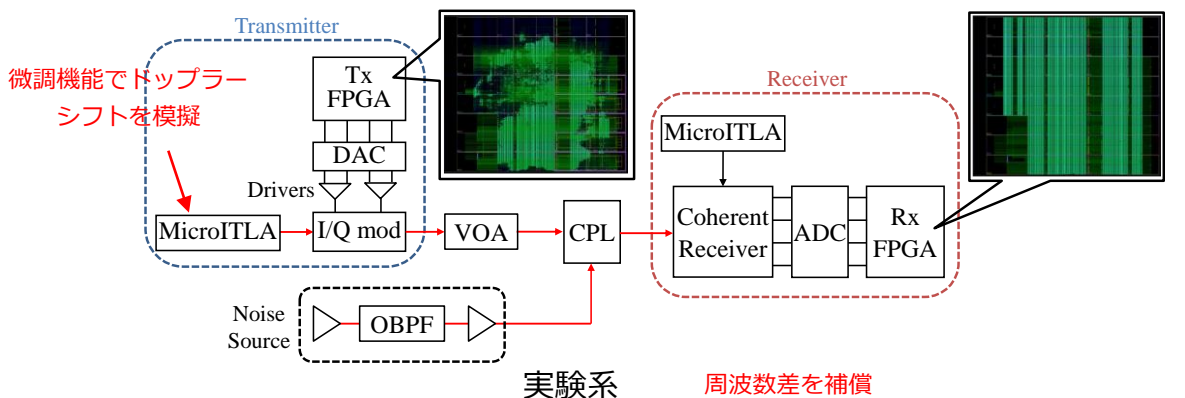


- The receiver sensitivity has been -49.1dBm at 2.5Gbps, BER of $1e-6$, which is fairly consistent with designed value of -49.6dBm even if Doppler shifts exists.
- OPLL stably locked more than 25 hours at incident power level of -52.0dBm

- コヒーレント光送受信試作機[1]を用いて、2.5Gbaud 2値位相変調及び4値位相変調（BPSK/QPSK）信号に対して、リアルタイムに送信搬送波周波数を変化させることでドップラーシフトを模擬し、光源位相雑音を含めた耐性を評価

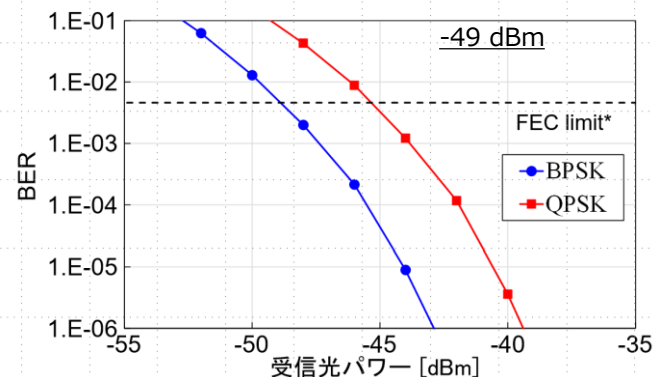
・ 10MHz/sを上回る40MHz/sのドップラーシフトと光源位相雑音の複合負荷条件下でもリアルタイムにFO補償が可能であることを示した。

[1] 備海 他, OECC2022



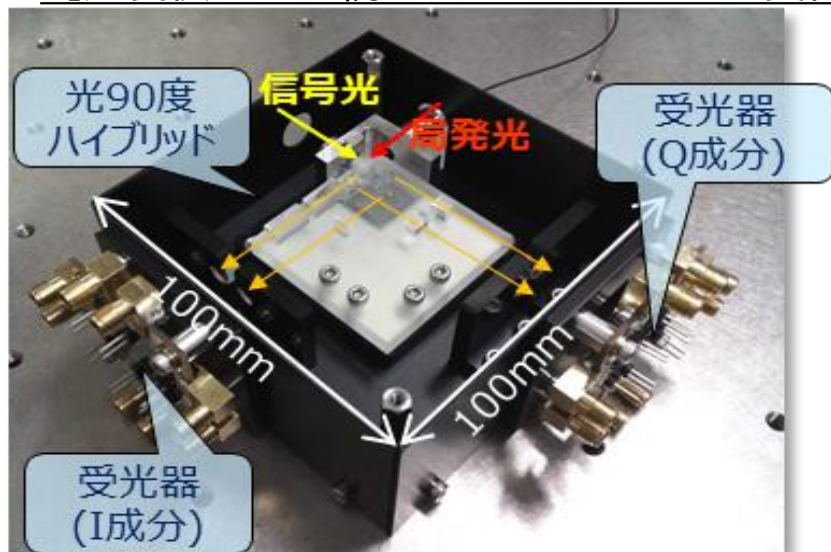
FPGAで実装したDSP機能部

受信感度評価結果

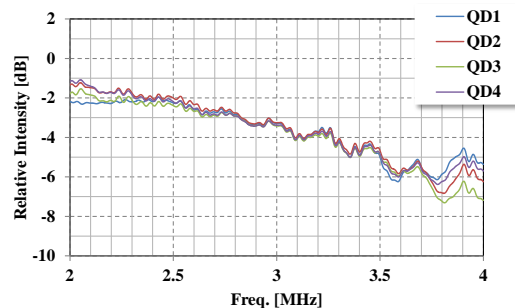
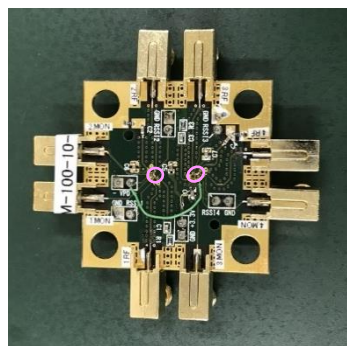


- 分割波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯のコヒーレント衛星光通信機器の小型化を目指し、捕捉追尾系の角度センサとコヒーレント受信器とを統合した受信フロントエンドを開発。

