

2021年9月21日

5Gの次に来る テラヘルツ波通信の可能性

永妻忠夫

大阪大学大学院 基礎工学研究科

1

講演の主旨

- 「5Gの次に来るテラヘルツ波通信の可能性」
(平等先生からいただいたタイトル)
- 「TILA: Tiny Integrated Laserとの接点」



- ・テラヘルツ波通信は本当に使われるのか？
- ・光技術（特にレーザ技術）の役割は何か？

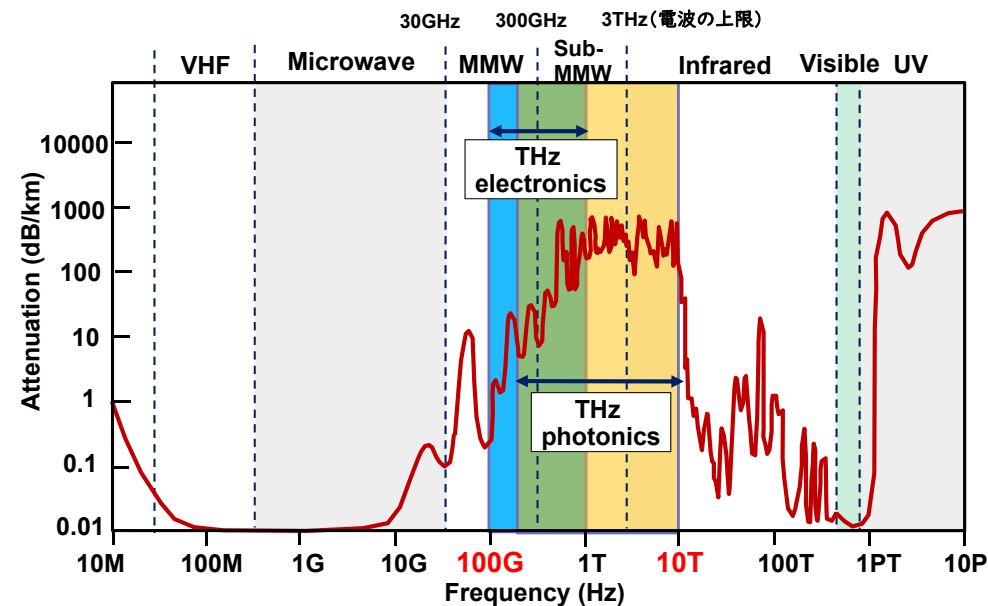
2

講演の流れ

- ・テラヘルツ無線の歴史を振り返る
- ・テラヘルツ無線通信の最近の動向
- ・光技術の役割と課題、今後の展望

3

テラヘルツ波 = ミリ波 + サブミリ波



4

THz技術の世代推移：“5th Gen.”へ

1980年代：超高速光エレクトロニクス

ピコ秒・フェムト秒パルスレーザ、フォトコンダクタ
化合物半導体デバイス、光通信の発展を牽引

1990年代：光技術によるTHz研究のブレイク

THzパルス波の進展、イメージング、分光の提案
THzパラメトリック発振器(1996)、UTC-PD(1996)

2000年代：THz波の産業応用の萌芽

通信応用(2002)、THz量子カスケードレーザ(2002)
分光システムの商品化、テラヘルツカメラ(2008)

2010年代：実用化に向けた新たな展開

電子デバイス・集積回路技術の進展(Siでも…)
計測技術の進展(スペアナ・ネットアナ)
周波数割当の議論

2020年代：“第5世代”市場の拡大へ

エレクトロニクスとフォトニクスの集積化

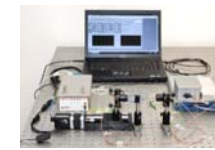
THz波を用いた科学・産業用機器



TeraView (UK)



Menlo Systems (Germany)



BATOP (Germany)



Ekspla (Lithuania)



LUNA (API) (US)



Rainbow Photonics (Swiss)



Nippo Precision (JPN)



Advantest (JPN)

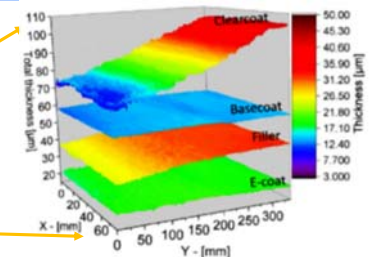


Pioneer (JPN)

THz波だけが出来ること：波長と透過性

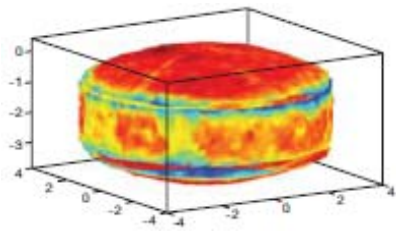


車体の塗装膜検査



Appl. Phys. Lett. 109, 021105 (2016).

タブレットのコーティング検査 (Teraview)



製紙プロセスの検査 (Advanced photonics Inc)



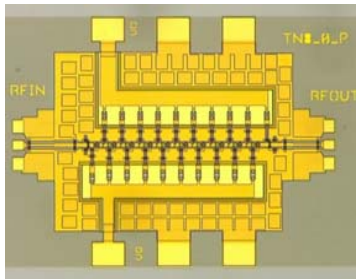
電子デバイス・集積回路技術の現状

- 化合物半導体(III/V)集積回路
 - 25nm InP HEMT, $f_{max}=1.5\text{THz}$, 9dB >1THz amp
 - GaN, $F_{max}=0.58\text{THz}$
 - InP-GaAsSb DHBT, $F_{max}=1.18\text{THz}$
- Si系半導体集積回路
 - CMOS bulk/SOI/FinFETs, $f_{max}\approx 300\text{-}350\text{GHz}$
 - SiGe BiCMOS/SiGe HBT, $f_{max}=700\text{GHz}$
- ヘテロジニアス集積
 - InP + SiGe
- 電子光集積
 - 光変調器/光導波路/Ge フォトダイオード/ on Silicon

InP系電子デバイスの能力: 1 THz増幅

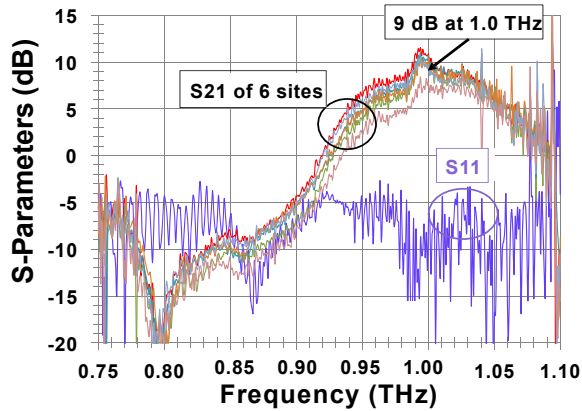
X. Mei, et al., "First Demonstration of Amplification at 1 THz using 25-nm InP High Electron Mobility Transistor Process," *IEEE Electron Dev. Lett.*, **36**, pp. 327–329 (2015).

- **25-nm InP HEMT**
- **10-stage** common source
- 2-finger 8-um wide devices
- On-wafer measurements



(基板厚25um)

9 dB Gain demonstrated on wafer at 1 THz



InP系電子デバイスの能力: 2008 vs. 2020

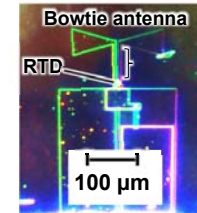
120 GHz (InP HEMT)



