

光無線通信の課題と将来展望

2016年3月17日

早稲田大学名誉研究員

松本 充司



早稲田大学
WASEDA University



FSOとは

光信号が、ファイバなどの媒体を用いることなく、自由空間を伝搬する技術

<長所>

- 傍受が困難で、セキュリティ面で安全な光ワイヤレスシステム
- ケーブル敷設に関わる大規模な土木工事を要しない
- 工事期間が短く、安価、導入が容易
- ライセンスフリー
- 数kmまでの高速通信を可能

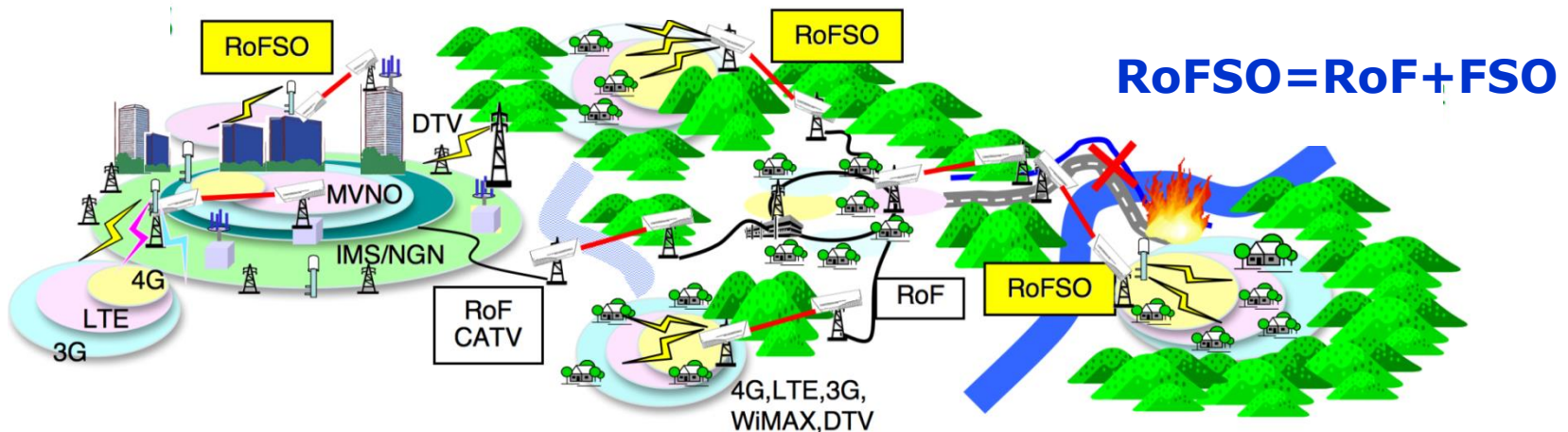
<短所>

- 気象条件に対する依存度が高い(霧, 雨, 雪, 塵粒子など)
- 障害物を介する伝搬不可
- 大気の影響を受けやすい(大気の変動)

FSOのアプリケーションシナリオ

光ファイバ:

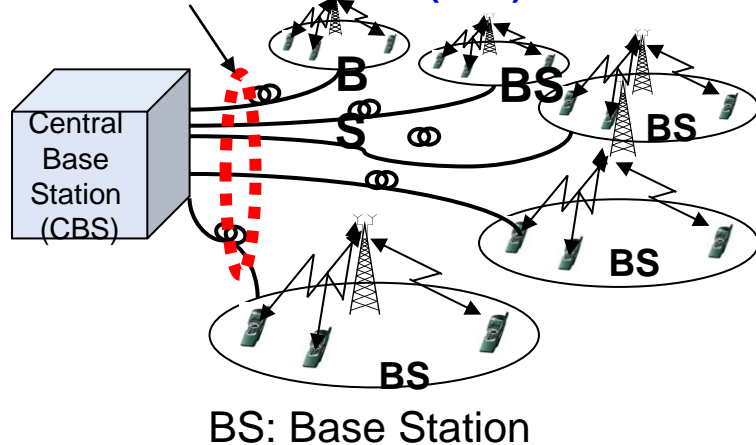
- 広帯域サービス提供の理想的な手段であるが建設に時間を要する。
 - 採算性や投資効率の面で光ネットワークの整備が進みにくい地域も多く存在する。
 - 都市部においても光ファイバの引き込みの困難な集合住宅、管路や電柱がなく容易に光ファイバの敷設ができない地域も存在する。
- 自由空間光通信(FSO)およびその延長上のRoFSOシステムは、
 - 光ファイバNWの代替技術となり得る(広帯域NW接続が不十分な地域に有効)
 - 魅力的なシステム:メトロネットワーク拡張, ラストマイルアクセス
 - 従来: 光ワイヤレス通信は隙間的な利用, 今後は補完と根幹の両方



Radio over Fiber (RoF)

- **RoF Application:**
- Central Station(CS)から遠隔アンテナ(RAU)にRF信号を分配するための光ファイバリンクとして使用
- **RoF Technology:**
- 広帯域無線通信を容易にするためのRF無線および光ファイバ・ネットワークの統合

Radio Over Fiber Links (RoF)

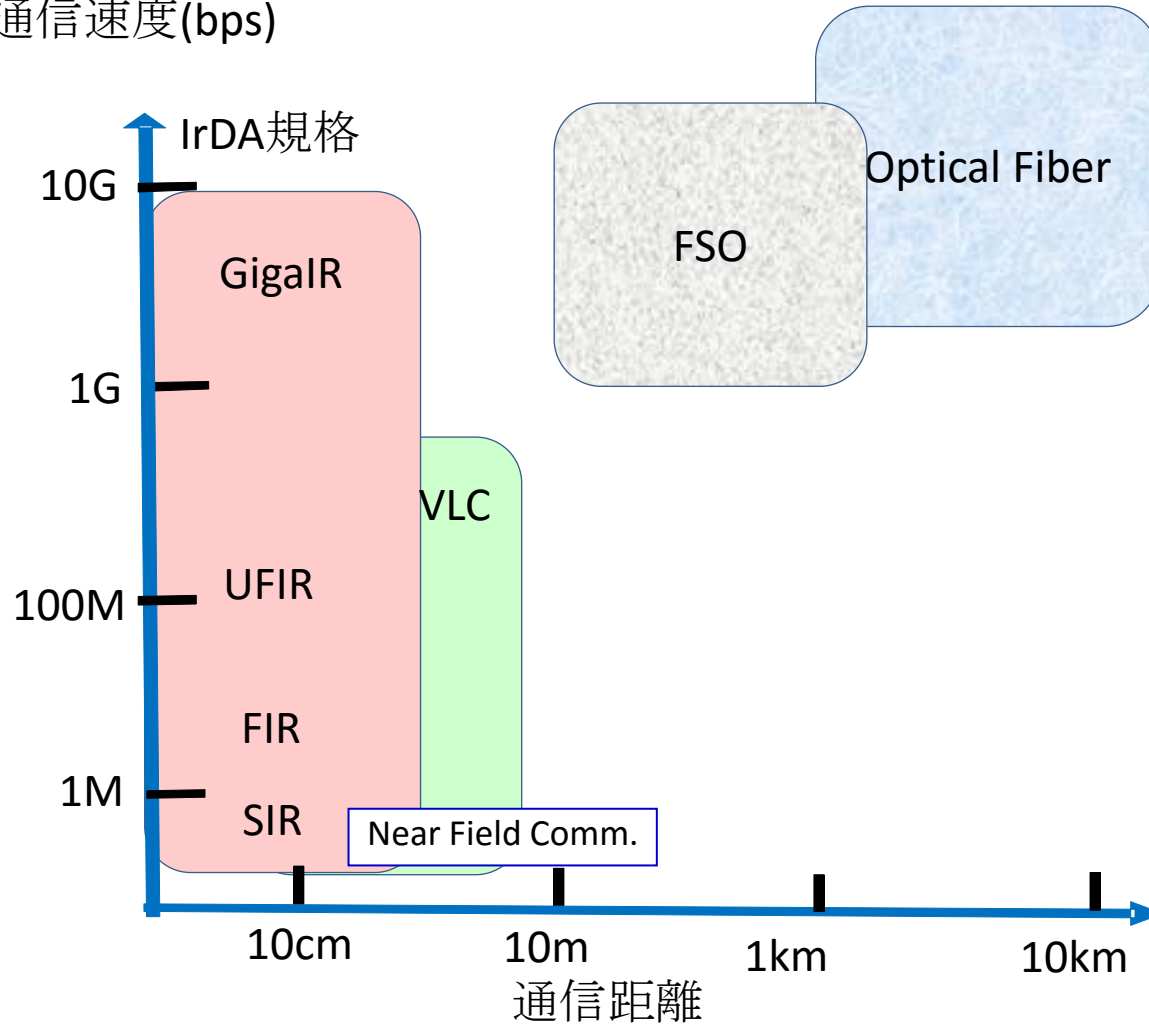


長所: 安価, 長距離, 低損失のRF信号の伝送

短所: 敷設されている光ファイバに依存。

光無線通信の通信距離と速度

通信速度(bps)



統合型光無線システム研究開発

2004～2005年 「フル光接続光無線(FSO)の高速化」
1.5 μ m帯用いてファイバと空間をダイレクトカップリング

空間での10Gbpsの
高速通信の実現

空間でのWDM伝送の実現

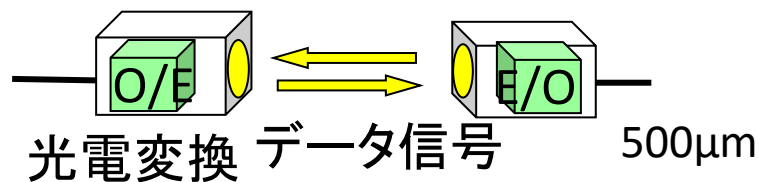
FSO

RoF

目標: 統合型光無線システム(RoFSO)による
ヘテロジニアスワイヤレスサービス提供の早期推進

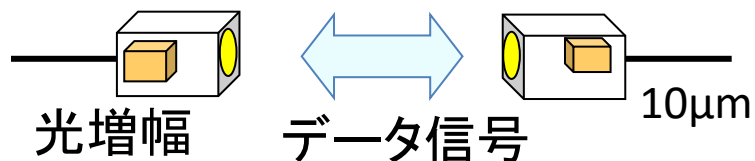
統合型光無線システムの研究開発

既存光無線システム



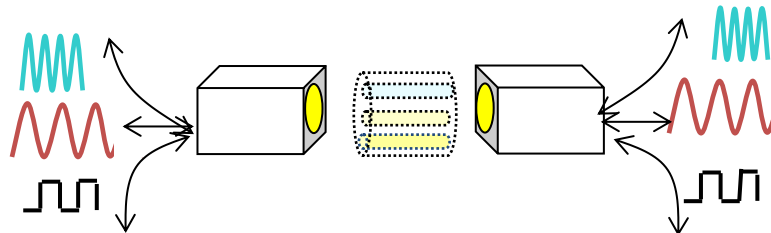
既存システムの課題
伝送速度限界: 2Gbps
インタフェースに制約

フル光接続光無線システム (物理的なブレークスルー技術)



Fiberと等価な物理的伝送路提供

Radio on FSO統合型光無線システム (サービスのブレークスルー技術)

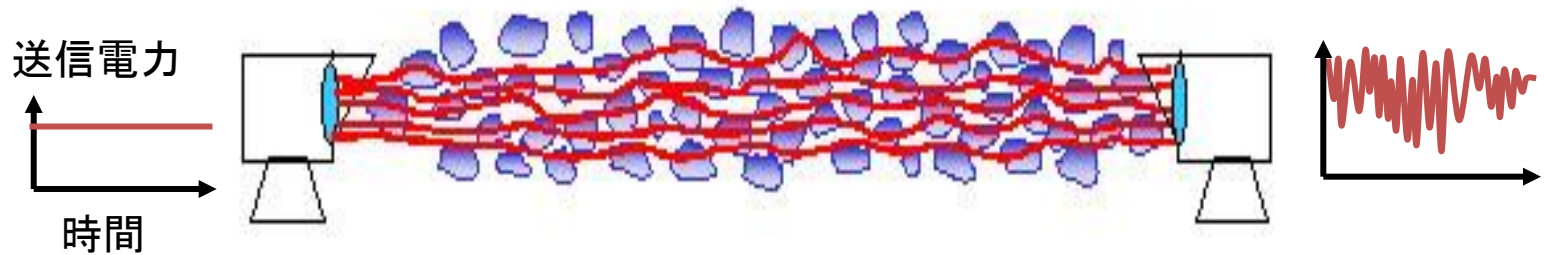
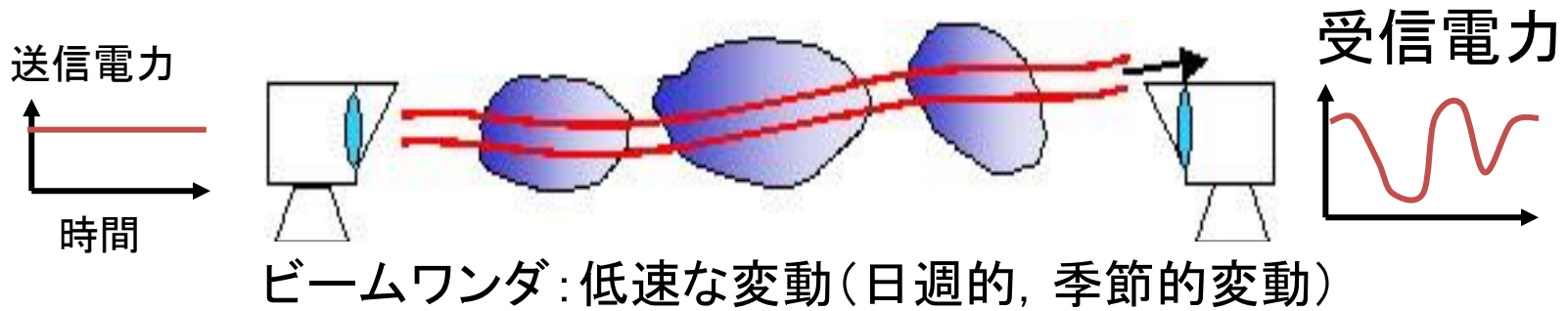


Fiberと等価なサービス提供

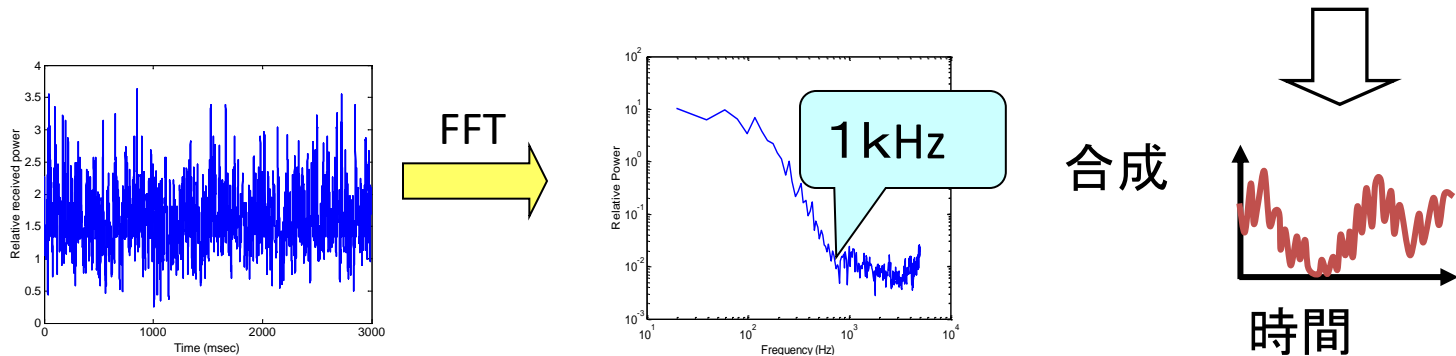
大気環境要因

Items	Effects	Solutions	Remark
雨	<ul style="list-style-type: none"> ■ 光子吸収 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 送信電力の増大 	影響は小さい
エアロゾル ガス・煙	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mie 散乱 ■ Rayleigh 散乱 ■ 光子吸収 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 送信電力の増大 ■ ダイバーシティ技術の導入 	影響はあるが深刻ではない
霧	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mie 散乱 ■ 光子吸収 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 送信電力の増大 ■ Hybrid FSO/RF 	濃霧はリンクの範囲を制限する ~ 500m
乱流 (Turbulence)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 放射照度変動 (scintillation) ■ Phase fluctuation ■ Beam spreading 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Diversity technique ■ Coding ■ Robust modulation techniques ■ Adaptive optics 	<ul style="list-style-type: none"> ■ <u>高温下で影響大</u> ■ Turbulence and thick fog do not occur together