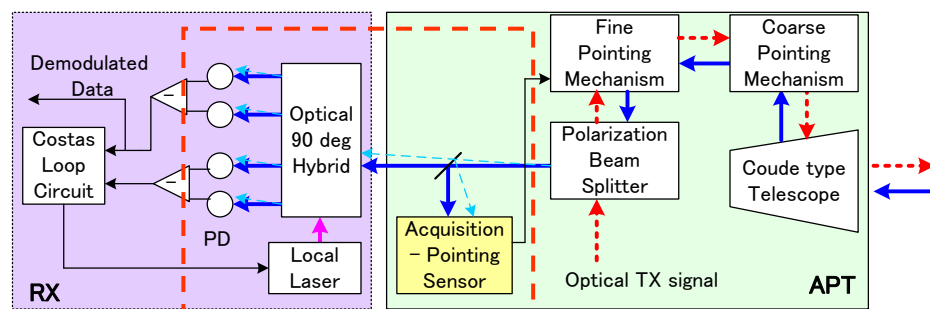
【角度検出器を統合したコヒーレント受信器】



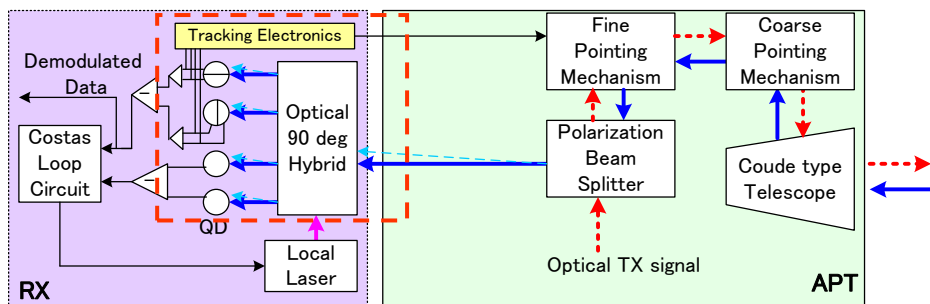
【高速分割型フォトダイオード外観】



従来の光送受信ターミナル



提案する光送受信ターミナル



3

COTS品(民生品)宇宙適用に向けた 開発

放射線は光・電子部品に性能劣化だけでなく永久故障を引き起こす可能性がある。
COTS品の宇宙適用には、放射線による影響を事前に把握することが重要

	積算効果		粒子1つの影響	
	TID	DDD	SEE	
半導体 光部品に与える影響	性能劣化		ファンクション エラー	永久故障
主な部品	電子部品	CCD,PD	CPUなど	FET,メモリ
評価方法	Co60	プロトン照射など		
				

TID : Total Ionizing Dose(トータルドーズ効果)

DDD : Displacement Damage Dose Effect (変異損傷)

SEE : Single Event Effect(シングスイベント)

- 宇宙空間における大容量宇宙光通信光源モジュールの性能実証に成功し広報発表を実施
- 宇宙実績のない民生部品(基準光源モジュール)を早期に軌道上実証するため、大学連携による小型衛星への相乗りに向けて社内開発を実施した。



NEWS RELEASE

宇宙光通信光源モジュールの軌道上実証で全サクセスクライテリアを達成
民生部品の活用と超小型人工衛星への搭載により、低コスト化と開発期間の短縮を実現

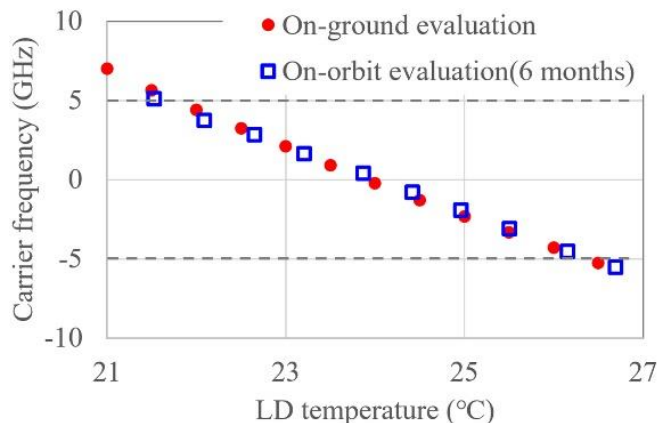
(開発 No.2412)

2024 年 9 月 19 日
三菱電機株式会社



開発した光源モジュール

■ 周波数掃引性能検証

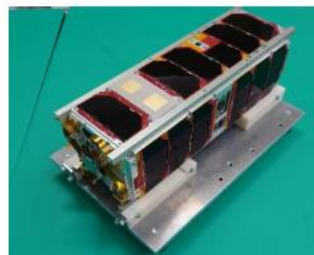


1. 世界初、大容量宇宙光通信に適用可能な波長 1.5 μ m 帯レーザー光源モジュールにより、宇宙空間でのレーザー光周波数制御の実証に成功

- ・人工衛星間でレーザー光線を用いた通信を行うには、人工衛星がそれぞれの速度で動くために生じるドップラー効果（レーザー光周波数の変化）を人工衛星の相対速度に応じて補正することが必要。今回開発した光源モジュールで、世界で初めて^{※3}このドップラー補正に十分なレーザー光周波数変化量 60GHz を宇宙空間にて実証

2. 産学連携の超小型人工衛星を活用し、短期間で低コストに実証試験を実施

- ・産学連携プロジェクトで開発した超小型人工衛星を活用し、宇宙空間での性能実証試験を実施
- ・従来の大型人工衛星への搭載による実証に比べ、約 3 分の 1 の期間と約 100 分の 1 の開発費用で実現^{※4}



OPTIMAL-1

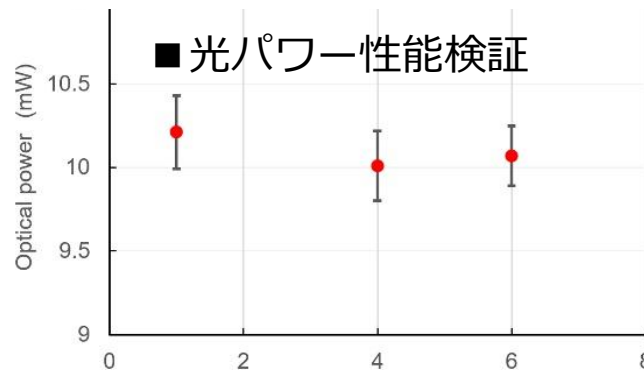
提供：アークエッジ・スペース/福井大学



ISS から宇宙空間への投入シーン

提供：JAXA/NASA

■ 光パワー性能検証



広報発表：<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2023/pdf/062>
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2024/0919-a.html>
 レーザー学会オリジナル論文 52巻Vol10.P543,(2024).

