

持続可能な電波の有効利用のための基盤技術 研究開発事業(FORWARD)

周波数ホッピングによる300GHz帯 高セキュリティ高速無線通信の研究開発

研究代表者： 三上 裕也(九州大学)

三上 裕也

- 博士(工学)
- 助教 @ 九州大学 加藤研究室
- 九州大学大学院システム情報科学研究院・学府
- 九州大学工学部電気情報工学科

研究テーマ

- THz波無線通信
- 半導体レーザーの制御

<https://optoele.ed.kyushu-u.ac.jp/>



- THz波無線通信における物理層セキュリティについて
- SCOPEでの成果について
- FORWARDでの研究開発内容について

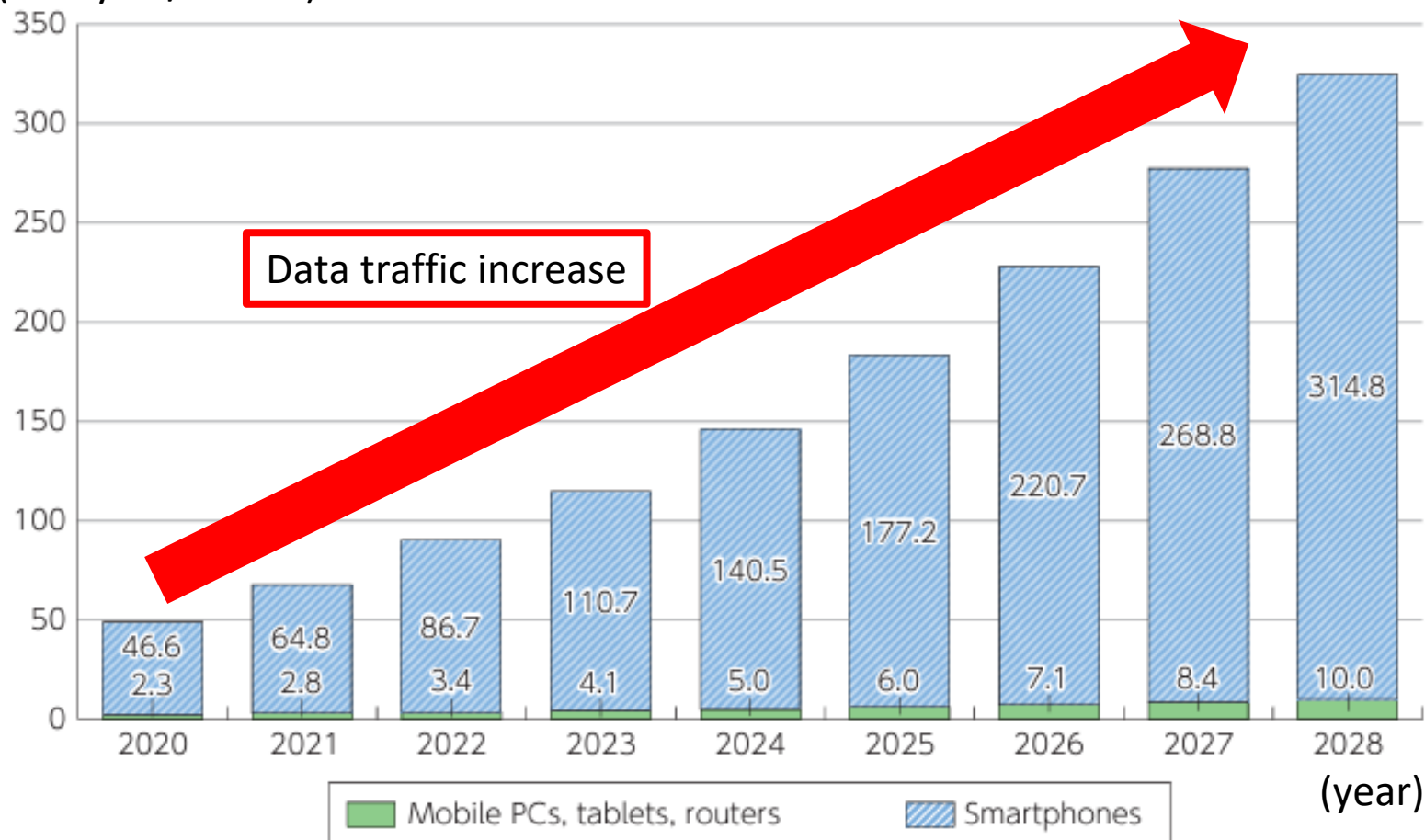
THz波無線通信における 物理層セキュリティについて

データトラフィックの増大

世界のモバイルデータトラフィックの予測(デバイス別)