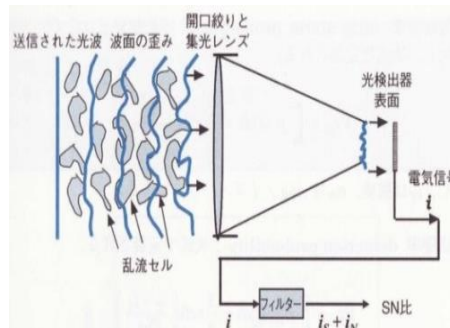
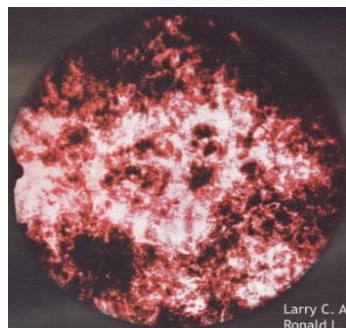
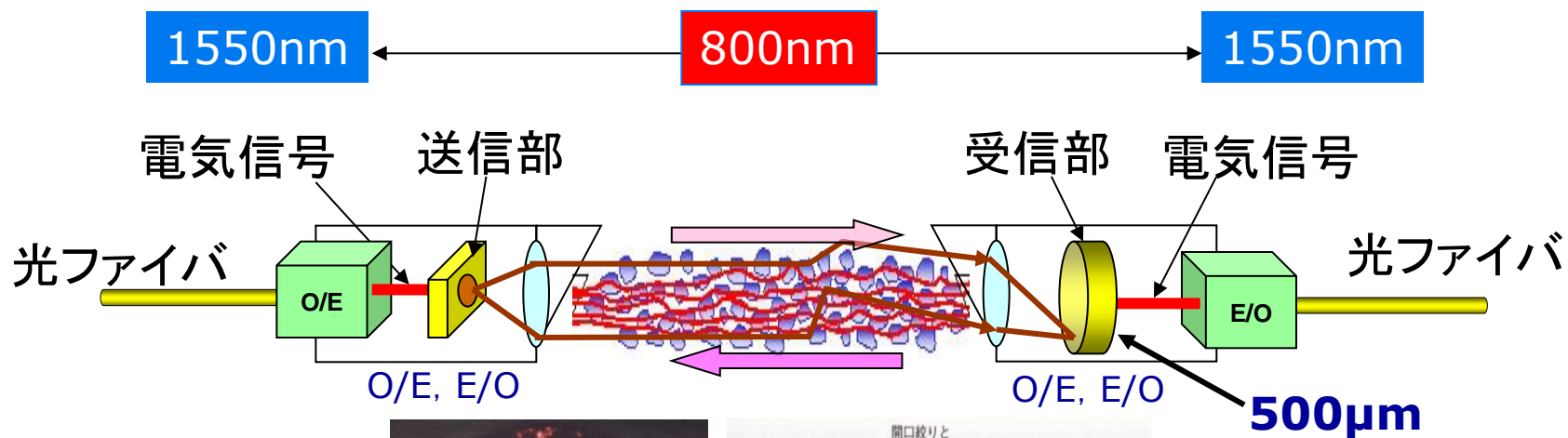
大気揺らぎの影響



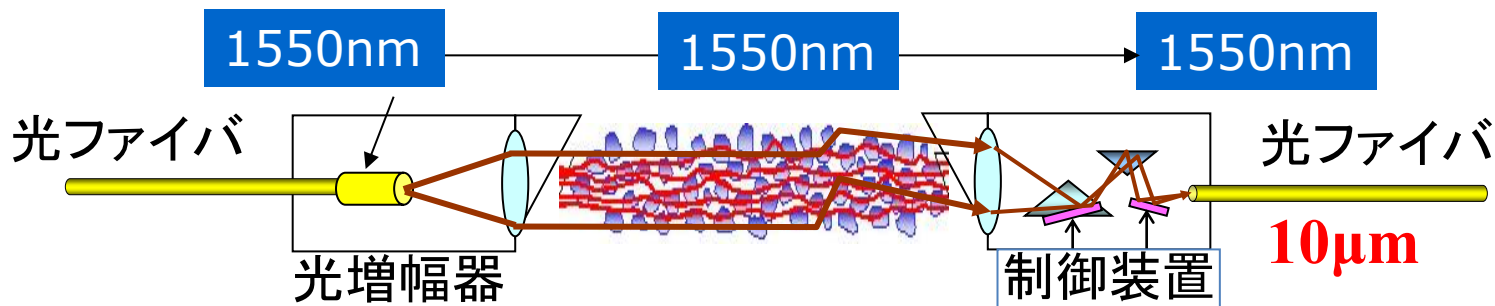
シンチレーション: 高速変動(従来型追尾方式では追従不可でPDのマージンとして対処)



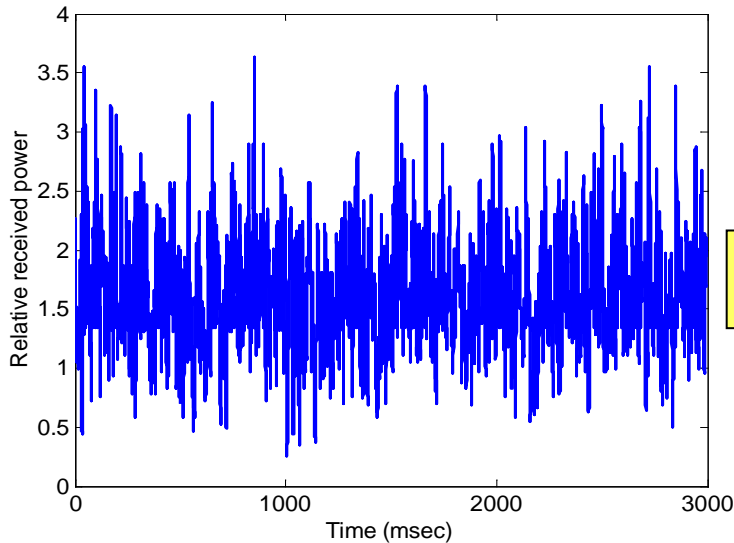
従来システムと提案システム



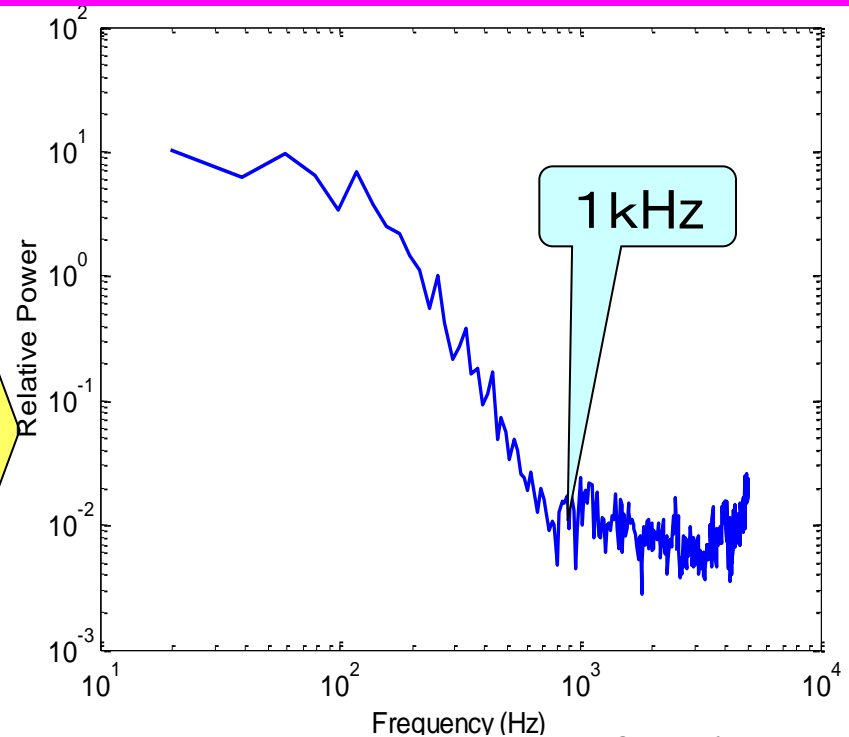
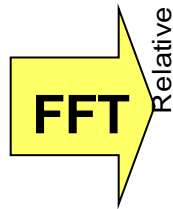
Reference: L. C. Andrews et al.,
Laser Beam Propagation Through
Random Media., SPIE- 1998



Scintillation (intensity fluctuations)



Optical beam intensity fluctuation



Frequency response of received power variations

- 一般的な変動率は数Hz～1kHzの範囲に分布する
- 受信光強度の100Hz 以上の早い変動は劇的に減少する。
しかし、この影響を補償しなければファイバ直接結合できない

大気乱流による電力変動

大気乱流通過伝搬時に起因する受信放射照度の変動は“シンチレーション”と呼称

Scintillation theory: The variance of the log-amplitude fluctuations, σ_A^2 can be related to the C_n^2 .

For horizontal path considering a plane wave, the following relations are applicable in determining C_n^2 :

$$\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

Rytov分散式
(1950-70年代)

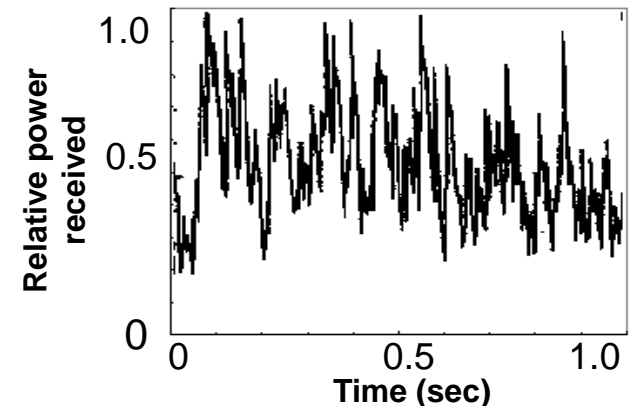
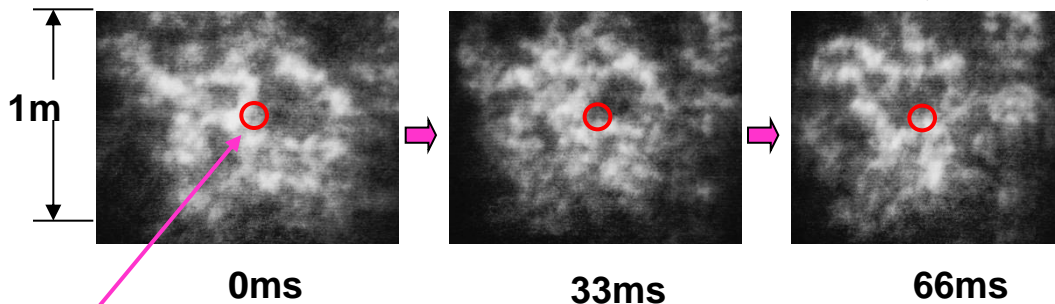
σ_I^2 : scintillation index
(normalized variance of irradiance fluctuations)
 I : optical wave irradiance (放射照度)
 C_n^2 ($m^{-2/3}$): index of refraction structure parameter
 k optical wave number ($k=2\pi/\lambda$)
 L propagation path (m)

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}$$

正規化された
強度変動の式

Cn^2 : 5×10^{-15} (week) < moderate < 5×10^{-14} (strong)

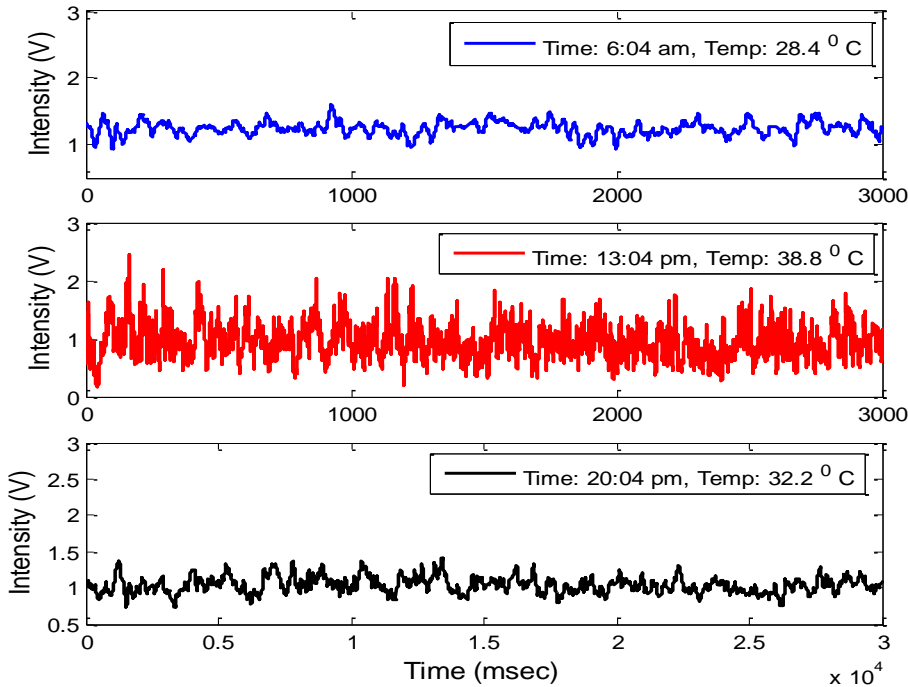
シンチレーションによるビームパターンの変動例



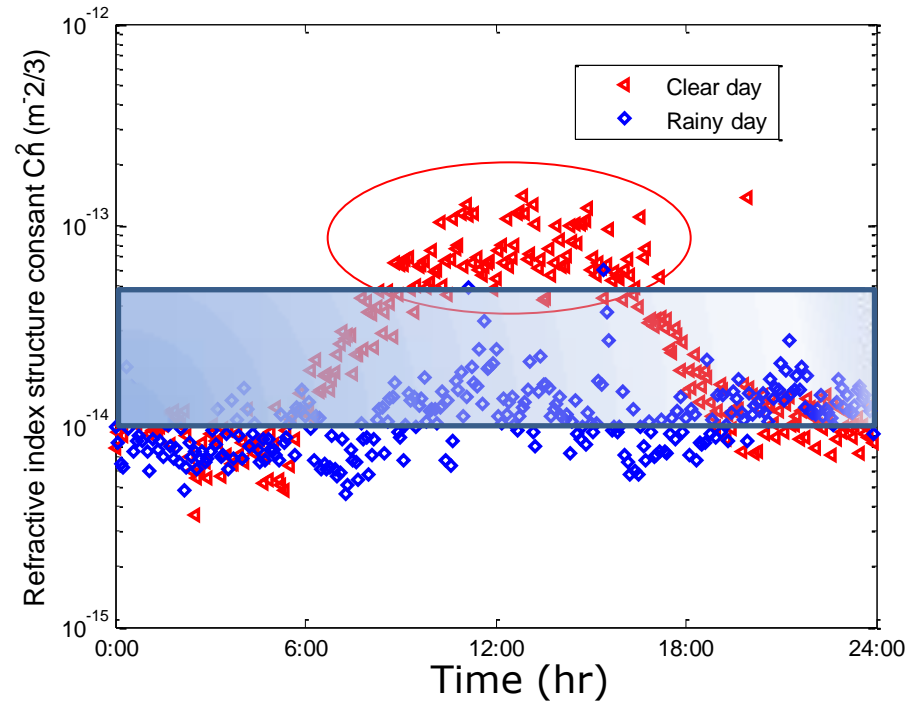
After 1km transmission, 100 mm radius lens, $\lambda=800\text{nm}$

Referred to experimentally, σ_I^2 is saturated with from 1 to 2 in the multiple scattering effect.

