



# テラヘルツ波を活用した高セキュリティ 無線通信技術の研究開発の概要

電波利活用ウェビナー2021

2021年10月28日

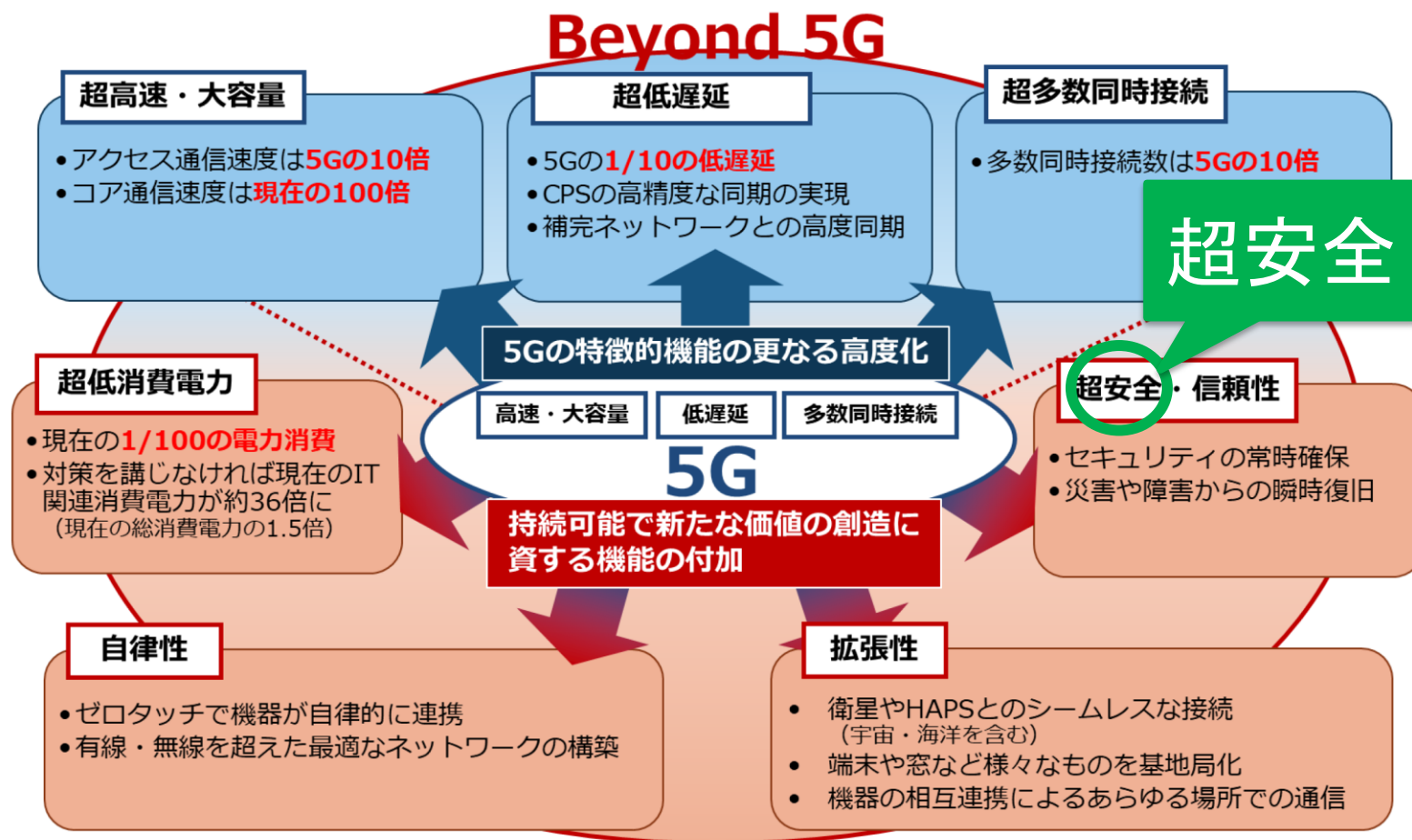
九州大学 加藤和利

# 発表内容

1. Beyond 5Gで期待されるテラヘルツ波とは
2. テラヘルツ波利用に向けた課題
3. 光通信技術を活用したテラヘルツ波生成
4. 高セキュリティ無線通信技術への展開
5. まとめ

# Beyond 5Gに求められる性能

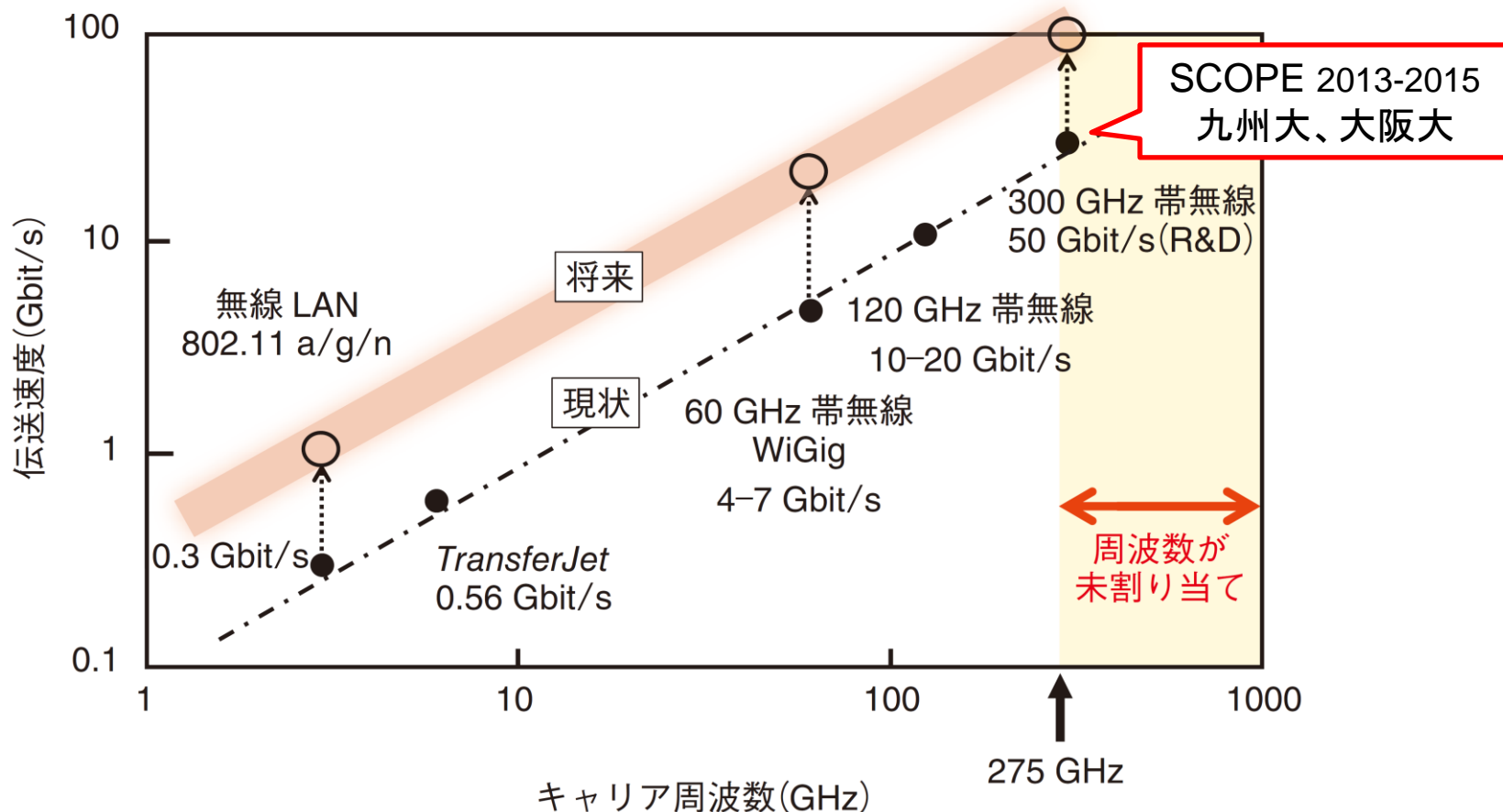
超安全：意識しなくてもセキュリティ、プライバシーが常に確保



総務省, “Beyond 5G 推進戦略 –6Gへのロードマップ–,” 2020年12月18日

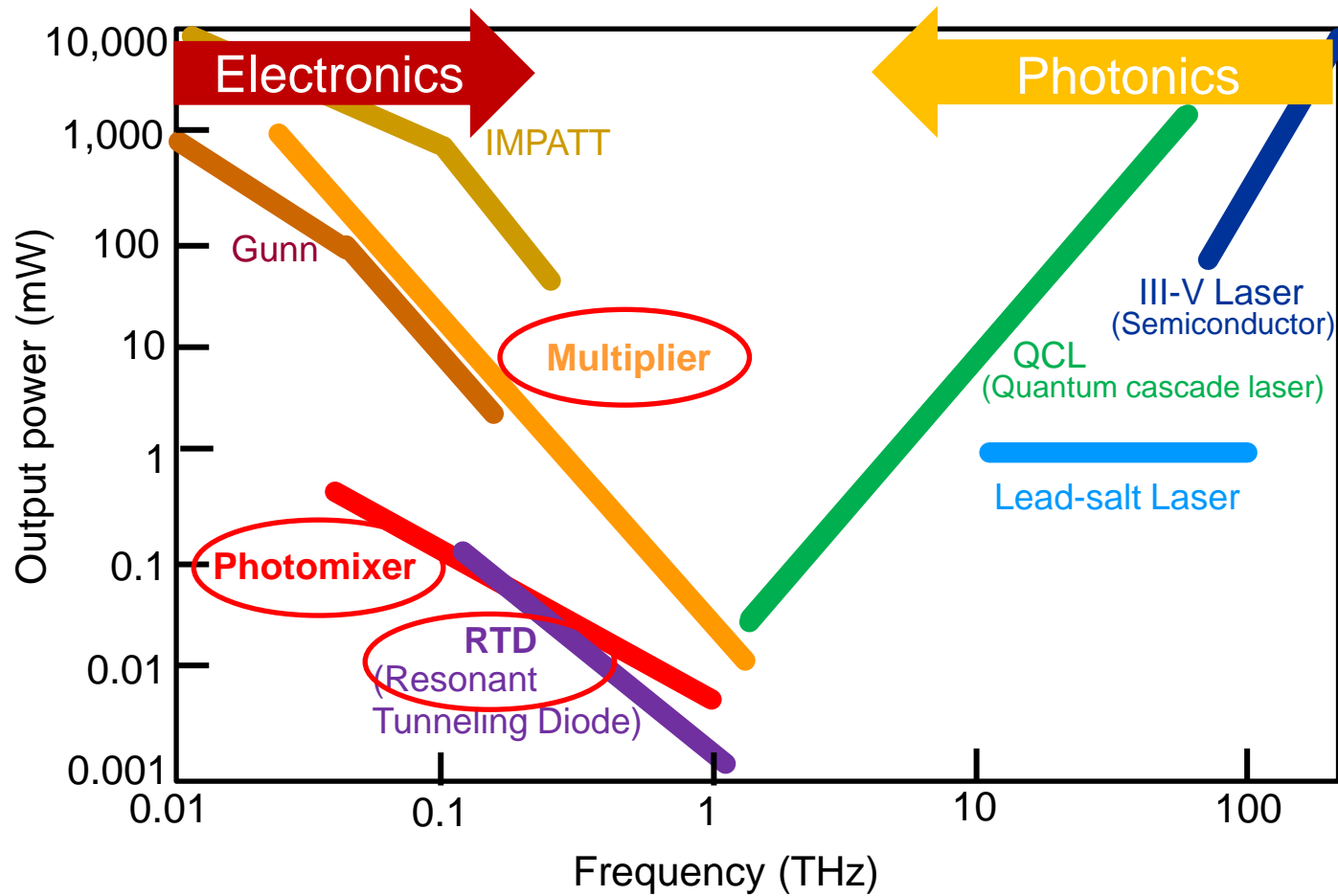
# 伝送容量 vs. キャリア周波数

無線通信の伝送速度はキャリア周波数にほぼ比例



永妻忠夫, “テラヘルツ波が拓く超高速無線通信,” 精密工学会誌, vol.82, no. 3, pp.221-224, 2016.