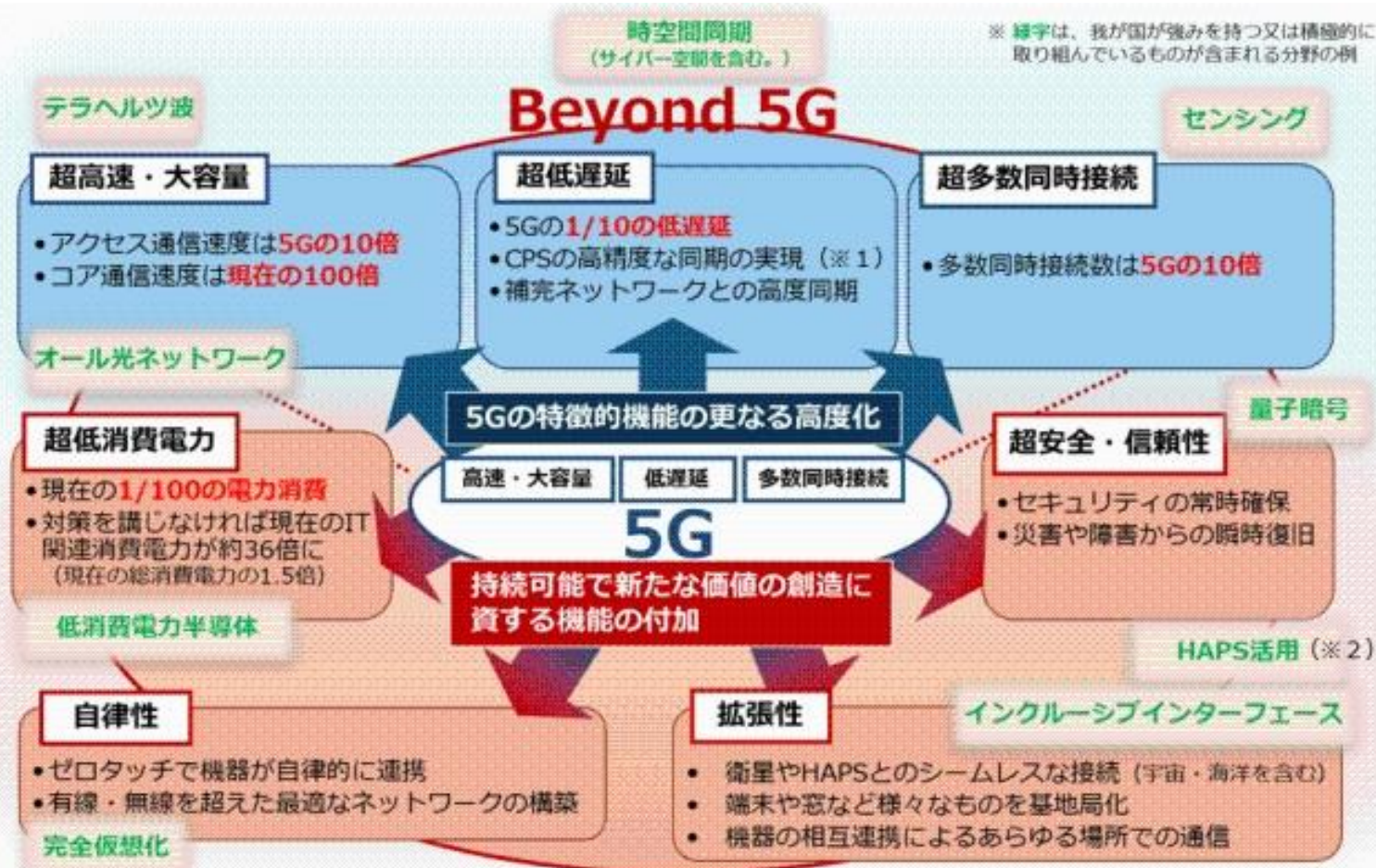
(Exabytes/month)