大気乱流の評価



晴天時の異なる時点における強度変化



晴天時と雨天時の C_n^2

- C_n^2 is refractive index structure constant, used to indicate atmospheric turbulence strength

▪ Weak : $10^{-15} \leq C_n^2 < 10^{-14}$

▪ moderate: $10^{-14} \leq C_n^2 \leq 5 \times 10^{-14}$

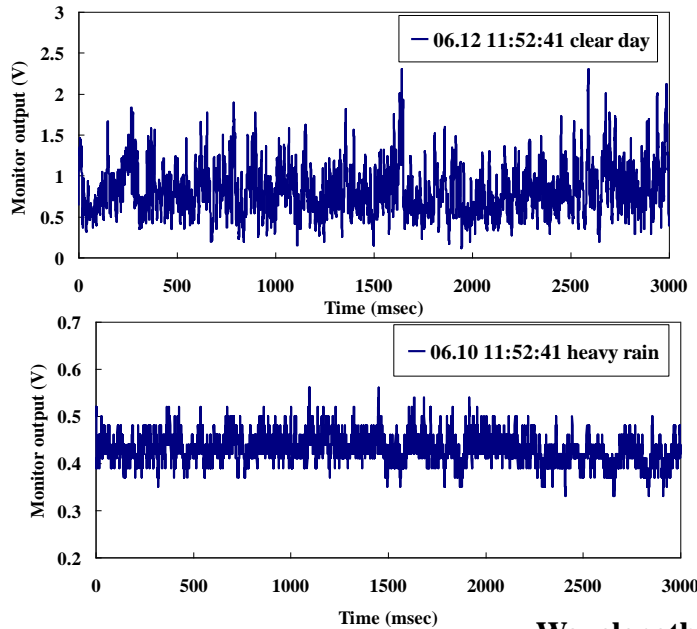
▪ strong: $5 \times 10^{-14} \leq C_n^2$

- Turbulence is strong at noon time, especially in sunny days and weak at sunrise, sunset and rainy days

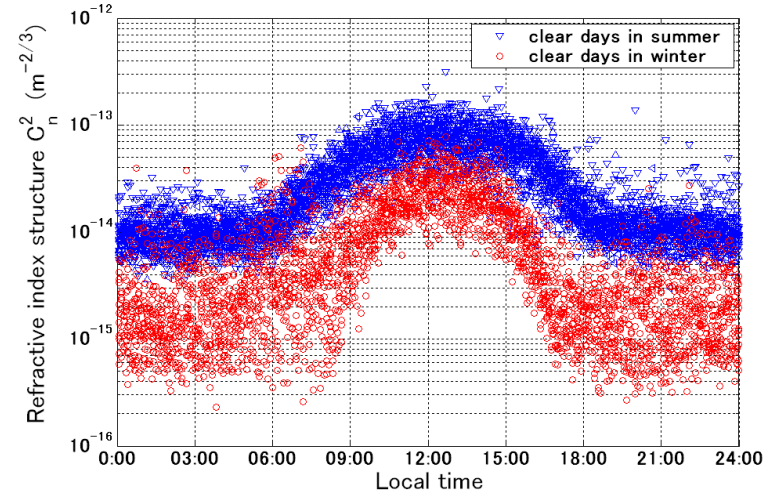
$$C_n^2 = \frac{\langle [I - \langle I \rangle]^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} / (1.23 \times (2\pi / \lambda)^{7/6} \times L^{11/6} \times [1 + 1.06 \times D^2 2\pi / (\lambda \times 4l)]^{-7/6})$$

大気ゆらぎの計測

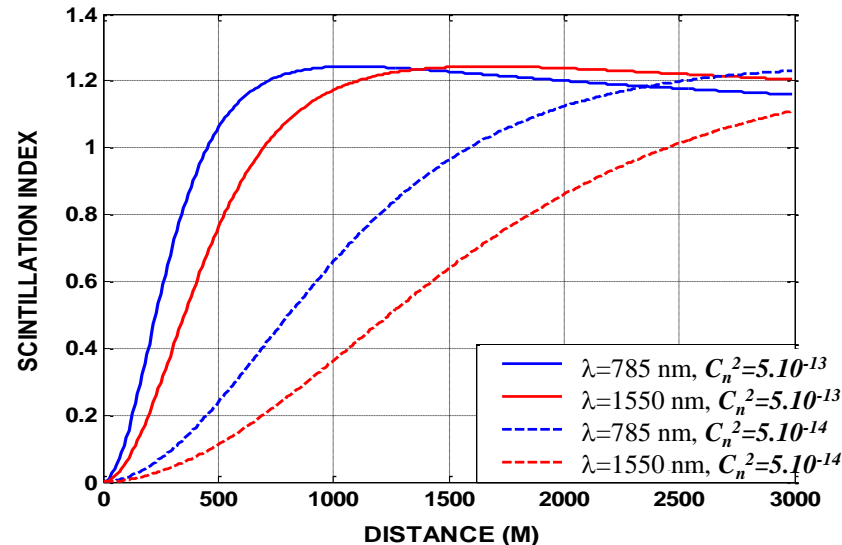
Scintillation (intensity fluctuation measurement)



夏季と冬季の C_n^2 変動



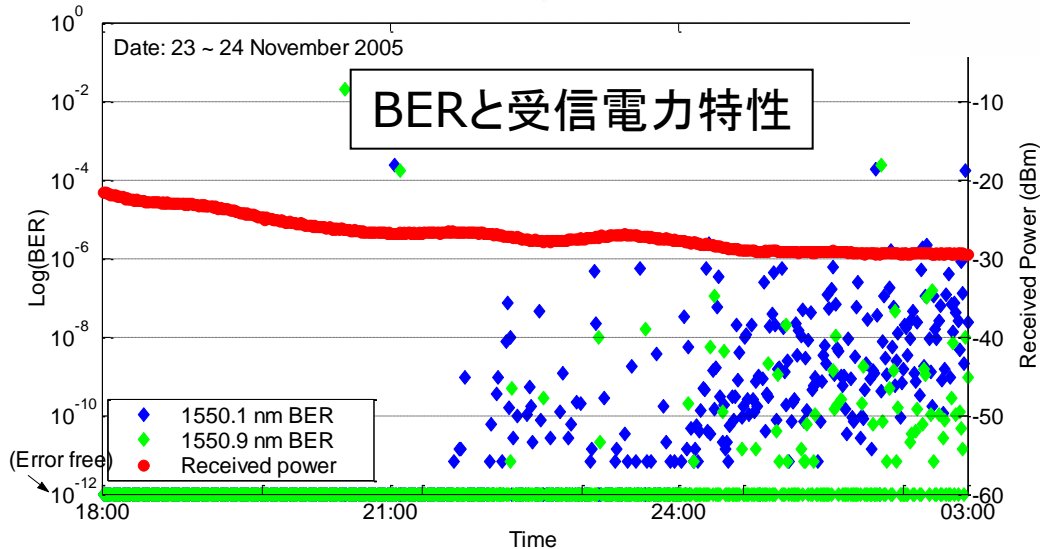
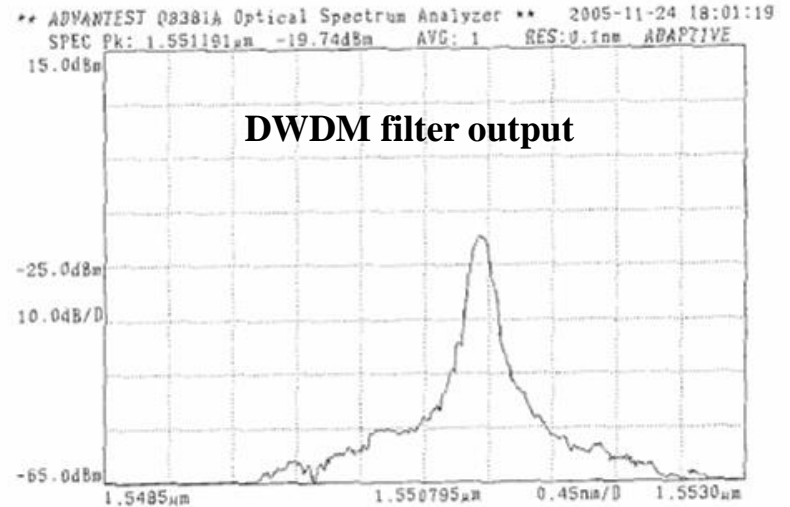
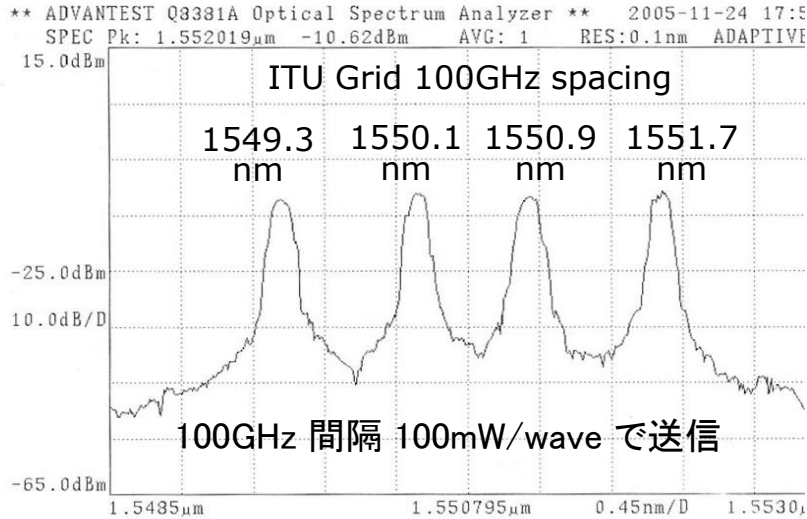
Wavelength dependability of a scintillation index



Scintillation Index vs. Distance

DWDM 伝送実験

WDM受信信号スペクトラム

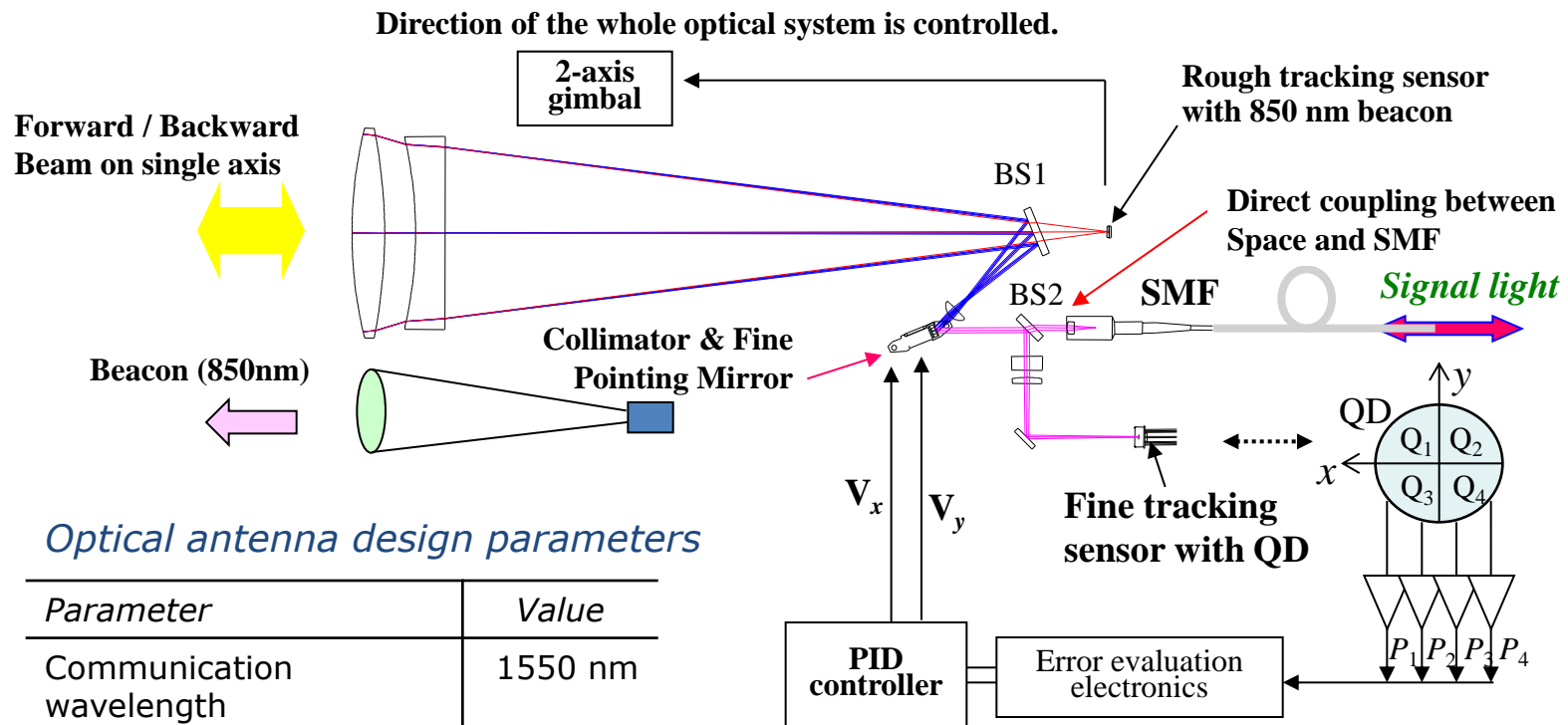


- 2.5 Gbps X 4 ch,
受信電力 100mW/波長
- 波長間の干渉や変動もなく,
安定的な通信が得られた。

光アンテナの説明

追尾メカニズム&光アンテナモジュールの光学配置

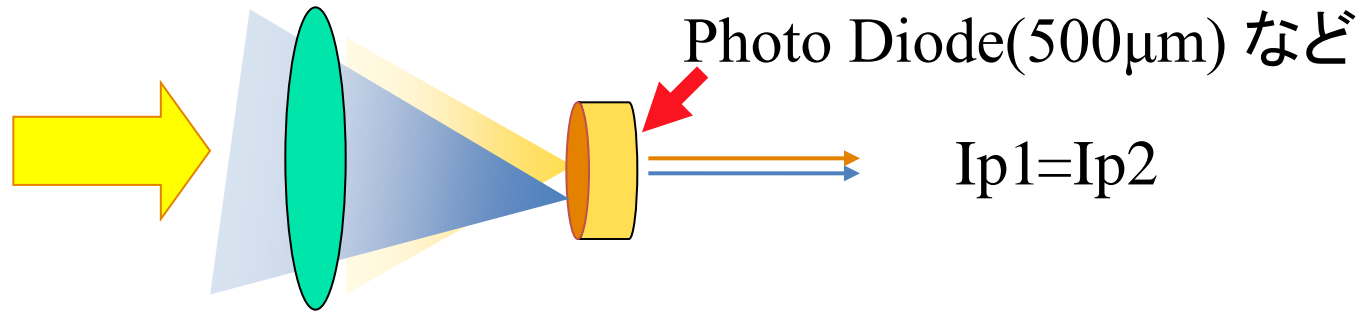
- 850 nm wavelength is used for initial alignment and coarse tracking.
- For fine tracking process used a part of 1550 nm wavelength signal light.
- Using the information the FPM controls and steers the received beam to the SMF core.