4

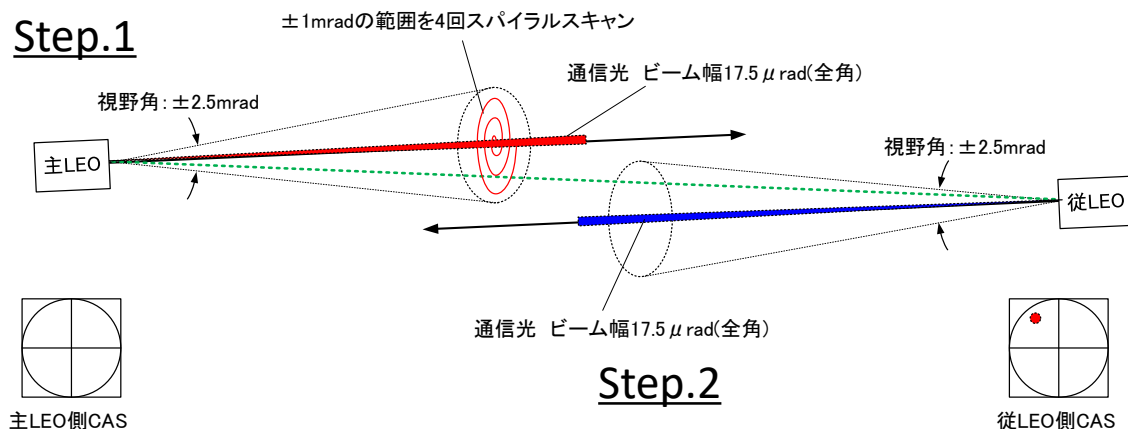
捕捉追尾技術

- 光路切替時の初期捕捉の方式としては、以下の3種類が想定される。
- 通信光として用いる細いビームを誤差範囲内でスキャンするビーコンレス方式は、初期捕捉のために機器構成の変更が必要ないためリソース面で有利となる

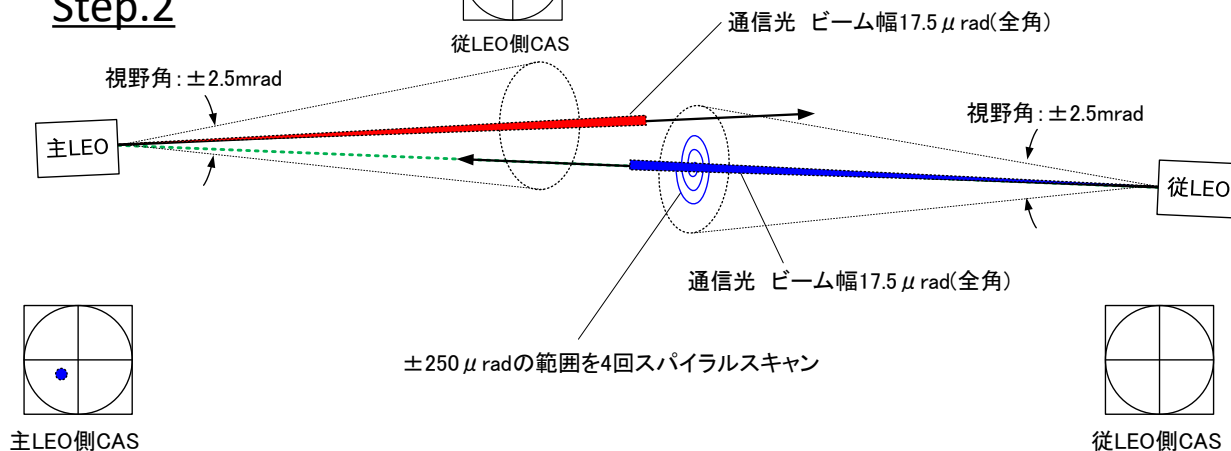
名称		ビーコンレス方式 (ビーム拡がり角固定)	ビーコン方式
走査方式		粗捕捉において、通信用ビームの拡がり角を変えずに細いビームのまま、スパイラルスキャンを行う	粗捕捉において、拡がり角の大きいビーコン光を用いてスキャンする
トレードオフ 項目	捕捉時間	△ 捕捉時間長	○ 捕捉時間短
	距離変動への対応	○ スキャン範囲の可変性で 対応可能	○ 距離に応じて受信光 強度が変動 近距離では有利
	質量	○ 測距・通信回線用機器が そのまま使える	△ ビーコン光源追加による 質量増
	消費電力	○ 測距・通信回線用機器が そのまま使える	△ ビーコン光源の消費電力 増
	光学系	○ 1度光学系の校正を取れば、 比較的安定	△ 別途ビーコン光路必要

- スパイラルサーチの場合、初期捕捉のシーケンスは次の通り。
- Step1: 主衛星LCTからTXスパイラル走査を開始、従衛星付近 $\pm 1\text{mrad}$ 範囲を走査。
従衛星LCTでの捕捉信号がRXの視野中心となるように従衛星側補正
- Step2: 従衛星LCTの走査範囲を縮小。
主衛星LCTでの捕捉信号がRXの視野中心となるように主衛星側補正
- Step3: 精追尾モードに移行。通信路が確立し通信を開始