10 Gbit/s & 6 km=2K (1.5 Gbps)x6ch.



300 GHz (InP RTD)



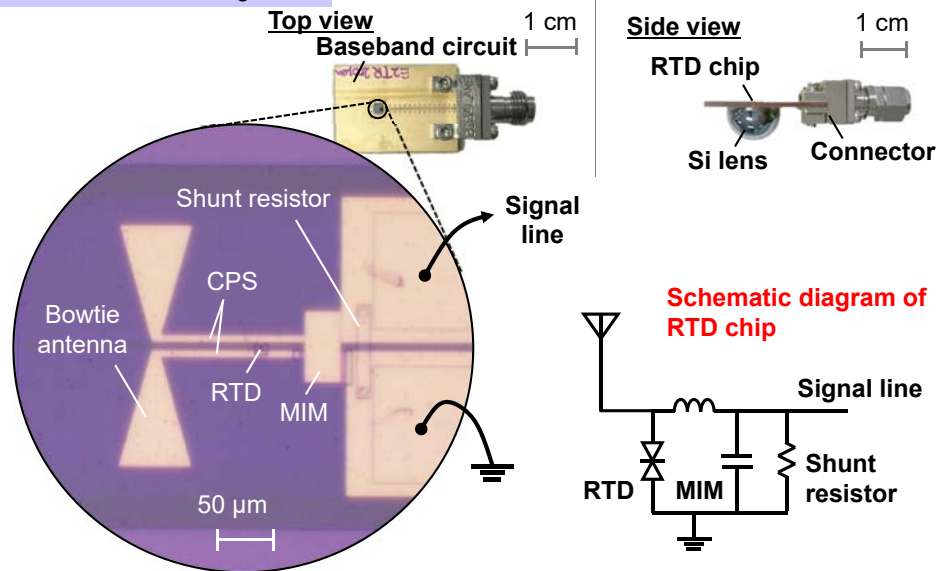
RTD: Resonant tunneling diode

**RTD RxTx: 4K (6 Gbit/s)x4ch.
30 Gbit/s (Error-free)→8K**



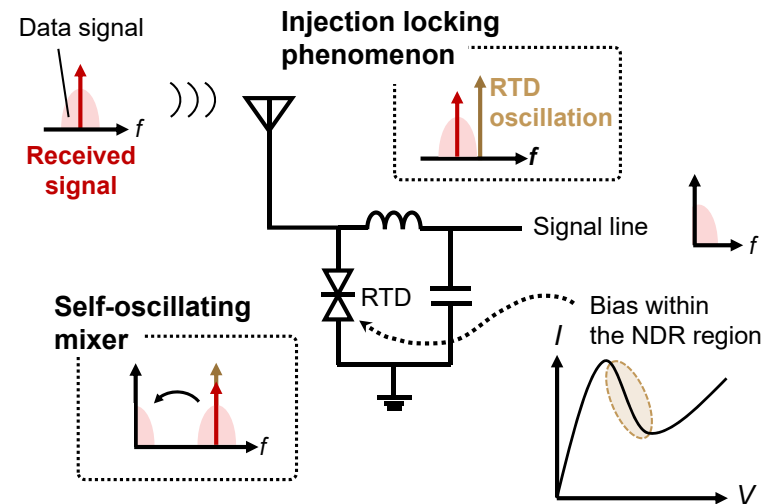
共鳴トンネルダイオード “THz dark horse”

RTD: Resonant tunneling diode



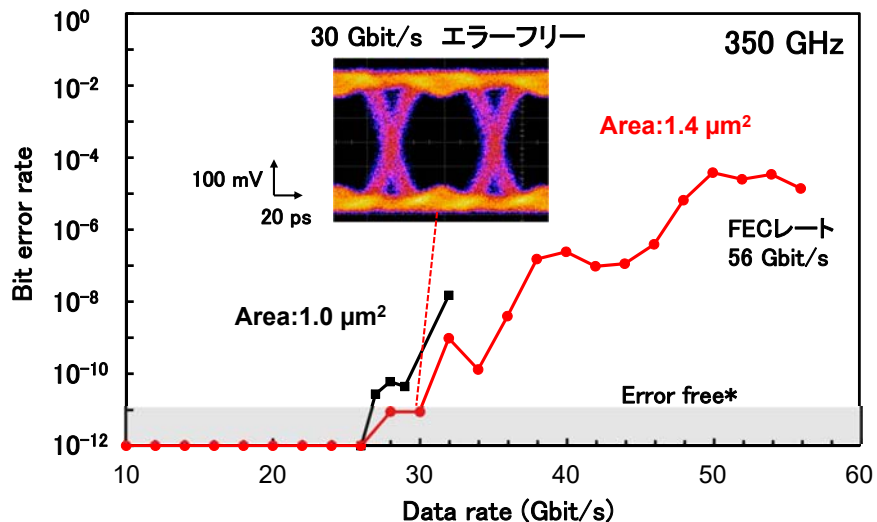
“RTDマジック”

注入同期現象: 増幅効果 (100倍から1000倍の感度増加)



ダイオード送受信器で優れた性能を実現!

Y. Nishida et al., Scientific Reports, vol. 9, 18125 (2019).



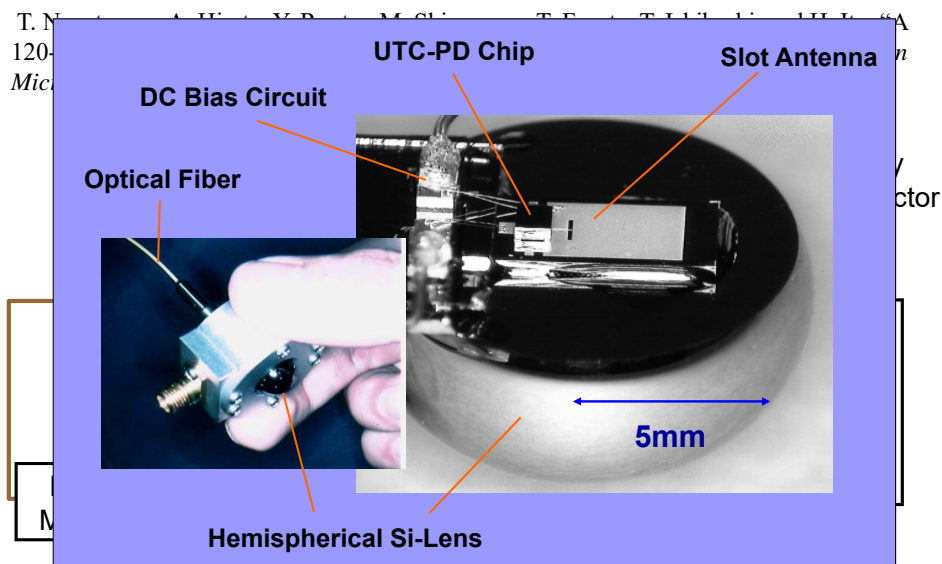
13

テラヘルツ波と光技術

- テラヘルツ波のブレークスルーは、光技術（特にレーザー技術）がもたらした!
- 今も実用化されている分光技術、膜厚測定技術は、レーザー技術をベースにしたものが主流!
- エレクトロニクス技術の進展がコモディティ化の鍵!
- 同様に通信応用のはじまりは、光技術だった!
- 今後も光技術は使われるか?

14

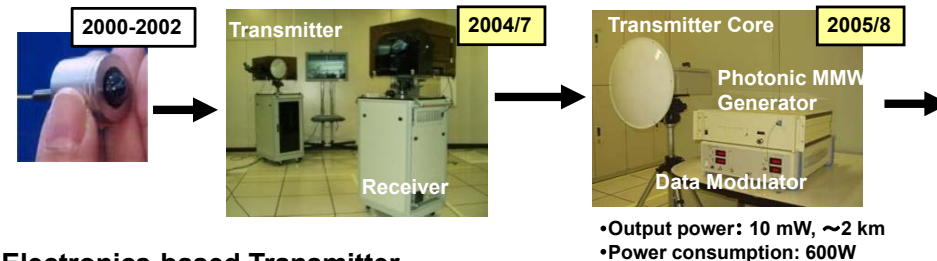
120-GHz Radio Using Continuous Waves



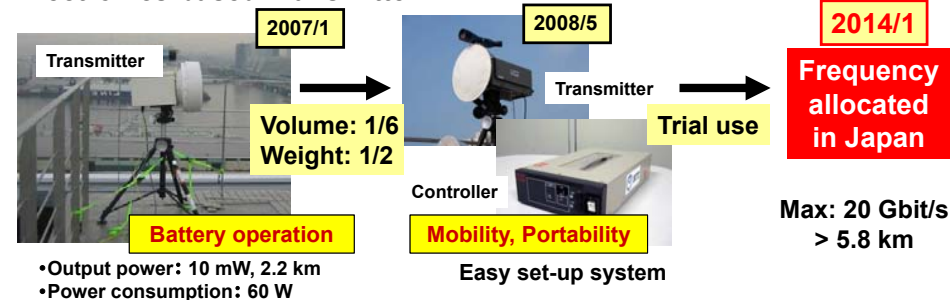
15

120GHz帯無線の歩み (2000年代)