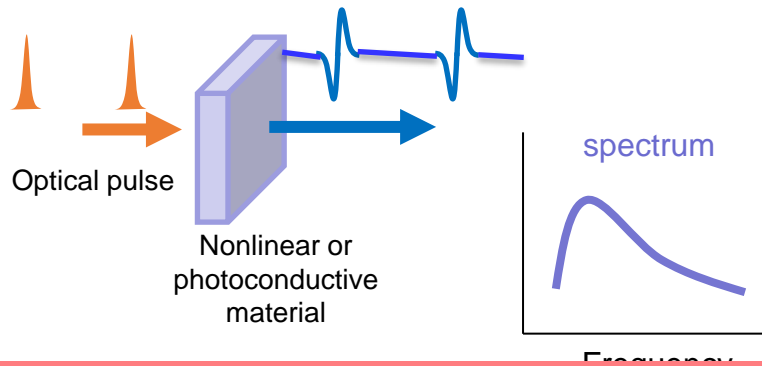
# テラヘルツ波発生技術のトレンド



# 代表的なテラヘルツ波発生法

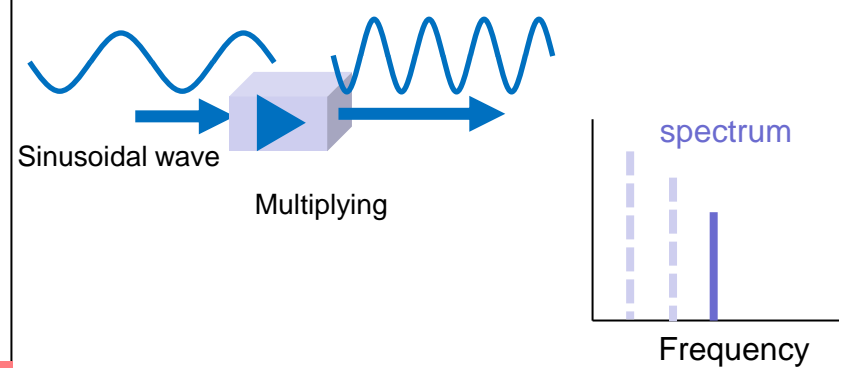
## Optical generation

### Optical pulse



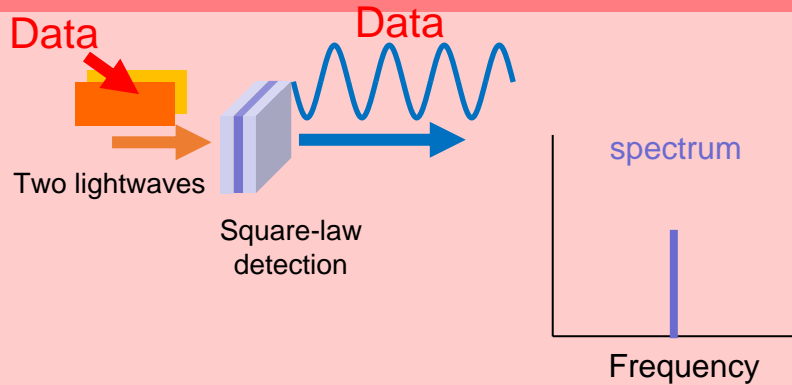
## Electrical generartion

### Multiplier

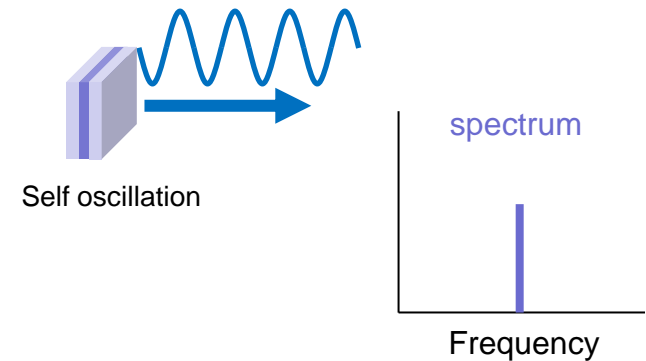


## 広帯域

(ex. 340 GHz bandwidth @600GHz)



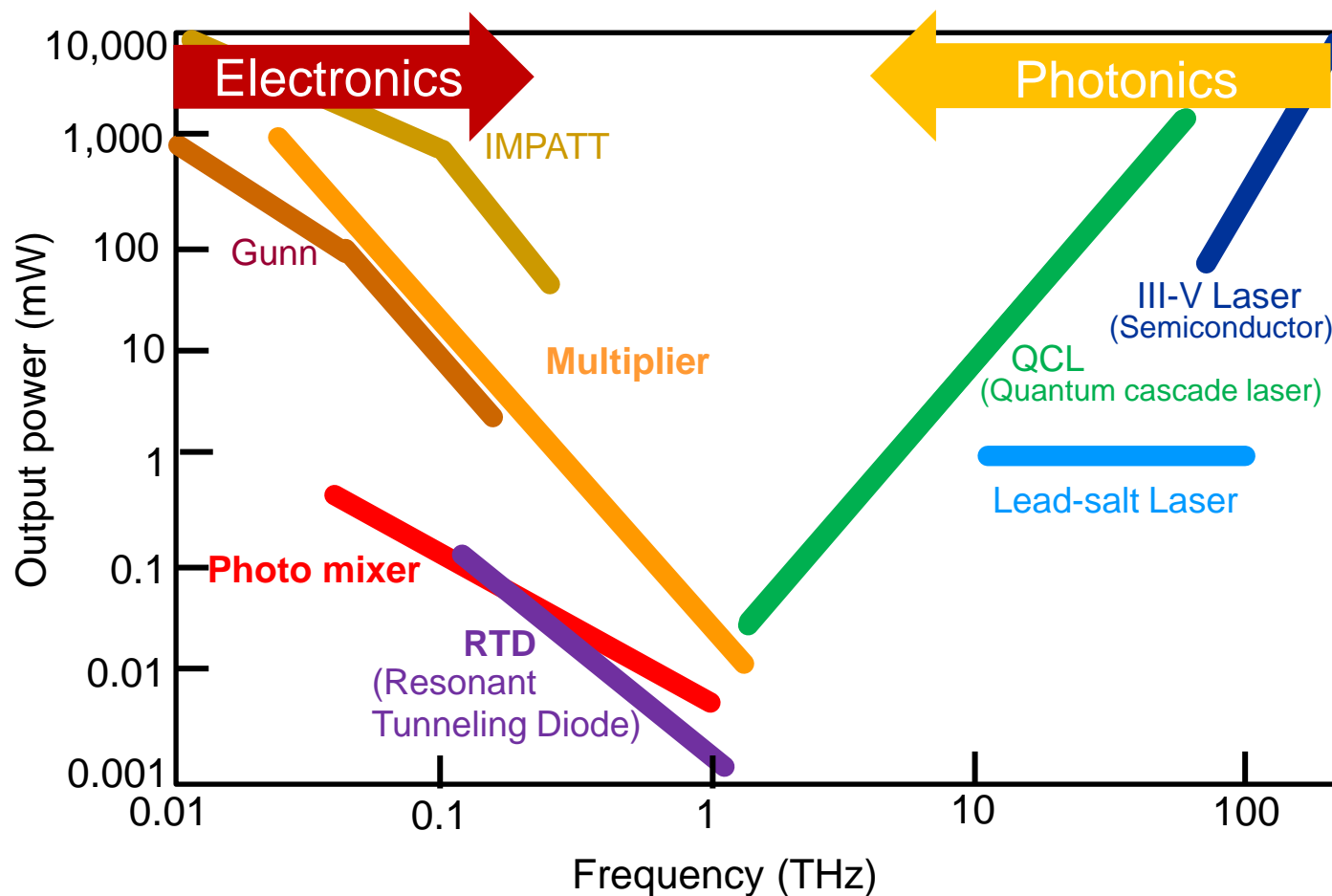
### RTD



# 発表内容

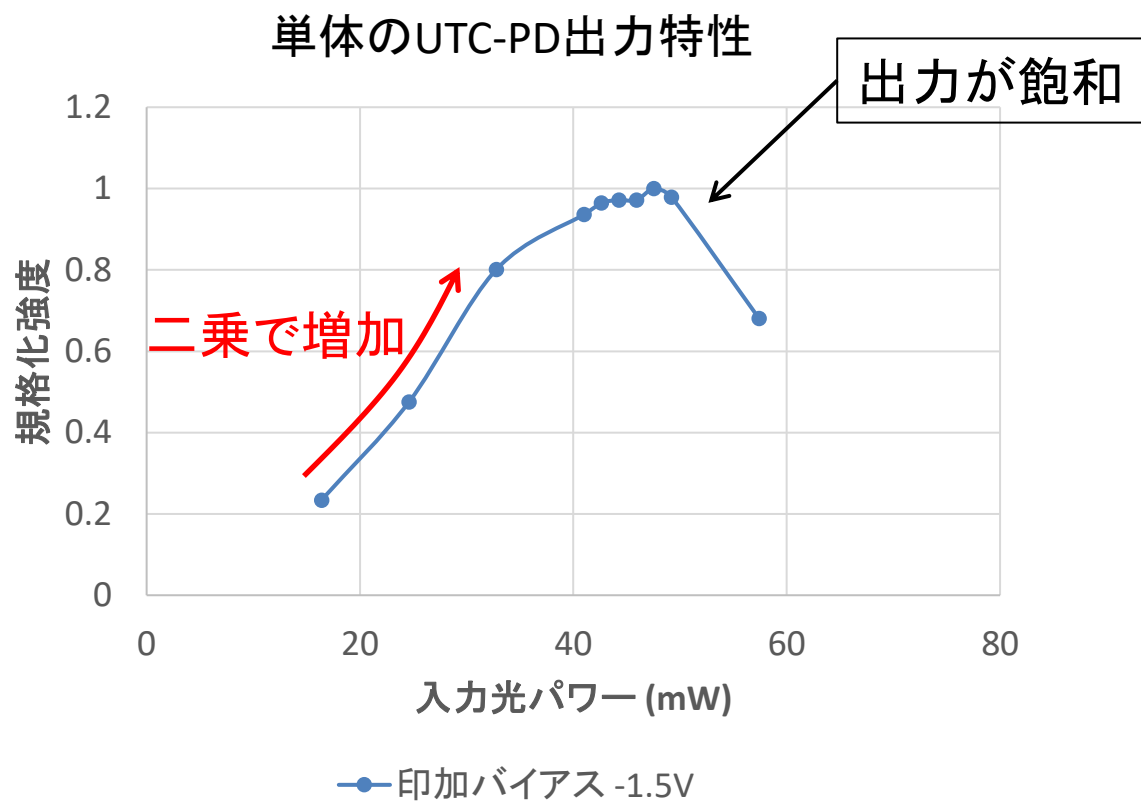
1. Beyond 5Gで期待されるテラヘルツ波とは
2. テラヘルツ波利用に向けた課題
3. 光通信技術を活用したテラヘルツ波生成
4. 高セキュリティ無線通信技術への展開
5. まとめ