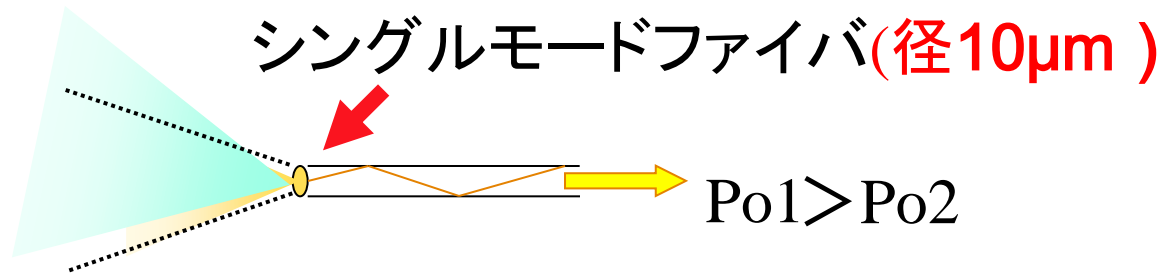
By analyzing and comparing output signal from **QD (Quadrature Photo Detector)**, the direction of the spot movement on the surface of the detector array can be determined.

大気揺らぎによる到来入射角度変動の抑圧

■従来の受光デバイス: 入射角度は無関係

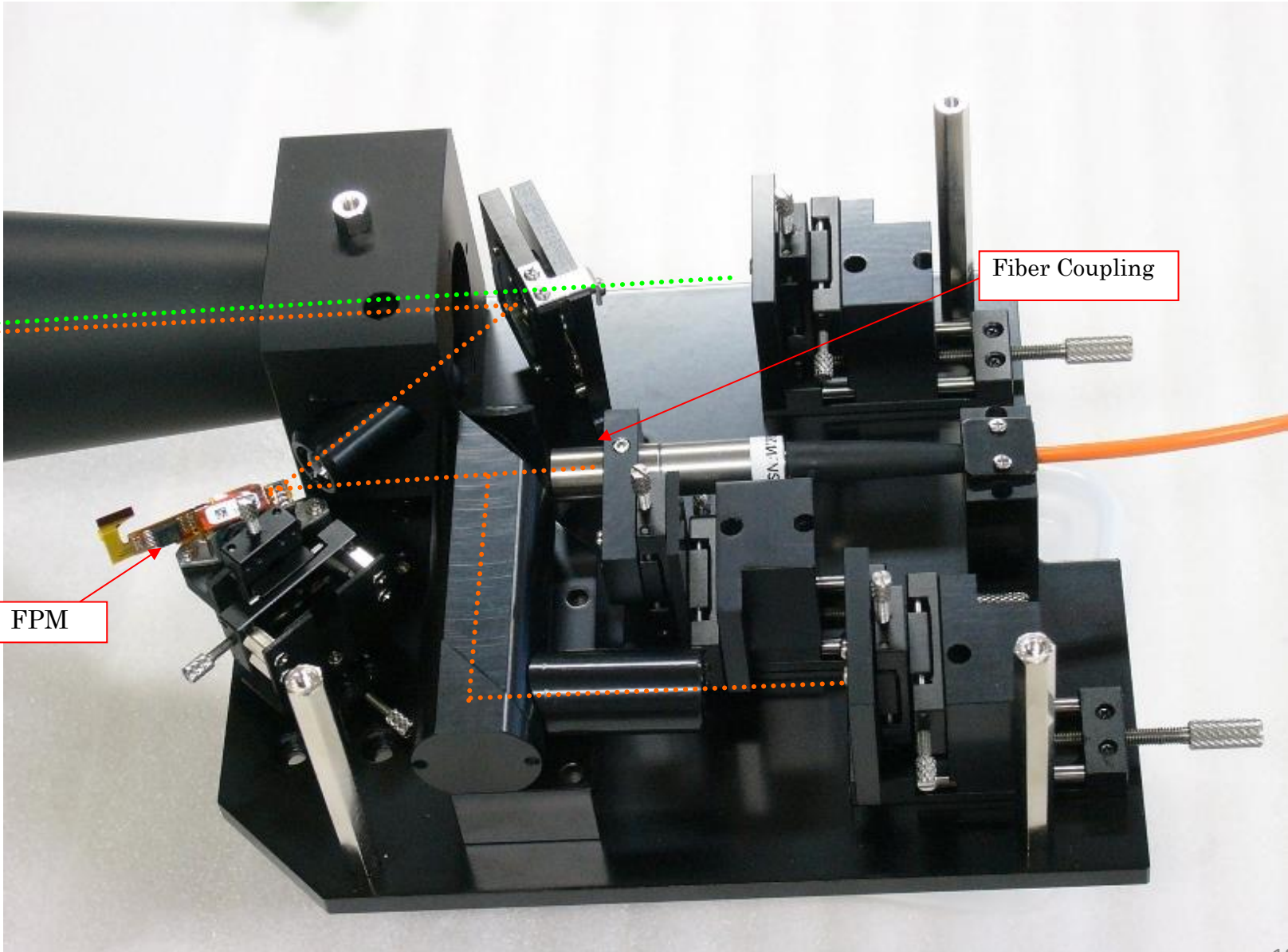


■次世代(提案)方式では入射角の影響大である.



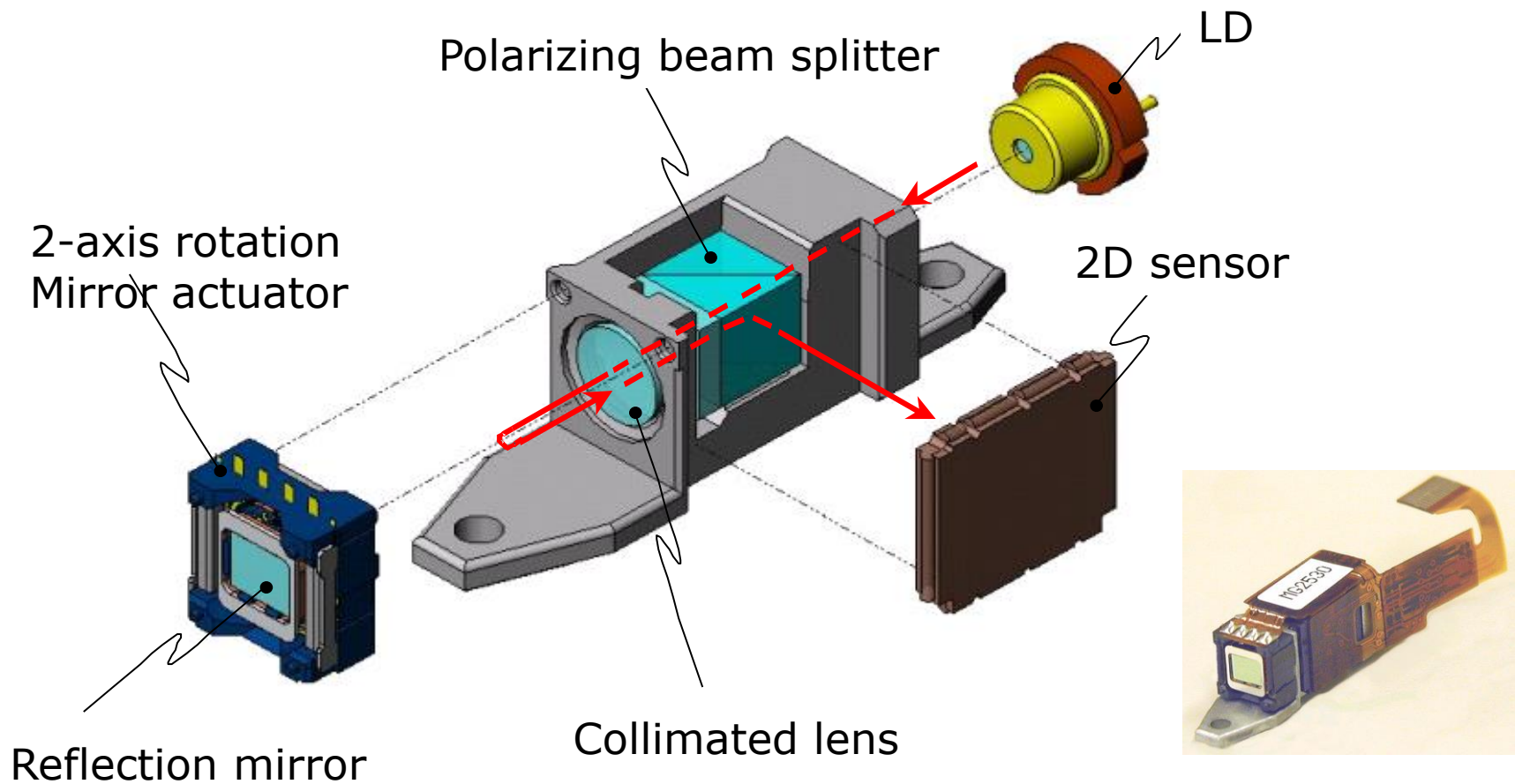
➡ 大気揺らぎによる到来角度変動が避けられないため、
到来角度変動、強度減衰、波面揺らぎを補償する
追尾システムの導入

Optical Antenna Module (Experimental)

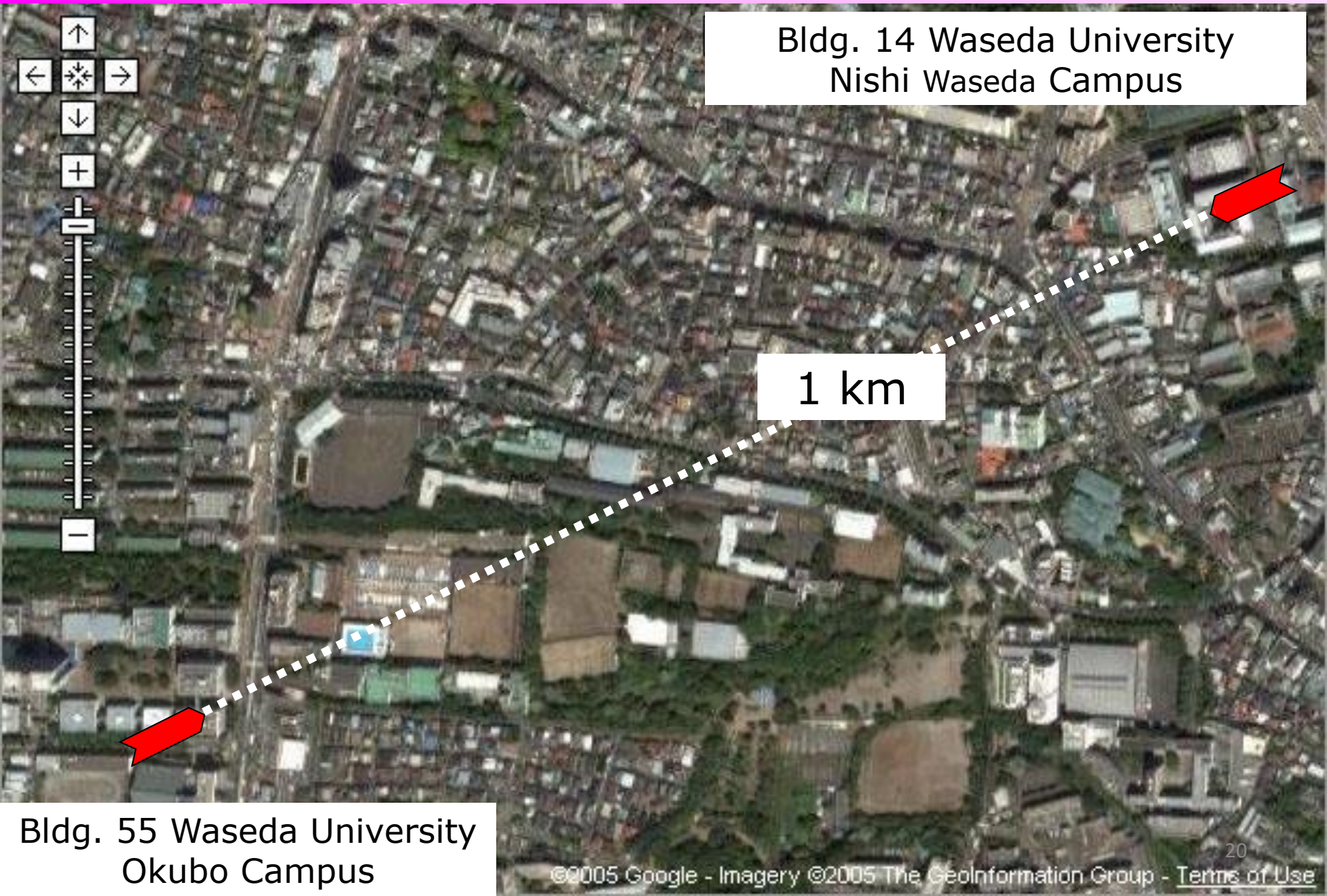


Tracking system (Internal structure of the FPM)

Improvement of the intensity variations caused by angle-of-arrival fluctuations FPM tracking



Experiment setup-1



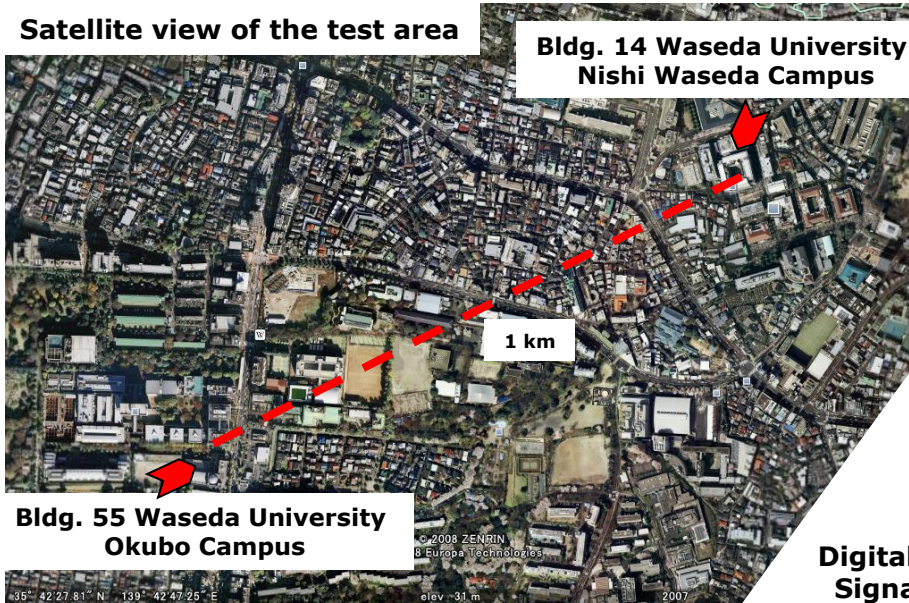
Bldg. 14 Waseda University
Nishi Waseda Campus