Step.1



Step.2

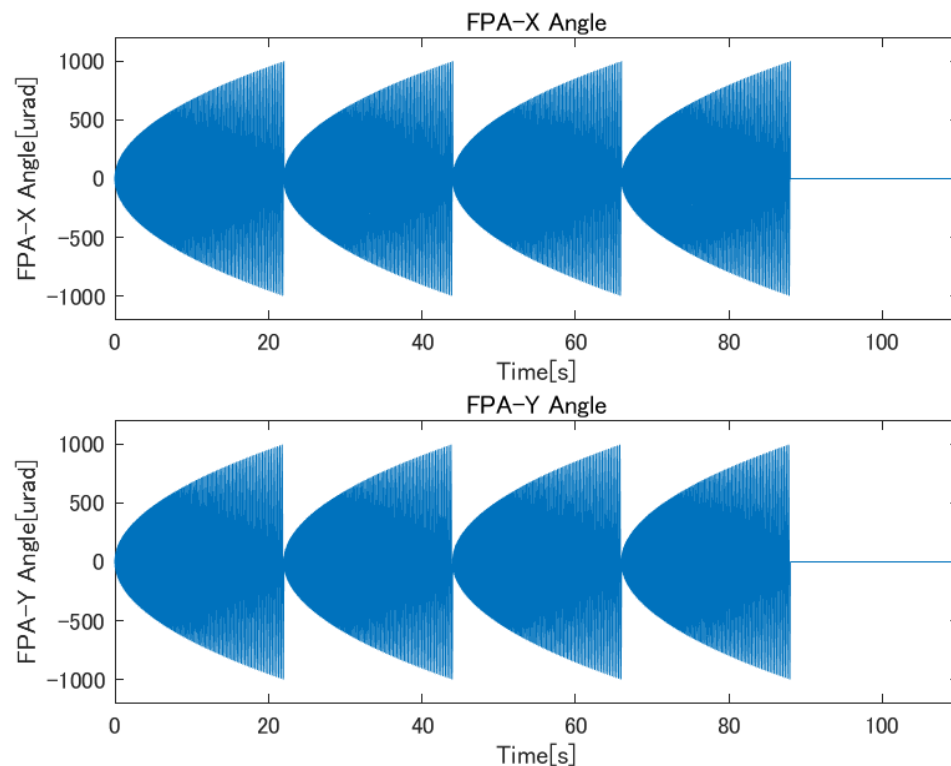


- STEP1における、主衛星 TX広範囲スパイラル走査時の駆動系の時間応答特性の一例を示す。LCTのICS要求（走査速度、捕捉追尾時間、初期捕捉確率）を考慮したTXビーム広がり角、スパイラル走査範囲、ビームオーバーラップを設定する。解析の前提として、不定範囲を $\pm 1\text{mrad}$ として仮定。

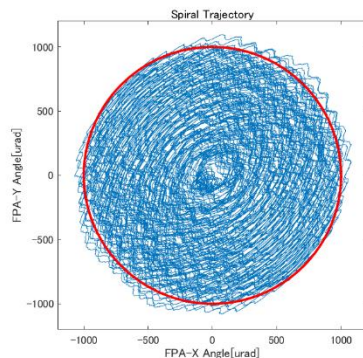
初期捕捉パラメータ（主LEO）

Parameters	Value	Note
Scanning rate	21.4mrad/s	1.2deg/s
Spiral Winding Number	150	
TX beam divergence	28.4urad	$\phi 80\text{mm}$
Beam overlap	76.5%	
Total PAT time	88sec	STEP1
Number of scan	4	T=22sec

Step1における 主衛星TXのミラーの時間応答例（誤差なし）



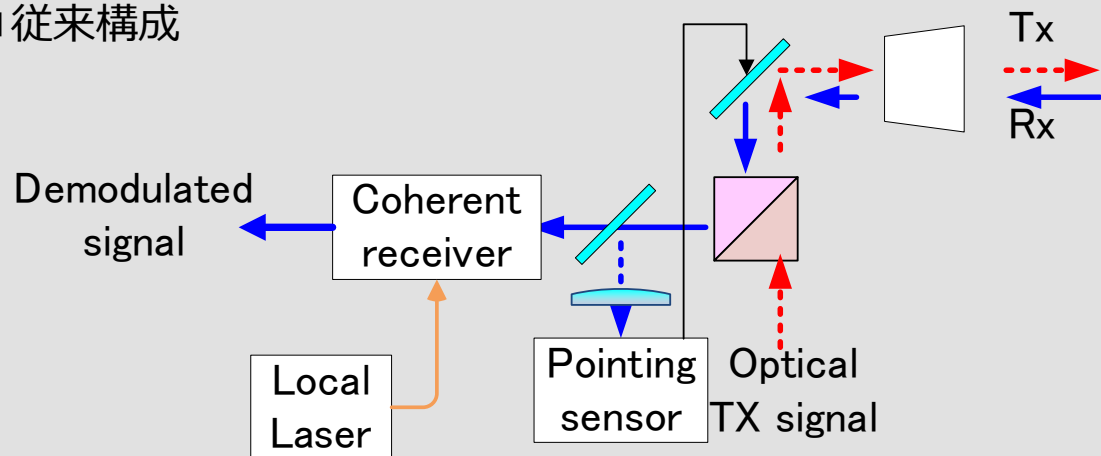
ビーム走査パターン例（指向誤差考慮）



Scan Area $\pm 1\text{mrad}$

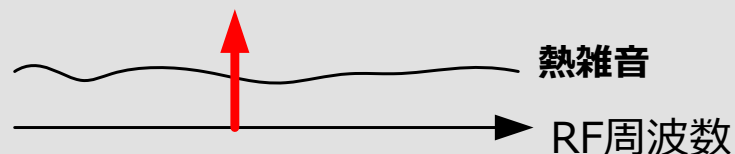
- 捕捉追尾系にコヒーレント検波を用いることで高感度化、背景光抑圧特性の向上が見込める。