Photonics-based Transmitter

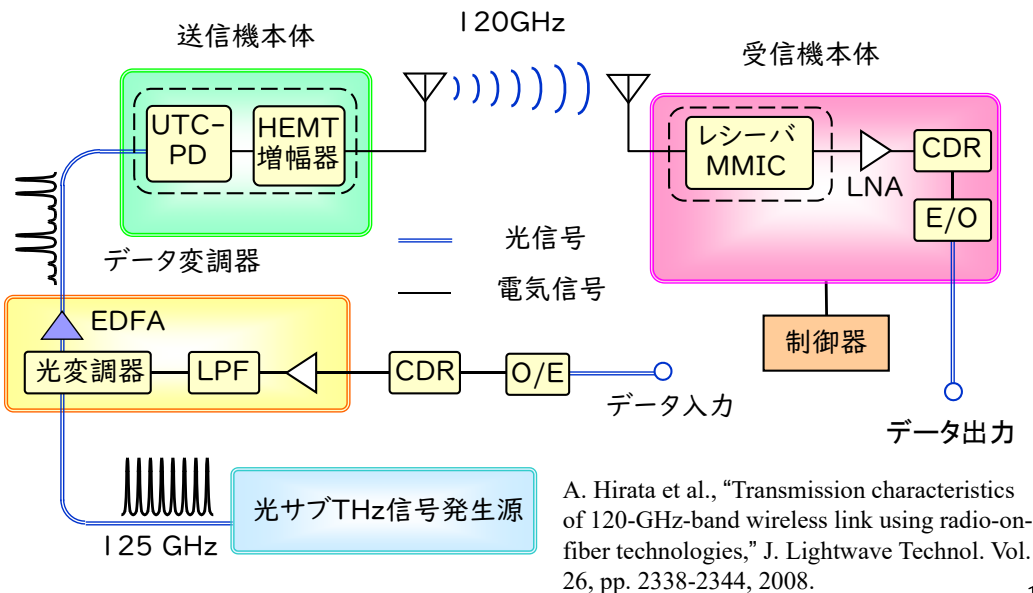


Electronics-based Transmitter



16

120GHz帯無線：送信機に光技術を用いた方式

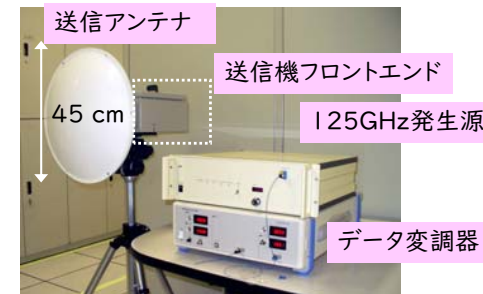


120GHz帯無線送信機：光技術を用いた方式



送信機仕様

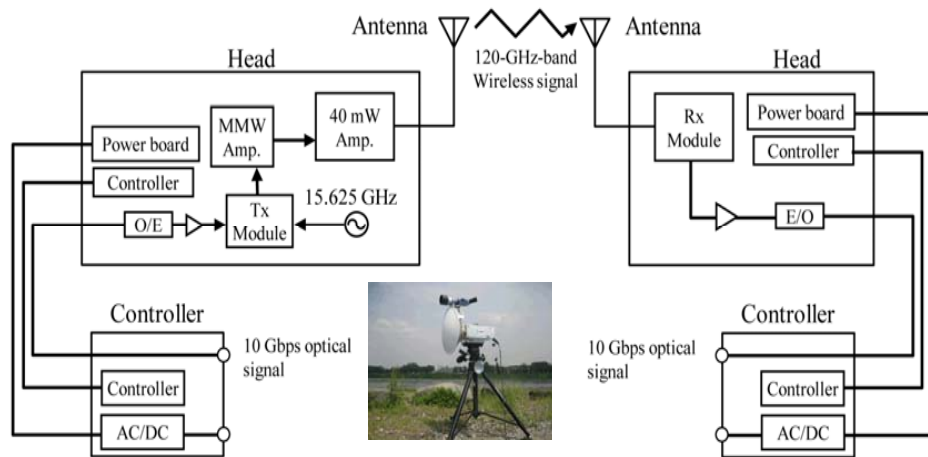
- ・ 中心周波数 125GHz
- ・ 占有帯域 116.5~133.5GHz
- ・ 変調方式 ASK変調
- ・ 出力 10mW
- ・ 最大伝送距離 1.5km
- ・ アンテナ カセグレンアンテナ
- ・ アンテナ利得 49dBi



InP MMIC技術による120GHz帯無線システム

10 Gbit/s, >5 km, InP-HEMT MMIC with FEC
偏波多重方式により双方向

A. Hirata et al., 2010 IEEE Intern. Conf. on Wireless Information Tech. and Sys.(ICWITS), 207. 1, 2010.



120GHz帯の周波数割当て

周波数	114.5~116	116~122.5	122.5~123	123~130	130~134	134~136
		← 120 GHz band (center: 125 GHz / 18GHz bandwidth) →				
用途	地球観測 電波天文 宇宙探査	地球観測 宇宙探査	固定無線 移動無線 衛星通信 アマチュア	衛星通信 ナビゲーション 電波天文	地球観測 固定無線 衛星間通信 電波天文	アマチュア 衛星通信 電波天文

60GHz帯では最大で9GHzが割当て 2倍の帯域!

我が国のテラヘルツ無線は世界を先導した

2014年1月30日：120GHz帯の周波数割当て

周波数割当て計画の一部を変更する告示案

～120GHz帯放送事業用無線局(FPU)の導入等に係る制度整備～

参考

◎変更概要

- **116GHzから134GHzまで** [116-119.98GHz*, 119.98-122.25GHz*, 122.25-123GHz, 123-130GHz*, 130-134GHz]
 - ・移動業務[無線局の目的:放送事業用]を新たに分配。(●120GHz帯放送事業用無線システム(FPU)の導入に係る変更)
 - ※国際分配で「移動業務」が分配されていない周波数帯においては、脚注「J84」を付けて二次業務として分配
 - 【参考】J84: 移動業務によるこの周波数帯の使用は、この周波数割当て表に従って運用する他の無線局又は受信設備に有害な混信を生じさせてはならず、他の無線局による有害な混信からの保護を要求してはならない。
- **915-930MHz**
 - ・一般業務の使用において移動体識別用での限定を解除。(●スポーツ競技連絡用の無線システムの導入に係る変更)
- **710MHzから770MHzまで** [710-714MHz, 714-750MHz, 750-770MHz]
 - ・運用が終了したアナログテレビジョン放送に係る規定の削除。

中心周波数: 125GHz 周波数帯域: 18GHz

米国が動いた：2019年12月

米FCCがミリ波を超えるテラヘルツ帯を実験用として開放へ



Media Contact:
Neil Grace, (202) 418-0506
neil.grace@fcc.gov

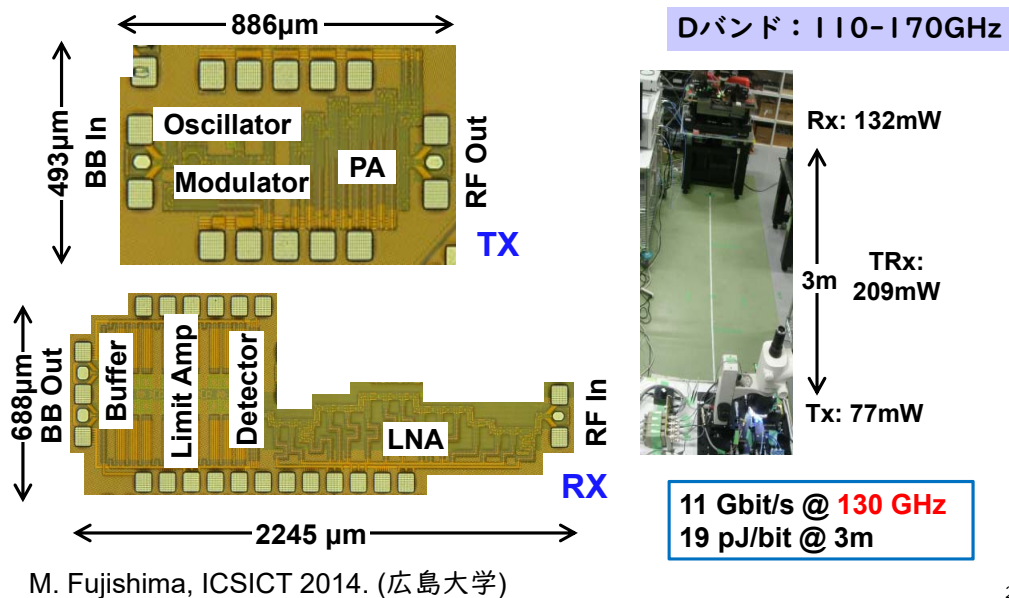
ripe: fully matured and ready to be used

For Immediate Release

FCC TAKES STEPS TO OPEN SPECTRUM HORIZONS FOR NEW SERVICES AND TECHNOLOGIES

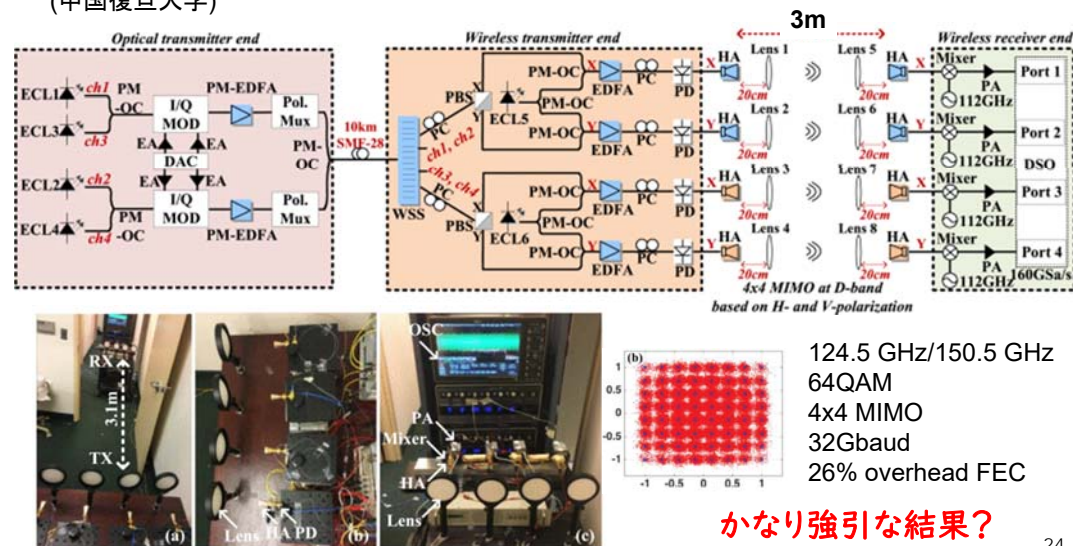
WASHINGTON, March 15, 2019—The Federal Communications Commission adopted new rules to encourage the development of new communications technologies and expedite the deployment of new services in the spectrum above 95 GHz. This spectrum has long been considered the outermost horizon of the usable spectrum range, but rapid advancements in radio technology have made these bands especially ripe for new development.