1 km

Bldg. 55 Waseda University
Okubo Campus

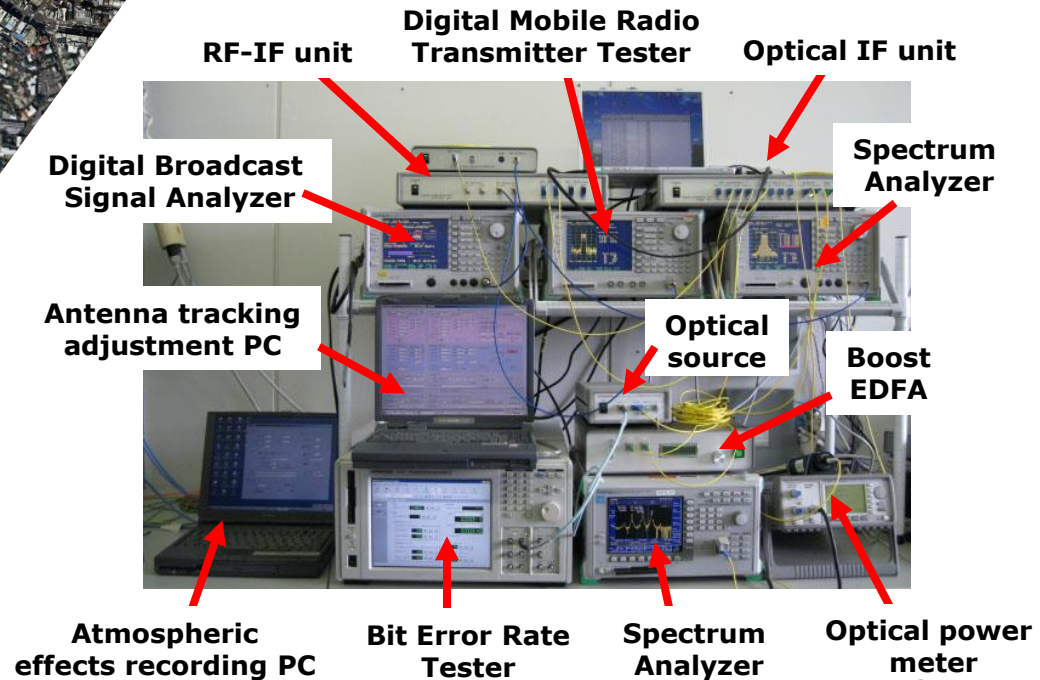
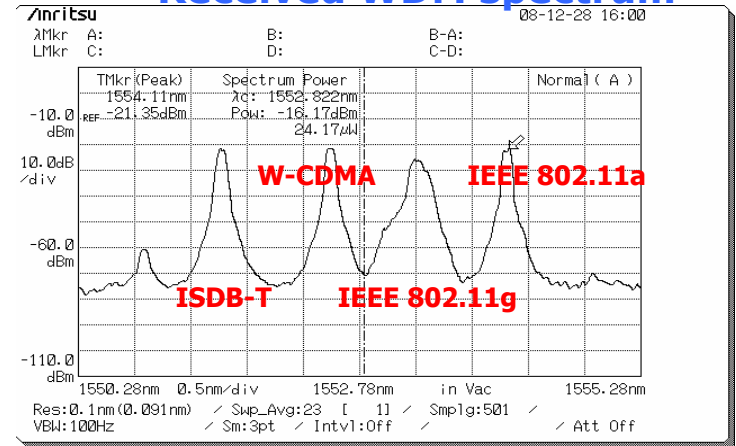
Experimental setup

Satellite view of the test area



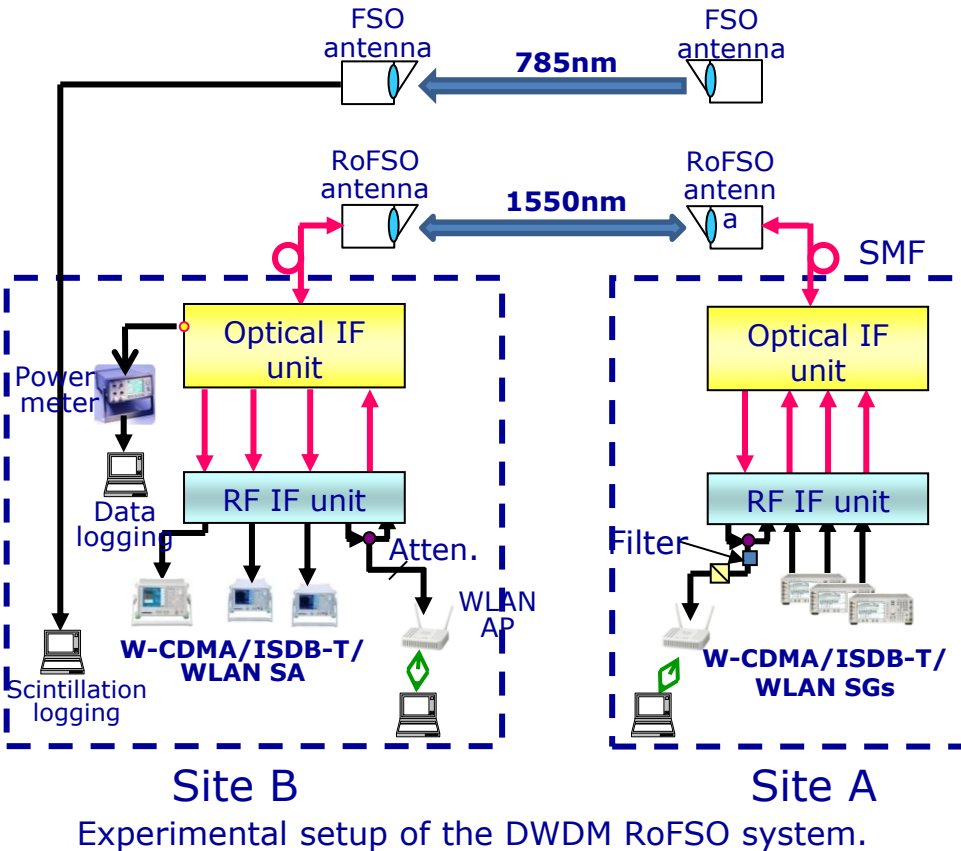
Source: Google

Received WDM spectrum



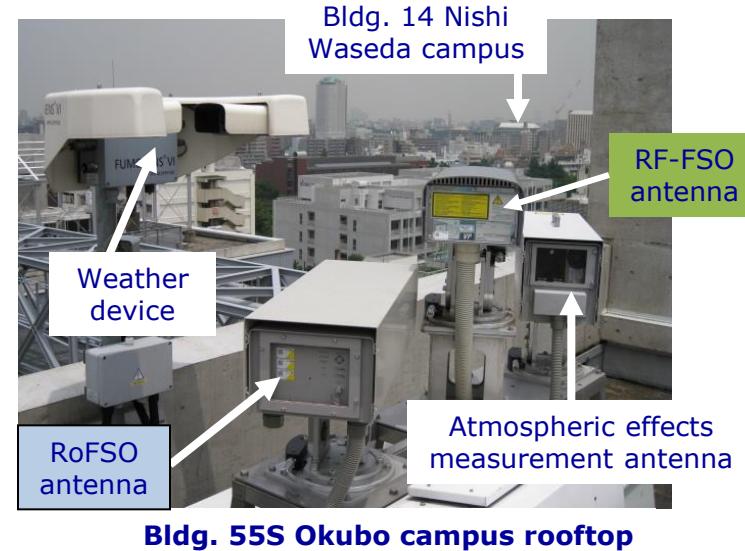
Experimental setup

Experimental setup



SMF Power point Level diagram

Transmission Power @EDFA : 20dBm(100mW)
 Distribution Loss in the Air @1km : 11.4dB
 Opt. Antenna-SMF coupling Loss \cong 5dB (Both 10dB)
 Optimum connection Receive Power@ Rooftop :-5dBm

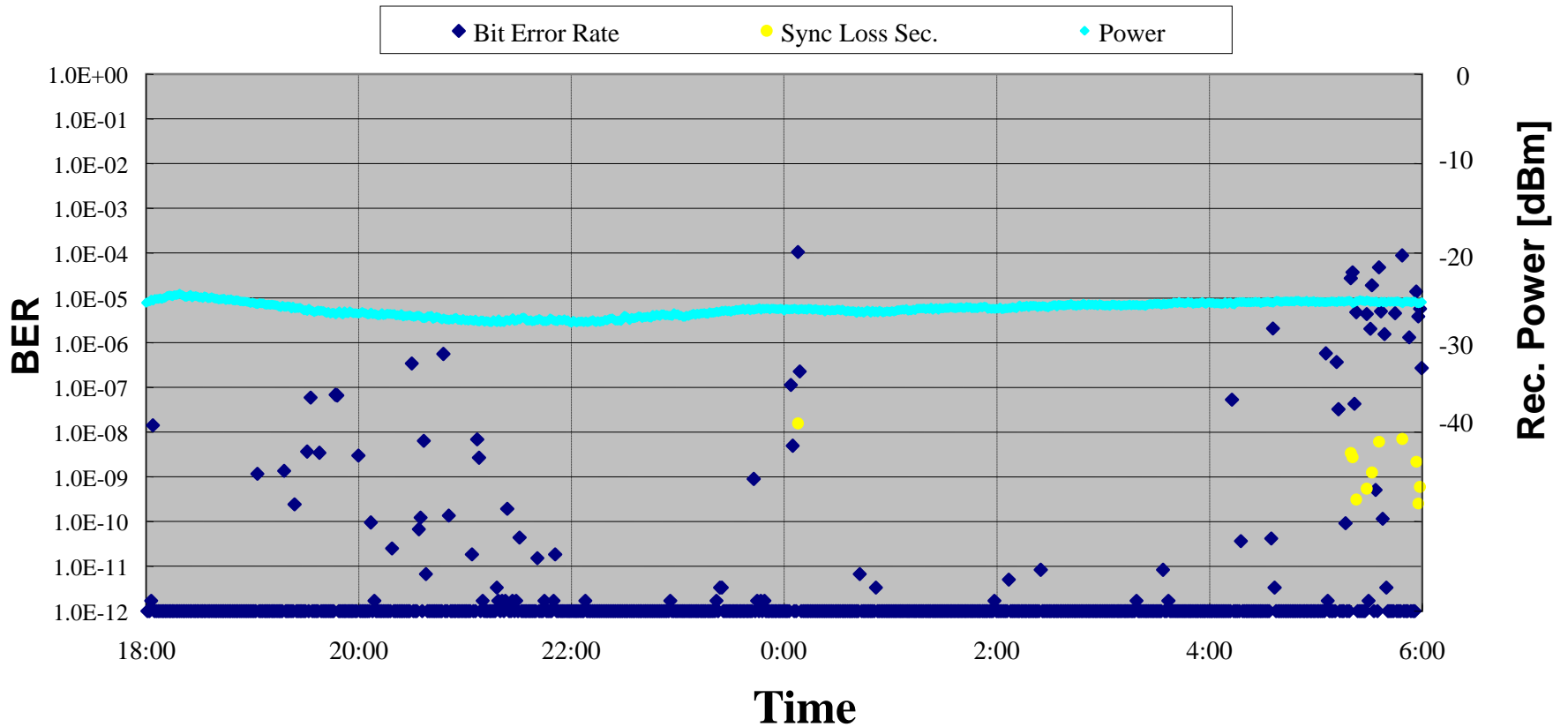


Wireless signal wavelength assignment

	Ch. #	Wave-length (nm)	Wireless service	Freq.
Down-link	29	1554.13	IEEE 802.11a	5.2 GHz
	30	1553.33	IEEE 802.11g	2.4 GHz
	31	1552.52	W-CDMA	2 GHz
	32	1551.72	ISDB-T*1	473 MHz
Uplink	33	1550.92	Free*2	
	34	1550.12	W-CDMA	2 GHz
	35	1549.32	IEEE 802.11g	2.4 GHz
	36	1548.52	IEEE 802.11a	5.2 GHz

10Gbps Transmission

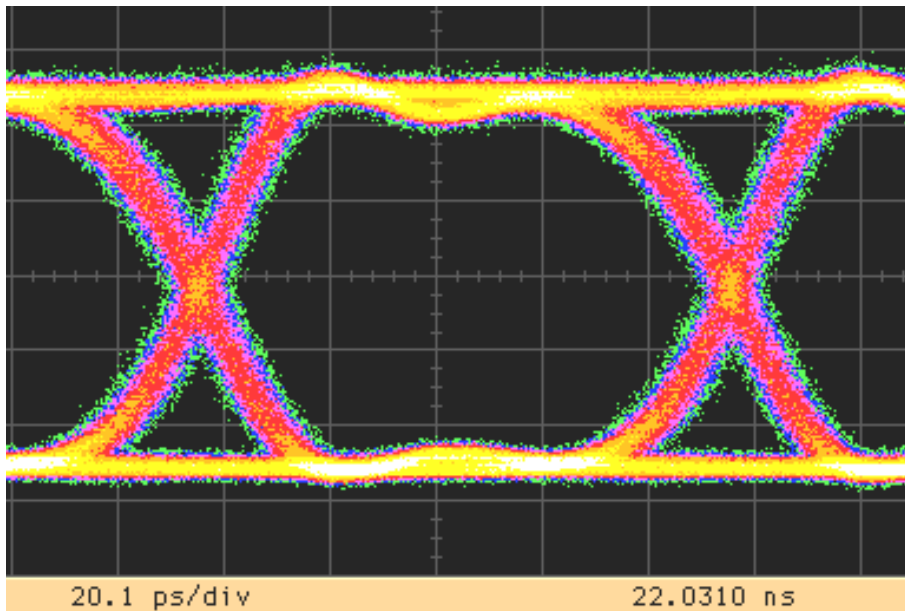
10Gbps BERT 2006 January 26-27



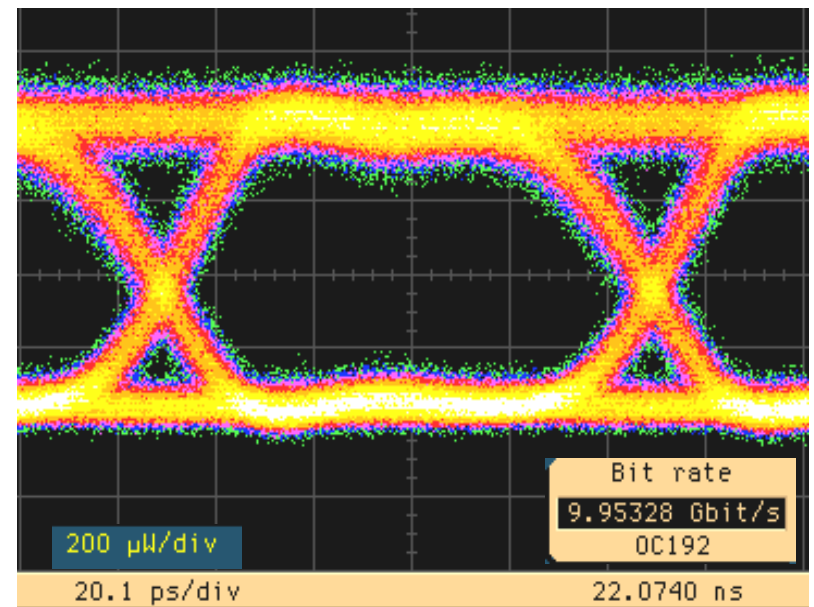
10Gbps 伝送実験

世界初の10Gbps光無線通信

DWDMとで100Gbps以上の通信も可能



送信波形 9.95Gbps OC192

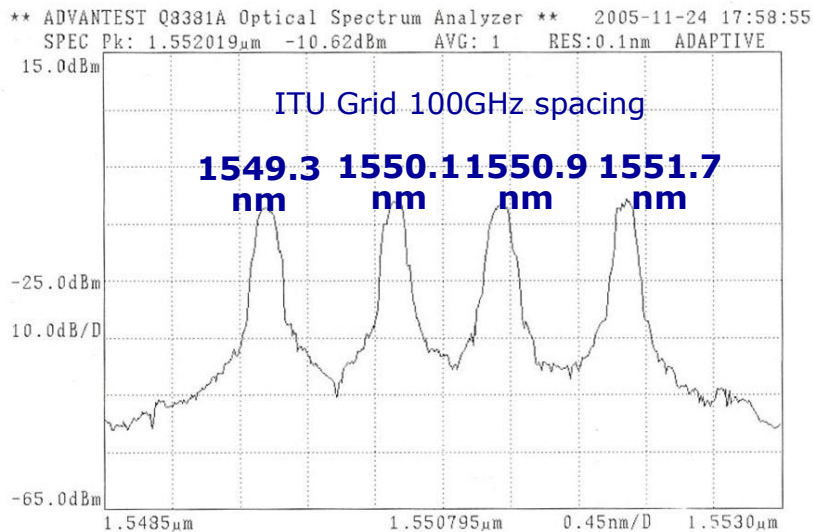


1km 伝送後

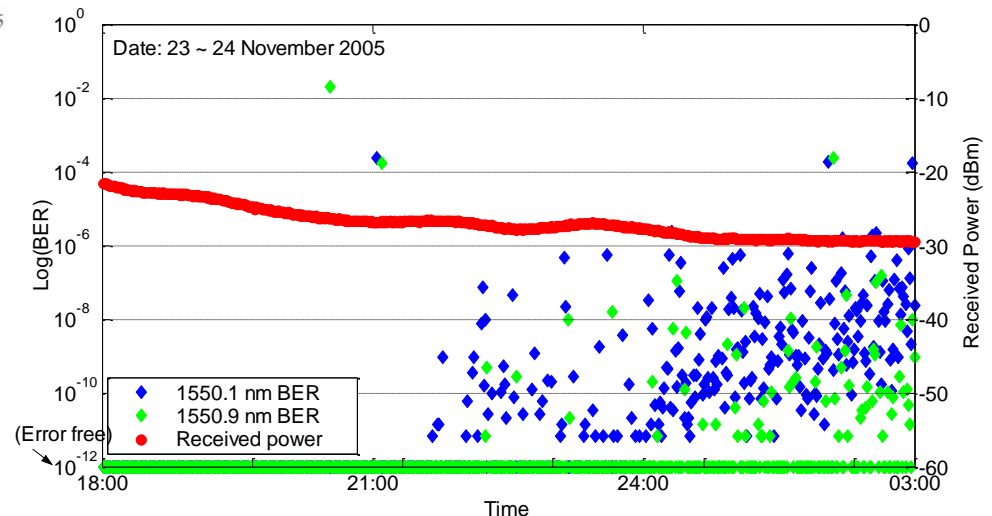
波長多重伝送(WDM)の結果

4ch 1550 nm (2.5 Gbps WDM伝送)