■ 従来構成

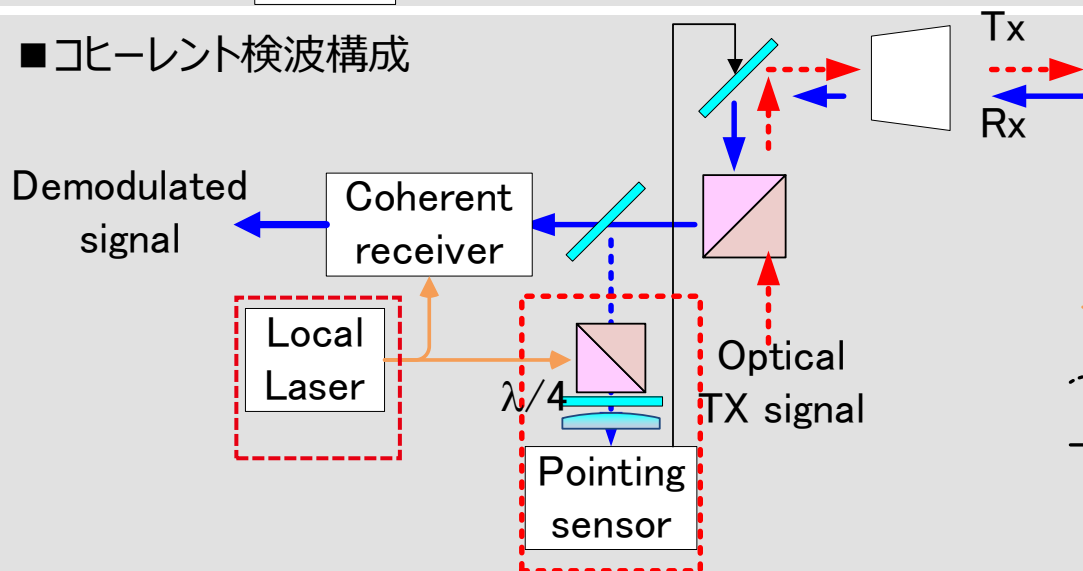


■ 直接検波

主要雑音：熱雑音

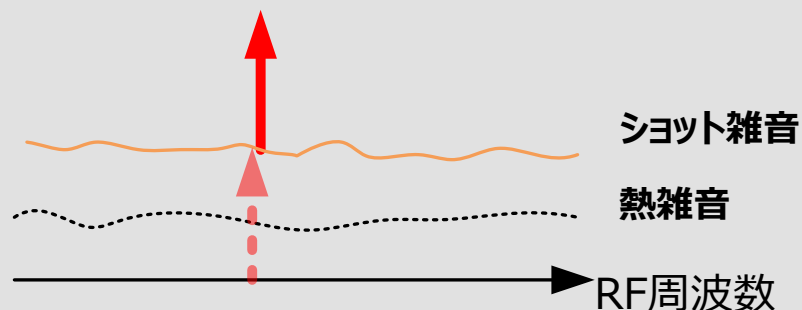


■ コヒーレント検波構成



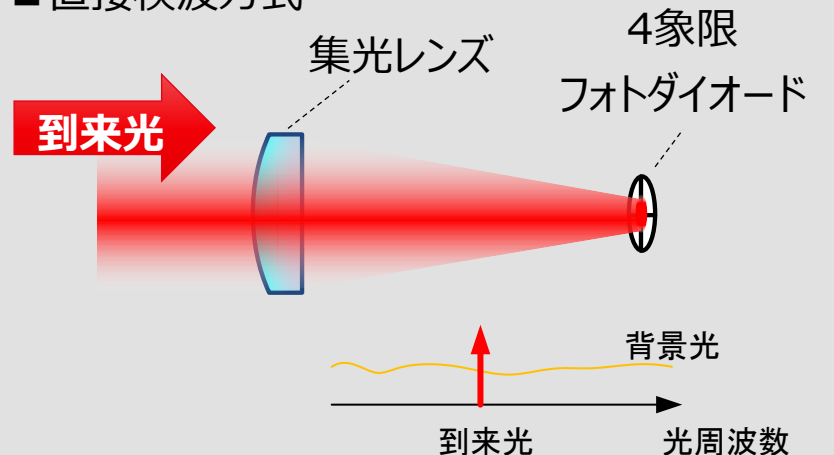
■ コヒーレント検波

主要雑音：局発光ショット雑音

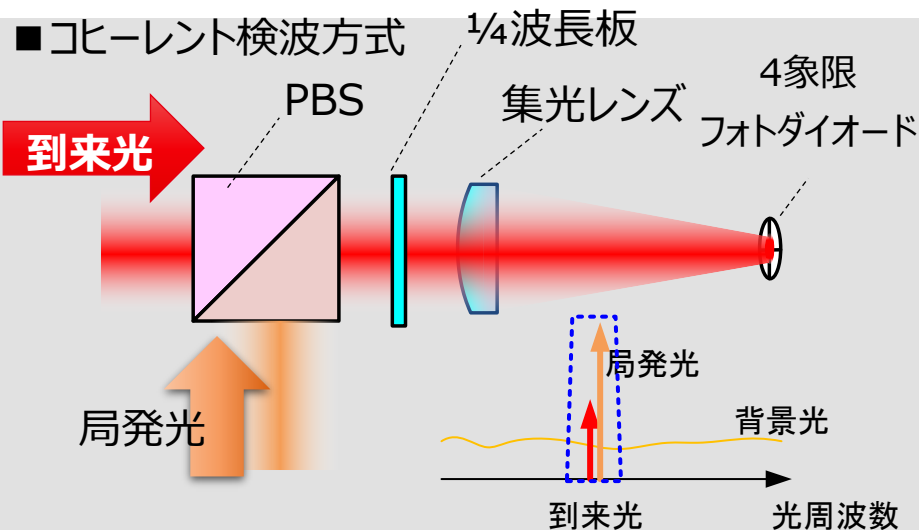


- コヒーレント検波を用いることで、背景光抑圧特性が70dB程向上し、
SNR : 20dB時の受信パワーは約22 dB改善する見込みを得た。

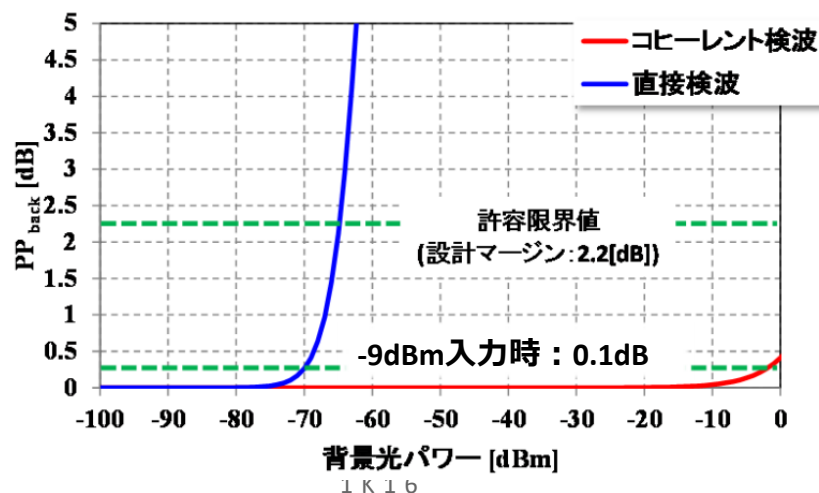
■ 直接検波方式



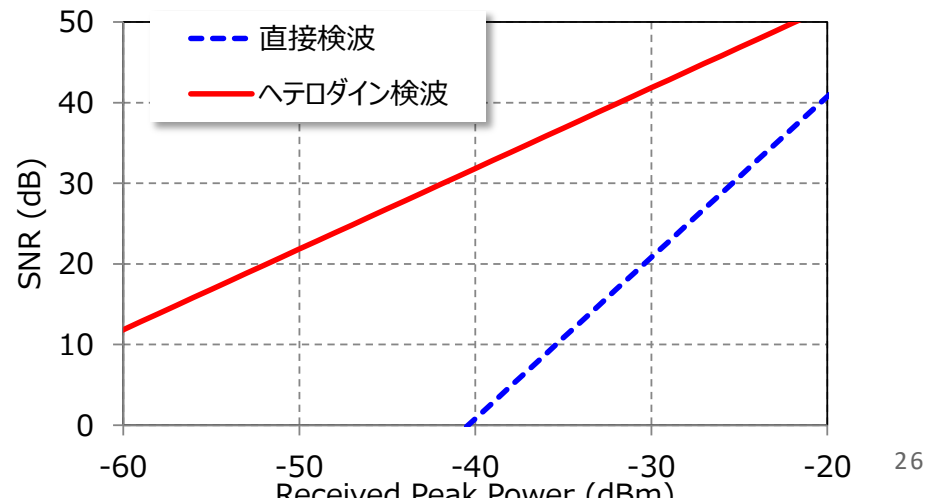
■ コヒーレント検波方式



■ 背景光抑圧効果の比較



■ 直接検波コヒーレント検波の感度比較例



- QD+TIAの帯域内に変調光を入力した場合のコヒーレント検波による角度検出特性の評価を実施。
検出角度特性(実測値)が設計値と良好に一致することを確認した。

原口他 第67回宇宙科学連合講演会 1K16 (2023)

