

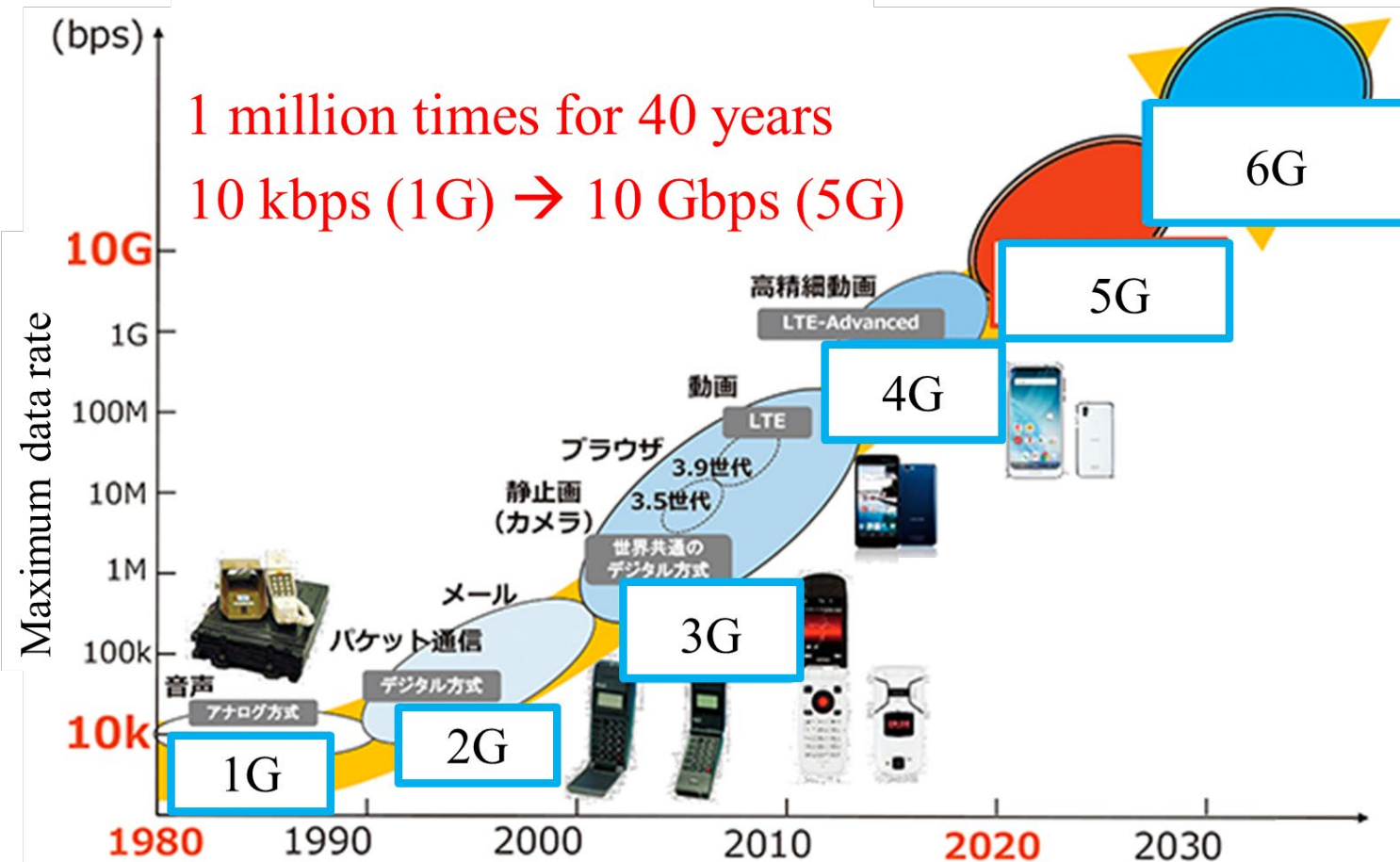
# 空間光伝搬通信における散乱・揺らぎ計測と制御

東海大学 情報通信学部  
高山 佳久

2025/3/4

多元技術融合光プロセス研究会 第5回研究交流会

## 地上では





# 宇宙では

## Space ICT

Broadband satellite communications

Small satellite constellation

Optical communications

Quantum key distribution

Artemis gateway

Deep space communications

Mars orbiter



# 長距離化

Psyche 火星と木星の間の小惑星帯を目指して移動中

2023年11月

3100万km、267Mbps

2024年6月

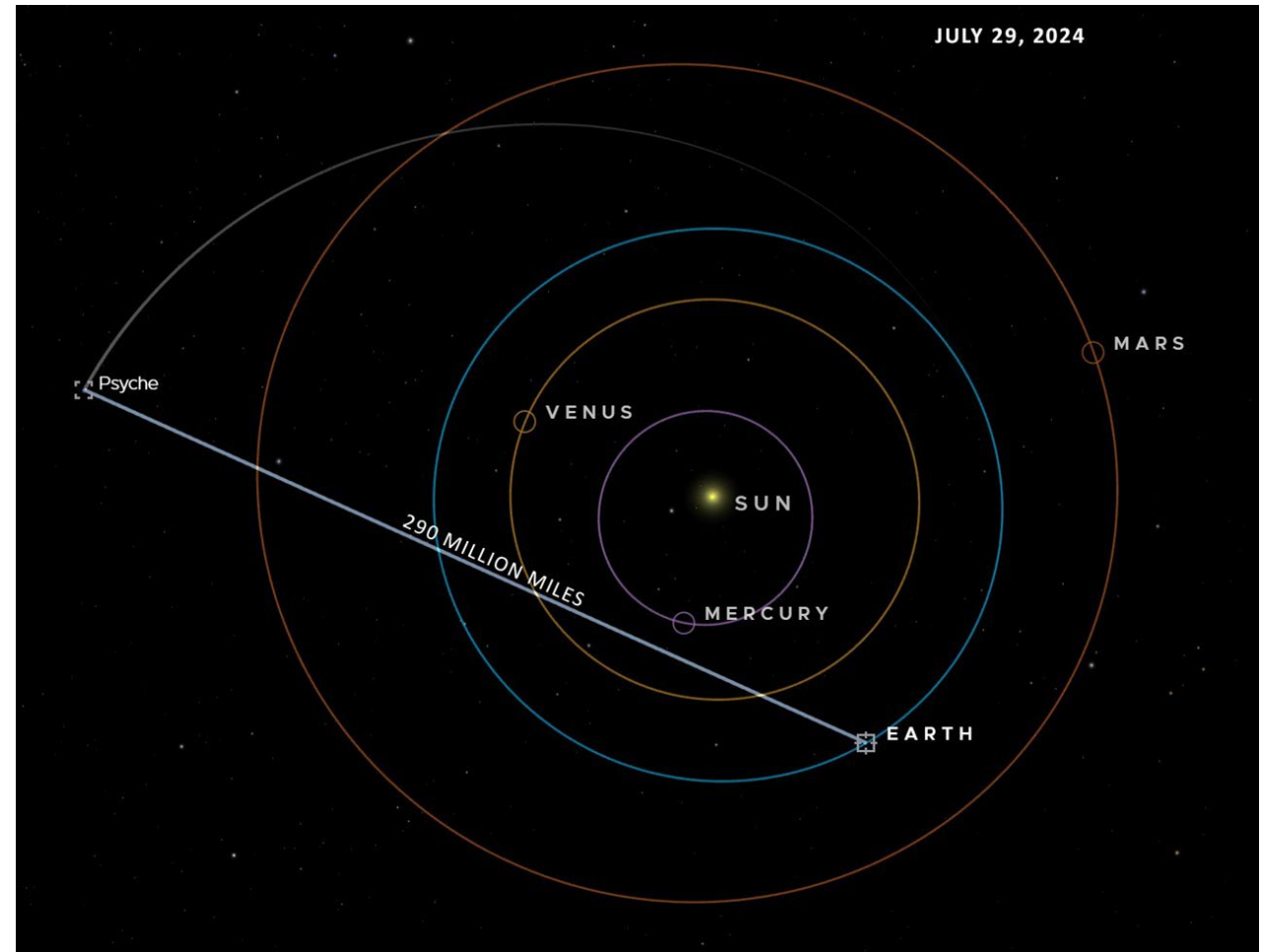
3億9000万km、6.25～8.3Mbps

2024年10月

4億6000万km、uplink

super-conducting nanowire

single photon detector (SNSPD) array