総務省 令和5年版情報通信白書



- 次世代通信システム Beyond 5G の開発が必要
- Beyond 5G では THz波の活用が必要

Beyond 5Gについて

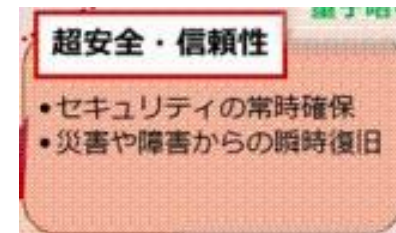


※1 Cyber Physical Systemの略。センサー等で実空間（フィジカル）のデータを収集・観測し、サイバー空間でデータの処理・分析を行ってその結果を実空間側にフィードバックすることで、新たな価値を創造する仕組み等を指す。

※2 High Altitude Platform Stationの略。携帯電話の基地局機能を搭載して成層圏などの高高度を飛行する無人航空機等を指す。

https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/B5G_sokushin/index.html

- セキュリティは従来上位レイヤ(アプリケーション)で対応
 - コンピュータ、AIの進化によりセキュリティリスクは常に存在
- 下位レイヤ(物理層)でのセキュリティの重要性

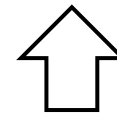


https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/B5G_sokushin/index.html

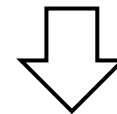
OSI 参照モデル

7	アプリケーション層 アプリケーションレベルのデータのやり取りを規定
6	プレゼンテーション層 セッションにおけるデータの表現方法を規定
5	セッション層 セッションの手順を規定
4	トランスポート層 ノード上で実行されるプロセス間での通信を規定
3	ネットワーク層 2つのノード間の通信方法を規定
2	データリンク層 物理アドレスやデータの packets 化などを規定
1	物理層 電気特性や符号の変調方式などを規定