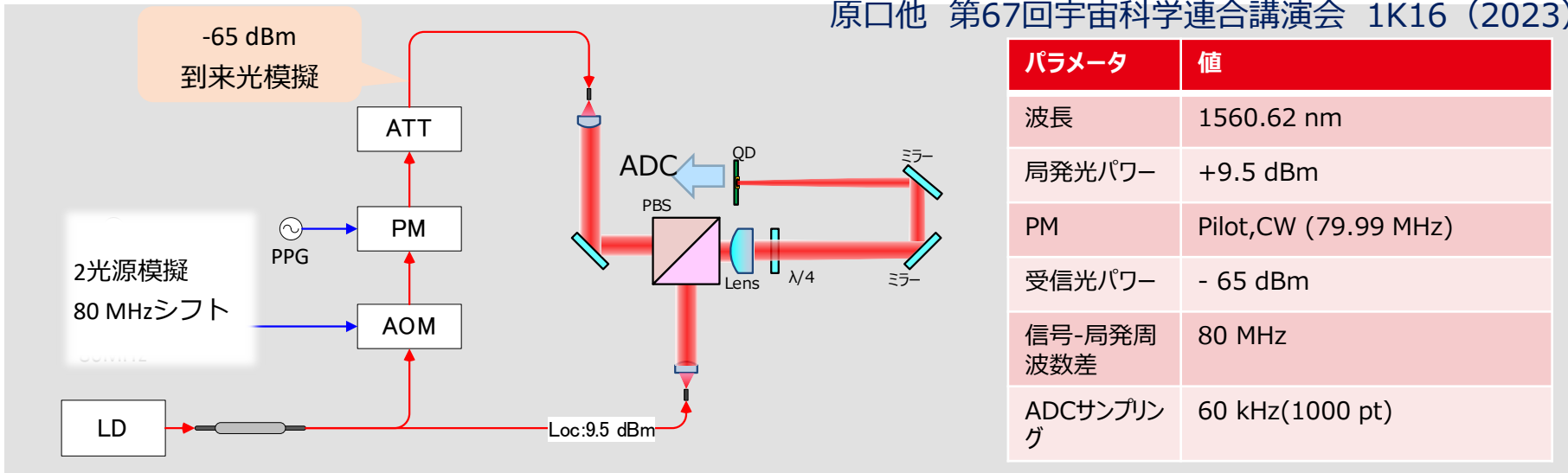


Fig.1 : QD検出スペクトラム

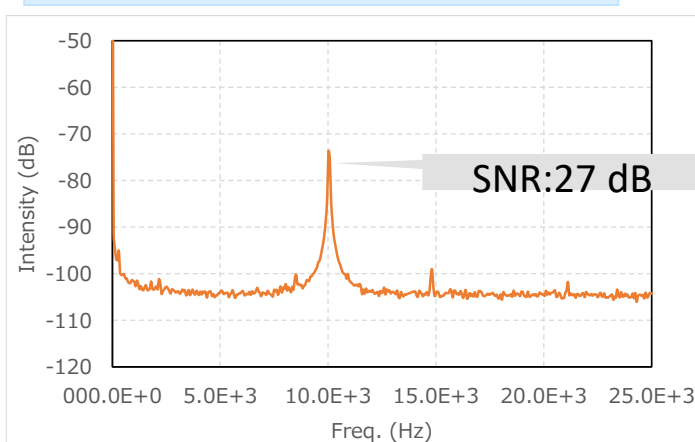


Fig.2 : 指向角度検出精度評価

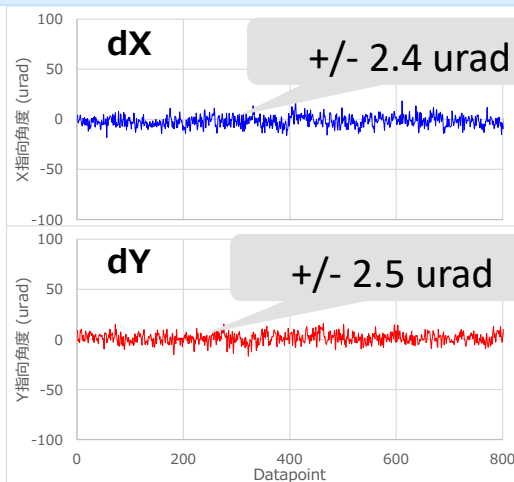
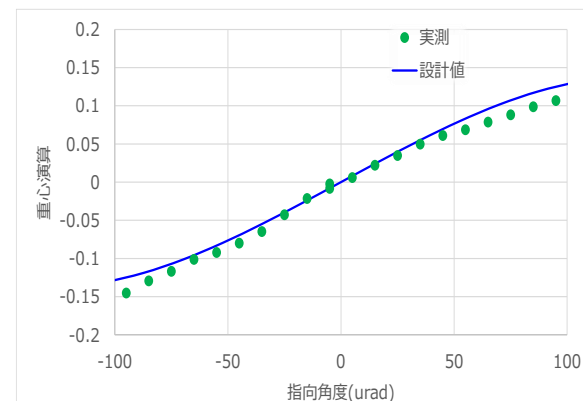


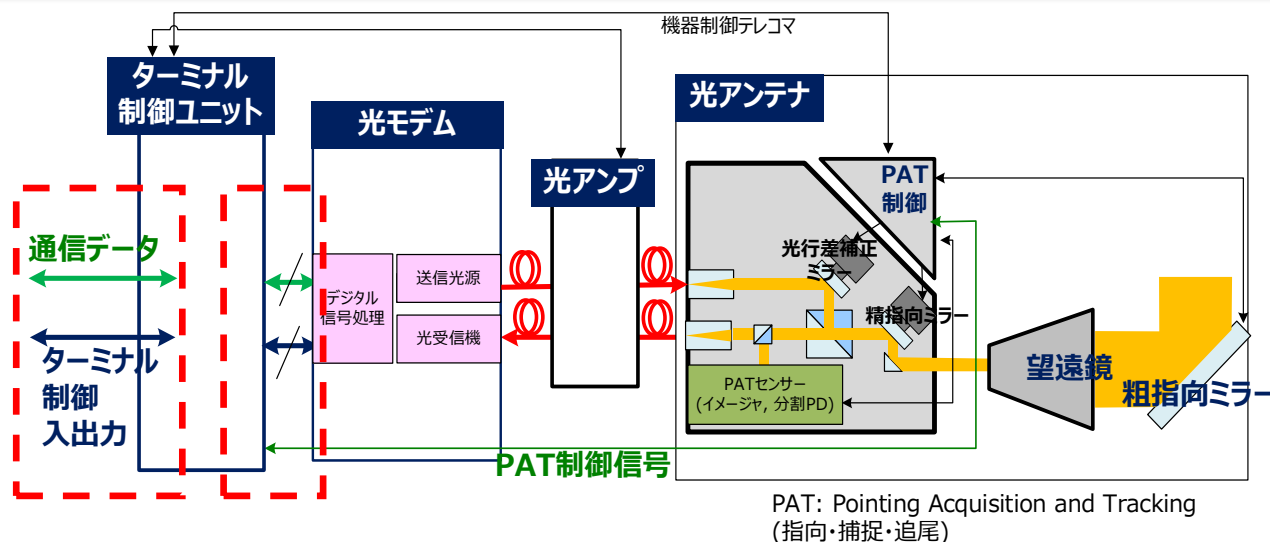
Fig.3 : ダイナミックレンジ評価



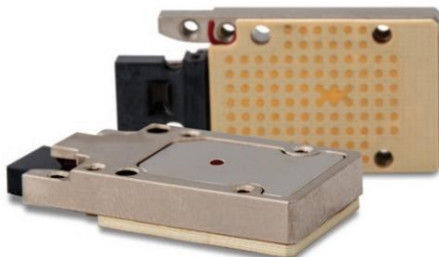
5

今後に向けた取り組みとまとめ