WDM 受信信号スペクトラム



BER と受信電力特性



- 100mW/波長の出力電力で2.5 Gbps X 4 ch 伝送
- 波長間の変動や干渉もなく安定した通信が可能であった。

RoFSOシステムの実験結果

[1]空間光のSMFへの効率的導光技術の開発:

O/E, E/O変換を行わず,受信空間光を直接SMFへ導光する光無線接続装置で,受信空間光とファイバとの結合損失3dB以下,東京地区と同等の気象条件下で通信距離1kmで運用を想定した場合,99.9%以上の稼働率確保を実現.

[2]フィールド実験によるフル光接続光無線の有効性の検証

種々の気象条件下での受光レベルと伝搬品質の評価を行い,試作装置にて,1年間以上の実験期間で,1.5Gbpsを超える通信性能と稼働率(99.9%)を示し,その実用性を示した.



ファイバ-空間-ファイバのシームレス接続によるBit rate free & Protocol free 無線通信システムを実現し, 10Gbps超の無線通信およびDWDMの実証した

通信無線光

世界最高速の10ギガビット

早大・情通機構、実験に成功

情報通信研究機構と早稲田大学は二日、レーザー光を使って無線で通信

する光無線通信の実験で、世界最高となる毎秒十ギガ(ギは十億)ビットの通

信速度を達成したと発表。光無線でも光ファイバー並みの高速・大容量

量通信ができることを初めて実証した。

情通機構などは、光ファイバーで利用されている波長と同じ一・五ギガ(ギは百万分の一)の帯のレーザー光を出す通信装置を開発した。

早大の大久

保キャンパス(東京・新宿)と西早稲田キャンパス(同)に新装置を設置。

一ギガの距離で通信実験を実施したところ、毎秒十ギガの通信速度を達成した。現在、都市間をつなぐ

光ファイバーの基幹通信網では毎秒十ギガが主流。今回の実験は光無線で初めてファイバー並みの速度が出たこととなる。通信品質も光ファイバー並みを確認した。現在の光無線通信装

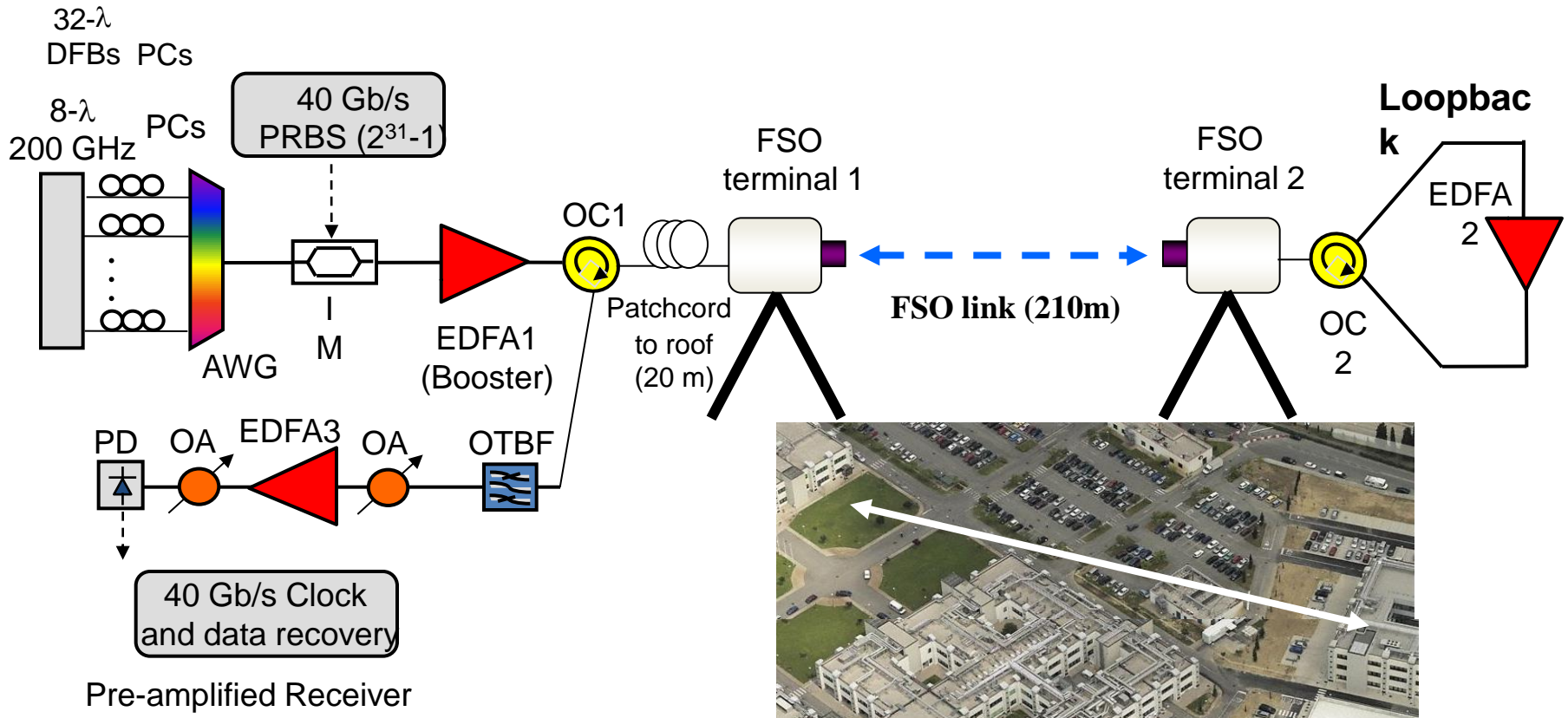
置は、波長が〇・八ギガ帯のレーザー光を利用している。この波長では、毎秒一ギガ程度の通信速度が限界。また、気温の変化に影響を受けやすく、通信品質が不安定になりやすい課題もある。

日経産業新聞

平成18年2月3日 6面

FSOの高速化の挑戦(1.2 Tbit/s伝送実験)

イタリアピサ(CNR国立研究センター構内)における国際共同実験

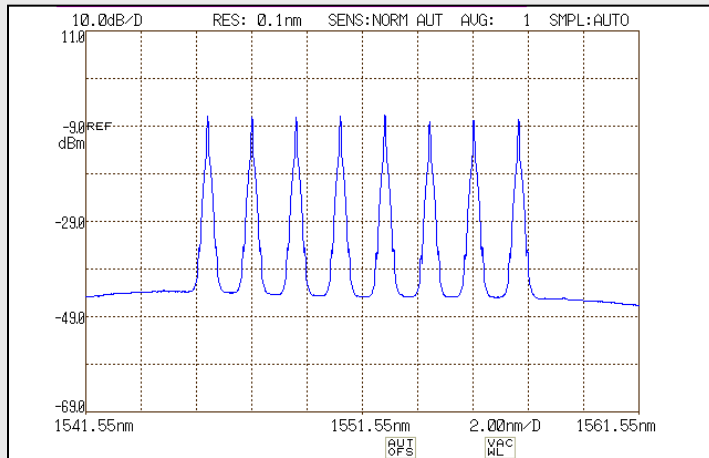


Achieved 1.28 Tera bits per second world record transmission for a wireless system using a system based a similar concept. E. Ciaramella, Y. Arimoto, G. Contestable, M. Presi, A. D'Errico, V. Guanno, and M. Matsumoto, "1.28 Terabit/s (32x40 Gbit/s) WDM Transmission System for Free Space Optical Communications," IEEE Journal Areas in Com. vol. 27, no. 9, Dec. 2009.

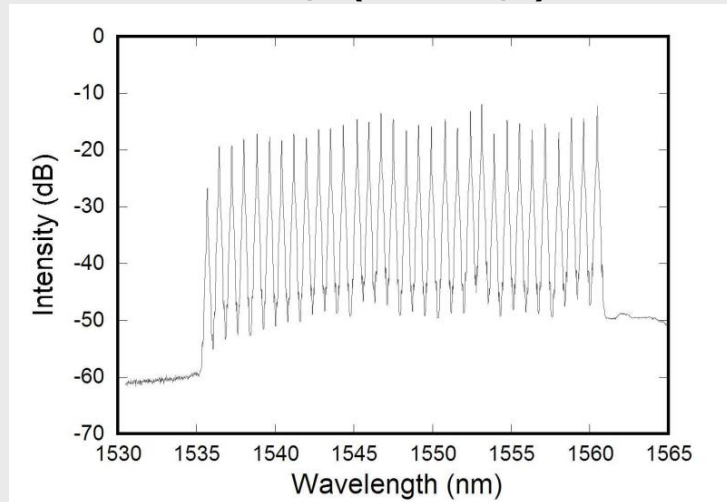


実験結果(EYE DIAGRAM)

OUTPUT OPTICAL SPECTRUM

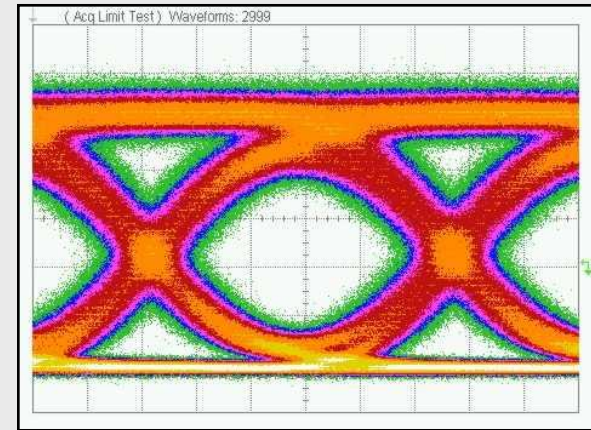


320Gbit/s (8x40Gbit/s)

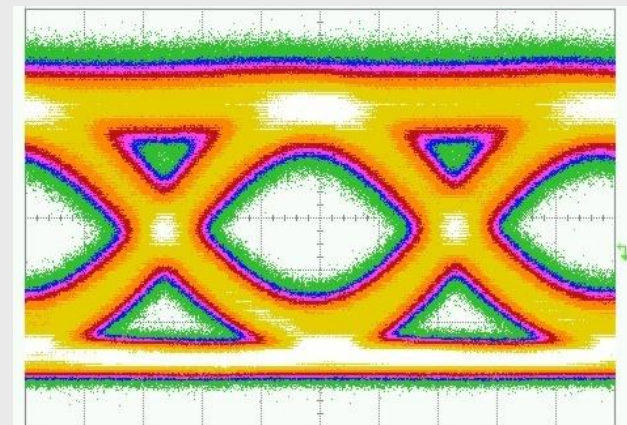


1.28Tbit/s (32x40Gbit/s)

OUTPUT EYE DIAGRAM
320Gbit/s

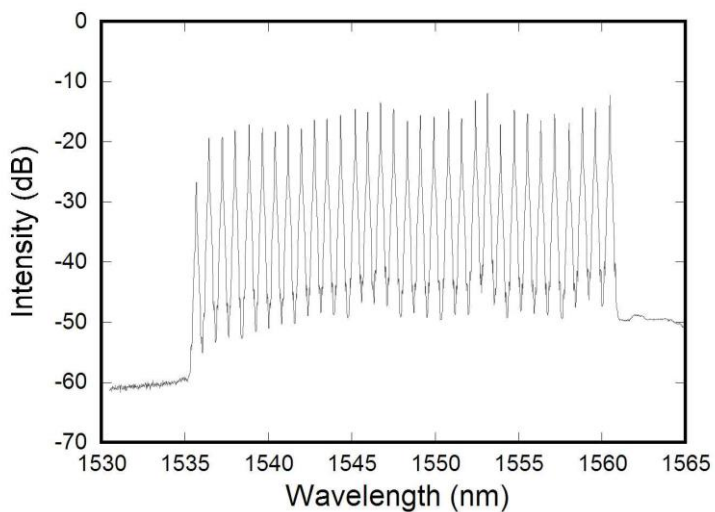


320Gbit/s

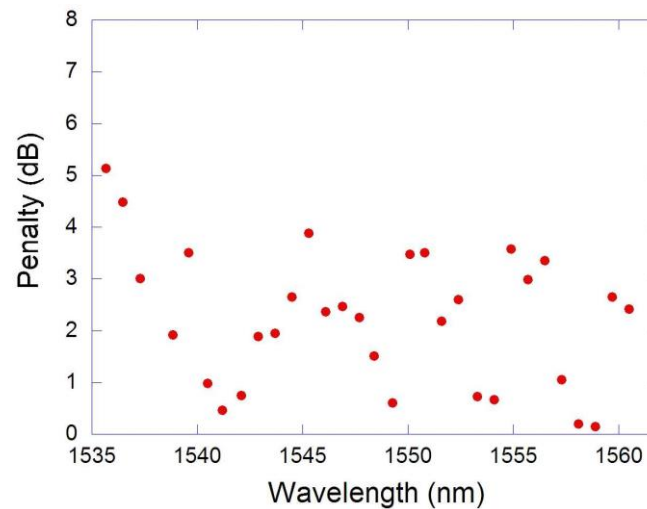
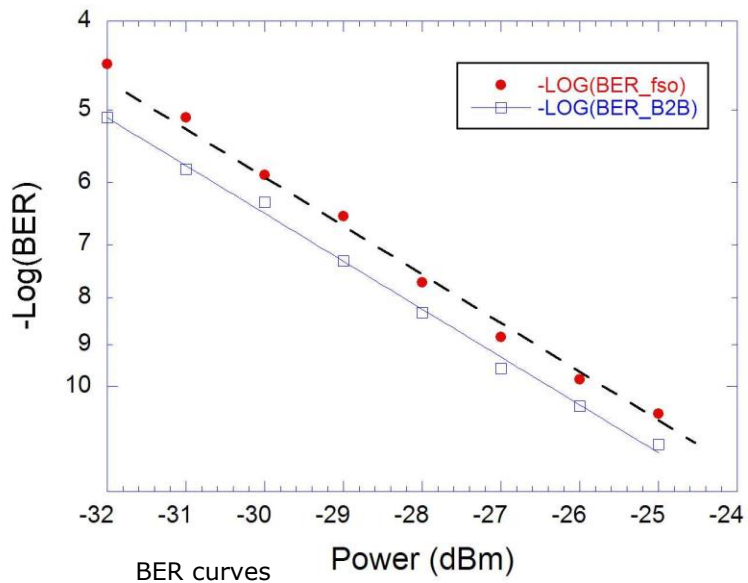


1.28Tbit/s

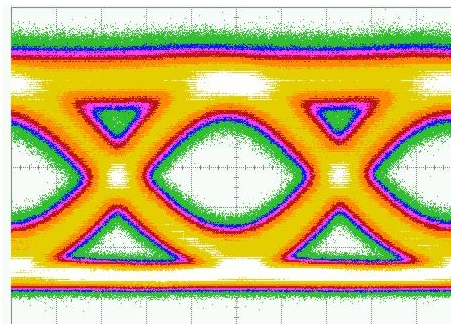
1.28 Tbit/s 伝送実験の場合



100 GHz spacing (from 1535.7 nm to 1560.5 nm)



Power penalty (at BER=10⁻⁹)
for the 32 WDM channels transmitted.