# 高速化

## TBIRD 低軌道の周回衛星

2022年6月

100Gbps

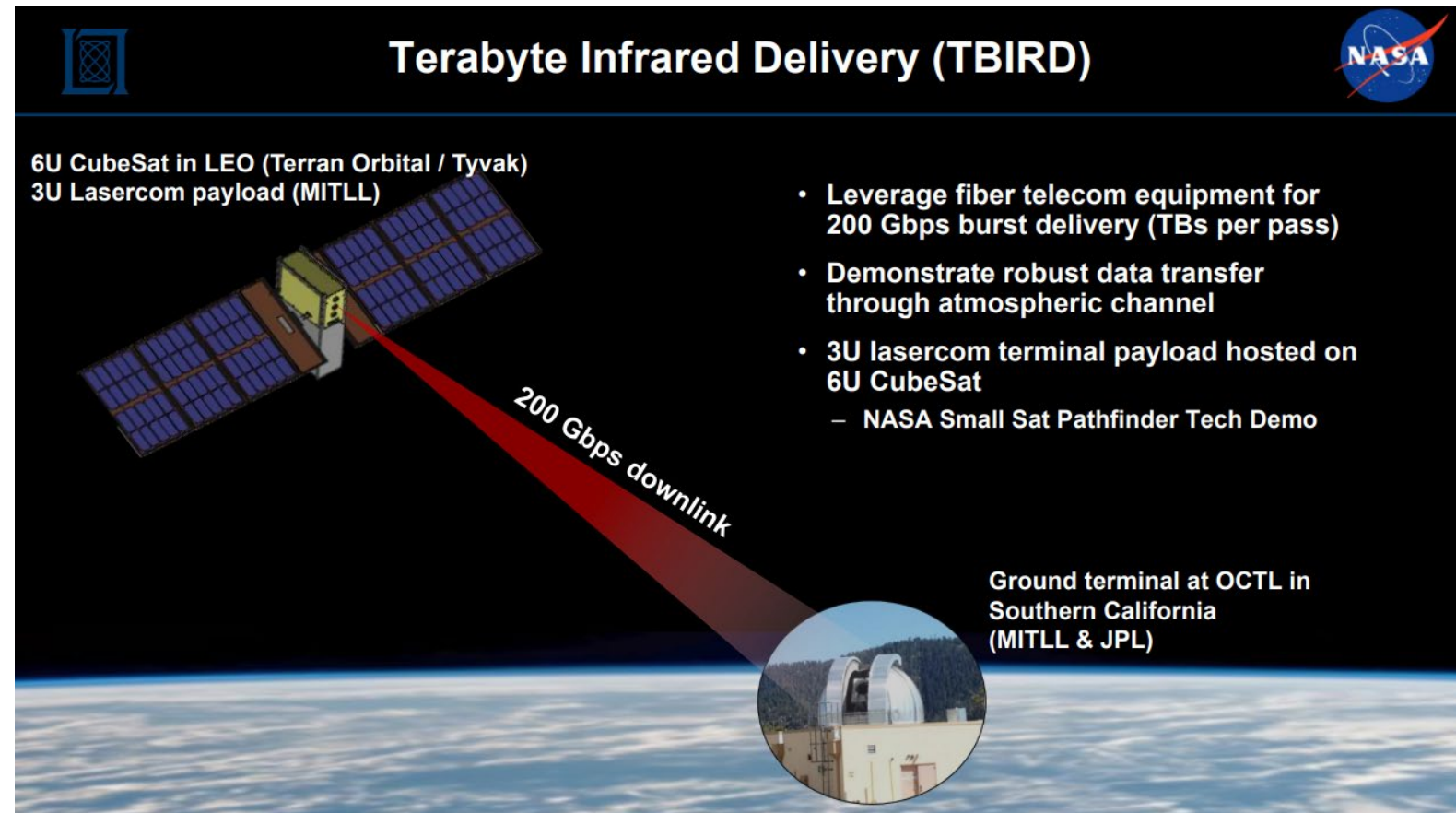
dual-polarization QPSK

2022年11月

200Gbps

2 wavelengths

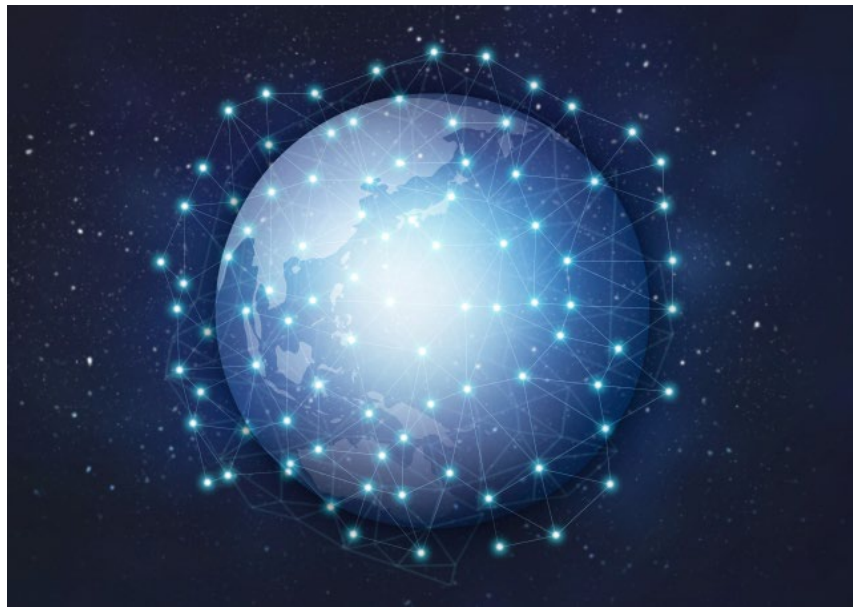
補償光学の適用



# ネットワーク化

Starlink's Laser System Is Beaming 42 Million GB of Data Per Day

9,000 lasers over the Starlink constellation delivering over 42 petabytes of data per day

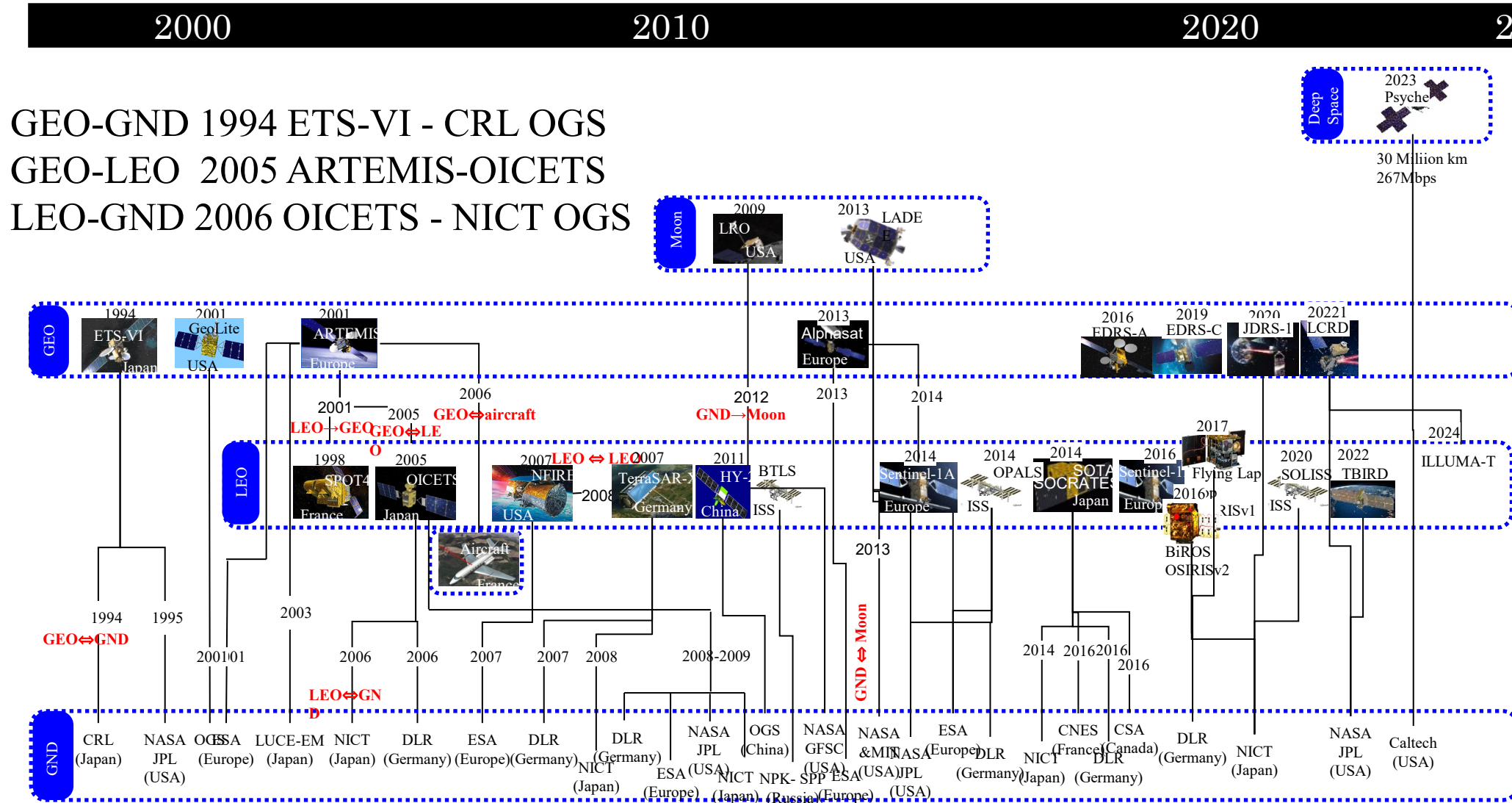


## SpaceX Reveals Operation of Over 8,000 'Space Lasers' Across Starlink Satellite Constellation – Enabling Faster Internet