Dバンドの将来性を予見させる報告例



Dバンドを使った1Tbit/s無線

X. Li et al., "1-Tb/s millimeter-wave signal wireless delivery at D-Band," JLT, 37, 1, 196(2019). (中国復旦大学)



Dバンドはテラヘルツ無線の最有力候補か？

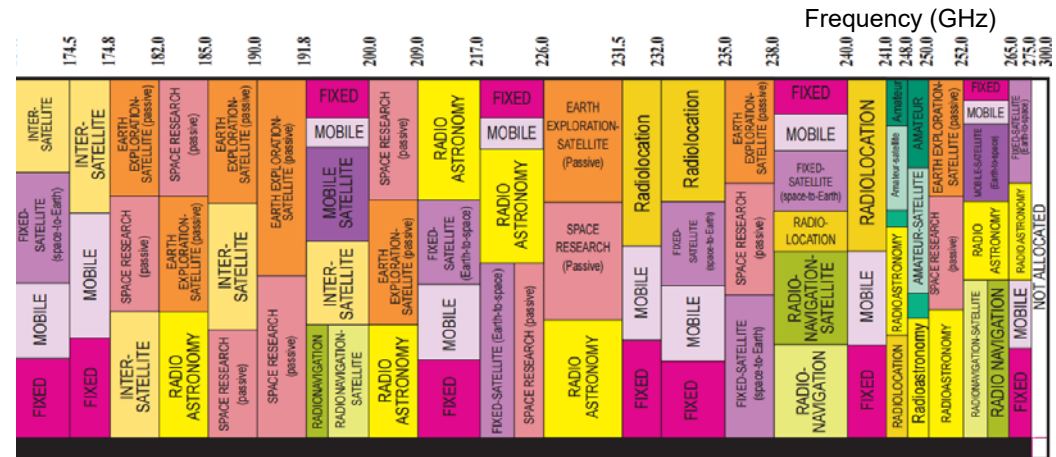
- Si-CMOS LSIの主戦場。
massive アレーが可能に
- 高出力GaN増幅器が利用可能。
- 国内では120GHz帯が割当。
18GHz帯域
OOK → 12.5 Gbit/s
QPSK → 25 Gbit/s
256QAM → 100 Gbit/s ?

25

より高い周波数探究へのモチベーション

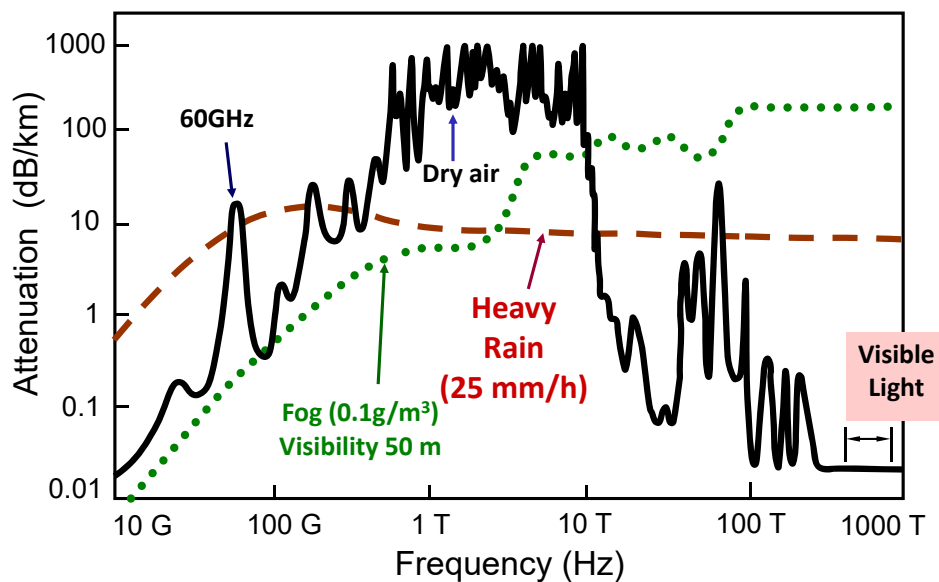
The access to the unregulated frequency bands: **>275GHz**

Free bandwidth (as per today!) is at really high frequencies.



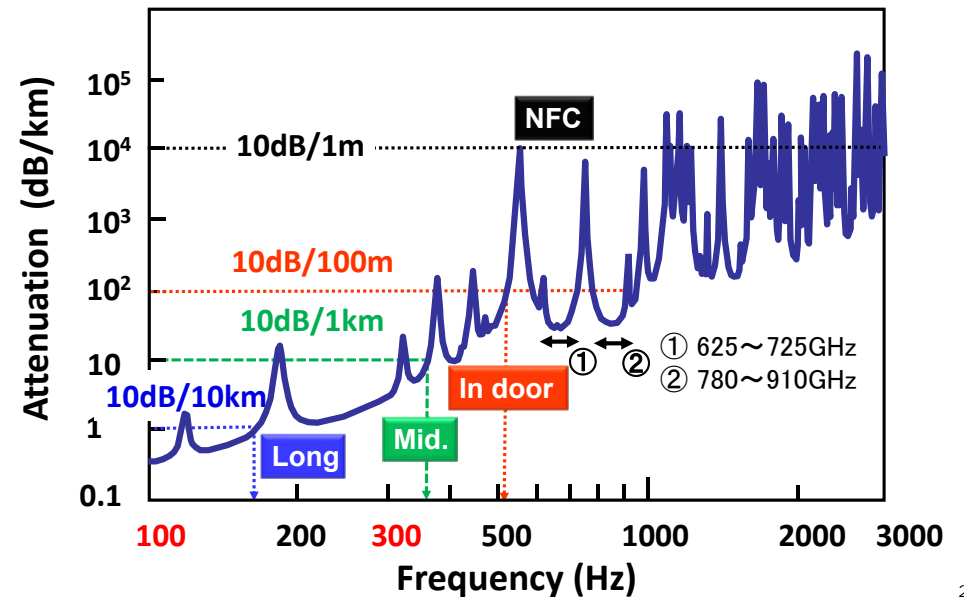
26

大気・降雨減衰が無線通信に与える影響



27

大気減衰の詳細と通信距離



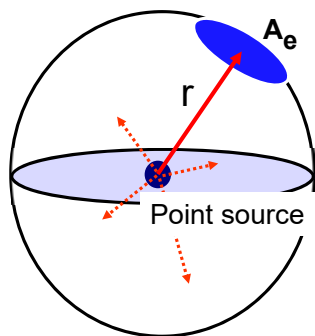
28

もうひとつの伝搬損：自由空間伝搬損失

自由空間伝搬損失: Free-Space Propagation Loss (PSPL)

$$\Gamma = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi fr}{c}\right)^2$$