# テラヘルツ波発生技術のトレンド

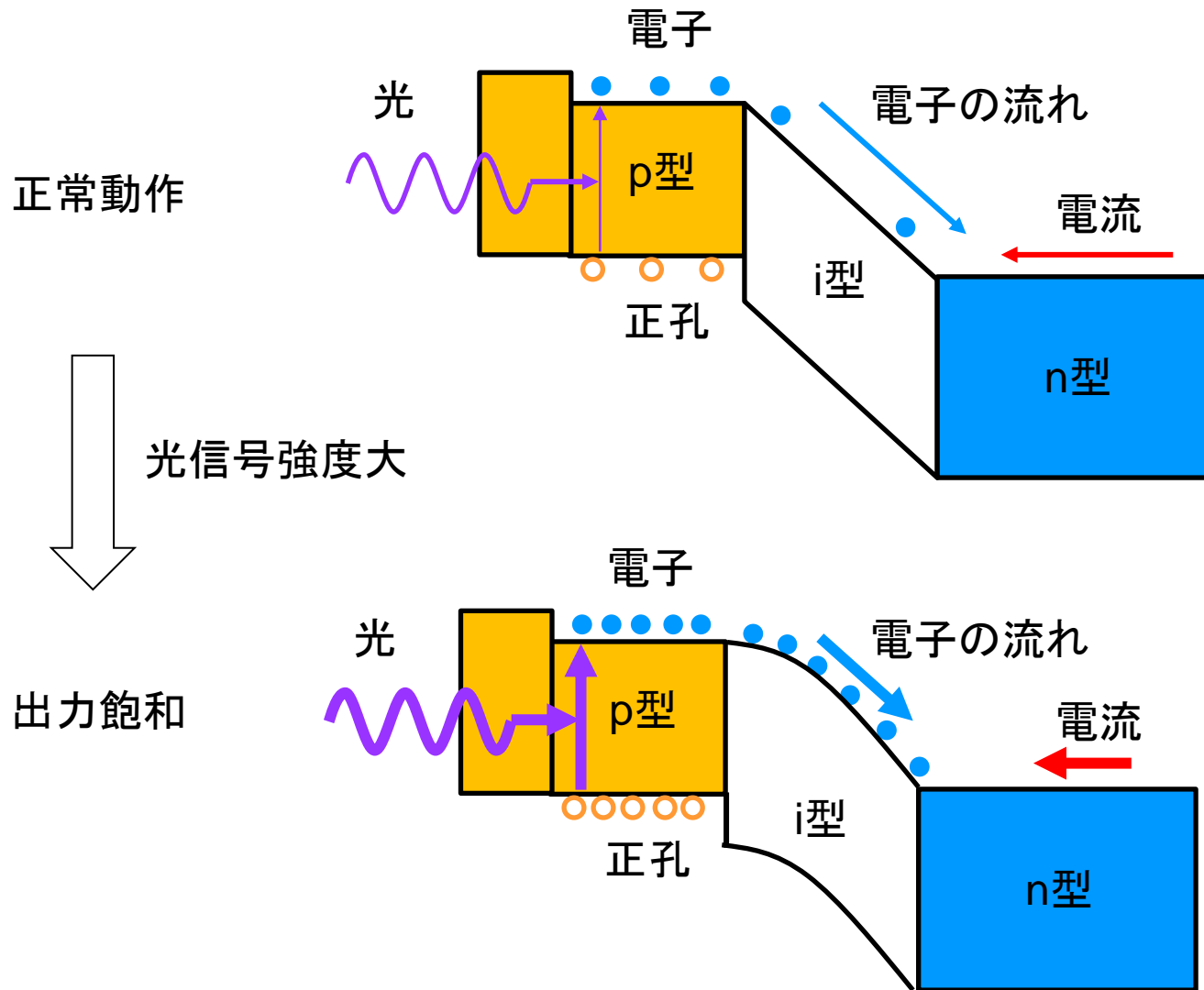




# フォトミキサの出力飽和

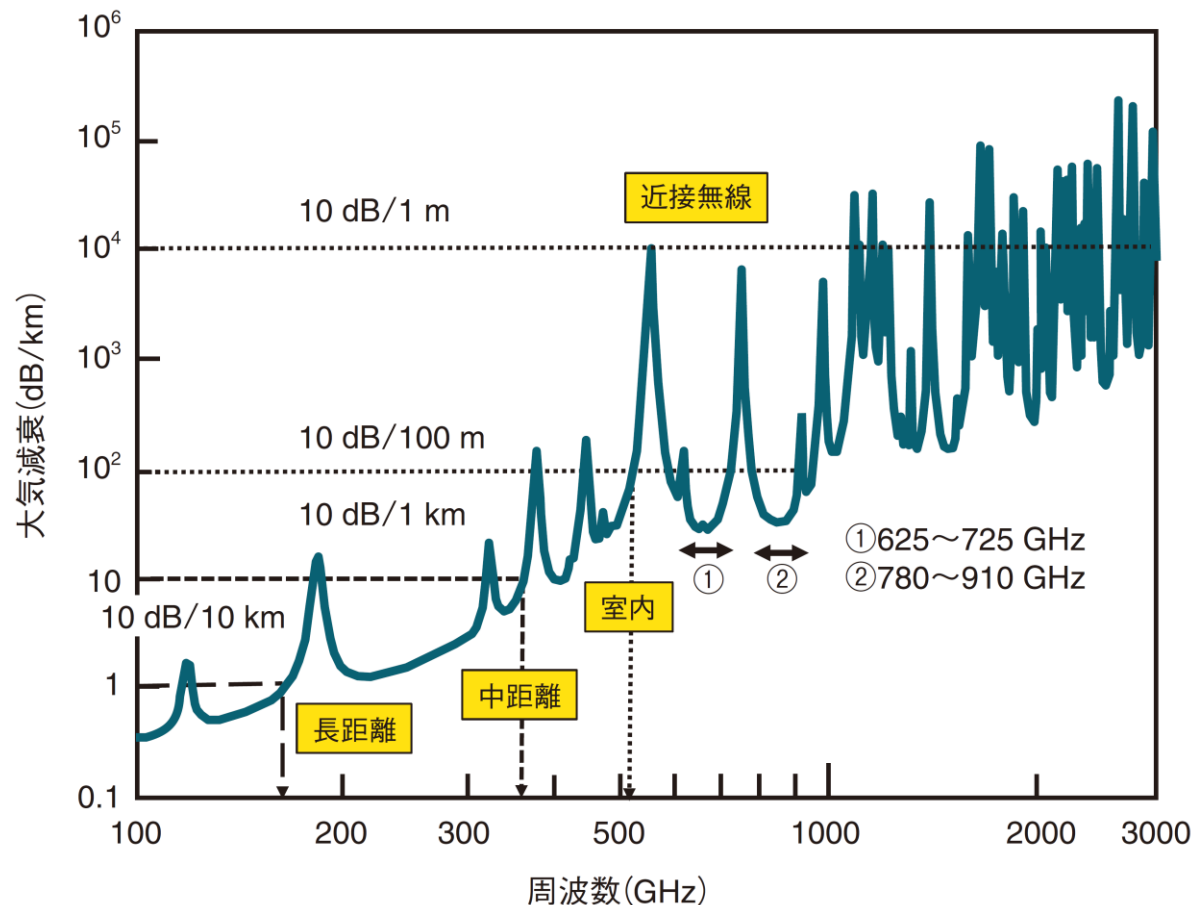


# フォトミキサ (フォトダイオード) の出力飽和



# 大気中での減衰

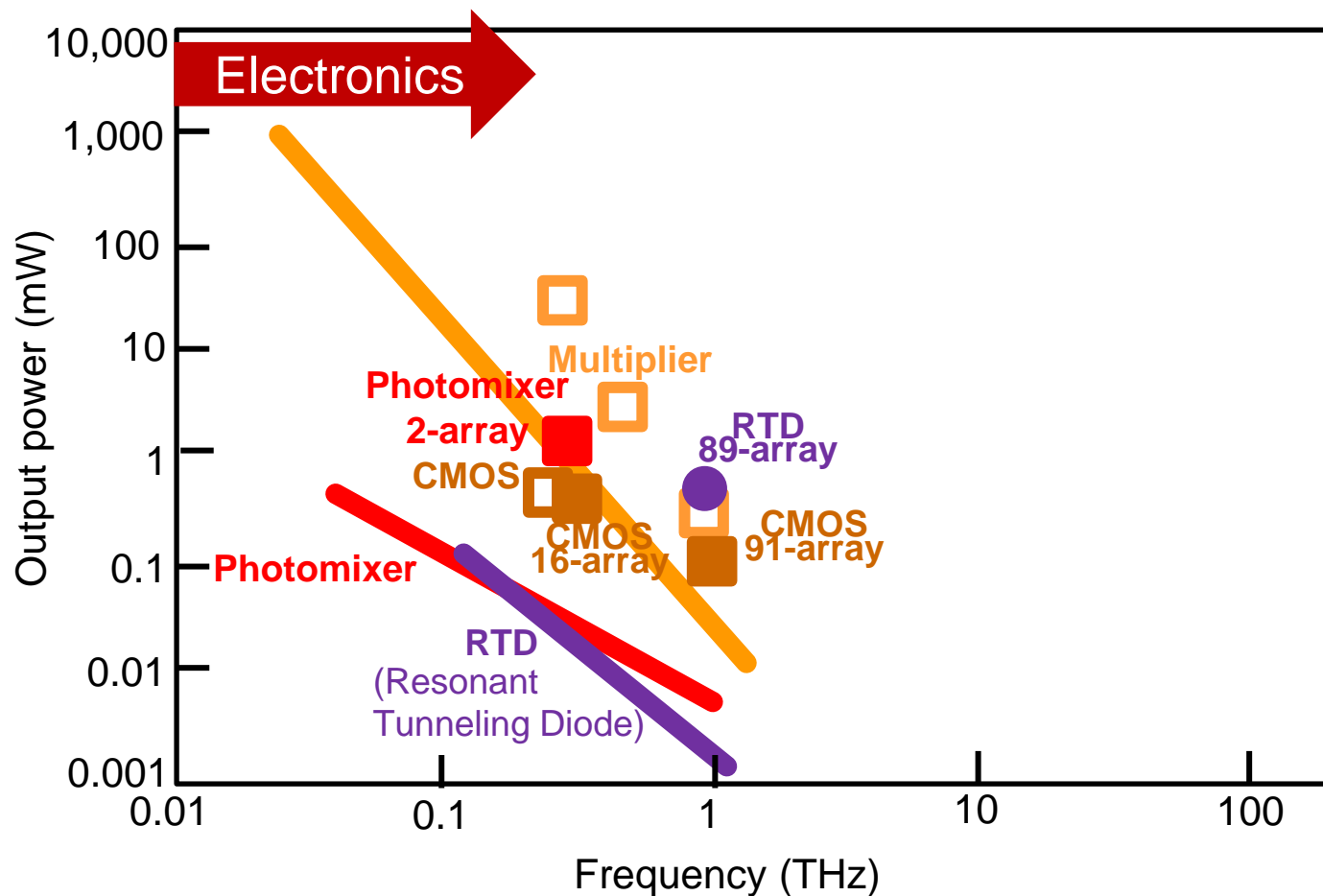
周波数の3乗に比例して損失が増加



永妻忠夫, “テラヘルツ波が拓く超高速無線通信,” 精密工学会誌, vol.82, no. 3, pp.221-224, 2016.