Sep 26, 2023 By Evelyn Janeidy Arevalo 5 Comments

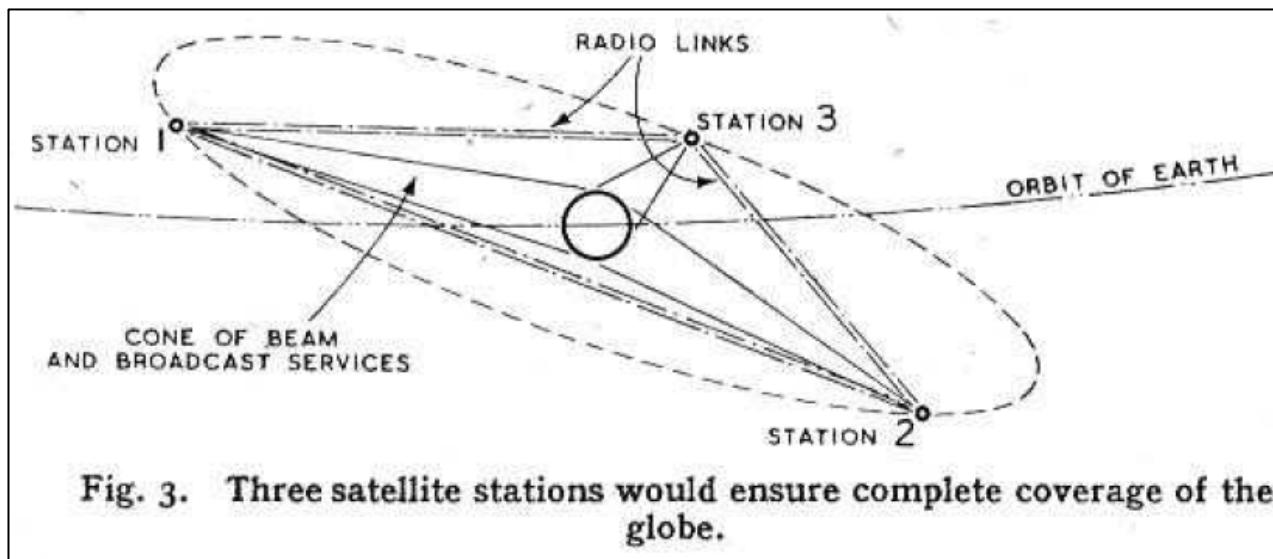


実績

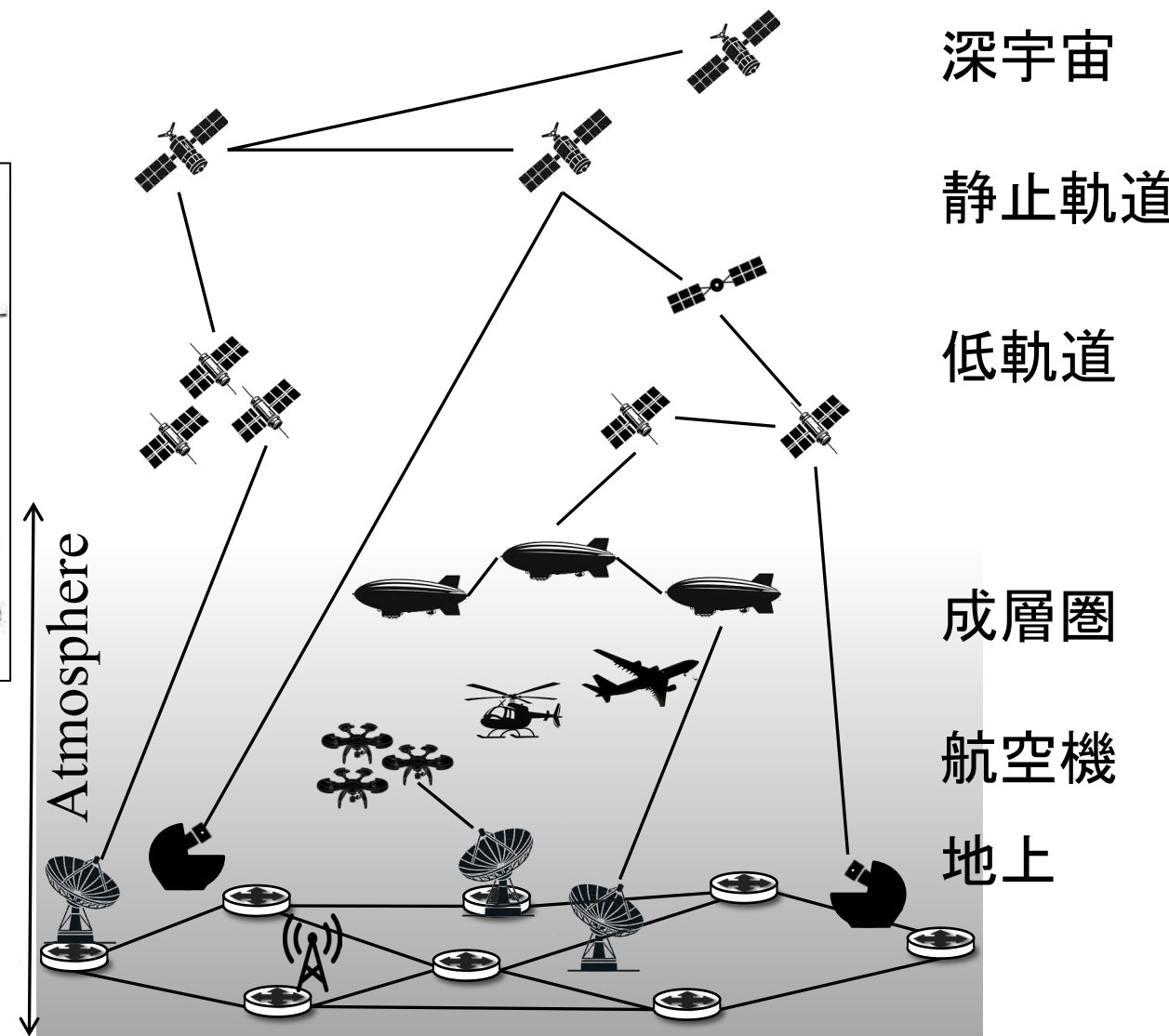




# Space & Non-Terrestrial Network



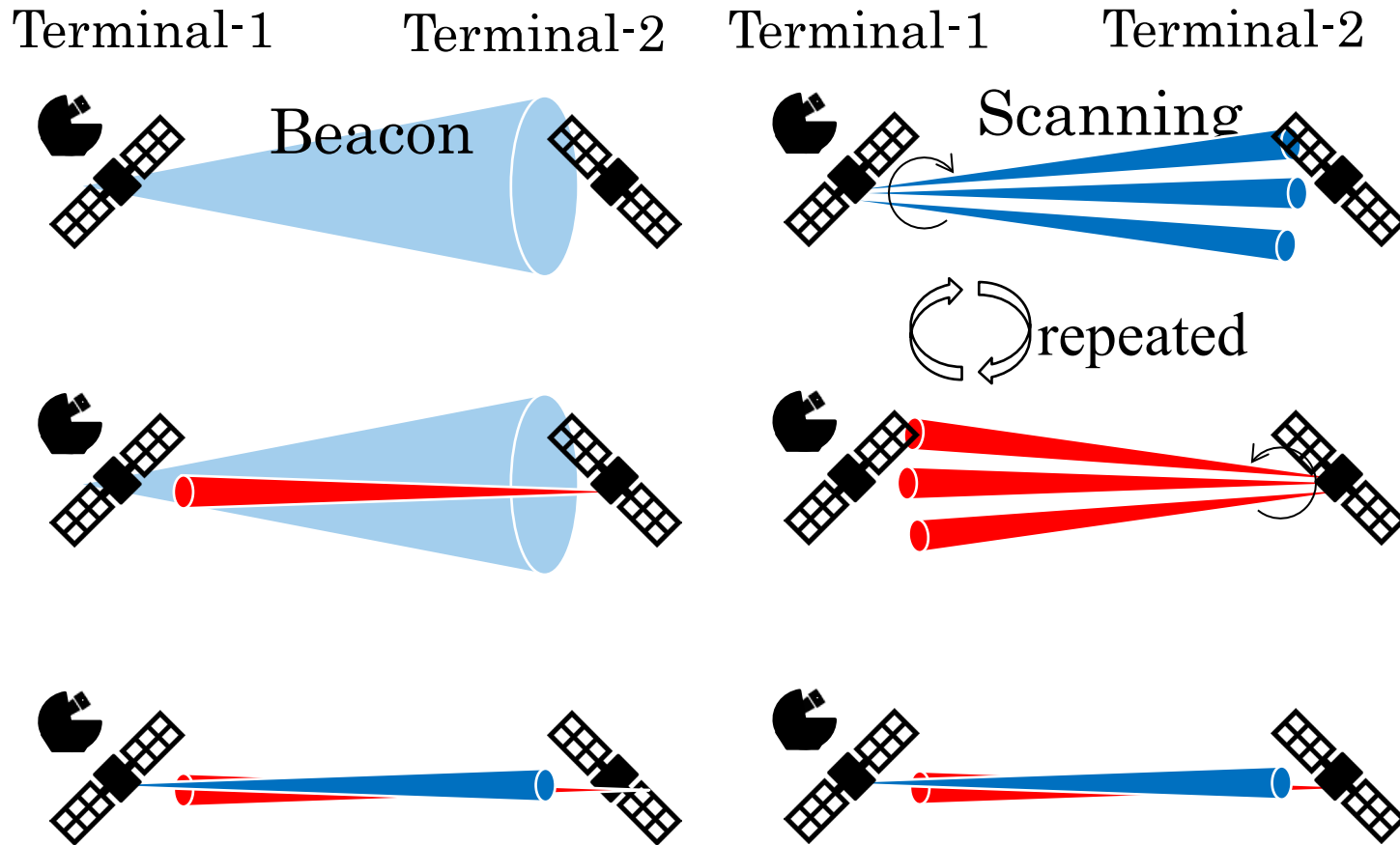
Arther C. Clarke, "EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS" Wireless World, pp. 305-308, 1945.