損失は距離と周波数の2乗に比例して増加する

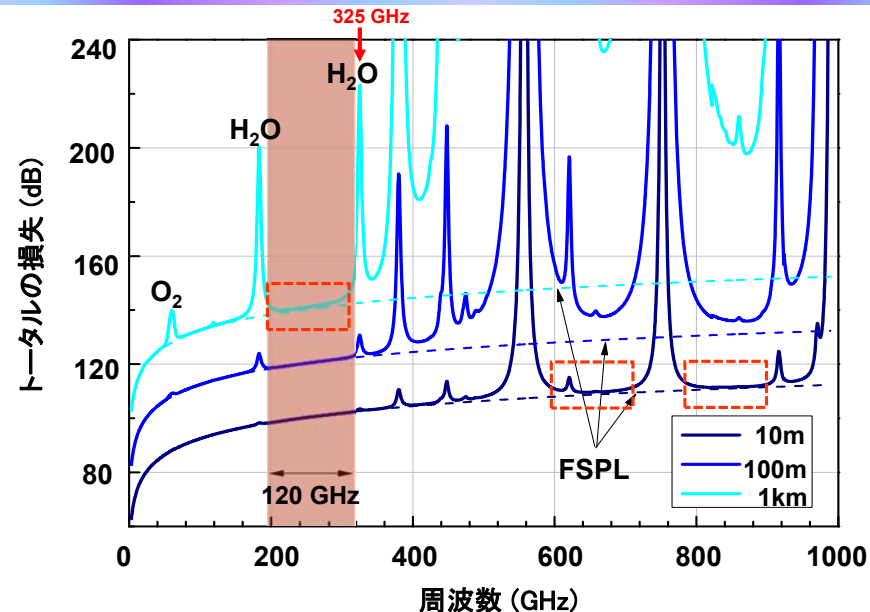


$$\text{損失} \propto 4\pi r^2 / A_e$$

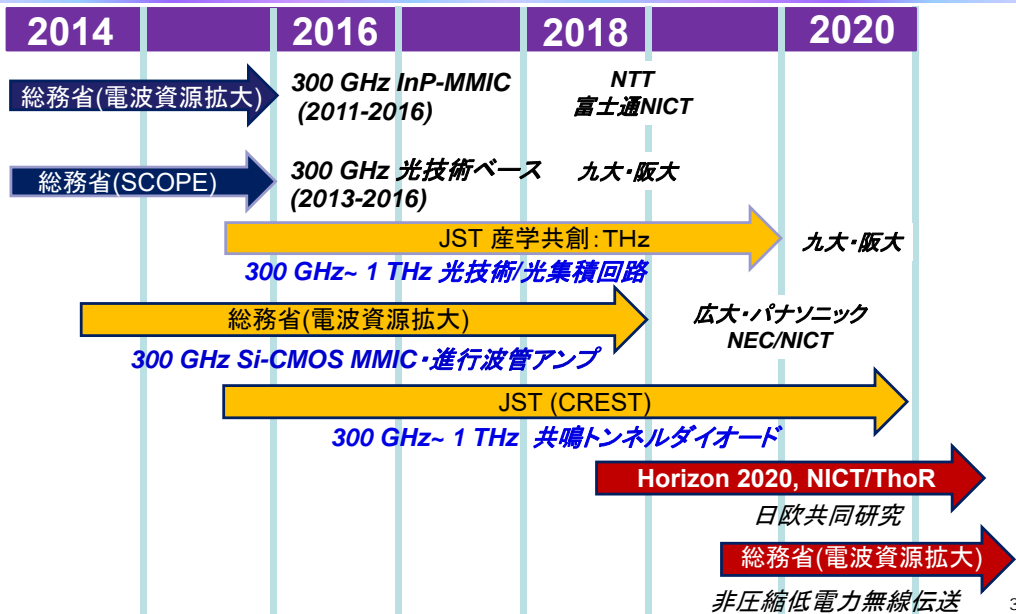
A_e : アンテナ開口
 $= \lambda^2 G_a / 4\pi$
 G_a : アンテナ利得

上記の表式は $G_a = 1$ (0 dBi) としたときに一致する

200GHz~320GHzに電波の窓が存在



我が国における研究プロジェクト (300GHz帯)



欧州における研究プロジェクト一例 (~2021)

ICT Beyond 5G Cluster

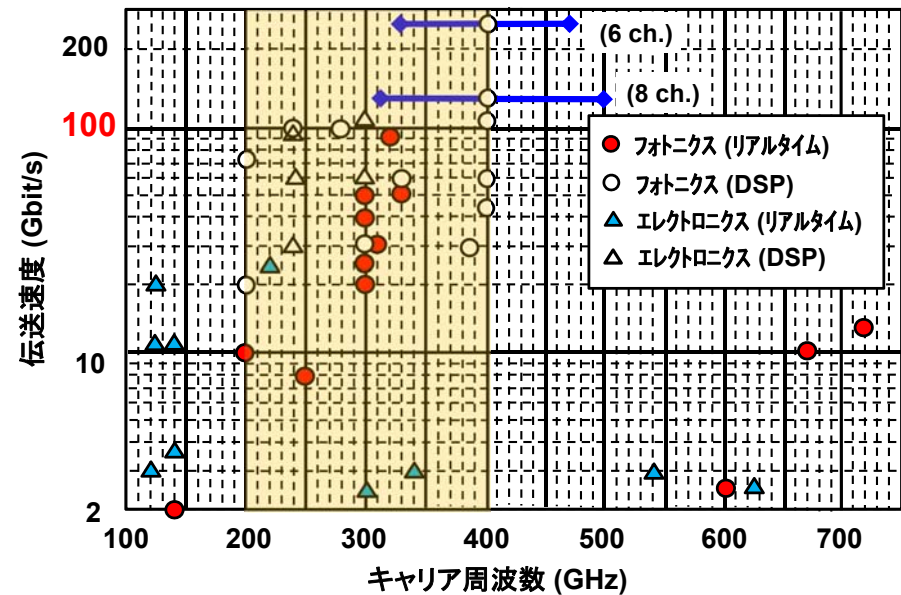


B5G/6Gに向けた伝送速度の要求

2000	2010	2020	2030
100M bit/s	1G bit/s	10G bit/s	100G bit/s
3G	LTE/4G	5G	6G

33

THz無線の現状：キャリア周波数 vs.伝送速度



34

100Gbit/sの「技術的可能性」が見えてきた

- 200 ~ 400GHz のキャリア周波数を用い 100Gbit/sの伝送速度が達成されている。
- 上記の多くは、光技術を利用したものであり、光技術がTHz無線の研究フロントを牽引している。
- 超100Gbit/sの報告もあり、これは光技術をベースにした多チャンネル化を利用したものである。

35

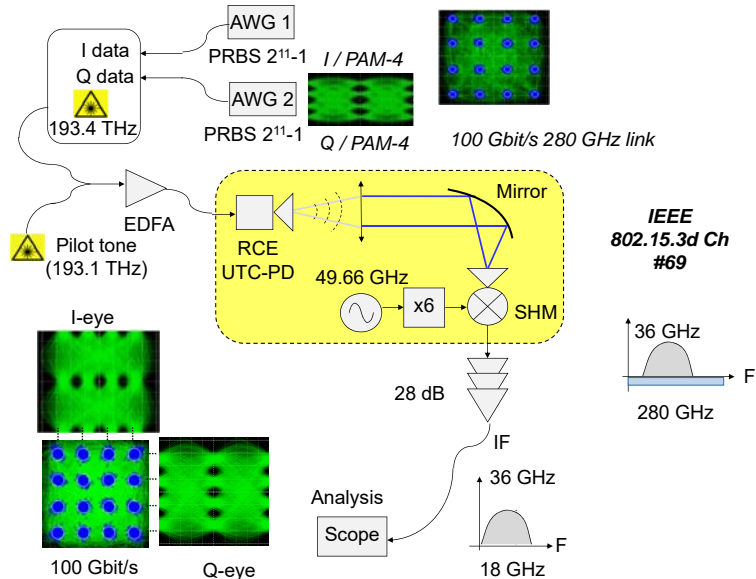
光技術を利用した100Gbit/s級無線の例

Authors	Frequency	Modulation	Data rate	Signal processing
S. Koenig et al. (KIT, 2013)	~240 GHz	16QAM (25 Gbaud)	100 Gbit/s	DSP (off-line)
V. K. Chinni et al. (IEMN, 2018)	~280 GHz	16QAM (25 Gbaud)	100 Gbit/s	DSP (off-line)
H. Shams et al. (UCL, 2015)	~200 GHz	QPSK (12.5 Gbaud) 4 carriers	100 Gbit/s (4 ch)	DSP (off-line)
X. Yu et al. (DTU, 2016)	300 GHz ~500 GHz	QPSK (10 Gbaud) 8 carriers	160 Gbit/s (8 ch)	DSP (off-line)
X. Pang et al. (NETLAB, 2016)	300 GHz ~500 GHz	16QAM (12.5 Gbaud) 6 carriers	260 Gbit/s (6 ch)	DSP (off-line)
A. Stöhr et al. (Duisburg U., 2017)	328 GHz	64QAM (7.4 Gbaud)	59 Gbit/s	DSP (off-line)
X. Pang et al. (NETLAB, 2017)	425 GHz	16QAM (32 Gbaud)	106 Gbit/s	DSP (off-line)
T. Nagatsuma et al. (Osaka U., 2016)	320 GHz	QPSK (50 Gbaud)	100 Gbit/s	Analog Real time

36

伝IEMNの100Gbit/s級無線

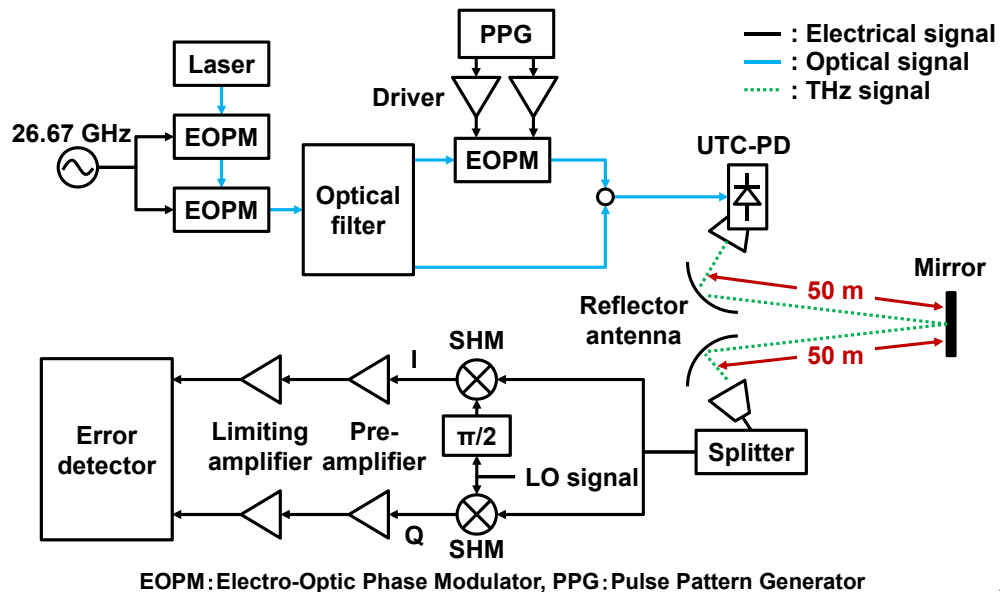
V. K. Chinni et al., Electron. Lett., 54, pp. 638–640, 2018.