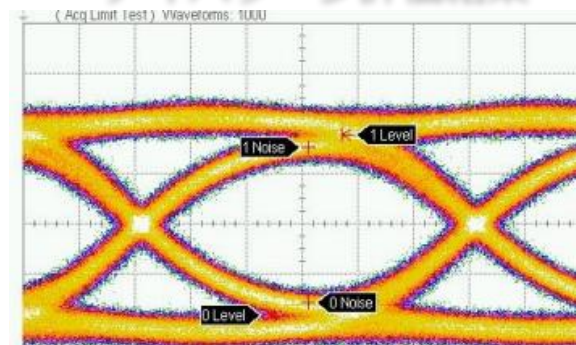
ミッションデータ、および衛星間通信の大容量化に伴い、衛星内通信の高速化が求められている。光通信による衛星内光通信は大容量化だけでなく、軽量化、耐EMCの観点からも有効。VCSELアレイを用いた耐放射線性を有するトランシーバが市販。



Smith社：
耐放射線トランシーバSpaceABLE^[1]



アイパターン評価結果

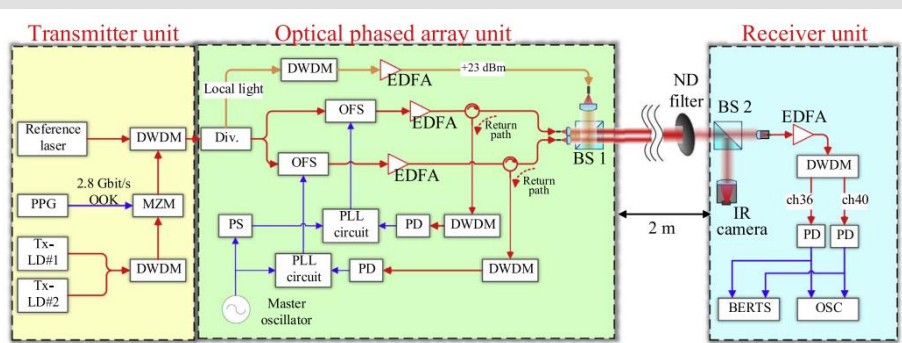


[1] <https://www.smithsinterconnect.com/products/optical-transceivers/embedded-transceivers/>