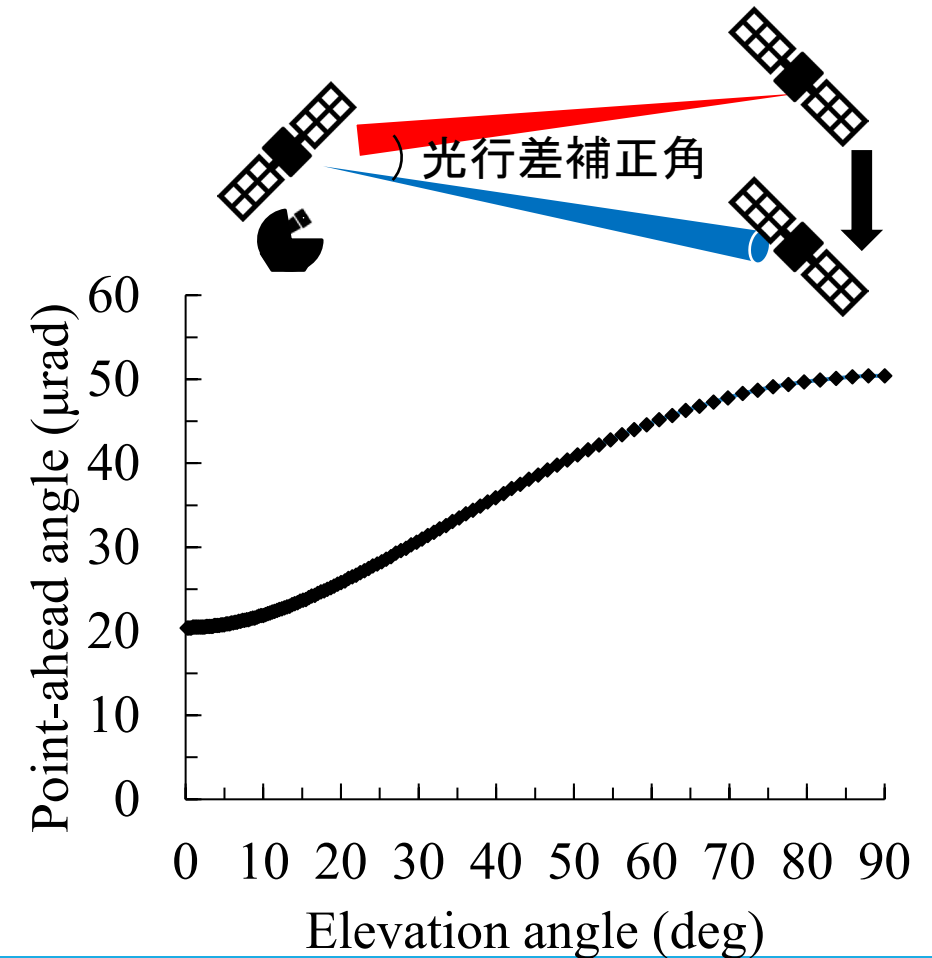


# 光通信に特有の技術（初期捕捉と光行差補正）

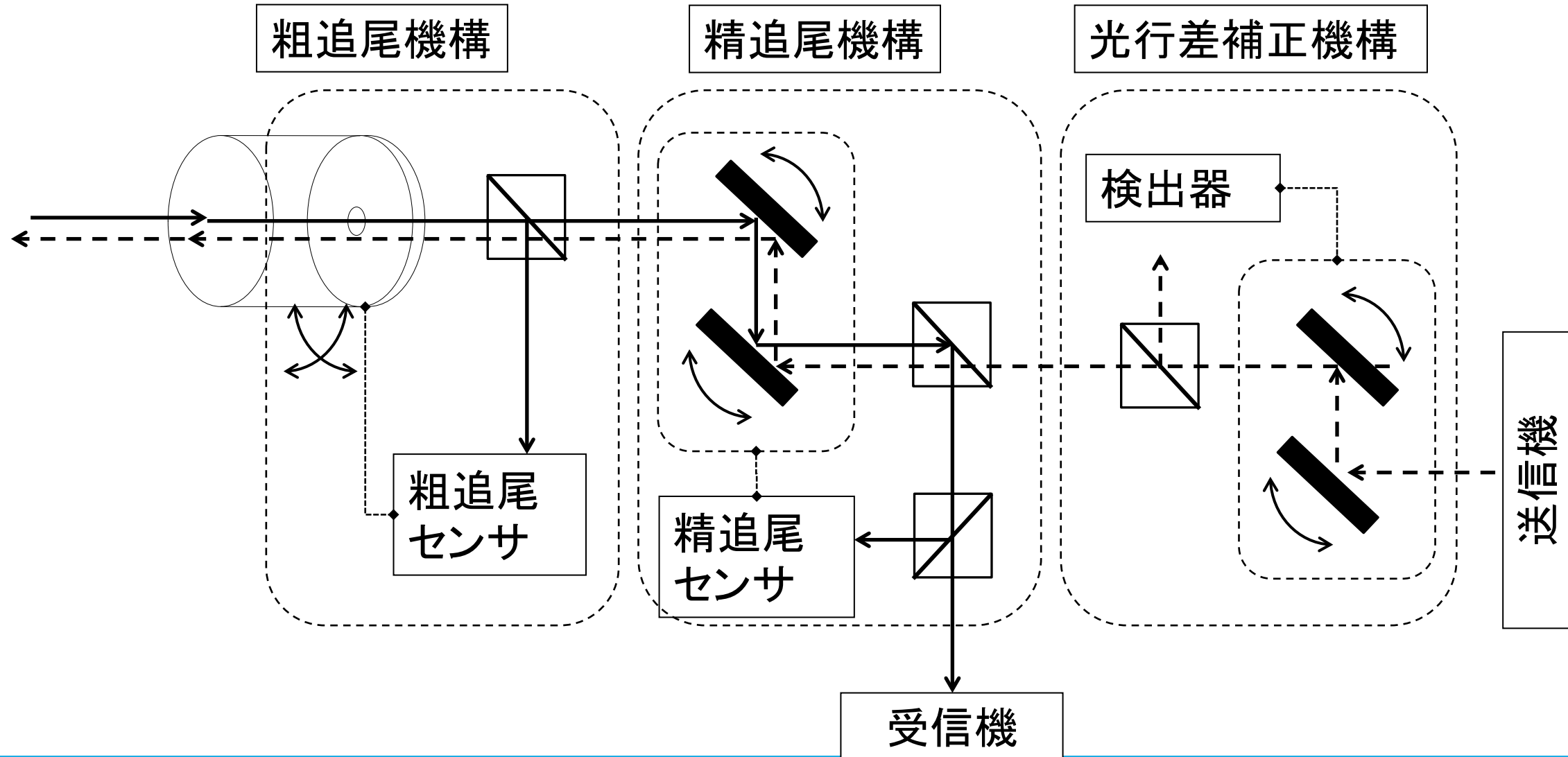
## 初期捕捉



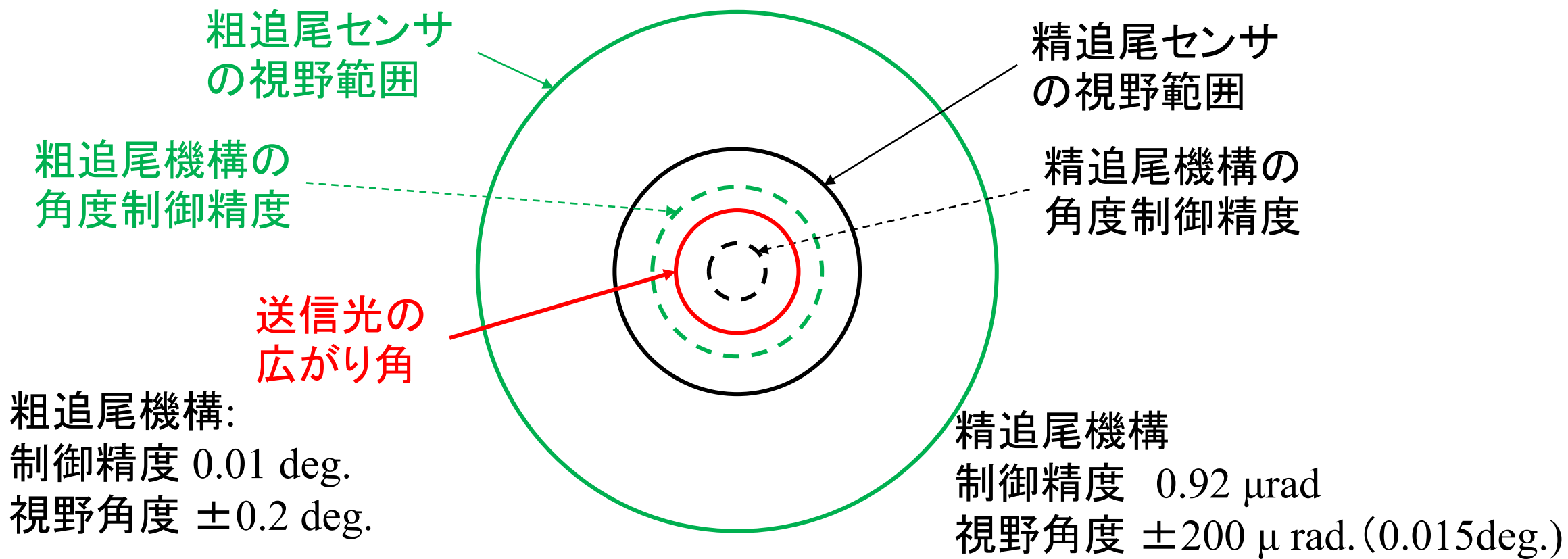
## 光行差補正



# 光通信装置の機能構成例



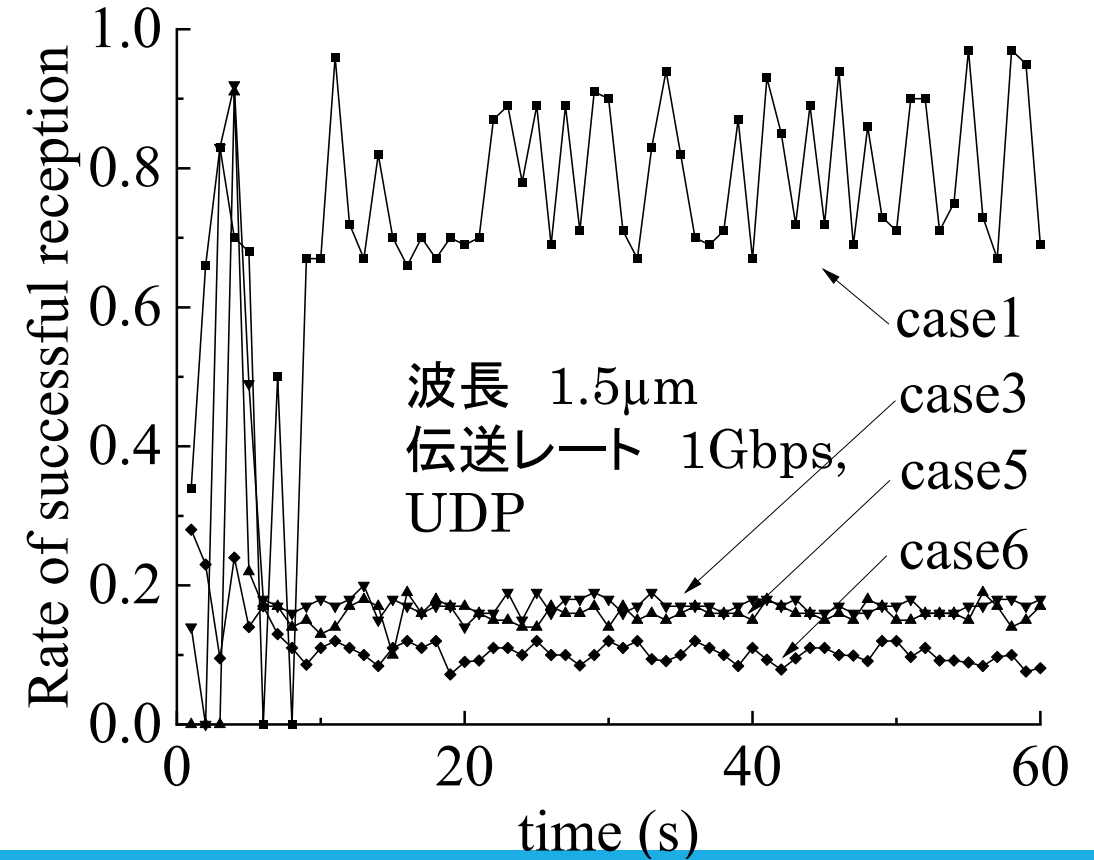
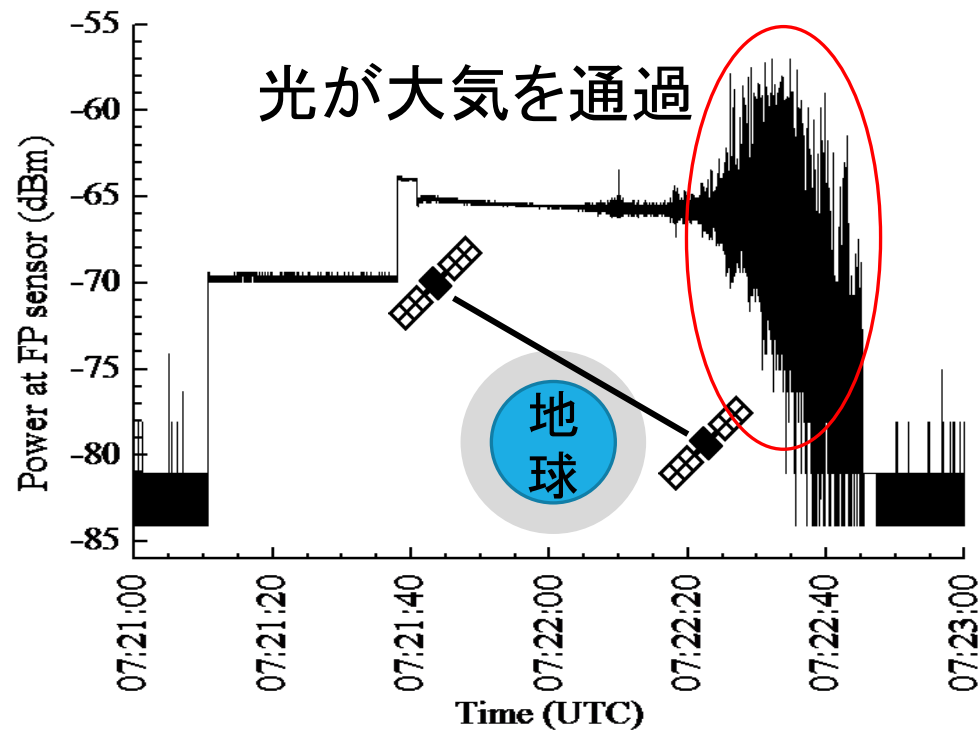
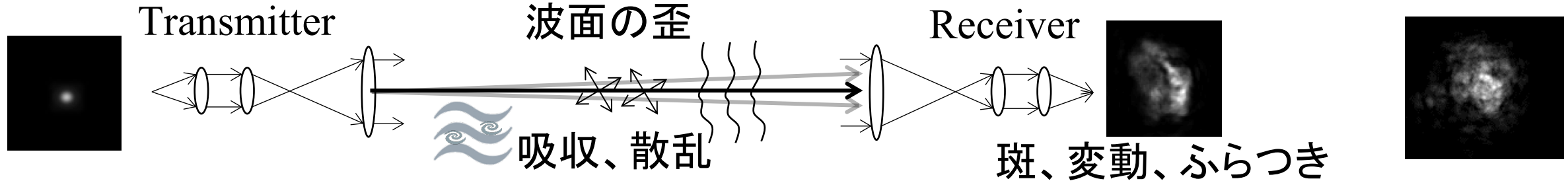
# 光通信装置の視野範囲と制御精度の例