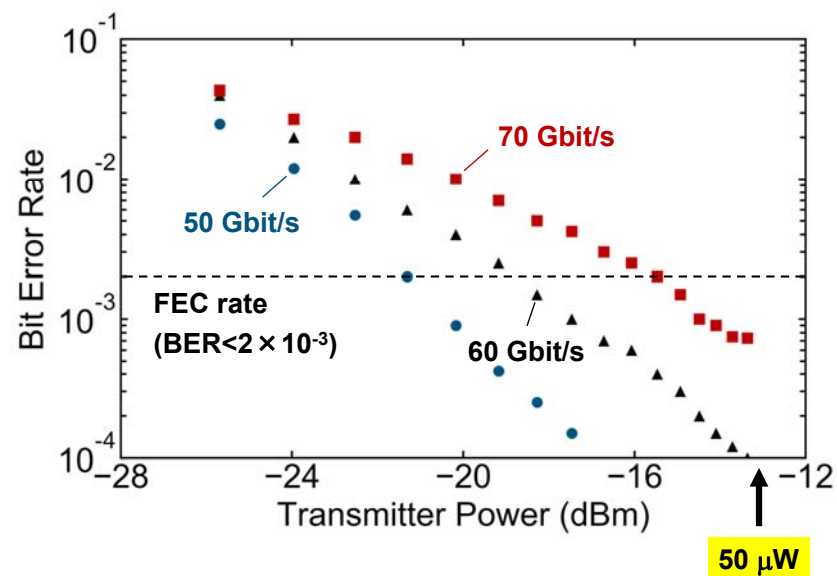
キャリア周波数と伝送距離

Carrier Frequency	Data Rate	Distance	Ref.
125 GHz	10 Gbit/s (OOK/real time)	5.8 km	A. Hirata et al., ICWITS 2010
240 GHz	64 Gbit/s (QPSK/off line)	850 m	I. Kallfass et al., J. IRMMW/THz, 2015
320 GHz	70 Gbit/s (QPSK/real time)	100 m	K. Iwamoto et al., MTSA 2017
300 GHz	100 Gbit/s (QPSK/off line)	110 m	T. Harter et al., ECOC 2018

QPSK 100m 伝送実験 (320GHz)

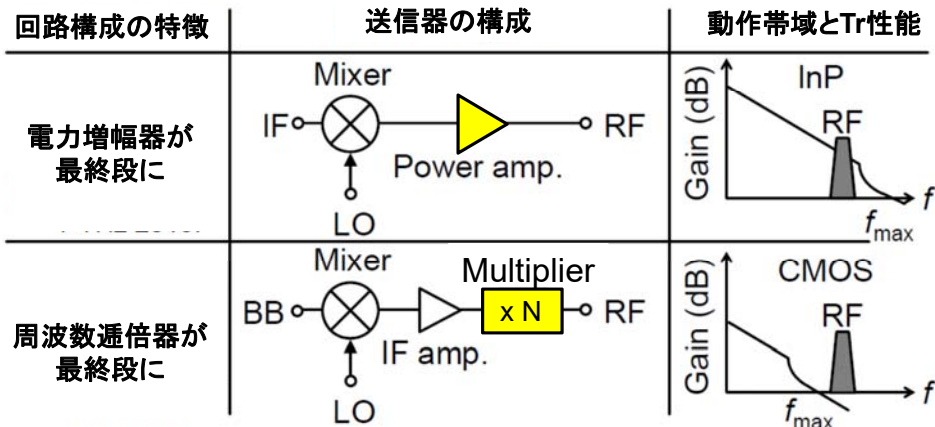


伝送特性 (320GHz)



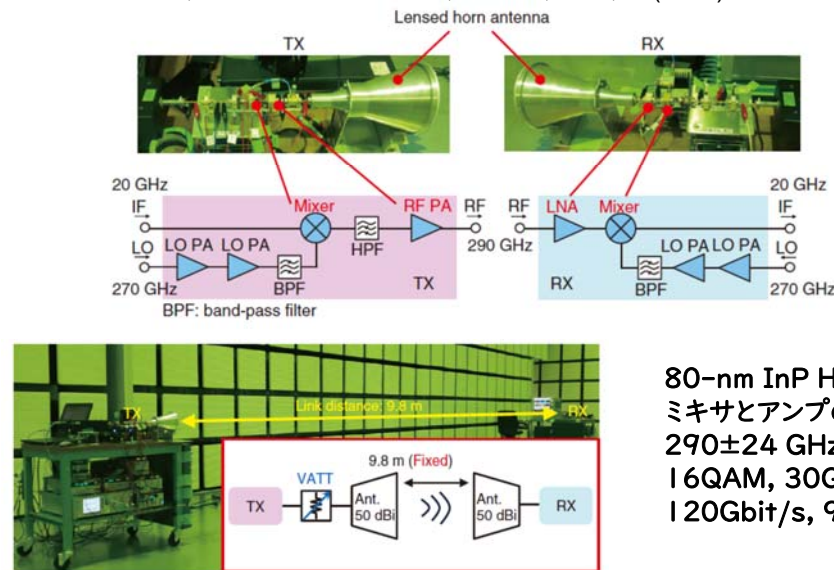
InP vs. Si-CMOS

f_{max} : Unity-power-gain frequency



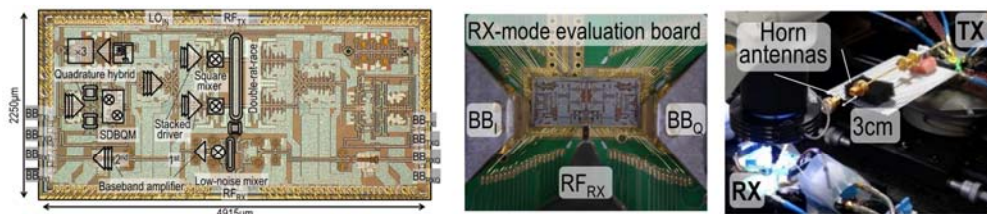
InP-HEMTによる300GHz帯無線(NTT)

H. Hamada et al., NTT Technical Review, Vol. 19, No. 5, 74(2021).



80-nm InP HEMTによる
ミキサとアンプの開発
290±24 GHz
16QAM, 30Gbaud
120Gbit/s, 9.8 m

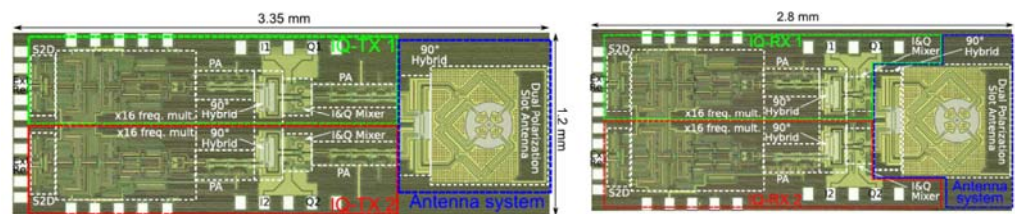
Si-CMOSによる300GHz帯無線(広島大他)



Channel	Ch.49	Ch.50	Ch.66
Center freq.	257.04GHz	265.68GHz	265.68GHz
Modulation	16QAM	16QAM	16QAM
TX Constellation spectrum (Equalized)			
	EVM	10.9%rms (-19.3dB)	11.3%rms (-18.9dB)
Symbol rate	7.04Gbaud	7.04Gbaud	20Gbaud
Data rate	28.16Gb/s	28.16Gb/s	80Gb/s

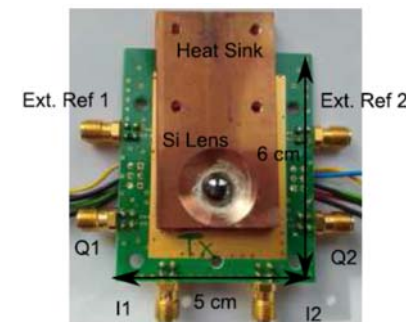
BW → Ch.49, 50 : 8.64GHz, Ch.66 : 25.92GHz

SiGe-HBTによる240GHz帯無線



110 Gbit/s (OPSK)偏波多重

P. Rodríguez-Vázquez et al., "A QPSK 110-Gb/s Polarization-Diversity MIMO Wireless Link With a 220–255 GHz Tunable LO in a SiGe HBT Technology," IEEE Trans. MTT, pp. 3834-3851, September 2020.