# アレー化による出力増大

周波数の3乗に比例して損失が増加



# 発表内容

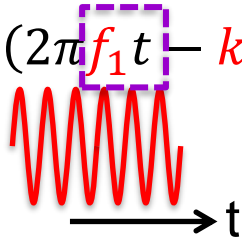
1. Beyond 5Gで期待されるテラヘルツ波とは
2. テラヘルツ波利用に向けた課題
3. 光通信技術を活用したテラヘルツ波生成
4. 高セキュリティ無線通信技術への展開
5. まとめ

# フォトミキシングによるテラヘルツ波発生

周波数の異なる2つの光からフォトミキサの自乗検波特性を用いて差周波の電気信号を生成

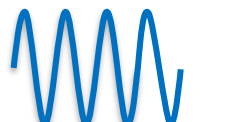
Electric field

$$A_1 \exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\}$$



Light source

Light source



Electric field

$$A_2 \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}$$

Square-law detection

Photo-mixer

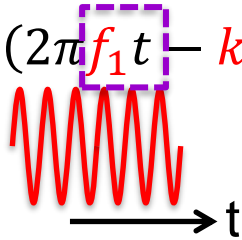


# フォトミキシングによるテラヘルツ波発生

周波数の異なる2つの光からフォトミキサの自乗検波特性を用いて差周波の電気信号を生成

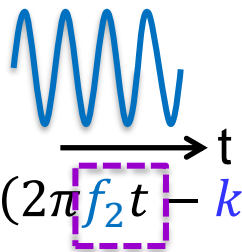
Electric field

$$A_1 \exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\}$$



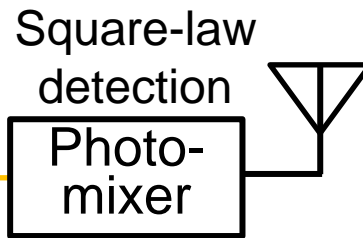
Light source

Light source



Electric field

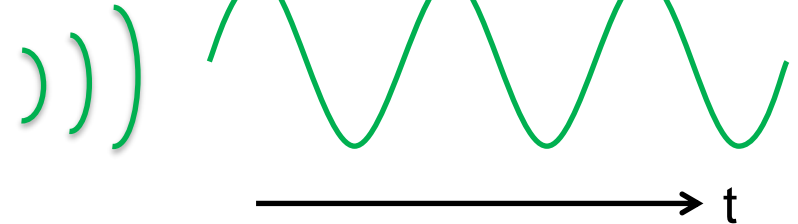
$$A_2 \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}$$



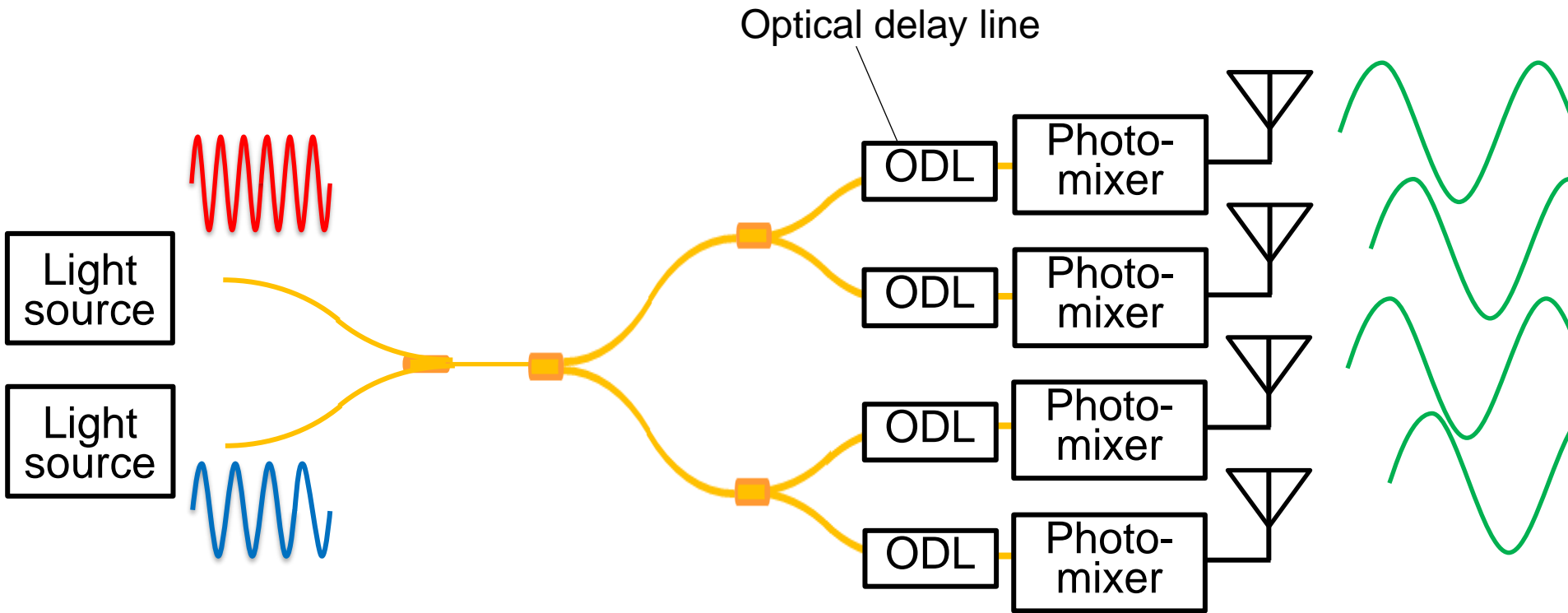
Electric power

$$|A_1 \exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + A_2 \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$
$$\propto 1 + A_1 A_2 \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - (k_1 - k_2)x + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

THz wave



# アレーフォトミキシングによるテラヘルツ波発生



$$|\exp\{i(2\pi f_1 t - k_1 x + \phi_1)\} + \exp\{i(2\pi f_2 t - k_2 x + \phi_2)\}|^2$$

$$\propto 1 + \cos\{2\pi(f_1 - f_2)t - \underbrace{(k_1 - k_2)x}_{\text{circled}} + (\phi_1 - \phi_2)\}$$

$$(k_1 - k_2)x \cong 2\pi \cdot 1000x \rightarrow x \cong 1 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

で  $2\pi$  の位相変化



# フォトミキシングのメリット

周波数193THz

1. 超広帯域 (@光からダウンコンバートするため)
2. アレー化と位相調整が容易 (@光領域)
3. データ変調が容易 (@光領域)