T. Jono, et. al., "Demonstrations of ARTEMIS-OICETS Inter-Satellite Laser Communications", AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), 5461, 1355, pp. 1-7 (2006)



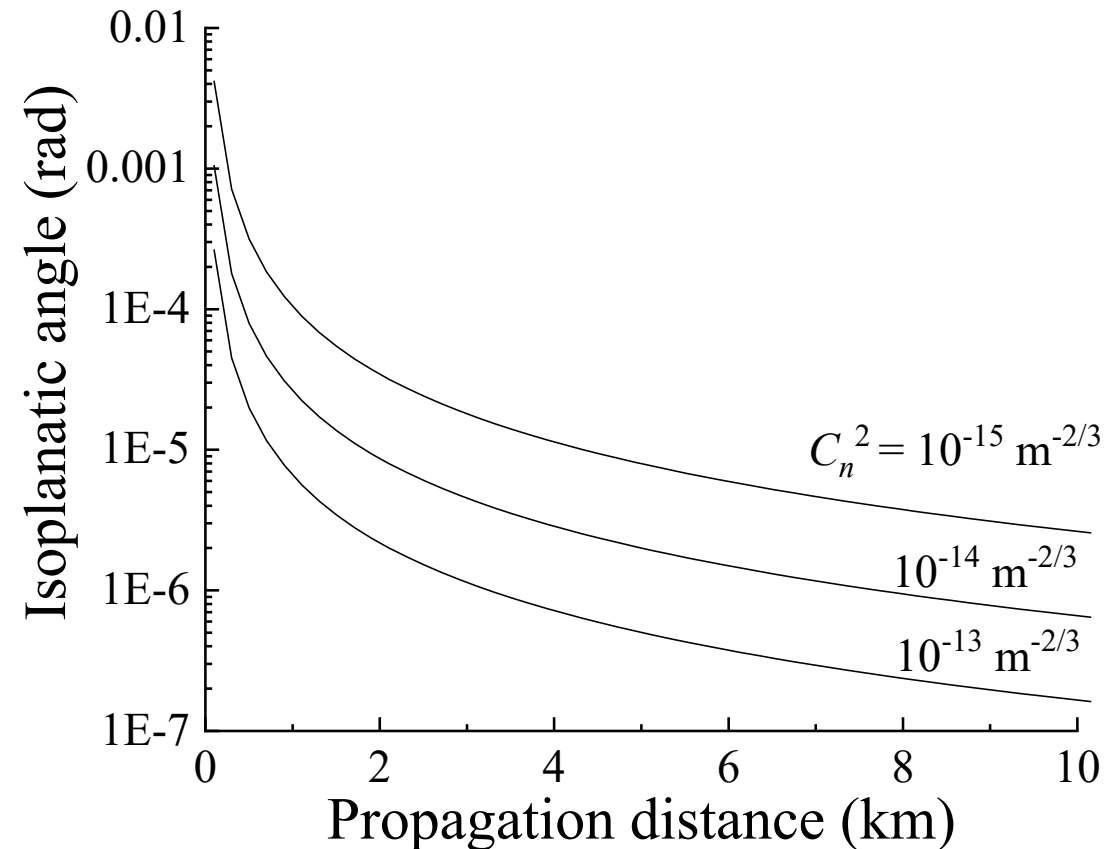
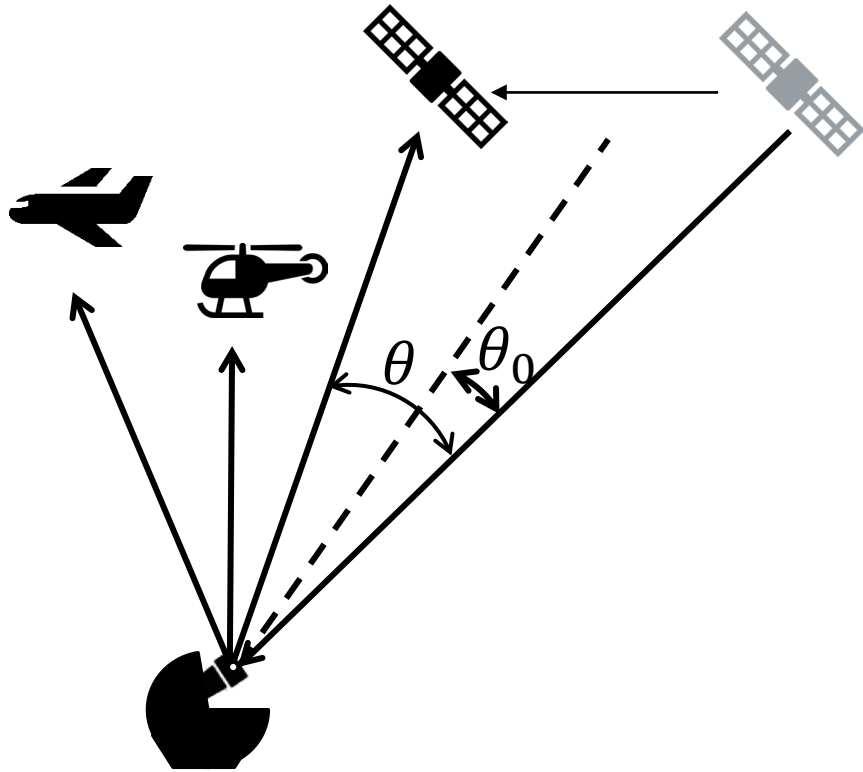
# 揺らぎの影響



Y. Takayama, et al., Proc SPIE 6709 (2007).

## 等波面離角(isoplanatic angle)

等波面離角 $\theta_0$ より大きな角度の方向では、異なる波面歪が生じる  
通信相手によっては、光行差補正角 $\theta$ が $\theta_0$ より大きくなる



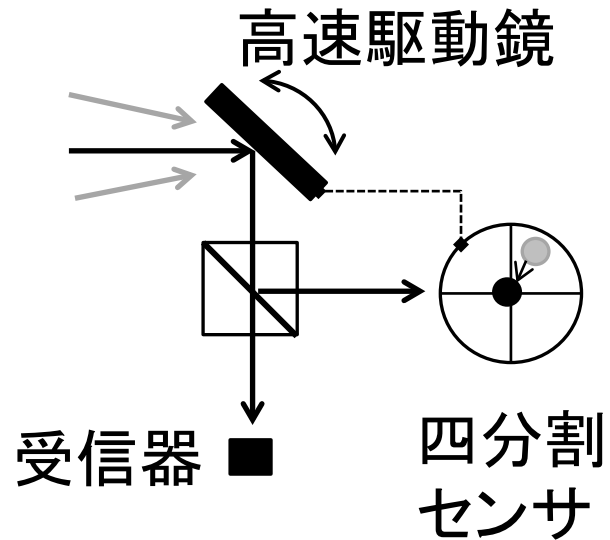
## 受信系での対策

問題: 光アンテナで通信光を受けても、受信器に光が入らない

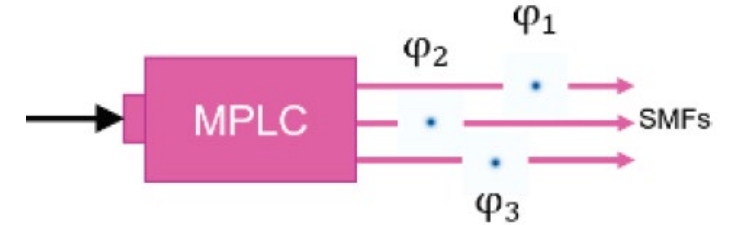
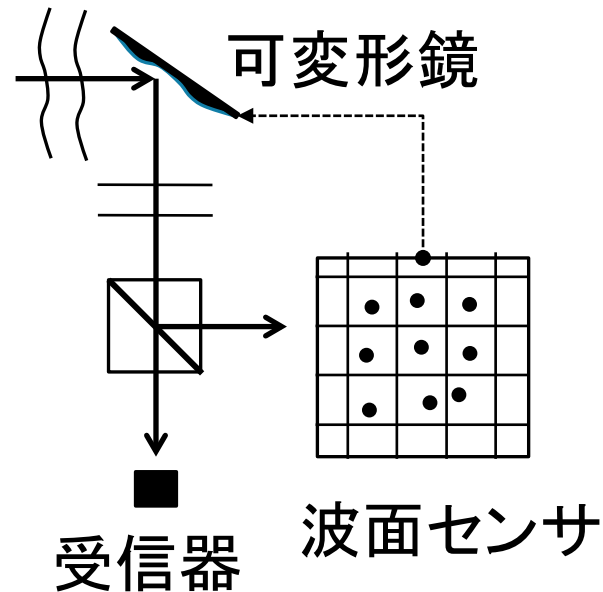
対策:

モードで分離 Multi-Plane Light Conversion

伝搬方向の補正

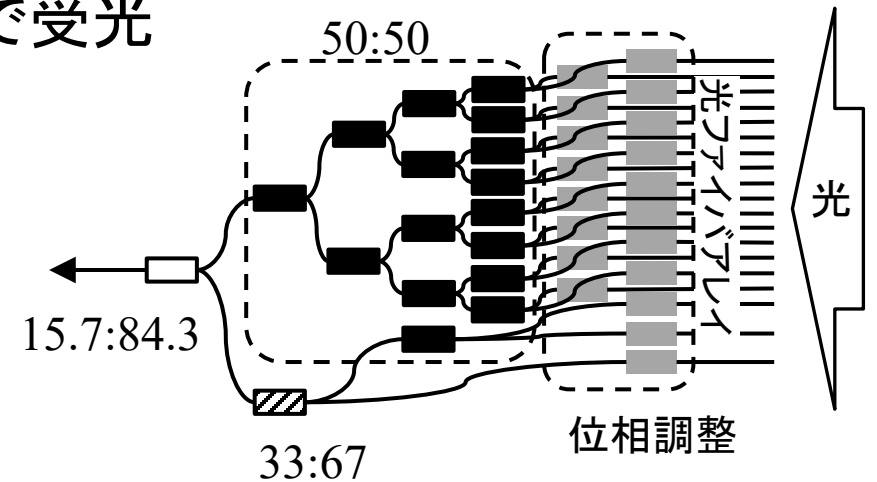


波面の補正



A. Billaud, et al., Proc. IEEE ICSOS, 2022.

面で受光



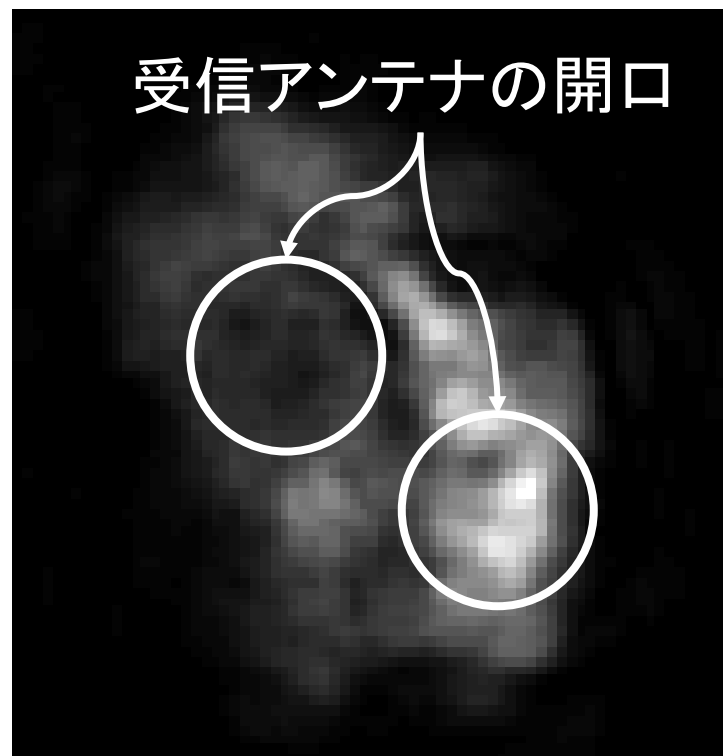
C. Geng, et al., Opt. Lett., 45, pp. 1906-1909, 2020.



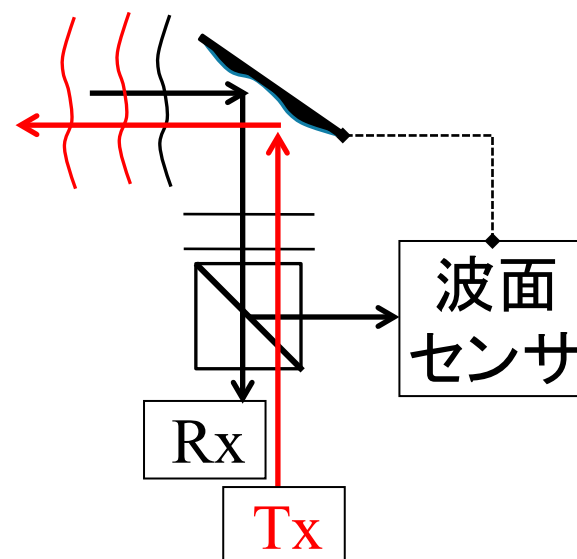
## 送信系での対策

問題: 受信側の光アンテナを安定して照射できない

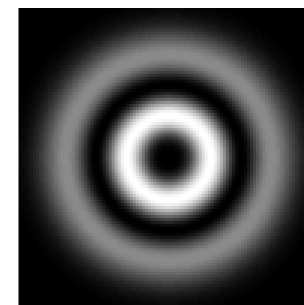
対策: 強度むらの低減



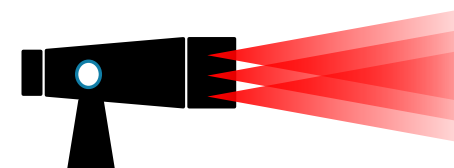
位相共役な波面の伝送



高次モード  
の伝送

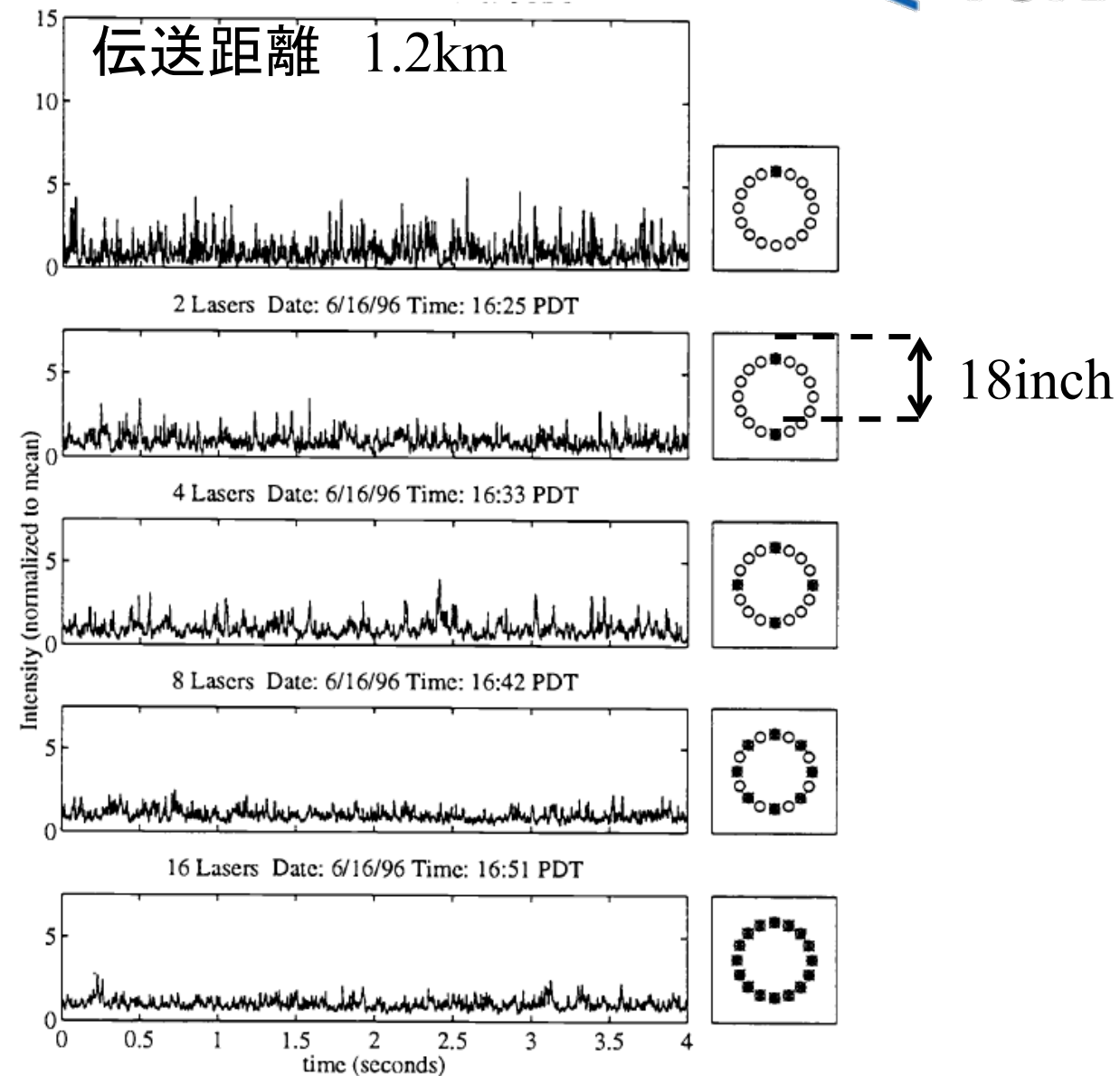
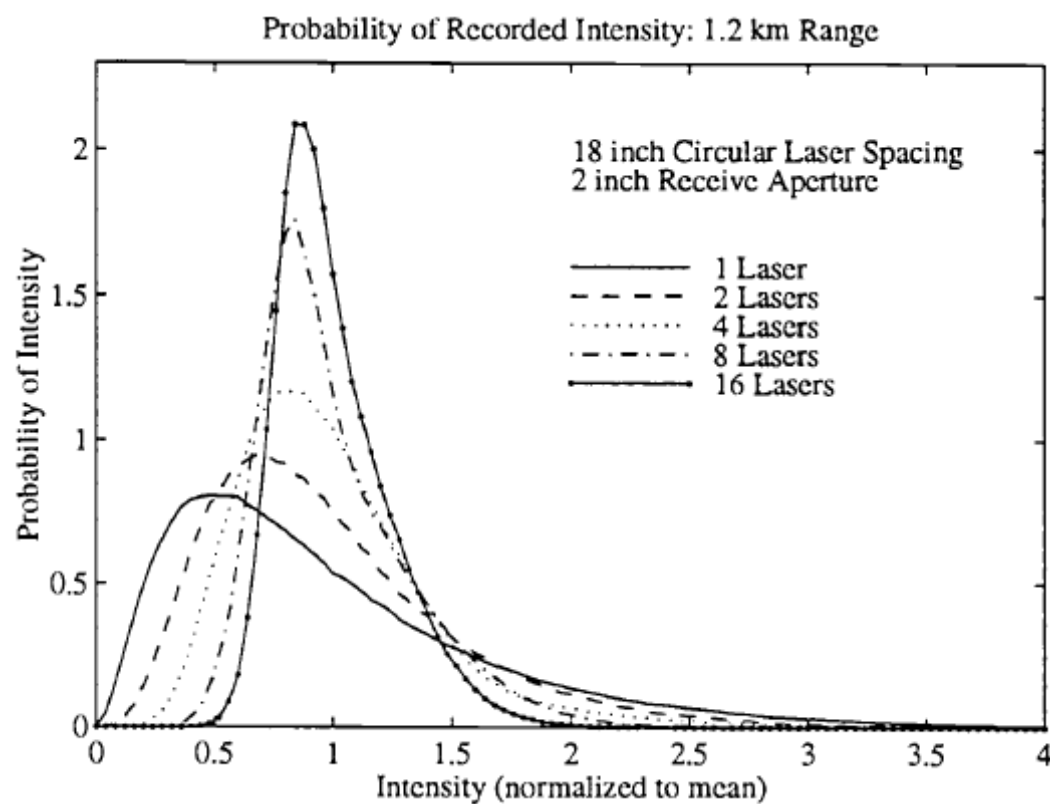