120GHz帯無線による非圧縮8K無線伝送

偏波多重システム: 24 Gbit/s (12Gbit/s x 2) for dual green 8K

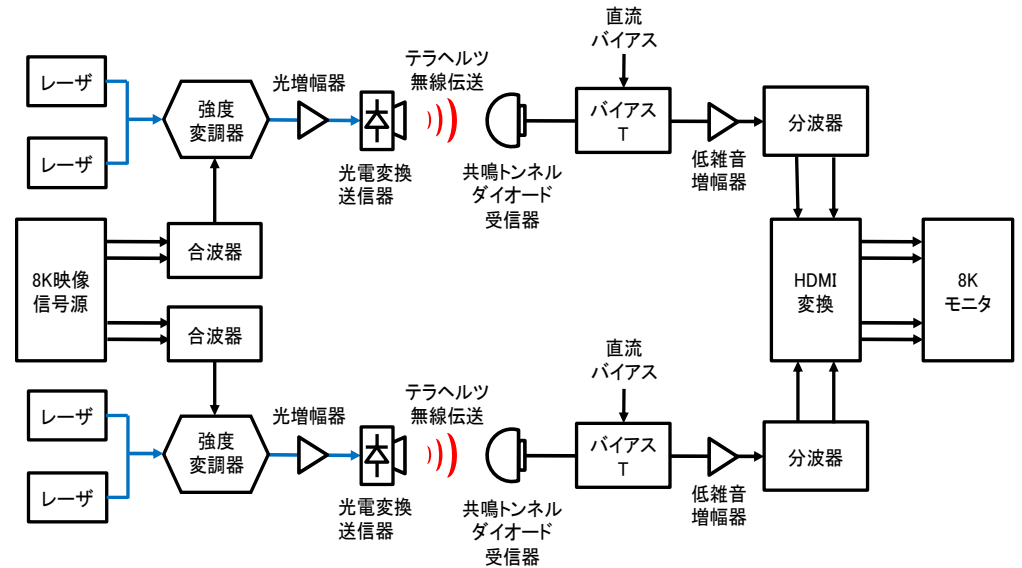
最長距離: 1.3 km



参考:NHK技研 R&D/No.165/2017.9

45

フル解像度8Kの非圧縮無線伝送: 48Gbit/s



46

300GHz帯無線による非圧縮フル8K無線伝送

周波数多重システム: 48 Gbit/s (24 Gbit/s x 2) for full 8K

8K Ultra HD Video Wireless Transmission using Terahertz Waves
by JST CREST "Development of terahertz integrated technology platform
through fusion of resonant tunneling diodes and photonic crystals"

47

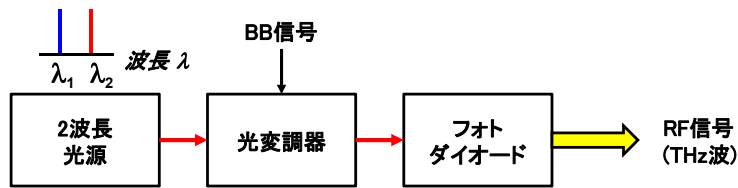
光技術の特徴と役割

- 送信技術において、THz信号の発生と変調の点で、電子技術よりも広帯域でかつその実現が容易
- 超広帯域性を利用したテラヘルツ応用のテクノロジードライバ
☞ 実用性能を早期に実現し応用を開拓
- 光ファイバネットワークとの融合において不可欠

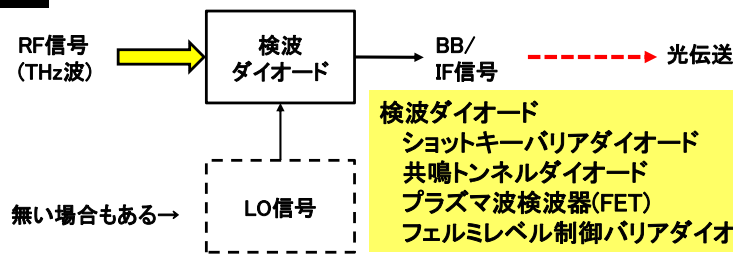
48

光技術を利用したTHz無線の基本形

送信機

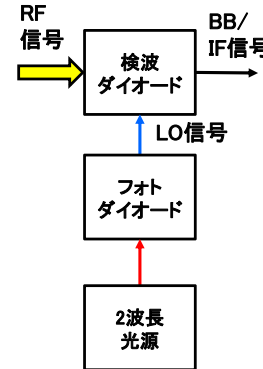


受信機

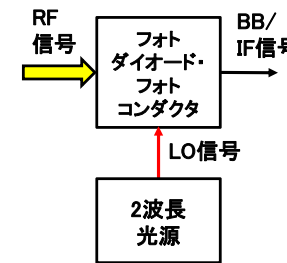


受信技術の今後：光技術の積極導入

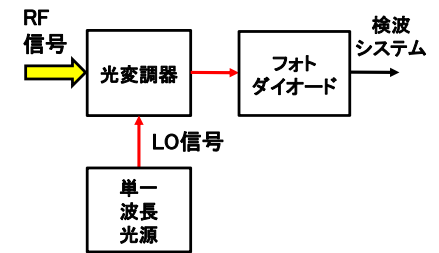
①光LO型



②光レーザ型

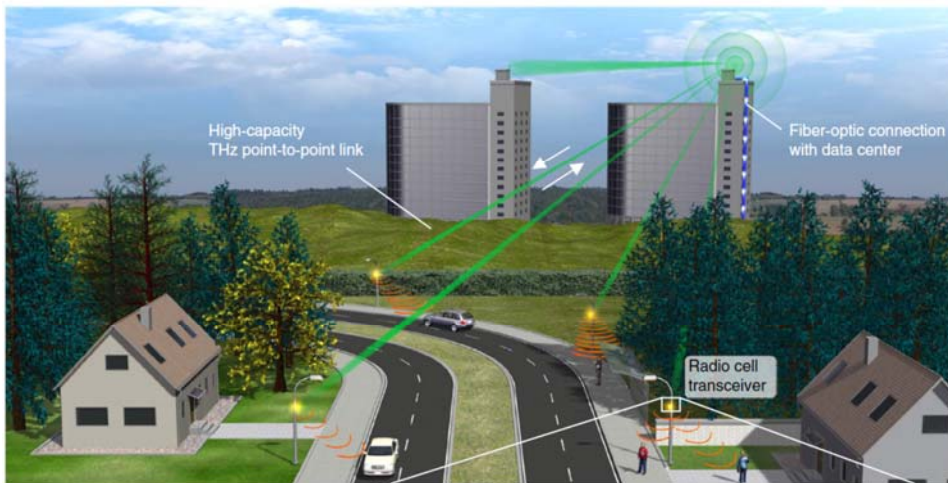


③光出力型



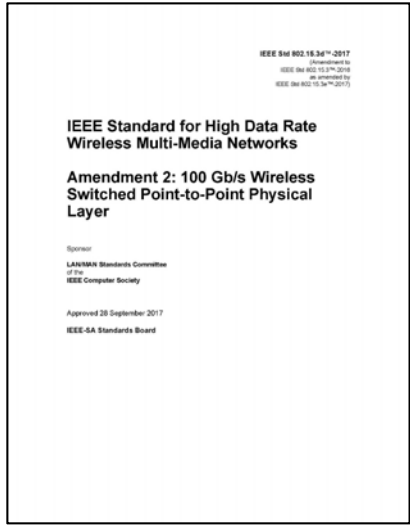
光ネットワークと無線との融合

T. Harter et al., Optica, vol. 6, 1063(2019).



周波数割当・国際標準化に向けた動向

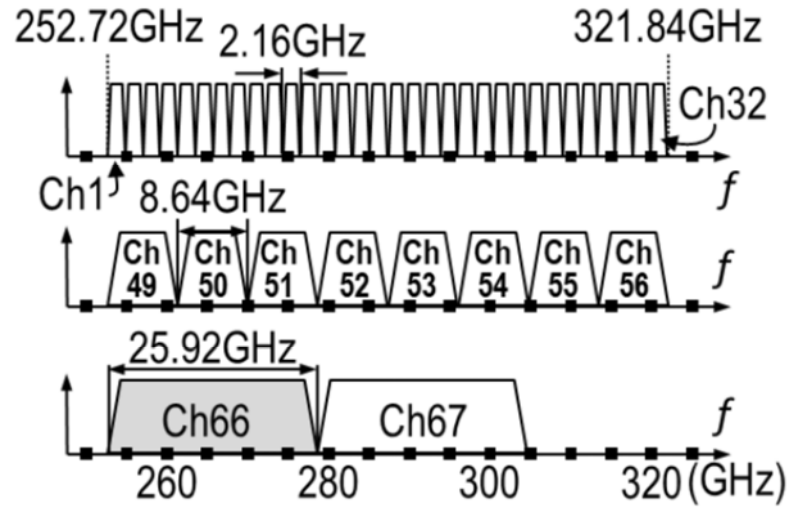
IEEE Standardization: Oct. 2017



Standardization of the PHY and MAC layers of wireless systems at frequencies from 252 GHz to 325 GHz for use cases such as kiosk downloading, inter-chip/inter-board communications, data center communications, and mobile fronthaul/backhaul.