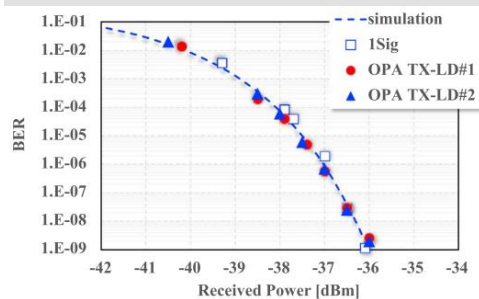
PRBS信号を重畳し、2素子フェーズドアレイによる信号伝送(OOK)実証を実施。[1]

波長多重による5Gbps (2.5 Gbps x 2)、40 Gbps (10Gbps x 4)を実証

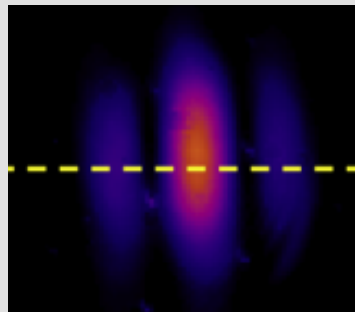
■ 光フェーズドアレイ送信機



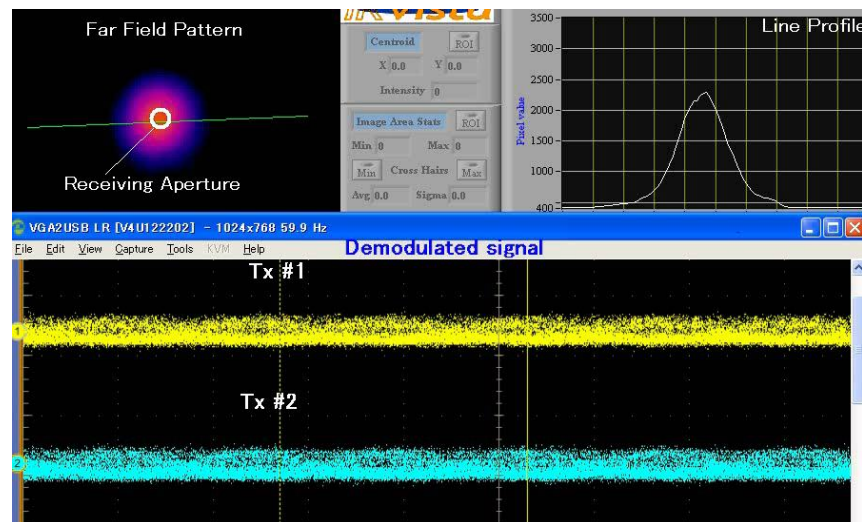
BER評価



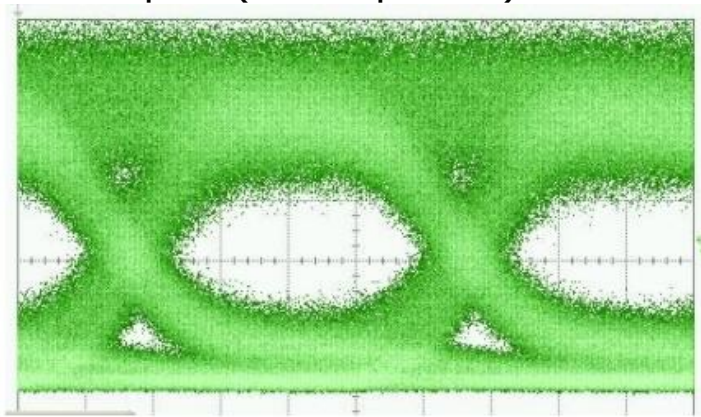
Far Field Pattern



■ 5Gbps (2.5 Gbps x 2)実証結果[1]

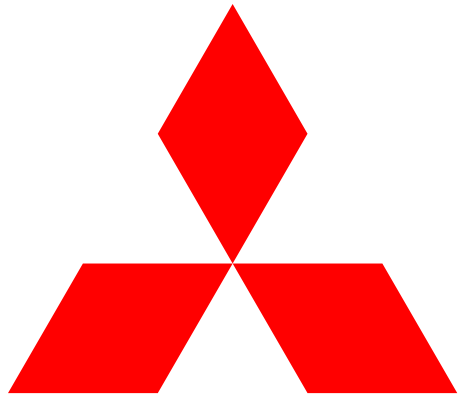


■ 40Gbps (10 Gbps x 4)実証結果



**民生技術の積極活用、地上の観測施設の利活用などにより、
通信にとどまらない光技術の幅広い宇宙活用を目指す。**

- 光衛星通信により通信・観測・測位衛星の融合、地上・近地球・新宇宙を含む超カバレッジで大容量通信の実現が望まれる。光コヒーレント技術は、通信システムの高感度だけでなく、衛星から衛星への通信、および衛星から地上への通信中の背景光に対する高い耐性で有望であり、100Gbps超の高速伝送の実現に有効である。
- 高感度光送受信技術
 - ドップラーシフトの補償、搭載検証：アナログ・デジタル各方式で検証
 - コヒーレント受信器：波長1.5 μ m帯の角度検出器を統合したコヒーレント受信器を開発
- COTS品宇宙適用開発
 - 民生部品の放射線試験やキューブサットによるコヒーレント光源の軌道上実証
- 地上からの観測技術
 - LEO追尾観測：民生望遠鏡によるLEO追尾観測、計算機による画像回復
- 捕捉追尾技術
 - 捕捉追尾システムを小型試作
 - 初期捕捉シミュレータ：搭載バスや光通信機器の指向誤差を考慮したビームスキャンシミュレータを開発



**MITSUBISHI
ELECTRIC**

Changes for the Better