複数光の伝送



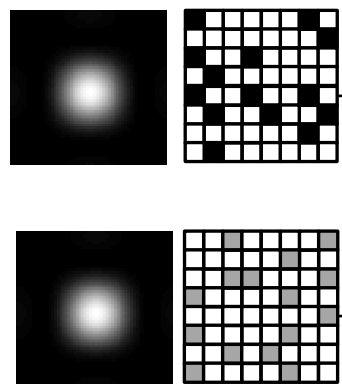
# 複数光の伝送

互いに干渉しない複数の光を  
異なる大気揺らぎを受けるように照射



I. I. Kim, et al., Proc. SPIE 2990, 102-113, 1997.

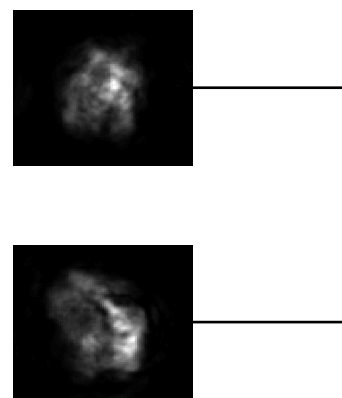
# 初期波面の操作による複数光伝送



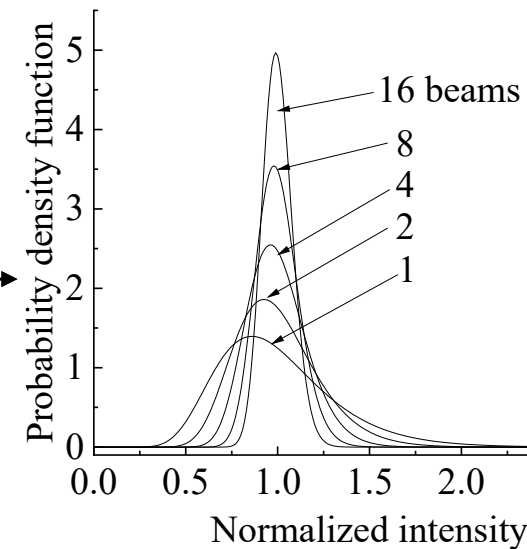
初期波面を操作

同じ伝搬経路

共通の波面歪



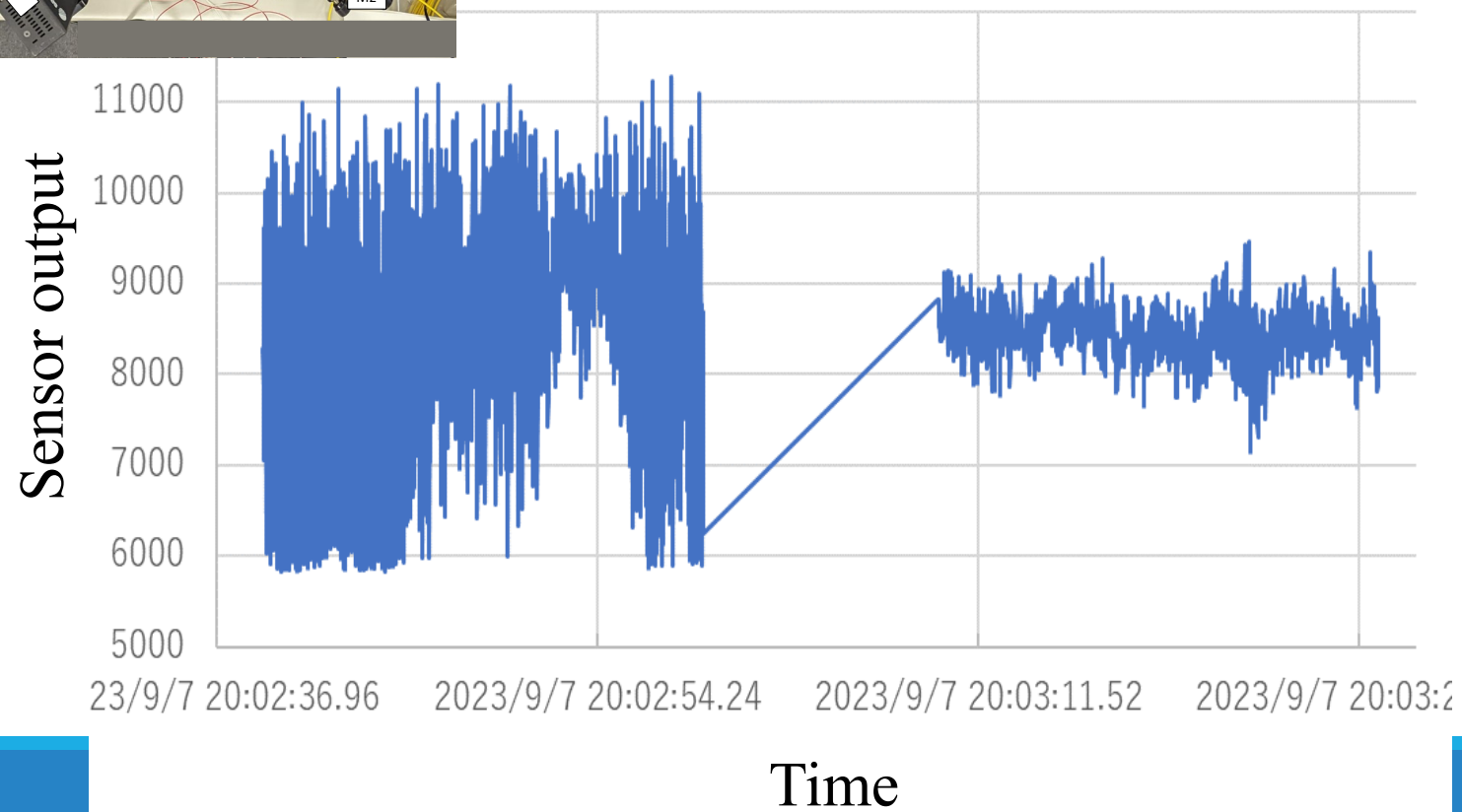
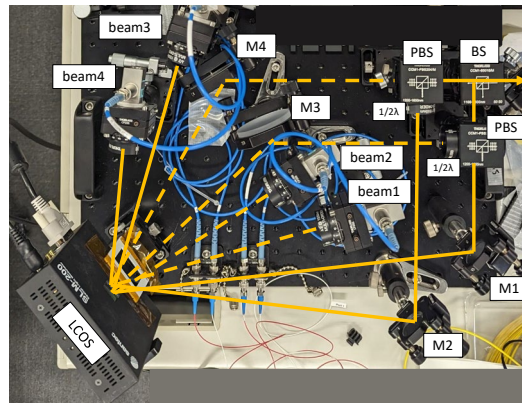
異なる強度分布



安定した照射

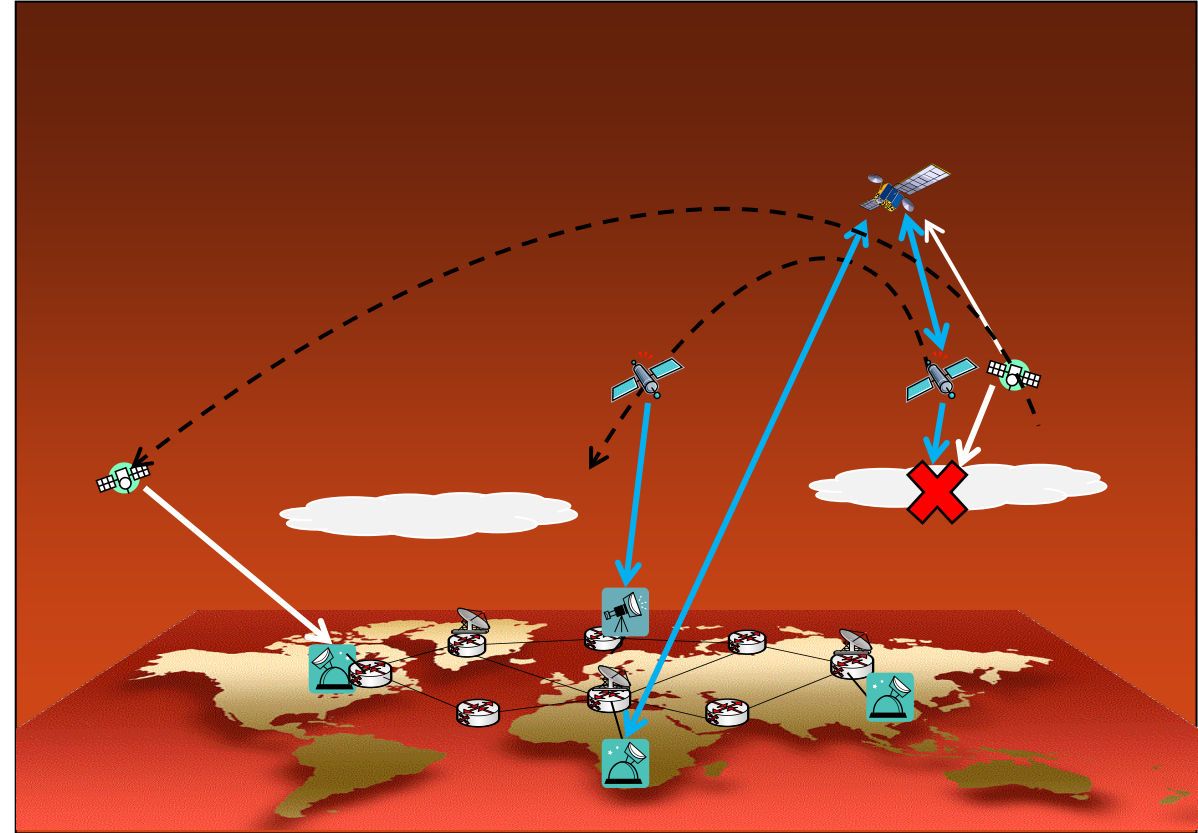
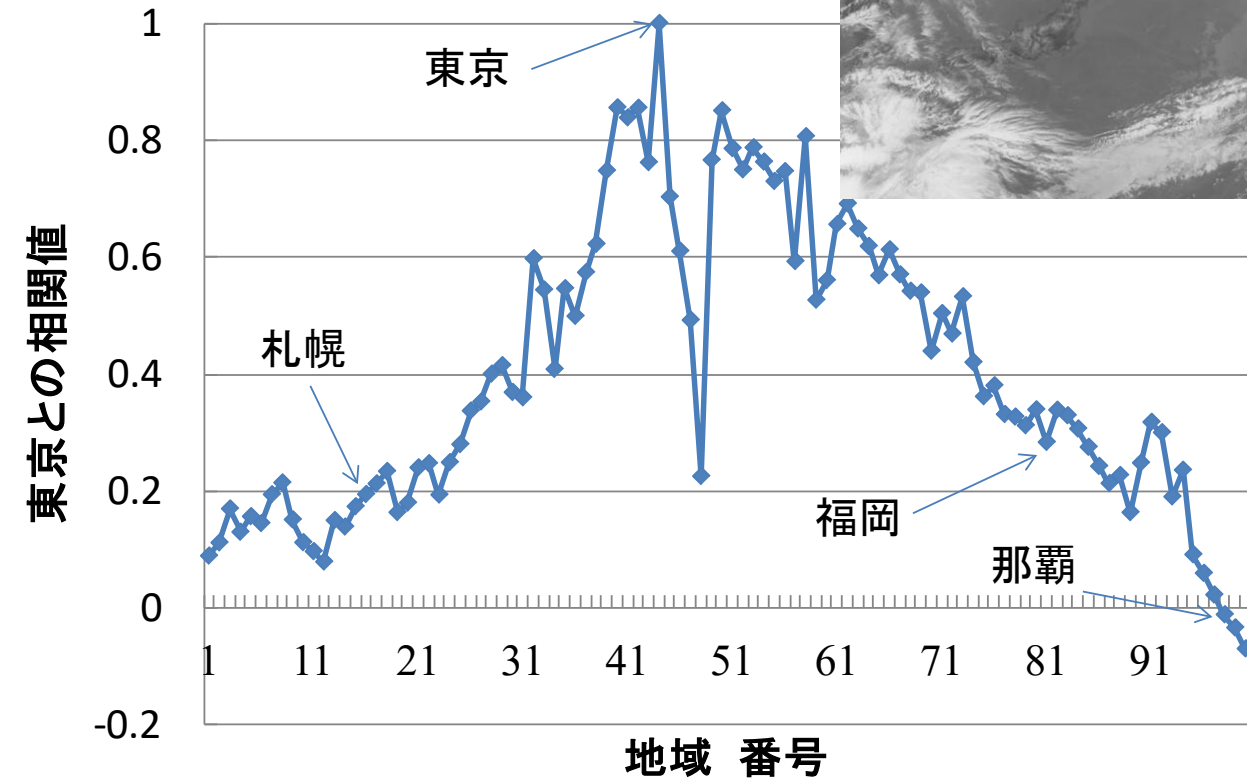
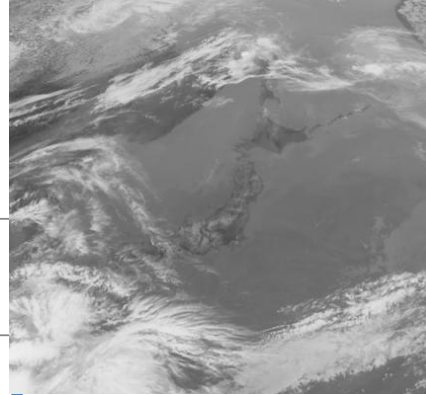