IEEE Std 802.15.3d: Channels

252~325 GHz



世界無線通信会議: WRC2019

World Radio-communication Conference 2019

目的：周波数や衛星軌道の利用方法等に関する国際的な取決めを規定した無線通信規則の改正

期間：2019年10月28日～11月22日

場所：エジプト（シャルム・エル・シェイク）

162か国、約4000名が参加

議題1.15：

275 -450GHz の周波数範囲で運用する陸上移動及び固定業務アプリケーションへの使用の特定に向けたコンセンサスの形成（周波数割当ての前の段階であるが、初めて公式に利用の意思が共有される）

結果: 275-296 GHz (21 GHz) 306-313 GHz (7 GHz) 318-333 GHz (15 GHz) 356-450 GHz (94 GHz)

B5Gで当面のターゲットとなる周波数帯域

- ・電波伝搬における窓領域
- ・IEEE802.15での標準化
- ・WRC2019での周波数特定

📡 252~296 GHz
中心周波数: 274 GHz
帯域: 44 GHz

ASK (OOK) では、30Gbit/s程度
>100Gbit/sのためには16QAM以上の多値化が必要

一般的な技術課題

要素技術の追求

トランジスタの高周波化：プレーヤ？
 高電流動作（高出力）：サーマルマネジメント
 伝送線の低損失化（誘電体線路？）
 アンテナ技術（アレー、ビーム制御）
 発振器の低位相雑音化（逡倍技術の限界、光技術の導入？）
 低電力化・高効率化技術（how?）

設計技術（と教育）：思想が変わる

システム＝電磁波回路
 （匠の世界→差別化できる？AIの活用?）

システム集積化技術と実装技術

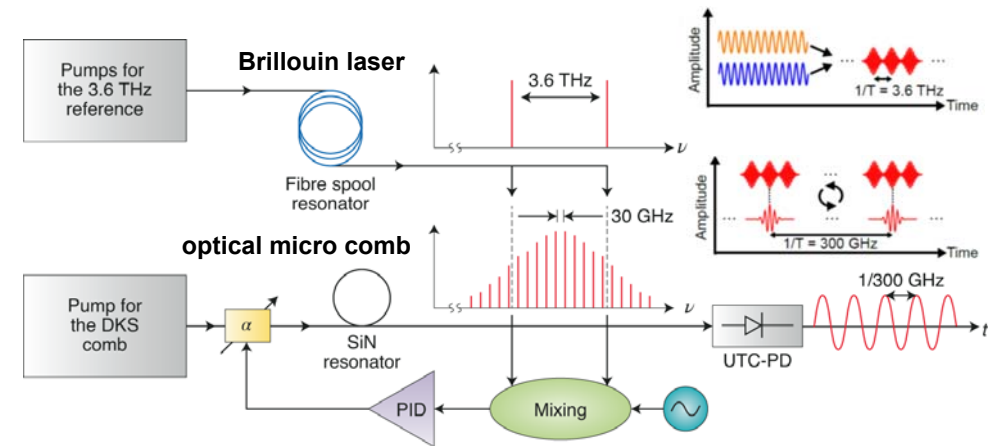
（ここで差別化できる可能性がある!!）

57

新たな低位相雑音光源の開発例

T. Tetsumoto, T Nagatsuma et al., "Optically referenced 300 GHz millimetre-wave oscillator," Nature Photonics, 2021.

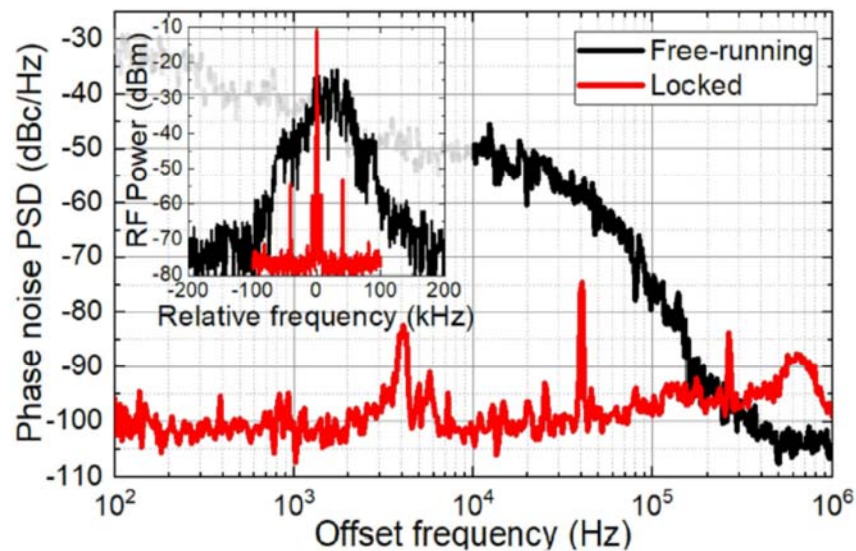
"optical frequency division"



58

位相雑音@ 300 GHz

T. Tetsumoto et al., Opt. Lett., vol. 45, pp. 4377-4380, 2020.



電波技術と光技術との融合が鍵！

Nature Electronics, Vol. 1, No. 12, pp. 622-638, 2018.

REVIEW ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41928-018-0173-2>

nature
electronics

Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonic systems

Kaushik Sengupta^{1*}, Tadao Nagatsuma² and Daniel M. Mittleman³

nature
electronics

Implantable micro-LEDs
take control



60

テラヘルツ集積システムの将来像

第5世代(2020年~)のテラヘルツ技術は、システムの集積化技術の進展によって、より小型で安価になり、私達の身の回りで使われるようになるだろう!

“Opening Terahertz for Everyday Applications,” K. K. O et al., IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, Aug. 2019.

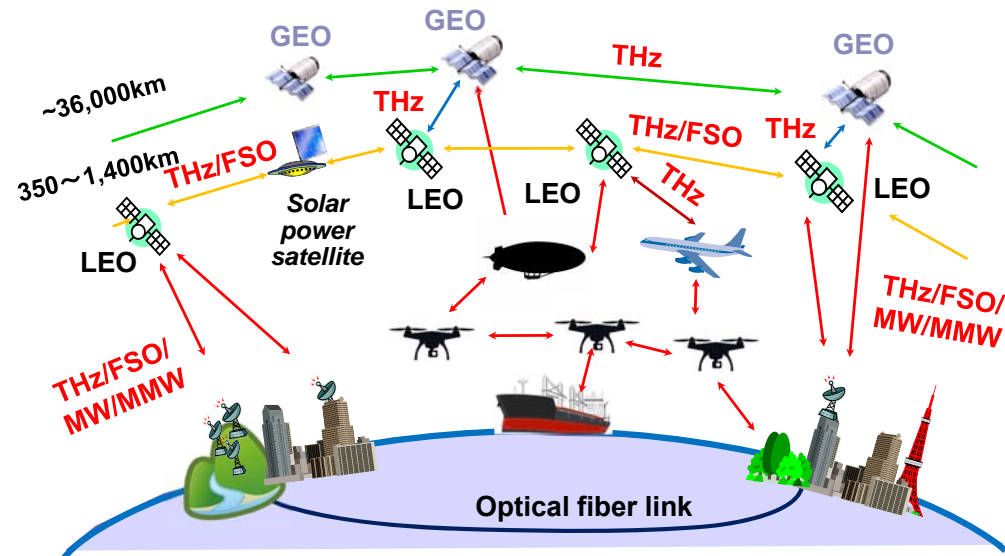
“Filling the Gap with Sand,” S. Naghavi et al., IEEE Solid-State Circuits Magazine, Summer 2019.



61

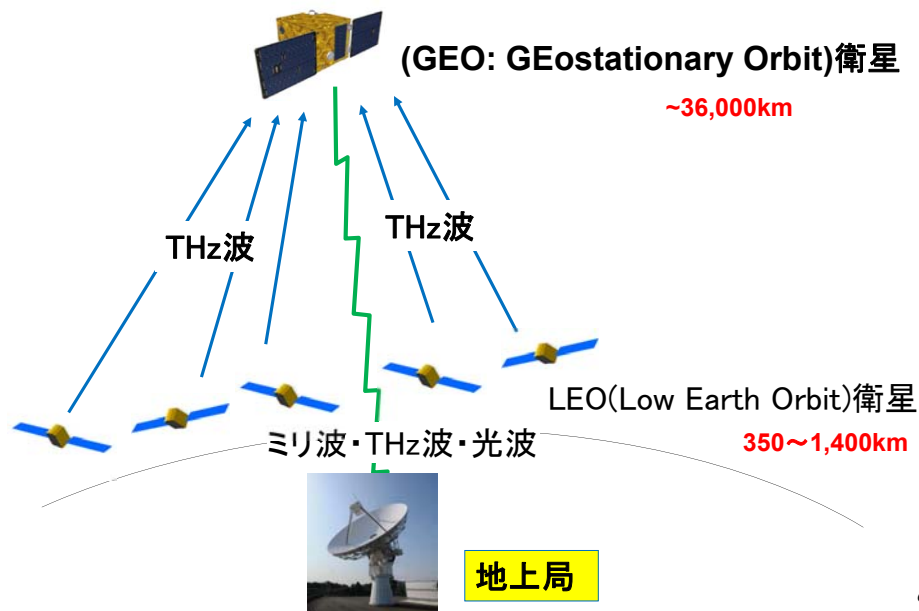
6G & Beyond

2次元NWからバーティカルへ、そして宇宙へ



62

LEO-GEO衛星間ネットワーク



63

我が国が世界を牽引し続けるために

- THz無線R&Dの組織的推進(ばらばらではもう欧米に勝てない)
- センター(統合拠点)の設置(NICT?)
コンポーネント開発G(海外ファンドリーの活用、一部は国産化)、
送受信システム開発G、テストベッド開発・伝送実験G、
ただし、すべてを一拠点に集中させる必要はない
- 挑戦的かつ現実的な(ニーズに整合した)ターゲット
 - ☞ 100 Gbit/s X 100 km
 - ☞ 1 Tbit/s X 1 km
- 通信応用で実用化した技術は、センシング、レーダ技術にも転用可能→THz波の産業化加速

64