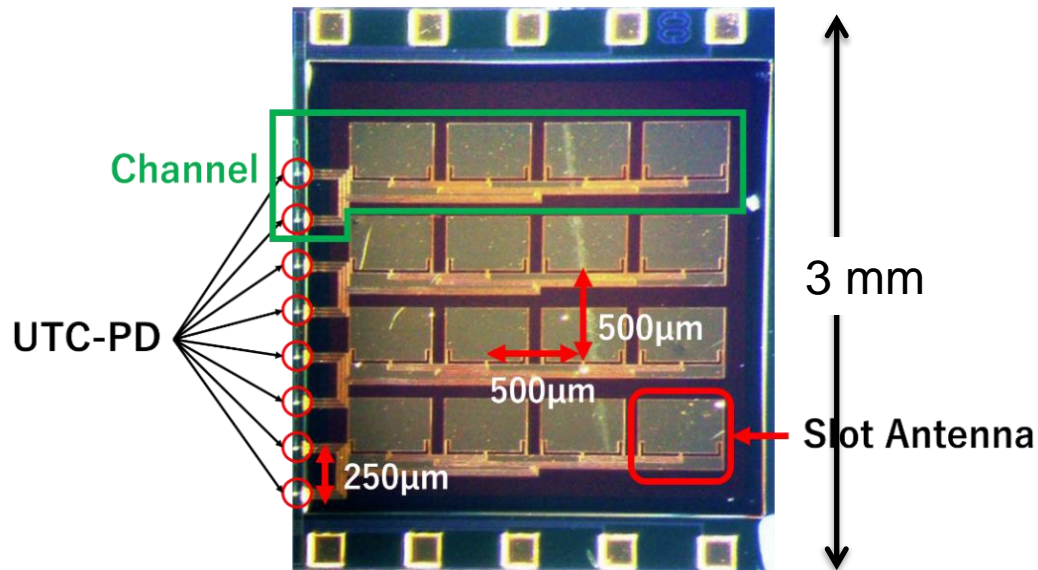
いずれも光を用いるからこそそのメリット

# 8ch-アレーフォトミキサ／平面アンテナ

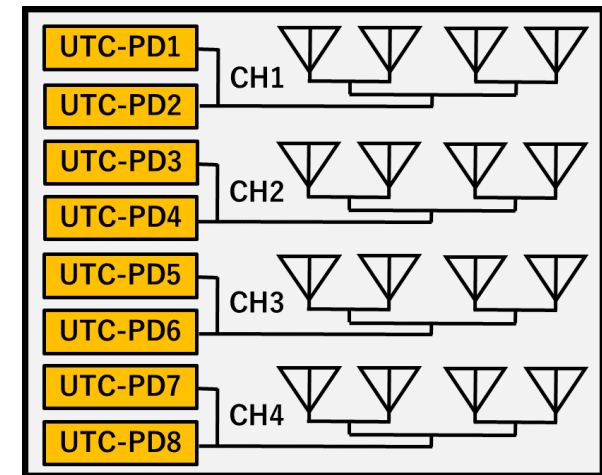
## 試作8アレーチップ

写真

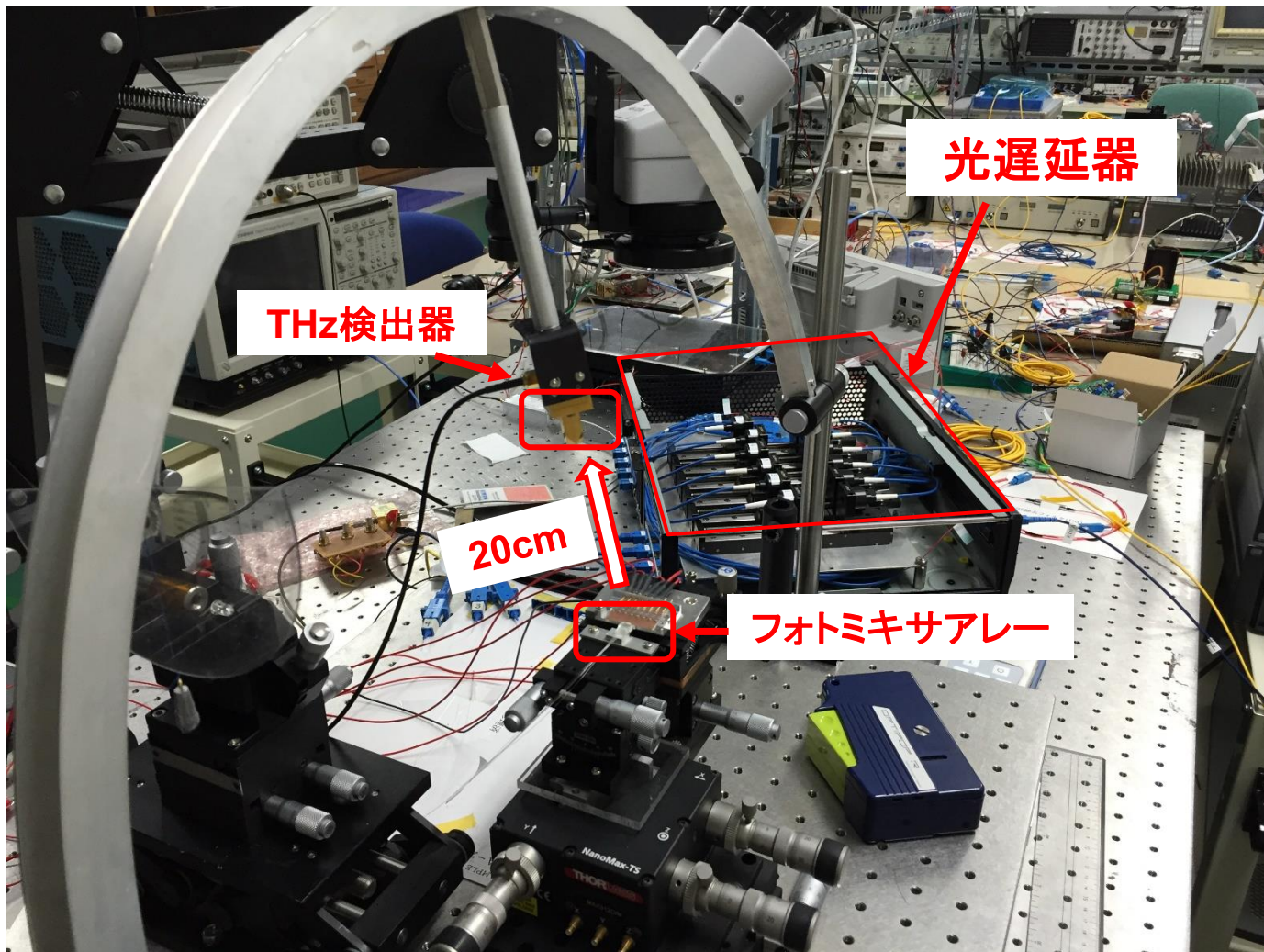
← 3 mm →



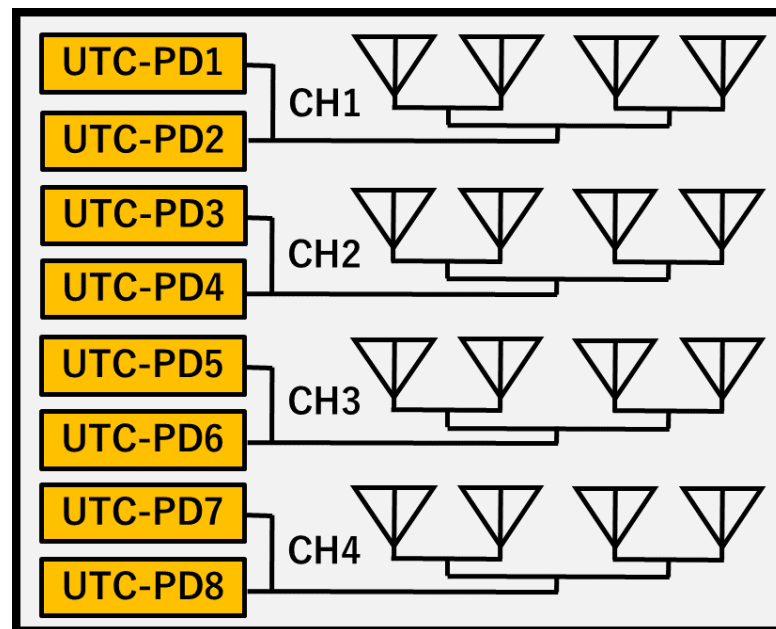
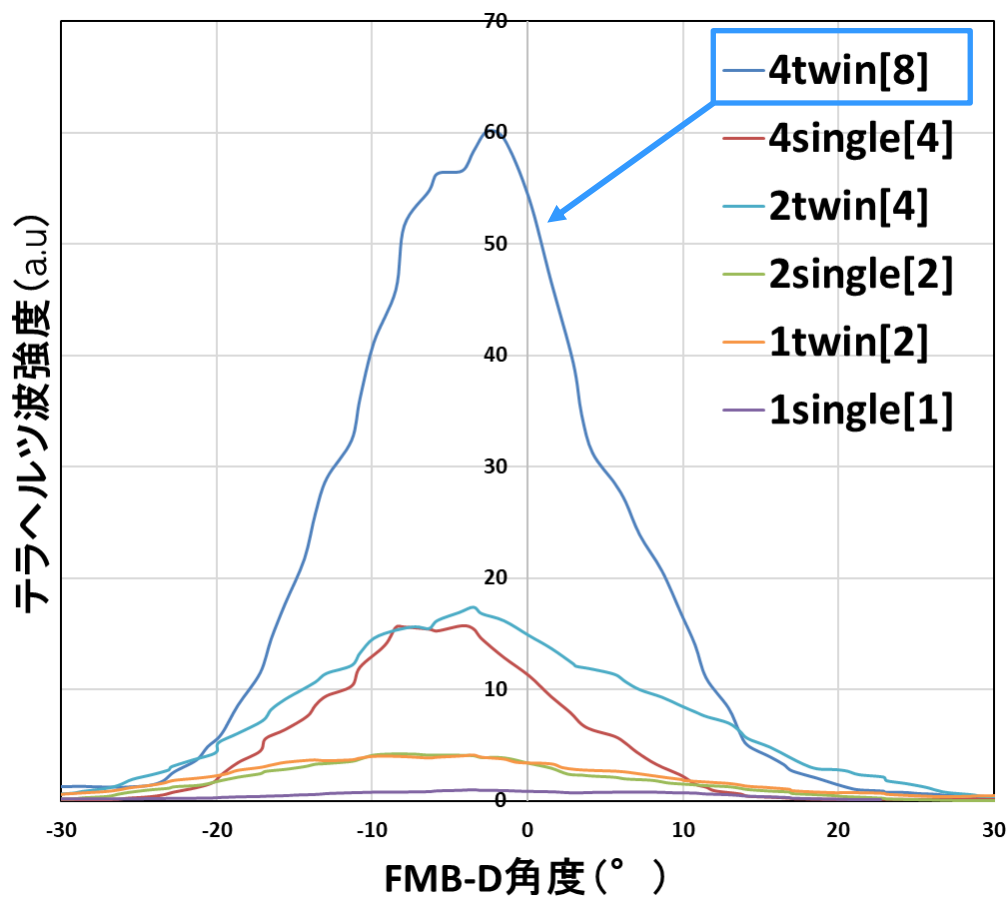
構成図