# 初期波面の操作による複数光伝送

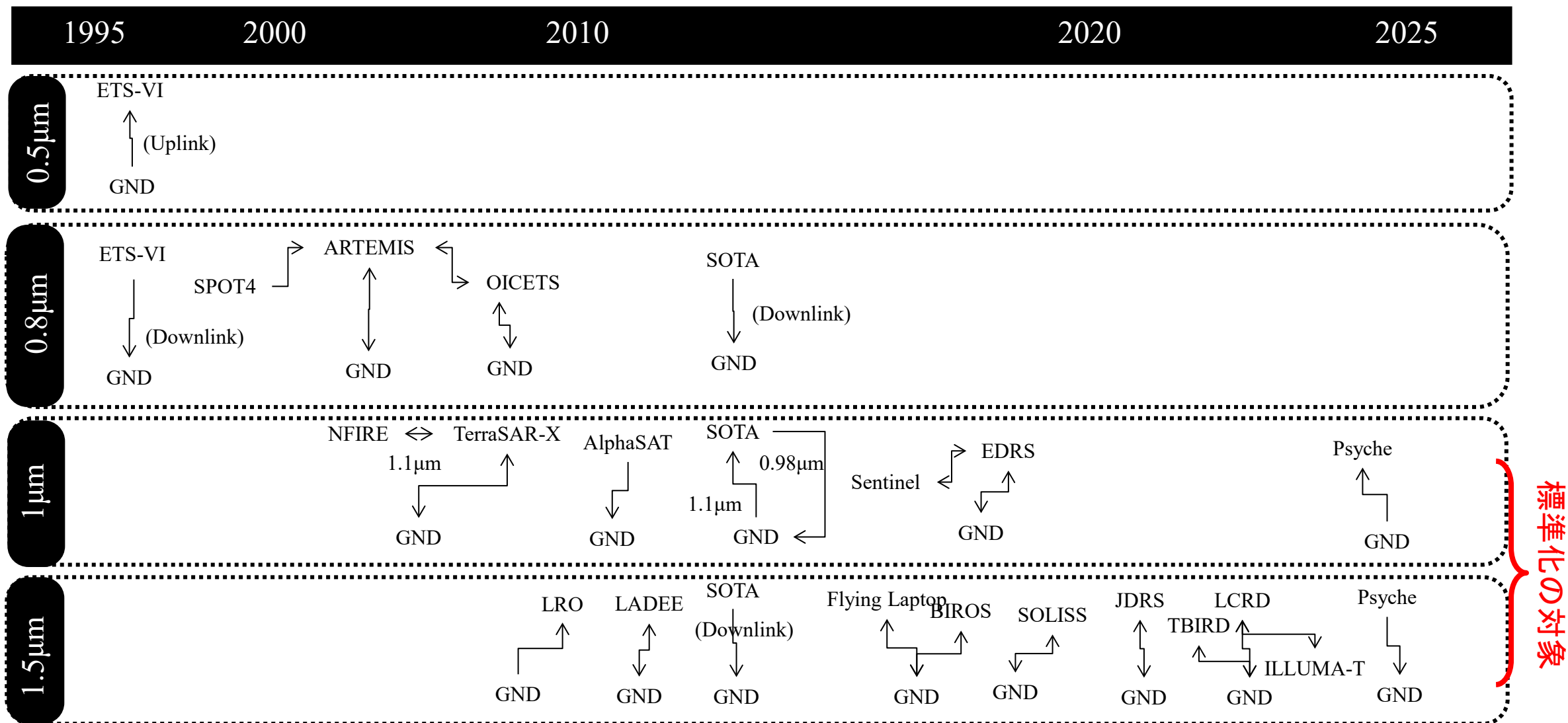


# 雲の回避

## 国内100地点間の雲の分布



## 波長





# 宇宙機関間会合



## IOP

The Interoperability Plenary (IOP) formed in 1999  
ASI, CNES, DLR, ESA, ISRO, JAXA, KARI, NASA, RFSA, UKSA



The Interagency Operations Advisory Group (IOAG),  
1999  
**Optical Link Study Group (OLSG), 2010**



The Consultative Committee for Space  
Data Systems (CCSDS), 1982  
**Optical Coding and Modulation (OCM), 2009**  
**Optical Communications (OPT), 2014**



The Space Frequency Coordination  
Group (SFCG) formed in 1980

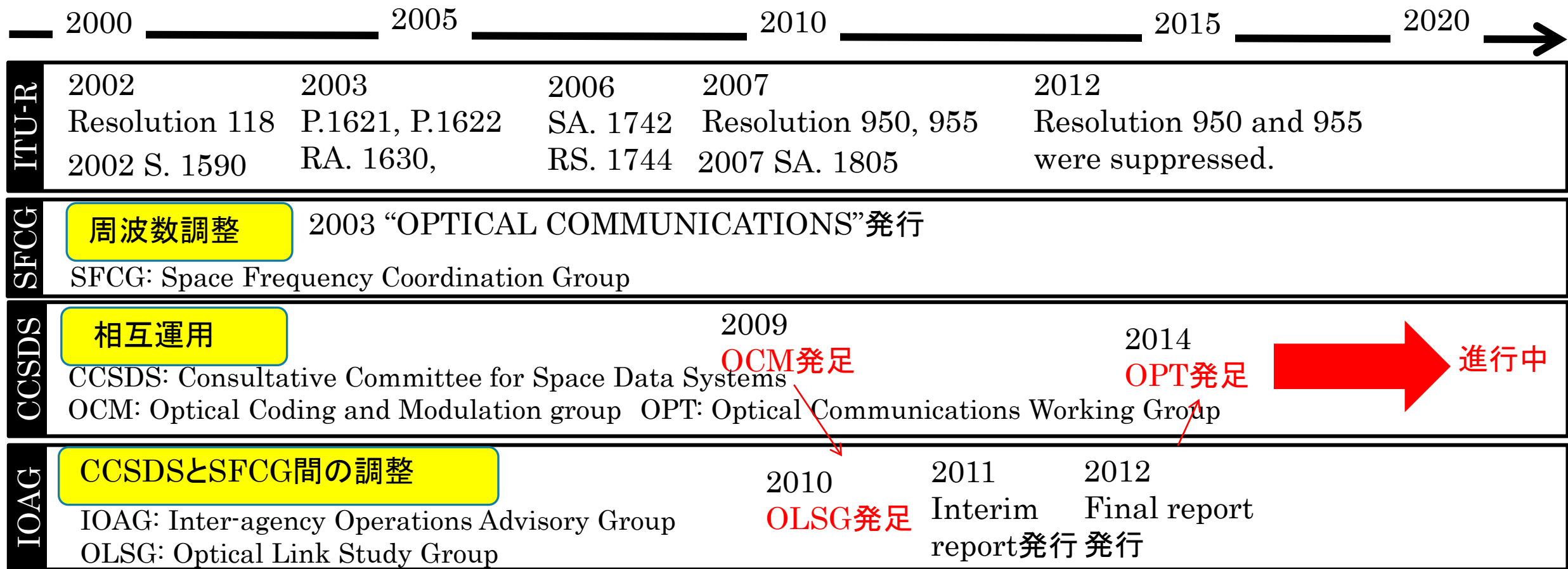


The International Committee on Global  
Navigation Satellite Systems (ICG), 2005



The International Space Exploration  
Coordination Group (ISECG), 2006

# 議論の流れ



# Space Development Agency, SDA



米国DoD

## Revision History

Optical Communications Terminal (OCT)  
Standard Version 3.0

Date	Document ID	Notes	Status
5/1/2020	N/A	Draft as issued for Transport Layer T0 RFP HQ085020R0001	DRAFT
6/5/2020	9100-001-01	This version incorporates editorial changes only.	DRAFT
2/5/2021	9100-001-02	Final version for SDA Tranche 0. Version 2.0	FINAL
5/14/2021	9100-001-03	Draft T1 OCT Standard Version DRAFT 3.0	DRAFT
8/10/2021	9100-001-04	Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.0	DRAFT
8/27/2021	9100-001-05	Optical Communications Terminal (OCT) Standard Version 3.0	FINAL

# まとめ

空間光伝搬通信の現状

空間光通信に特有の技術

揺らぎの影響

揺らぎへの対策

標準化の議論