Eye diagram at the receiver taken with 30 minutes persistence.

IL TIRRENO

€ 1,00 (con "I piatti del cuore" € 9,90) - anno 132 - n. 252

Venerdì 12 Settembre 2008

GOLDEN BOY
ekò
 dancing
 LUNATA
 LUCCA
 0583 - 93.54.12

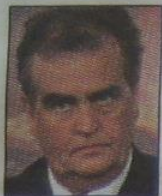
QUESTA SERA
BALLO
 CON
ORCHESTRA
KARAOKE
RIDUZIONE
VENERDI

DIREZIONE, REDAZIONE, AMMINISTRAZIONE v.le Alfieri 9 LIVORNO tel. 0586/220111 - REDAZIONI: Carrara via Roma 9 tel. 0585/777333-4 - 777224; Cecina via Circonvallazione 11 tel. 0586/682721; Empoli p.za F. Degli Uberti, 30 tel. 0571/711775 - 710894; Firenze via L. da Vinci 16/18 tel. 055/5522548; Grosseto p.le Cosimini 20 tel. 0584/414900; Lucca via S. Croce 105 tel. 0583/491816 491817; Massa via Petrarca 2 tel. 0585/41032; Montecatini c. Roma 5 tel. 0572/772461; Piombino c. Italia 95 tel. 0565/222222; Pistola via C. Trinci 2 tel. 0573/97791; Pisa c. Italia 88 tel. 050/502255; Pontedera via Loti 3 tel. 0587/52400; Portoferraio v.le Eiba 3 tel. 0565/914604; Prato via del Ceppo Vecchio 5 tel. 0574/606015-6-7; Viareggio via Coppino 273 tel. 0584/389389

Spedizione in abbonamento postale art. 2 comma 20/B Legge 662/96 - Livorno

PISA

www.iltirreno.it



FEDERALISMO

Primo via libera al progetto Calderoli

A PAGINA 5

Sfida a Livorno. Picchi apre

Derby pro

Il presidente nera

Il fermo auto risarcito come danno

PISA. «Ni by di Livor mandatem i zia dell'Ans fosse uno s dente del J Pomponi, h chi ieri sera to che il Cas

... di 3.2 Tbps. Regolarmente di 30 mila spec



FABIO MUZZI - 2008

Lo staff della Scuola Sant'Anna protagonista del record

plici: primi tra tutti, la capacità di trasmettere grandi quantità di dati a velocità elevate su ogni singola fibra e la

ramella - per evitare di rompere il manto stradale, oppure in situazioni di emergenza per ripristinare una linea interr

サンタナ大学(Pisa Italy), 早大, NICTにより 1.28Tbps伝送に成功(2008.9.5)³²

光無線通信で最速

情通機構など 毎秒1ピット以上

情報通信研究機構は一日、早稲田大学とイタリアのサンタナ大学と共同

で、レーザー光を使って

無線で通信する光無線通

信の実験で、世界最高と

なる毎秒一テ(テは一兆)

ト以上の通信速度を達成

したと発表した。一週間

にわたって安定して伝送

できることを確認した。

離島や山間部など、光

ファイバーを敷設できな

いような地域で活用した

い考え。

情通機構などは、光フ

アイバー通信で利用され

ている波長と同じ一・五

ギ(ギは百万分の一)以

上のレーザー光を使い、

光信号を送受信する装置を開発した。実験はサン

タナ大学で実施し、同大

に敷設されている毎秒一

・二テの光ファイバ

ー装置から光信号を放

ち、二百十ギ間を一週間

以上伝送できることを確

認した。

宇宙の衛星間で使う光

無線通信技術の成果を活

用した。

レーザー光は直径十ギ

の太さまで絞り込んで

発する。増幅装置などを

使わなくても通常の光フ

アイバー通信のような高

品質の通信ができる。通

信距離は、一ギ程度ま

では延長可能という。鏡

や信号処理を組み合わ

せ、レーザー光の方向を

正確に捕らえる仕組みを送受信装置に採用したことで可能になった。

従来の光無線通信は、

レーザー光を太くするこ

とで光を捕らえていたが

信号の品質が落ちる問題

があった。LAN(構内

情報通信網)などを延長

する用途で実用化されて

いるが、毎秒十ギ(ギは

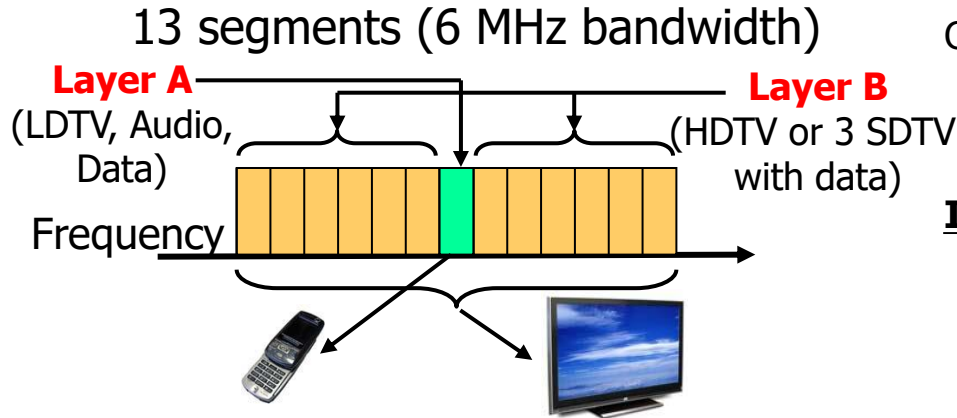
十億)程度だった。

RoFSOシステムの性能評価

品質評価尺度パラメータとして

- RoFSOシステムの性能評価と設計にはMER, ACLR and Link Margin が有効
 - **Modulation Error Ratio (MER)** is a quality metric parameter used to evaluate ISDB-T signal transmission
 - **Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR)** is a quality metric parameter used for W-CDMA signal transmission

DWDM RoFSO System実験 (ISDB-T 信号伝送)



Handheld reception (1seg service) Fixed and mobile reception (HDTV, etc)

ISDB-T channel segments and services

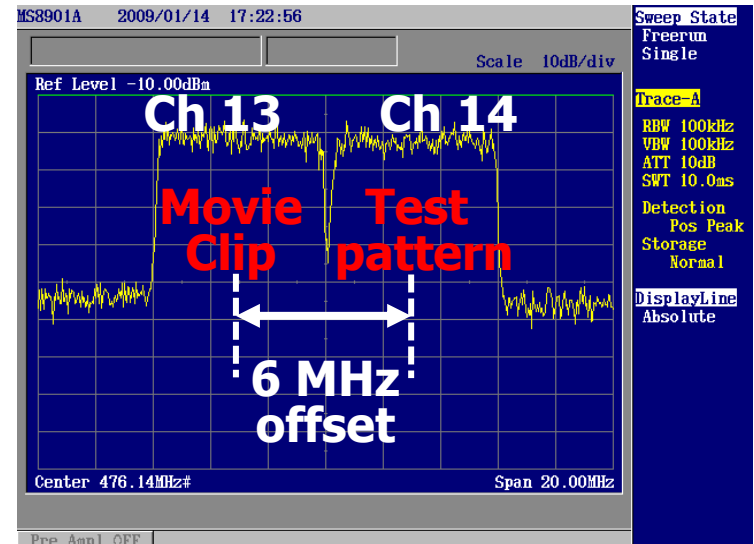
Parameter	Value	
Mode	3	
Layer	A	B
Number of segments	1	12
Modulation scheme	16 QAM	64 QAM
Information bit rate	624.13	19,660
Required CNR/MER (dB)	11.5	22.2

ISDB-T Transmission parameters.

Operates in the **UHF band** at frequencies between **470 MHz** and **770 MHz**, with total bandwidth of **300 MHz** divided into **50 channels**.

Integrated Service Digital Broadcasting

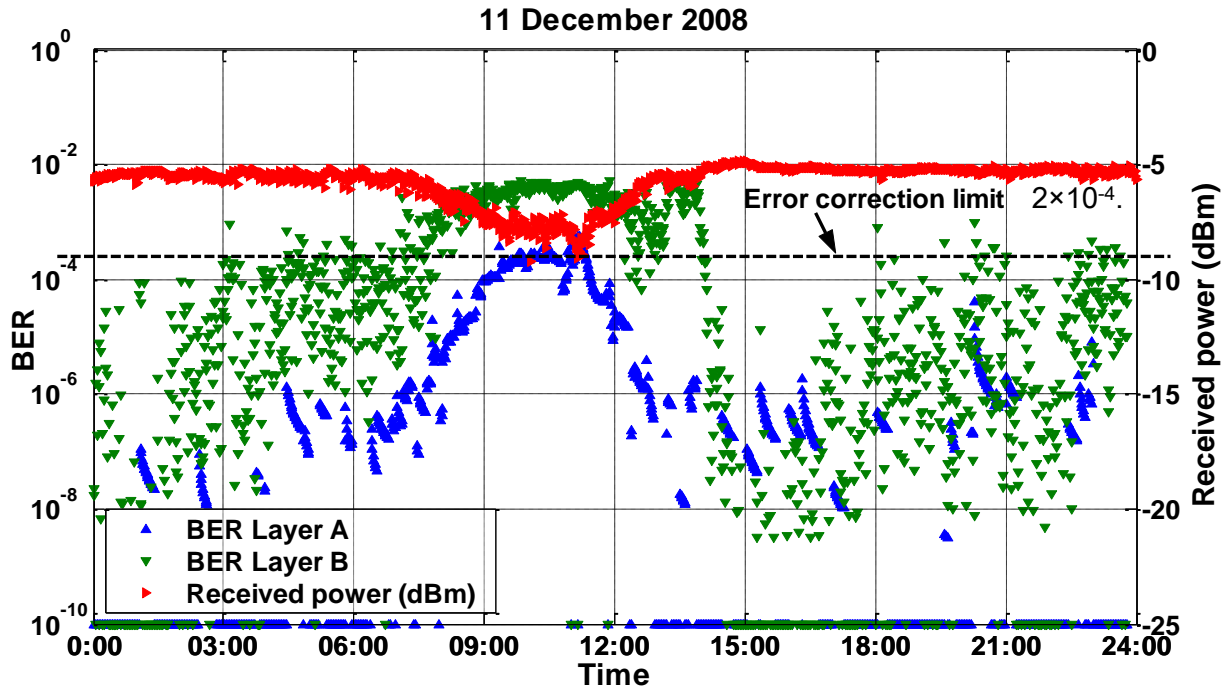
- Terrestrial (ISDB-T) is one of **international standard for terrestrial DTV broadcasting format** developed and adopted in Japan (6 MHz bandwidth).



Received ISDB-T signal spectrum

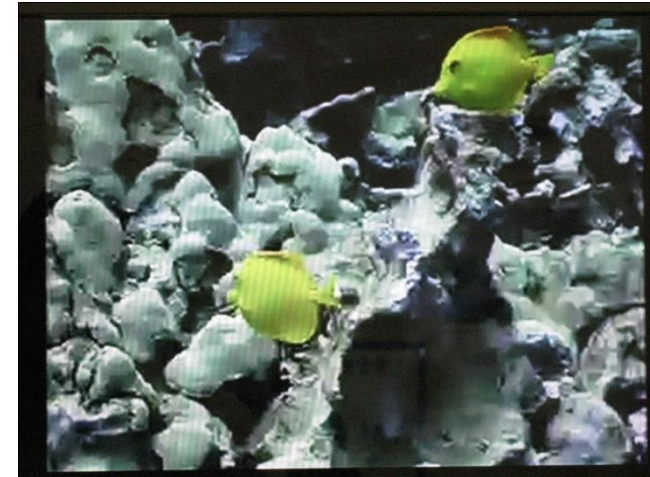
RoFSO 動画像伝送結果

Digital TV broadcasting signal transmission



Digital TV broadcasting BER and received optical power characteristics.

BER shown here is calculated from error correction information. The error rate currently displayed is between for an error correction with a RS and Viterbi cord. Error collection limit is 2×10^{-4} .