# テラヘルツ波強度発生/測定系



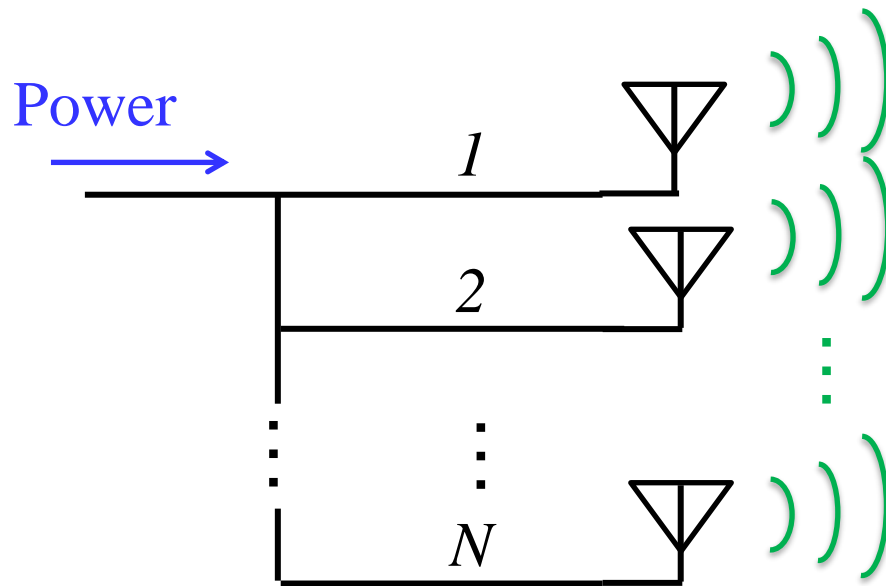
# テラヘルツ波強度分布



# アレーアンテナ



# アレーアンテナ



指向性利得  
 $N$ 倍

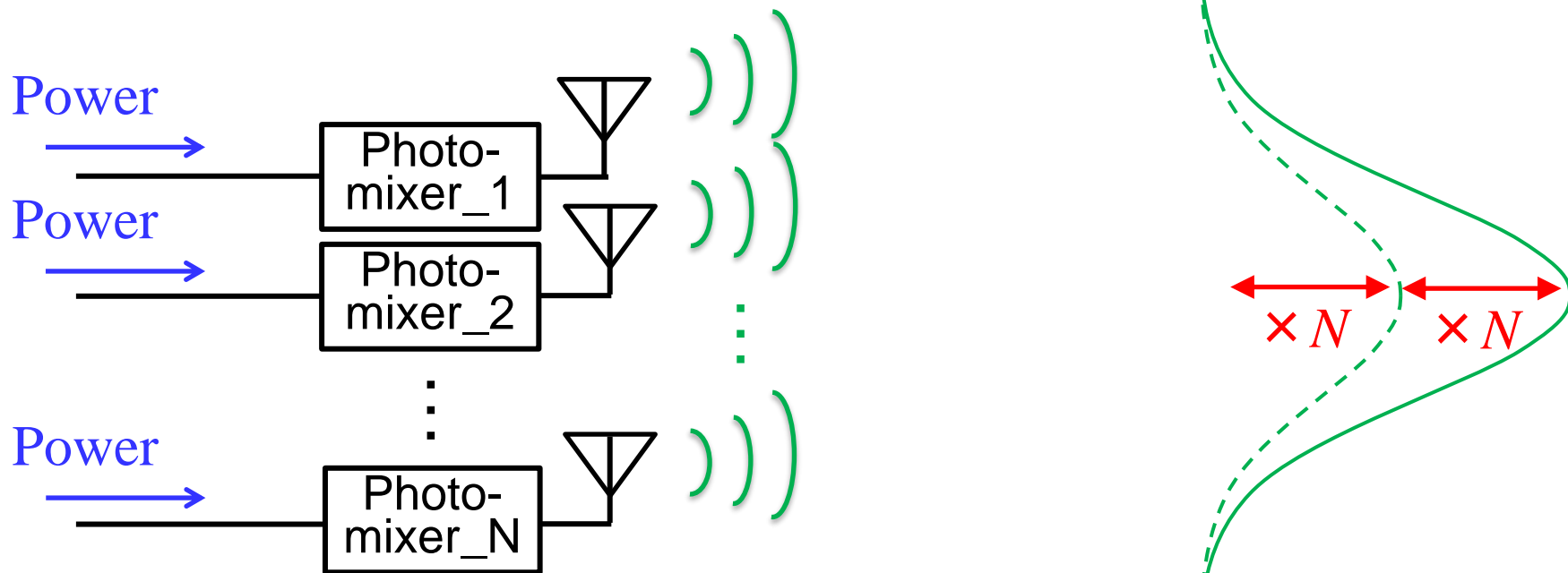
$\times N$

# アレーアンテナ

給電ポイント  
 $N$ 倍

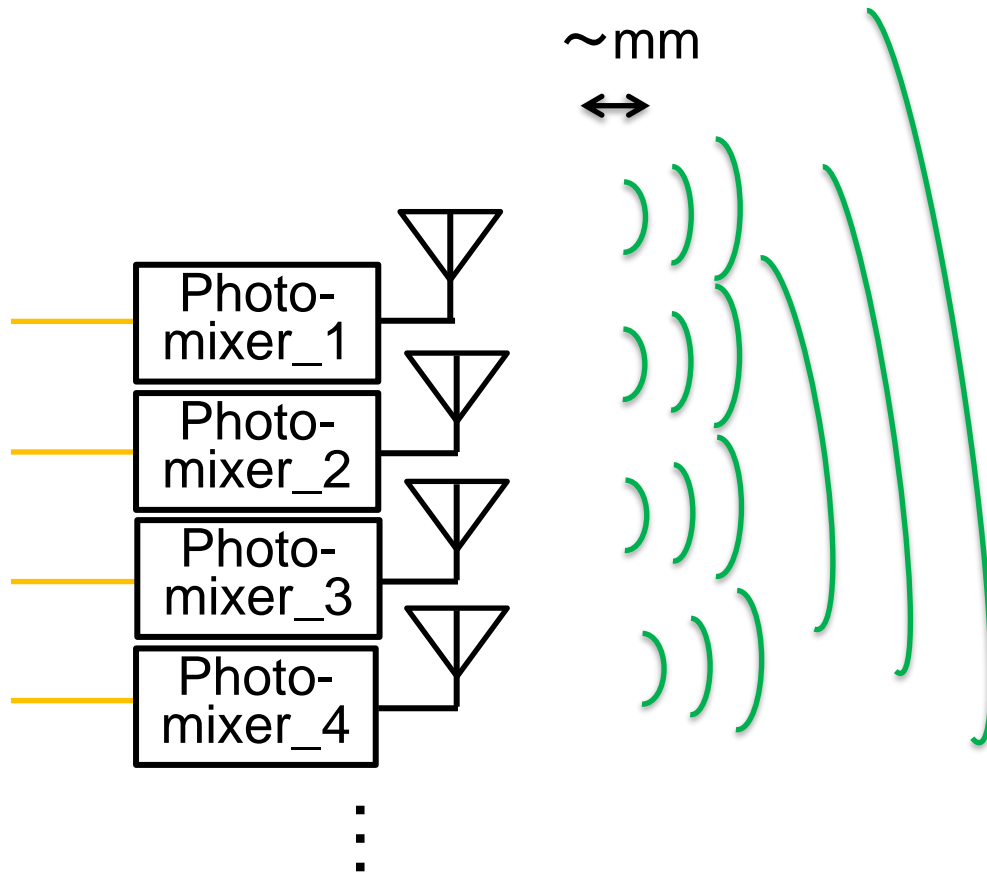
×

指向性利得  
 $N$ 倍



相対テラヘルツ波強度 =  $N^2$

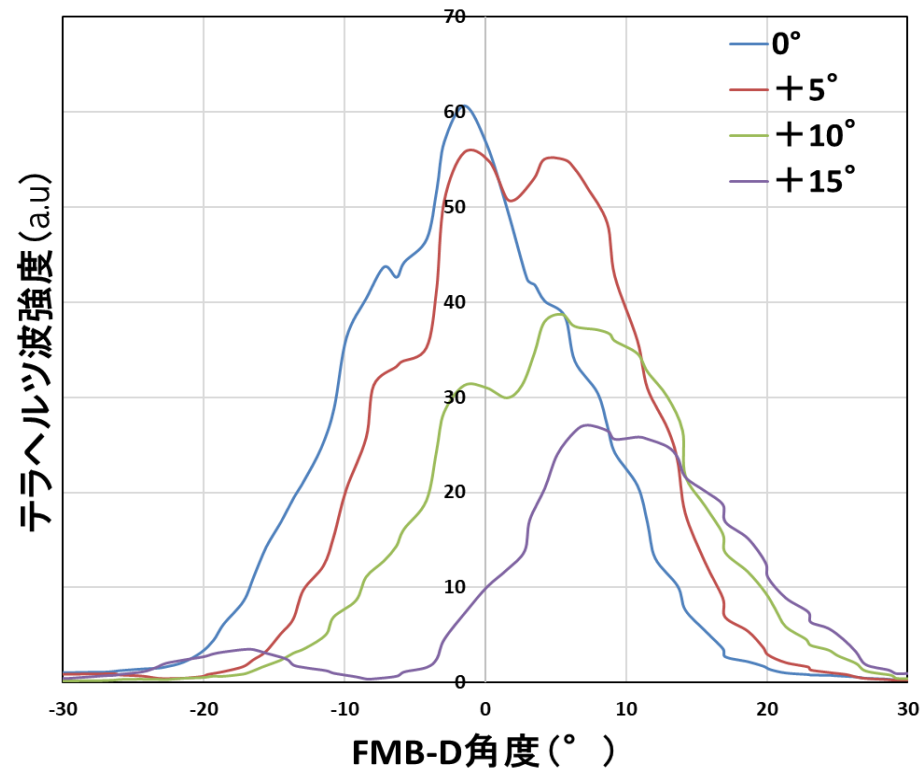
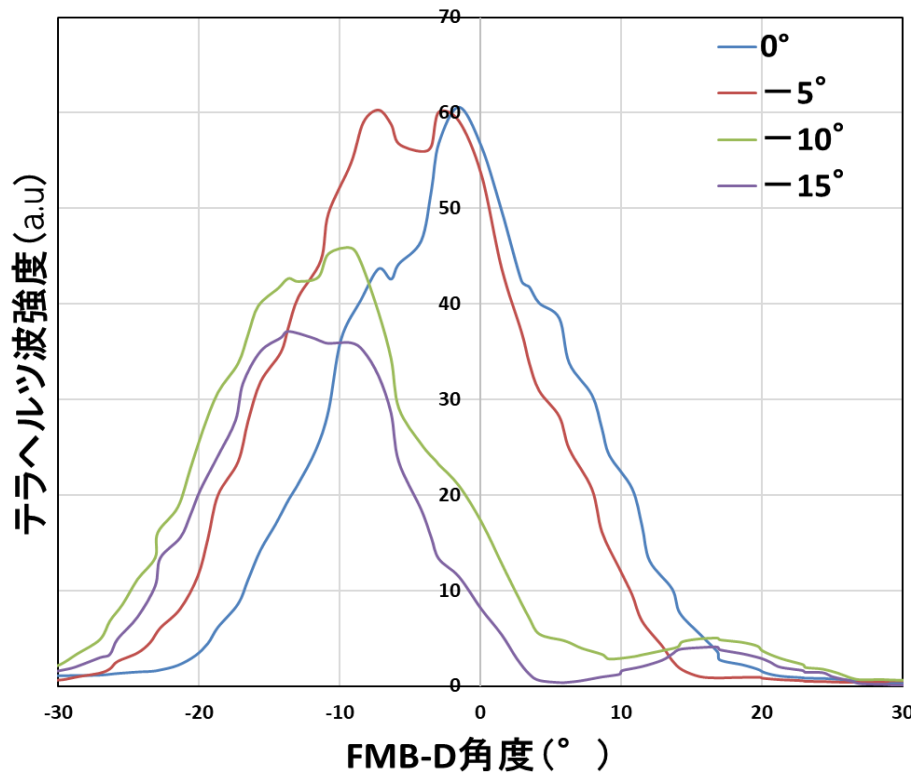
# ビームステアリング



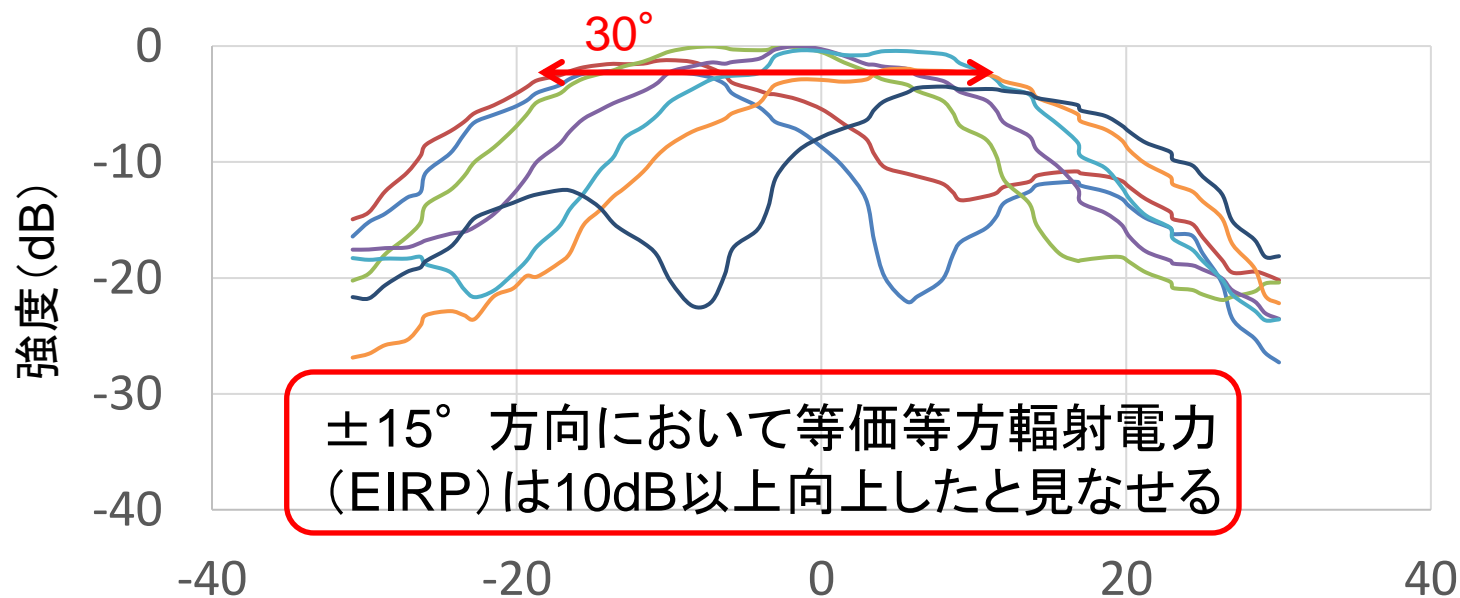
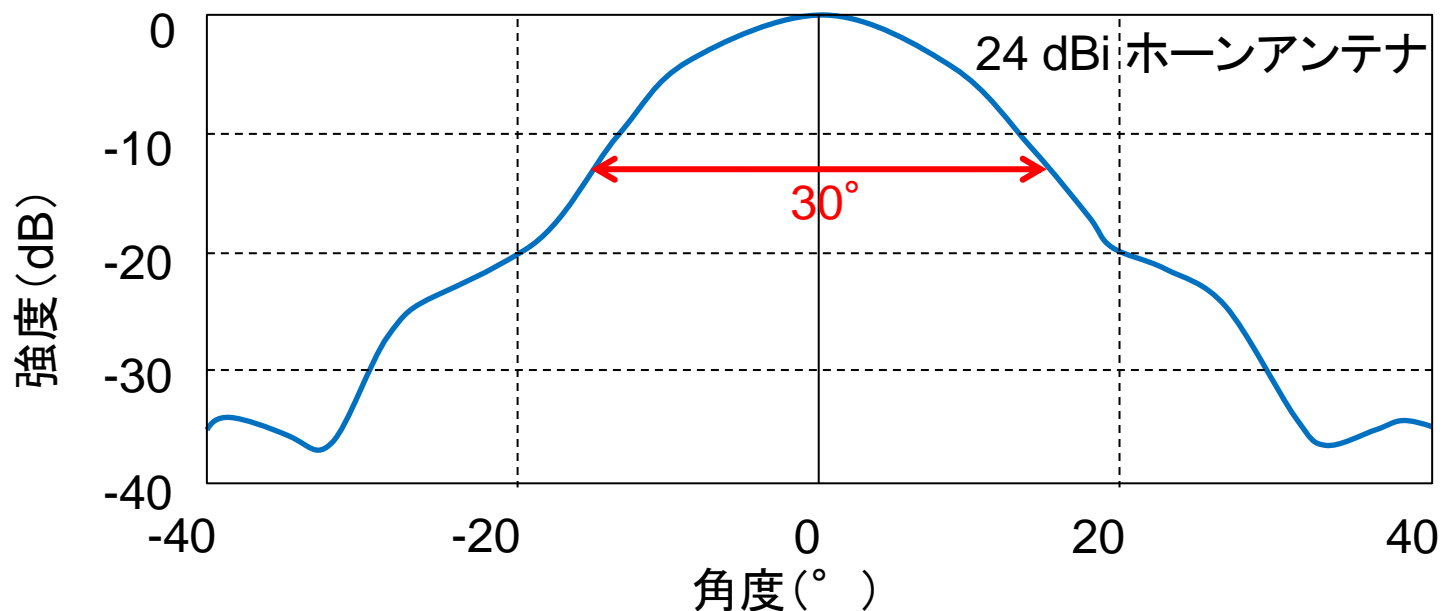