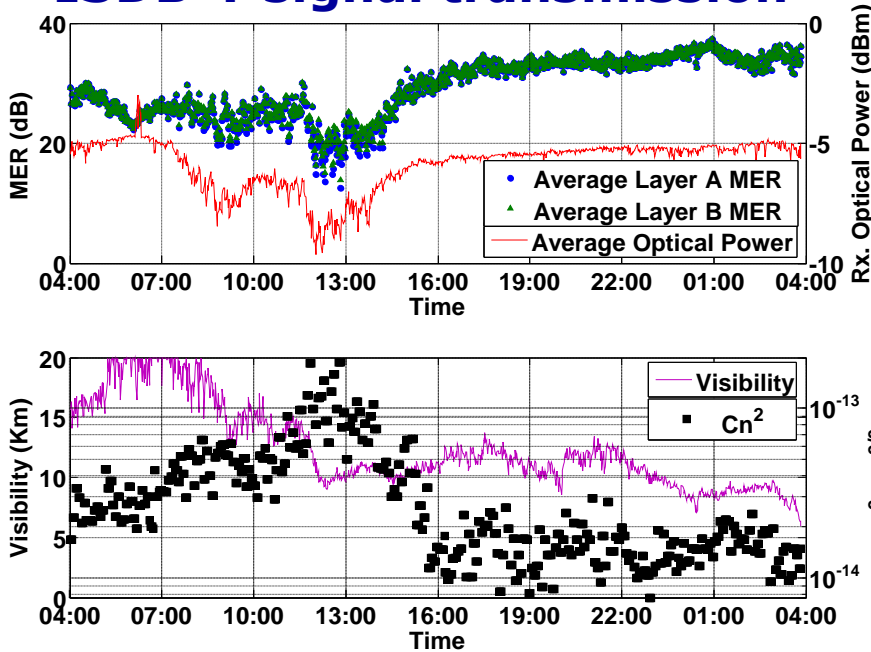
A-Layer 1seg video



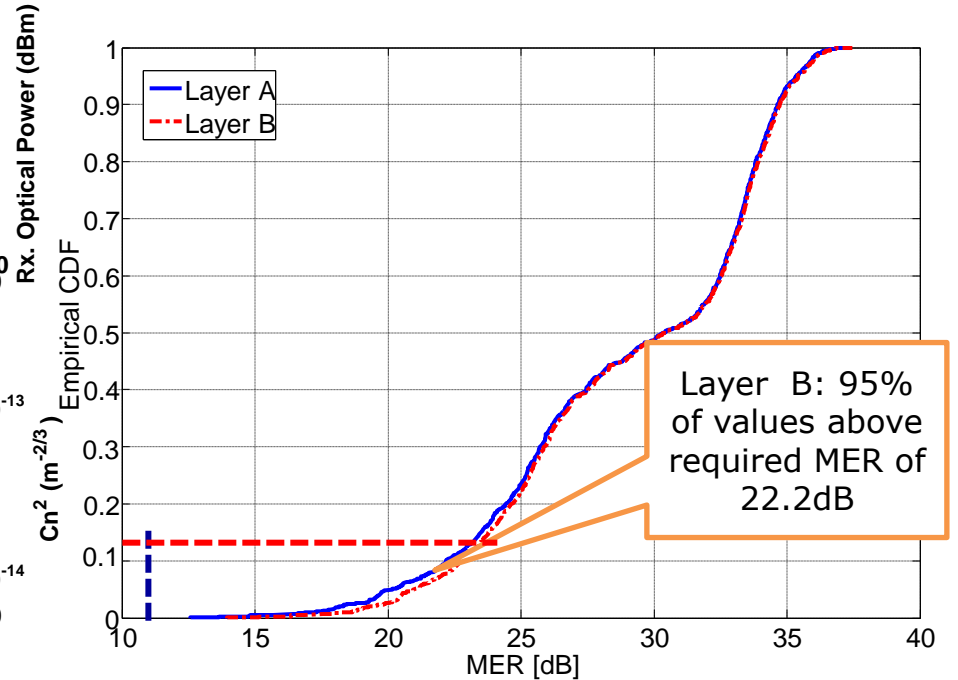
B-Layer 12-segment video

実験結果

ISDB-T signal transmission



MER and received optical power



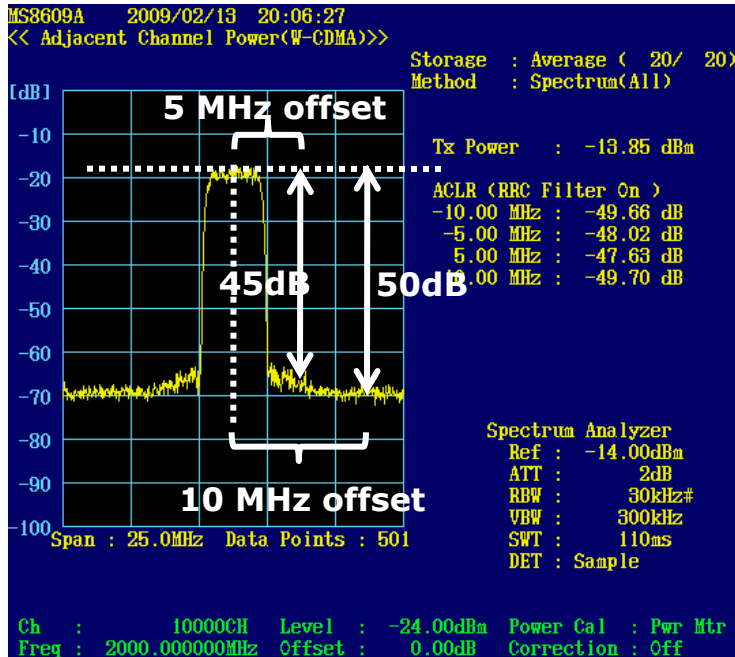
CDF of MER for Layers A and B over 24-h

- **ARIB STD-B21** specifies a minimum required MER value for **Layer A** (one segment) to be 11.5 dB and **Layer B** (12 segment) is 22.2 dB

$$\text{MER} = 10 \times \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N (I_j^2 + Q_j^2)}{\sum_{j=1}^N (\delta I_j^2 + \delta Q_j^2)} \right\} [\text{dB}] \quad 37$$

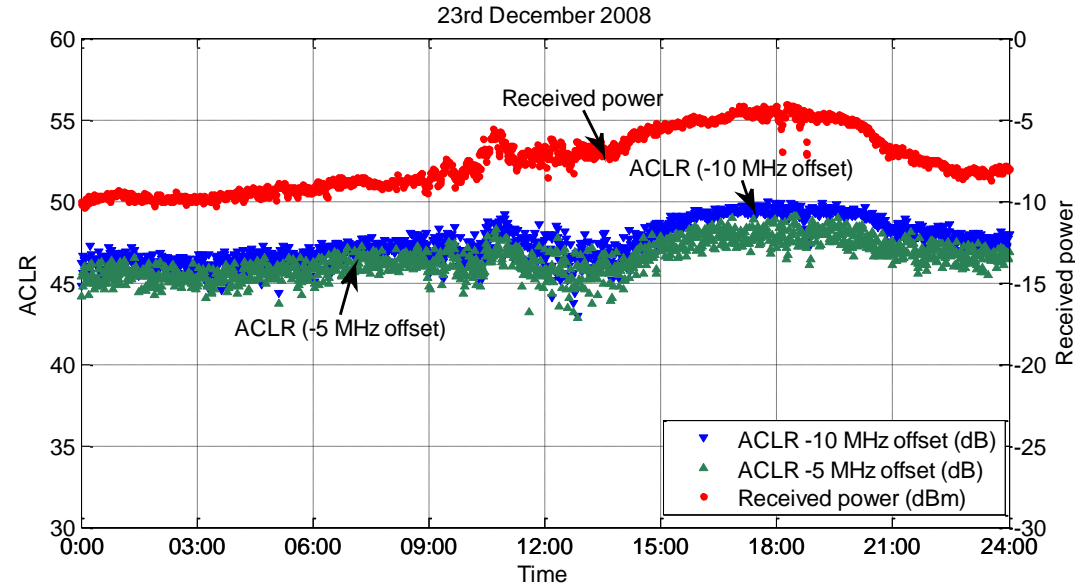
隣接チャンネル(W-CDMA)の影響

W-CDMA signal transmission

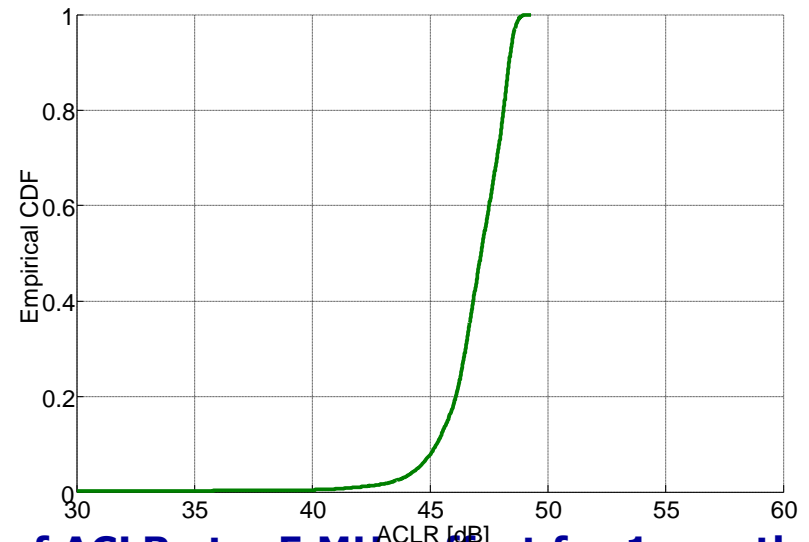


Received W-CDMA signal ACLR spectrum (3GPP Test Signal)

- ACLR is a quality metric parameter specified by the 3GPP for evaluating W-CDMA signal transmission.
- 3GPP specifies ACLR value of **45 dB at 5 MHz** offset and **50 dB at 10 MHz** offset.

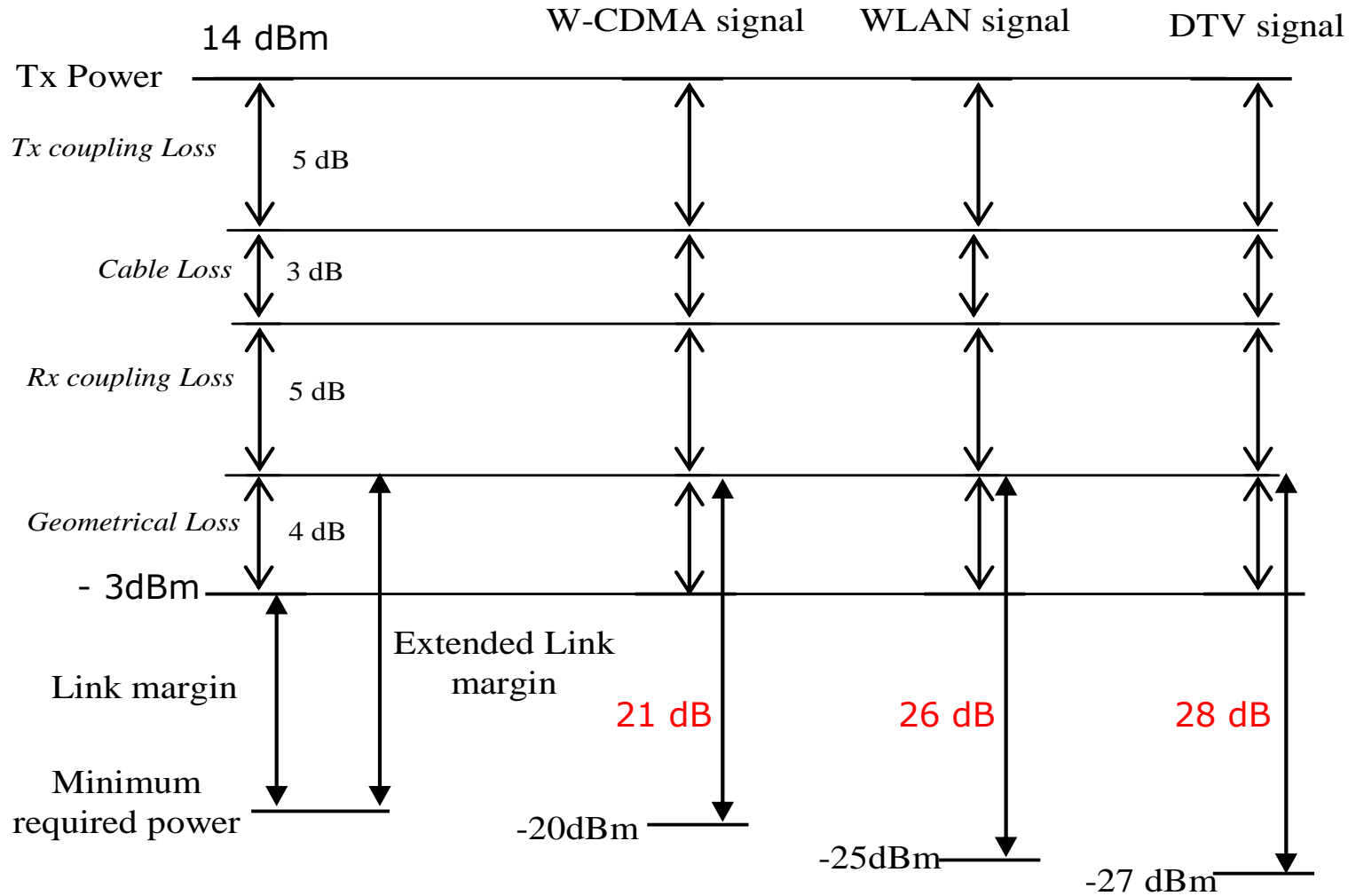


ACLR and received optical power



CDF of ACLR at - 5 MHz offset for 1 month

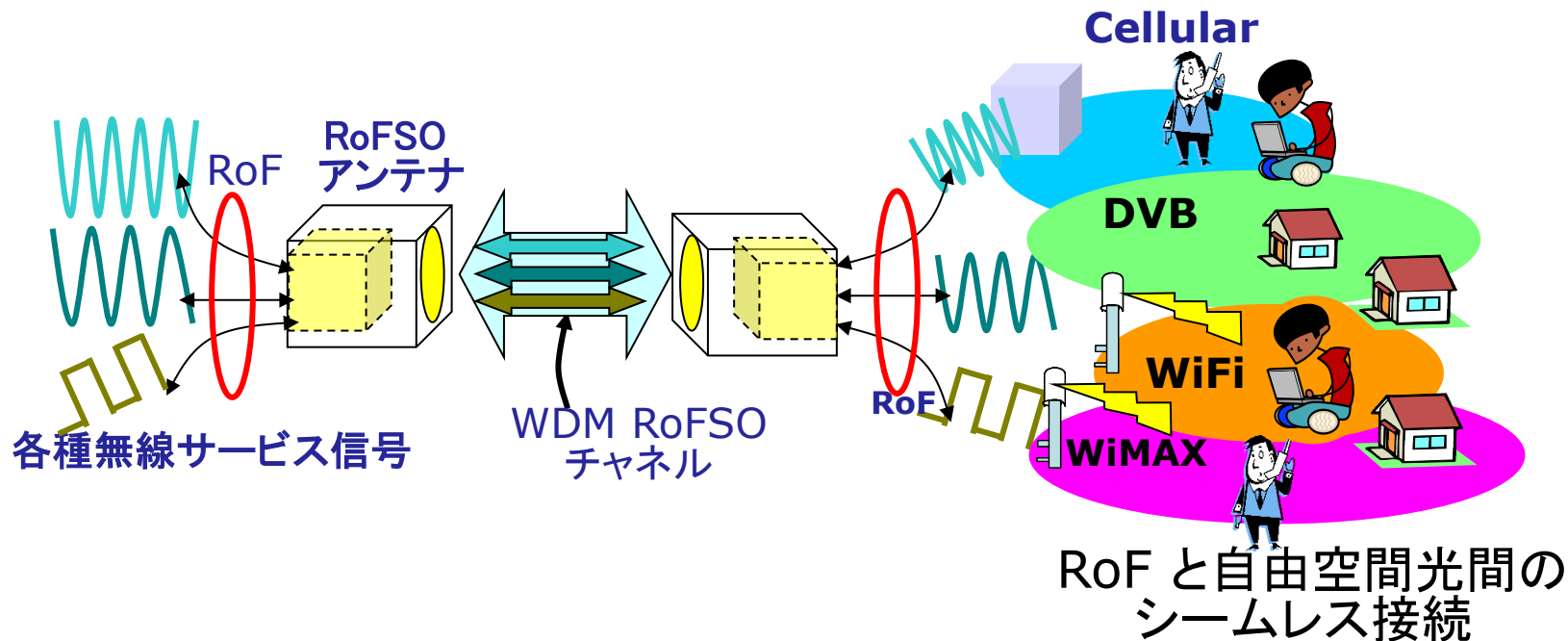
大気擾乱環境下における所要リンクマーージンの設計



Link margin of the RoFSO system for different wireless signals

統合光無線システムの展開イメージ

各種無線サービス信号に対して透明なRoF技術を自由空間へ拡張・応用するRoFSO(Radio on Free Space Optics)技術の実現



- ◆1550nm 波長
- ◆WDM RoFSO チャンネルを用いて、複数のRF信号を伝搬
- ◆WLAN, 3 GPP 携帯システム, 地上デジタルTV等の各種ワイヤレスサービスを提供するためのユニバーサルプラットフォーム

結果とまとめ

- WDM技術を用いて、複数のRF信号の同時伝送が可能なRoFSOシステムの設計コンセプトと性能特性を示した.
- 大雨, 濃霧, 雪や嵐のような厳しい気象条件ではない場合, RoFSOシステムを用いてISDB-TおよびW-CDMA信号の伝送を行い, 良好な性能を実証した
- 光ワイヤレス通信の根幹と補完の両方で使用でき, 高度なRoFSOシステムはユビキタス無線サービスを提供するための普遍的なプラットフォームとしての展開に適している.

今後の課題:

- 4141FSOの簡易化, 屋内の光無線通信, 電波無線の共生