# ビームステアリング

8つのUTC-PDを動作させ、各角度にビームステアリングしたときの放射指向性を測定



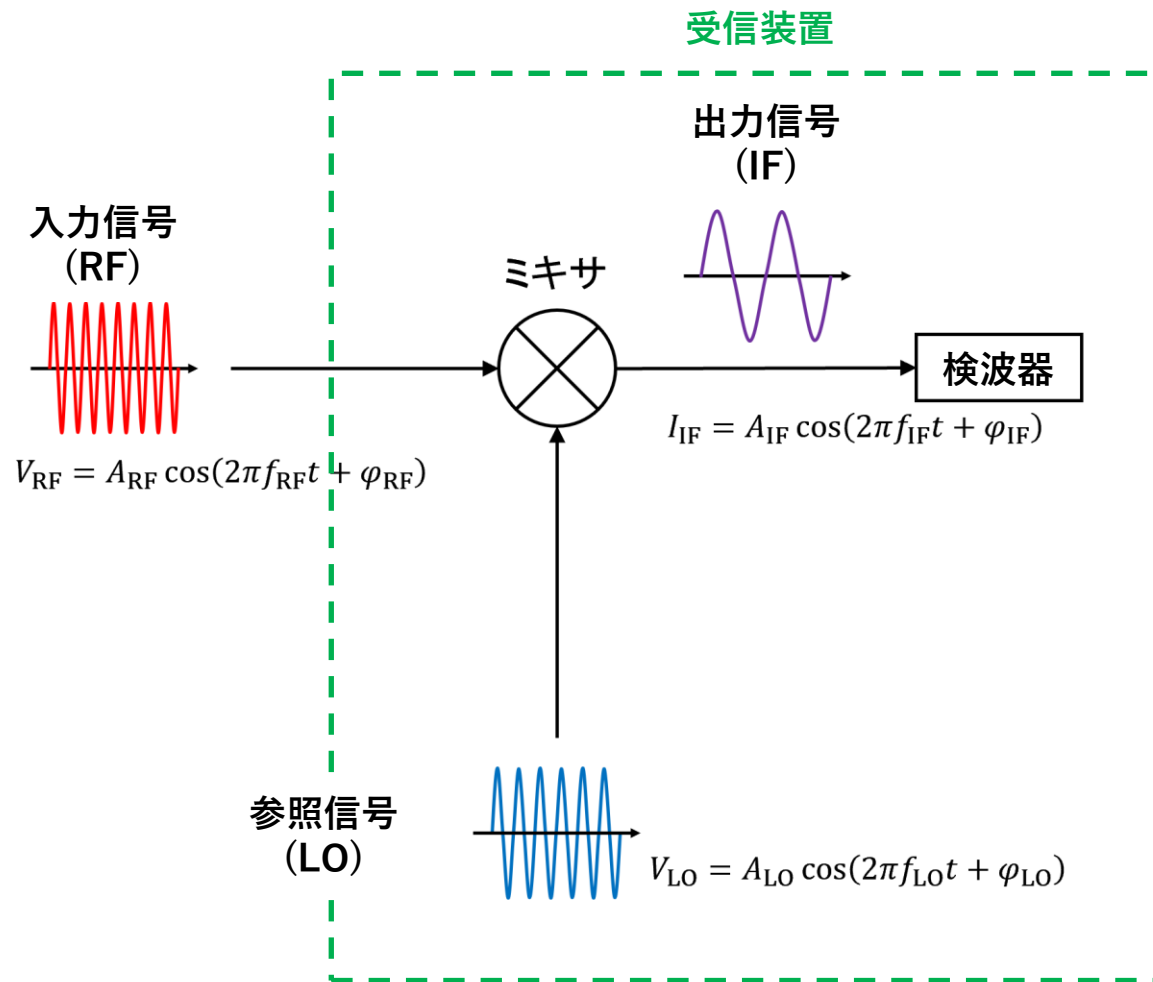
# 標準ホーンアンテナとの比較



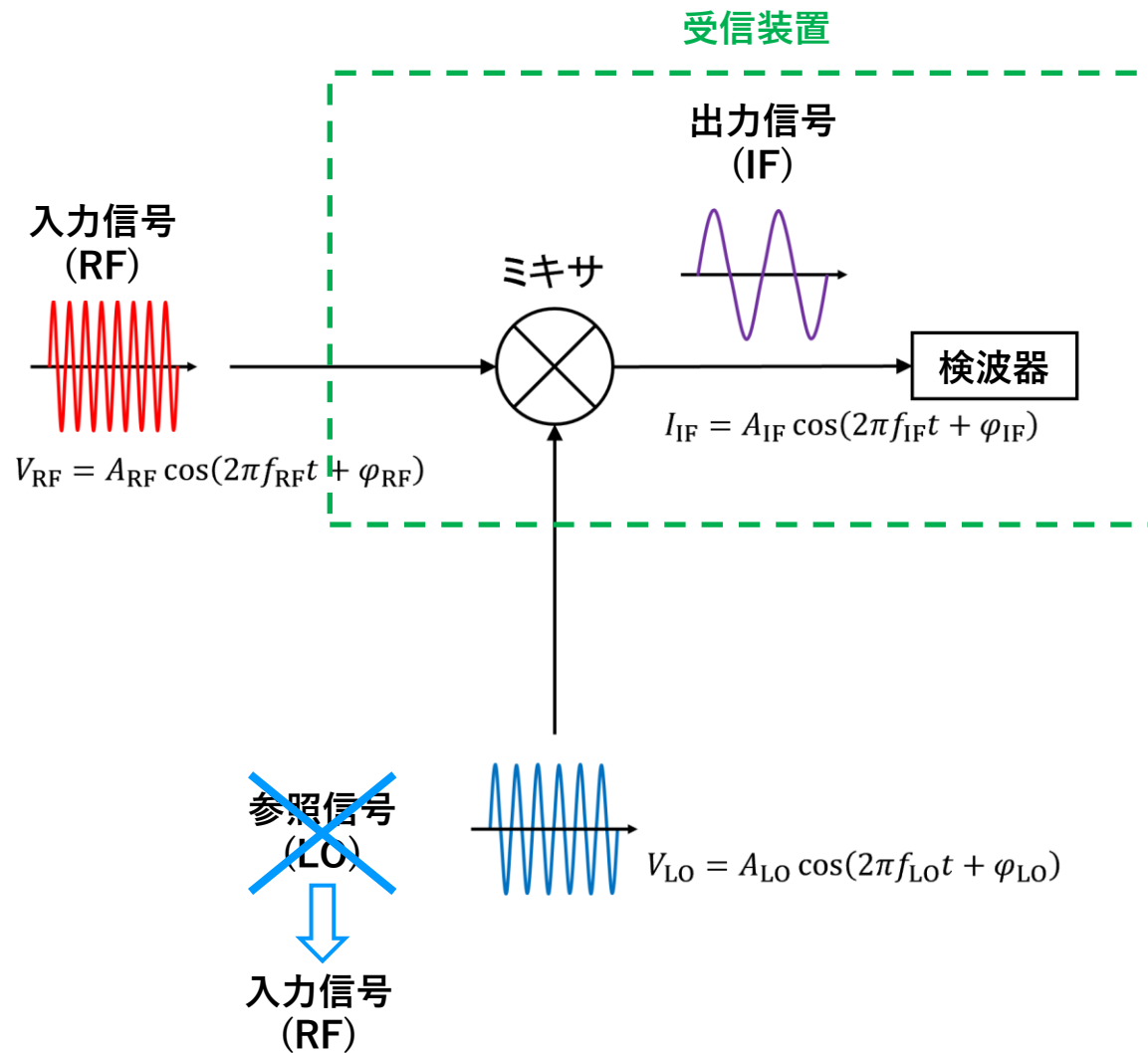
# 発表内容

1. Beyond 5Gで期待されるテラヘルツ波とは
2. テラヘルツ波利用に向けた課題
3. 光通信技術を活用したテラヘルツ波生成
4. 高セキュリティ無線通信技術への展開
5. まとめ

# ヘテロダイン検波の原理を利用したAND演算



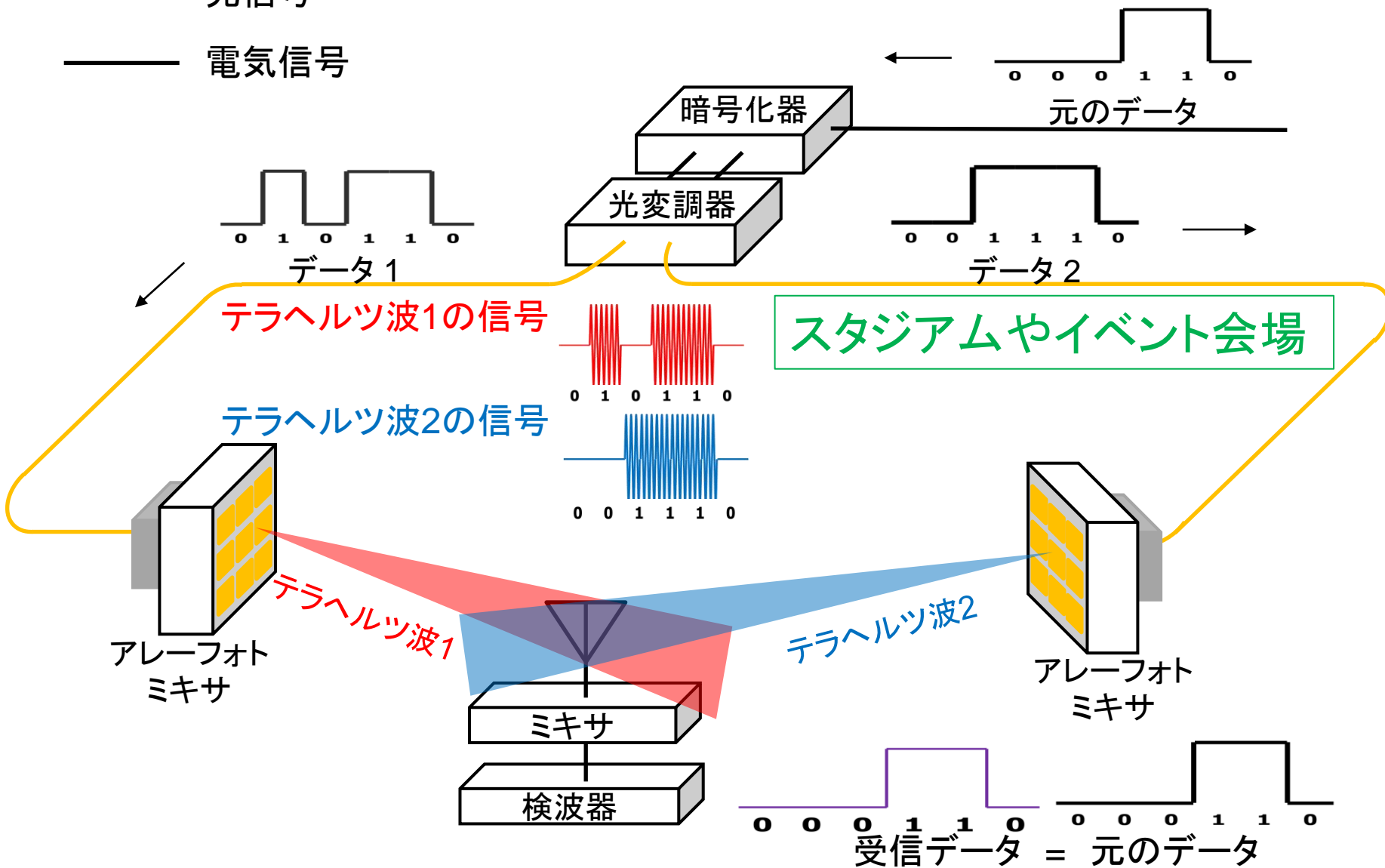
# ヘテロダイン検波の原理を利用したAND演算



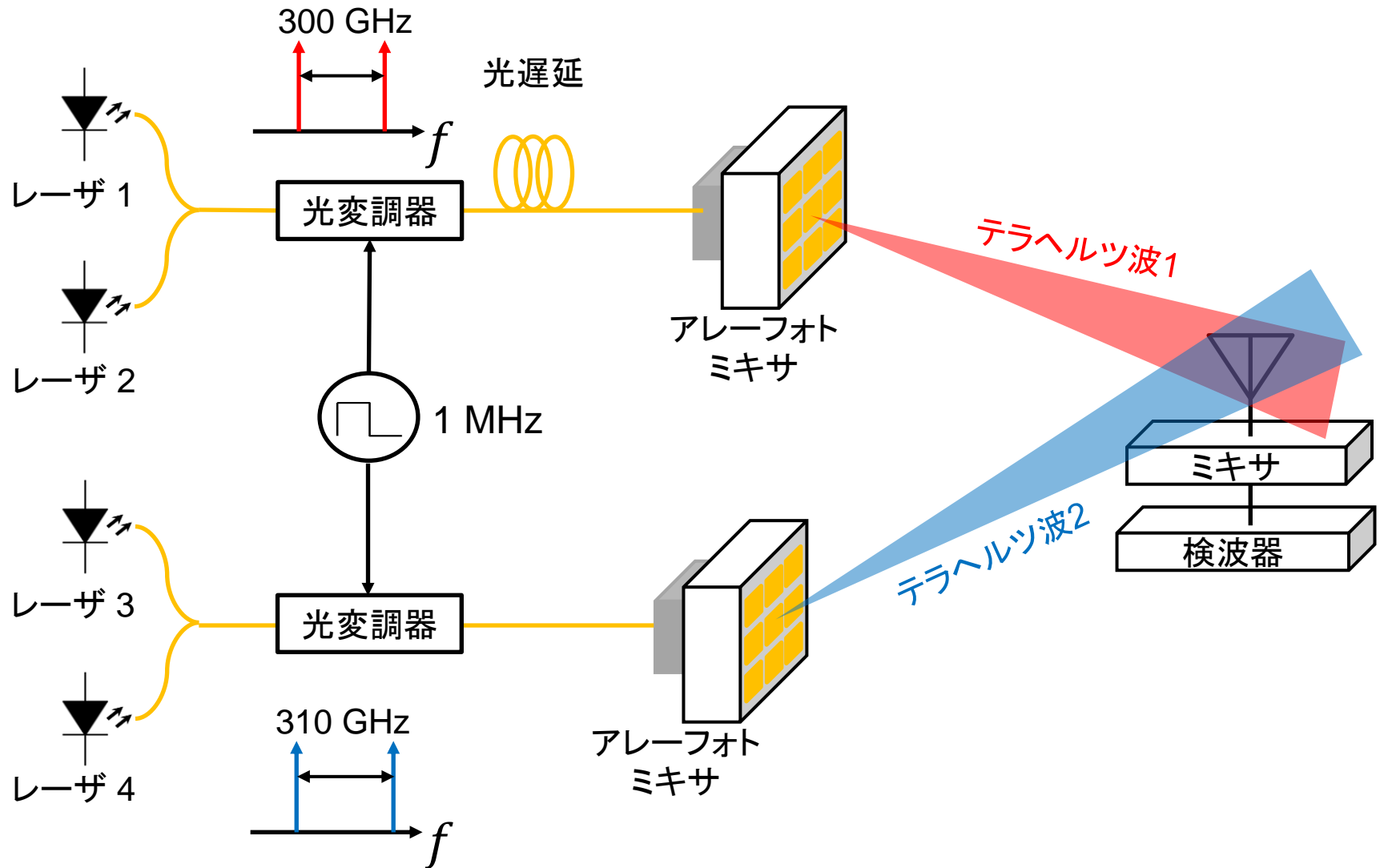
# テラヘルツ波ビームを活用した無線通信システム

— 光信号

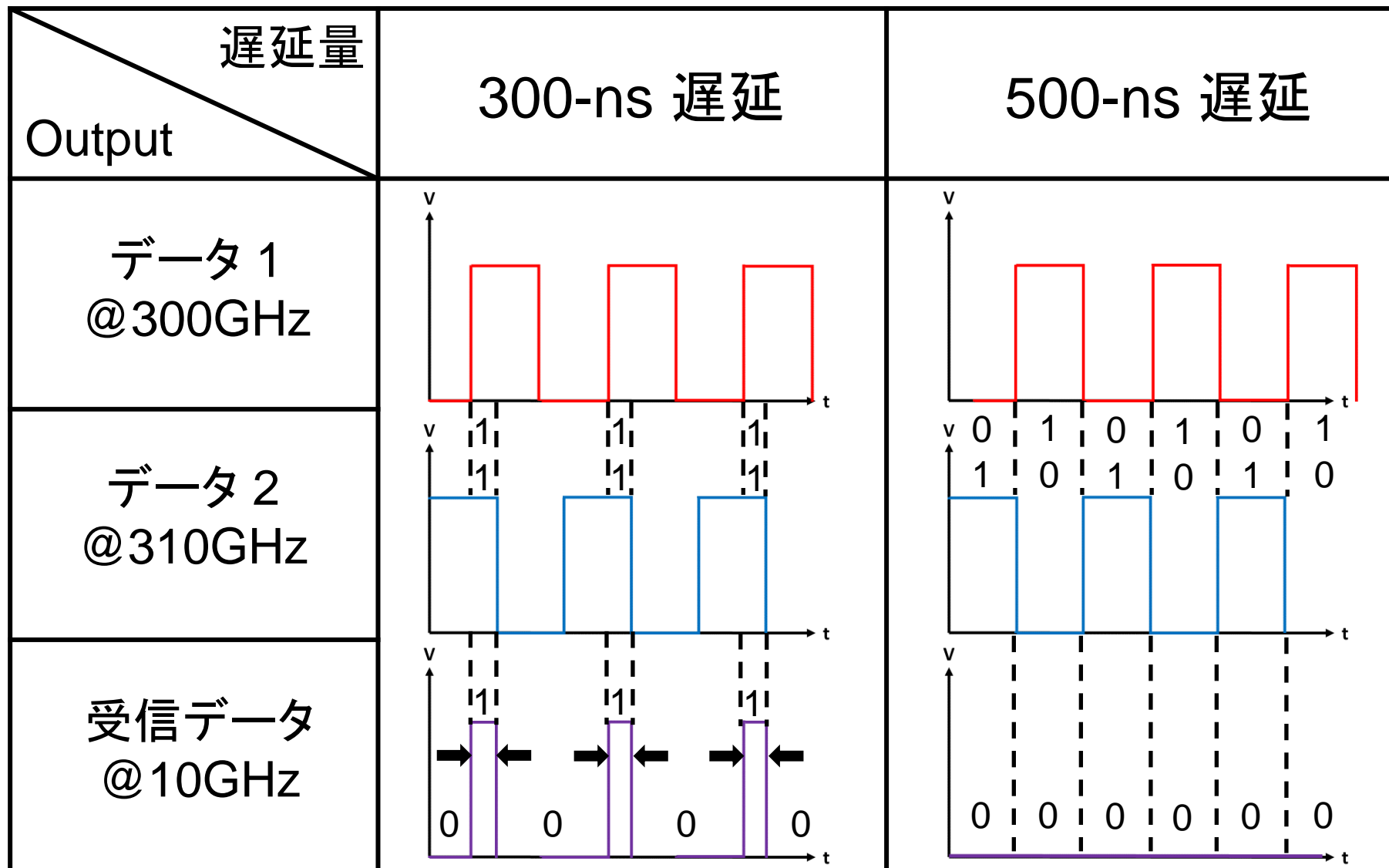
— 電気信号



# 原理確認実験構成



# 予想される結果

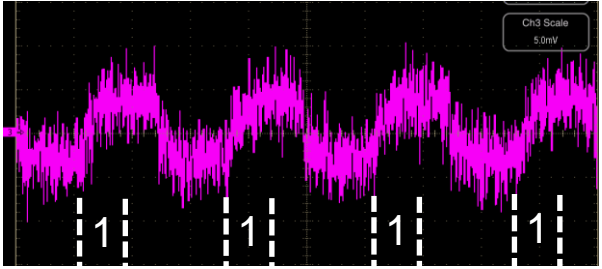
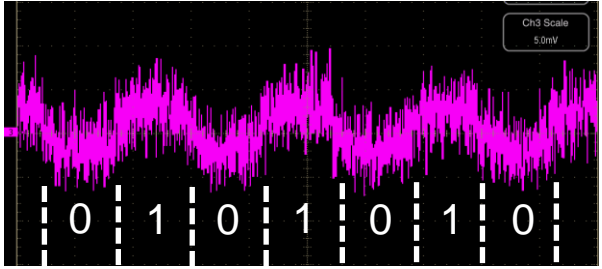
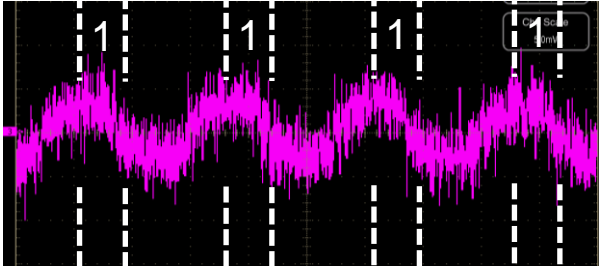
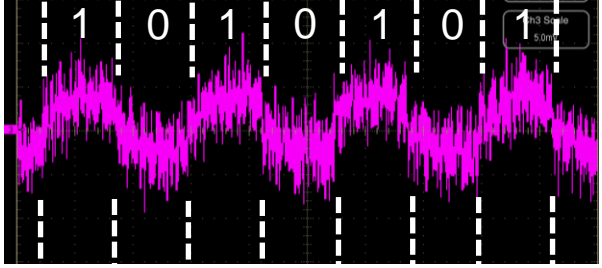
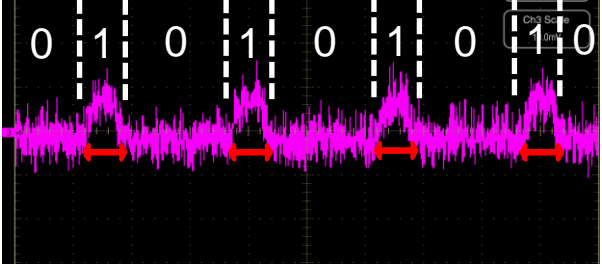
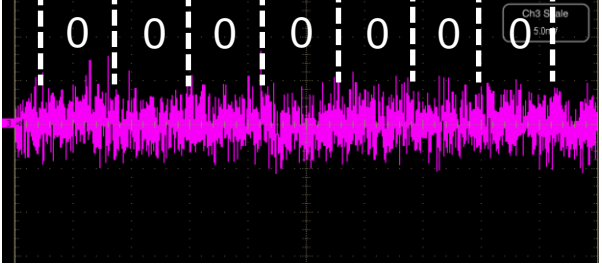


”1”の幅は200-ns

”1”は存在しない



# 測定結果

遅延量 Output	300-ns 遅延	500-ns 遅延
データ 1 @300GHz		
データ 2 @310GHz		
受信データ @10GHz		

”1”の幅は200-ns

“1”は存在しない

# まとめ

- Beyond 5Gに向けた無線通信技術の課題
  - 300GHz帯電波の高出力化
  - セキュリティの抜本的な向上
- 光技術を用いたテラヘルツ波の発生
  - パワー合成、ビーム化
  - ビームステアリング
- テラヘルツ波ビームによる高セキュリティ無線通信
  - ヘテロダイン検波による物理層でのセキュリティ
  - 原理検証実験の紹介

# 謝辞

## 本研究の支援機関



総務省

Ministry of Internal Affairs  
and Communications

戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)

## 本研究の協力機関



大阪大学大学院基礎工学研究科

永妻研究室(情報フォトニクスグループ)

*Nagatsuma Laboratory (Information Photonics Group)*