一般的なセキュリティ



組み合わせが可能



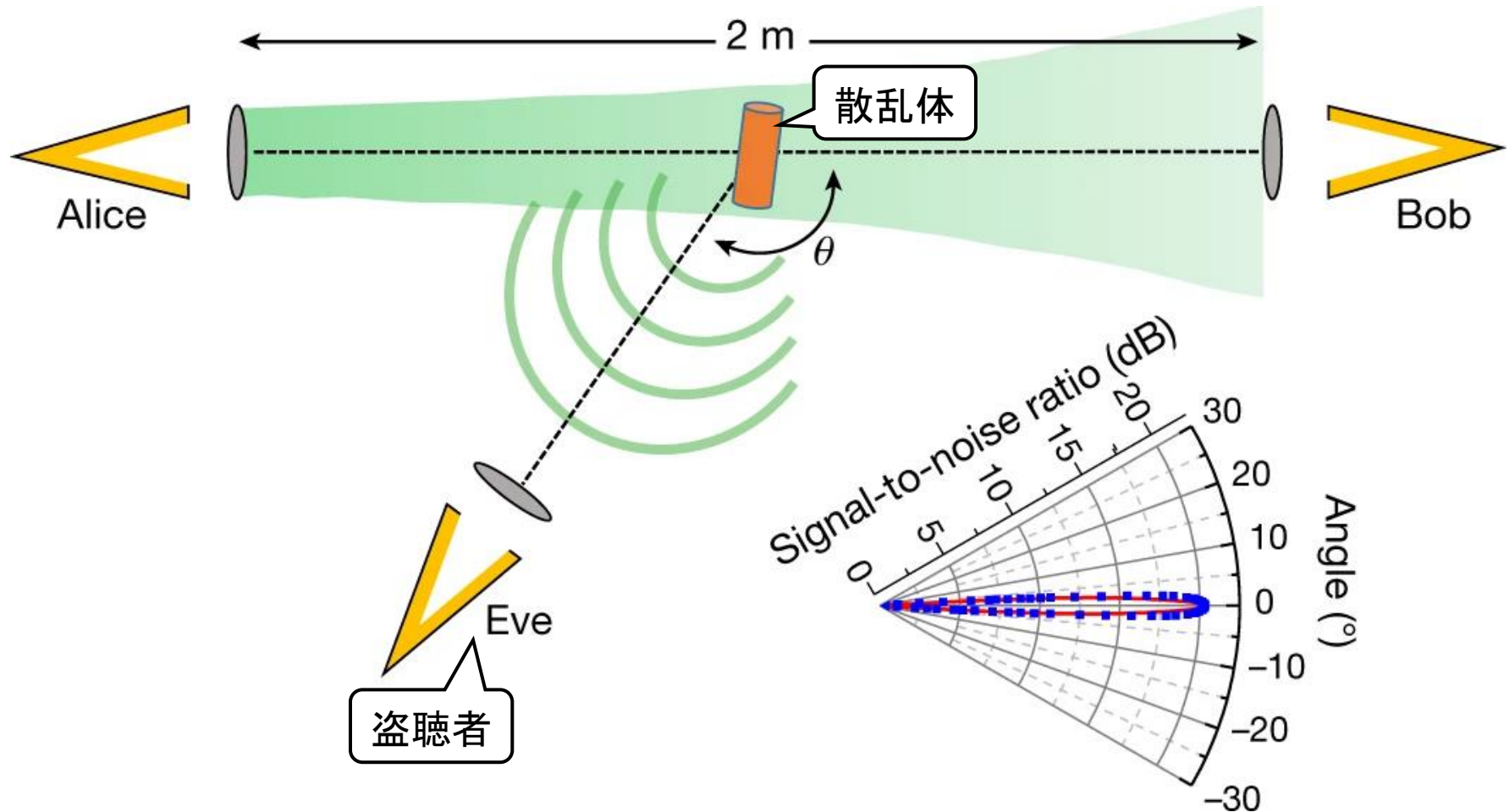
物理層セキュリティ

- ・ ノイズを加える
- ・ 周波数を変える

THz波への応用

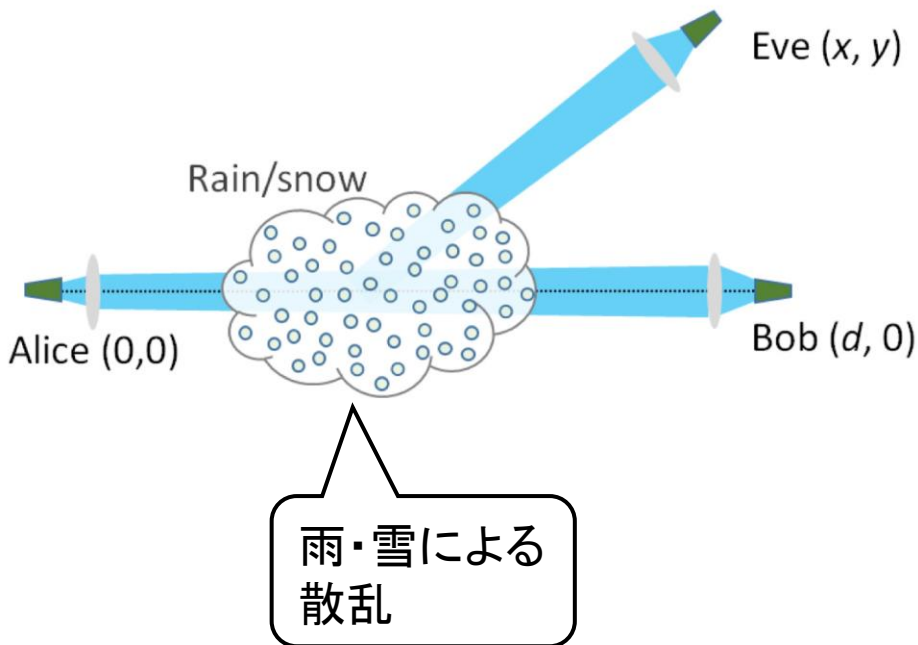
Security and eavesdropping in terahertz wireless links

J. Ma, et al., Nature 563, pp.89-93 (2018).

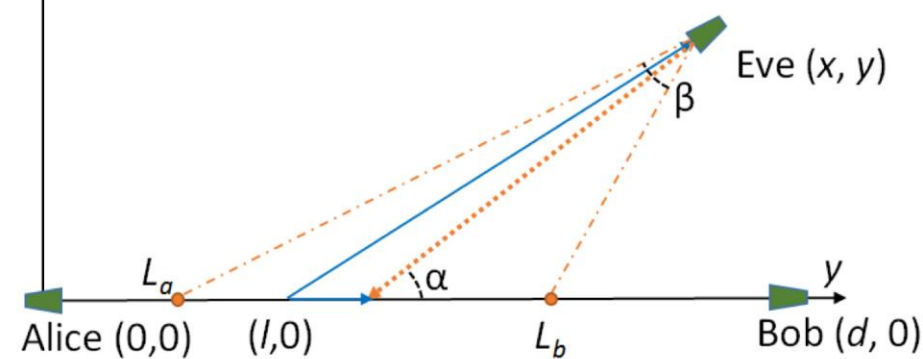


R. Wang, et al., Nano Commun. Netw. 28, pp.100350 (2021).

(a)



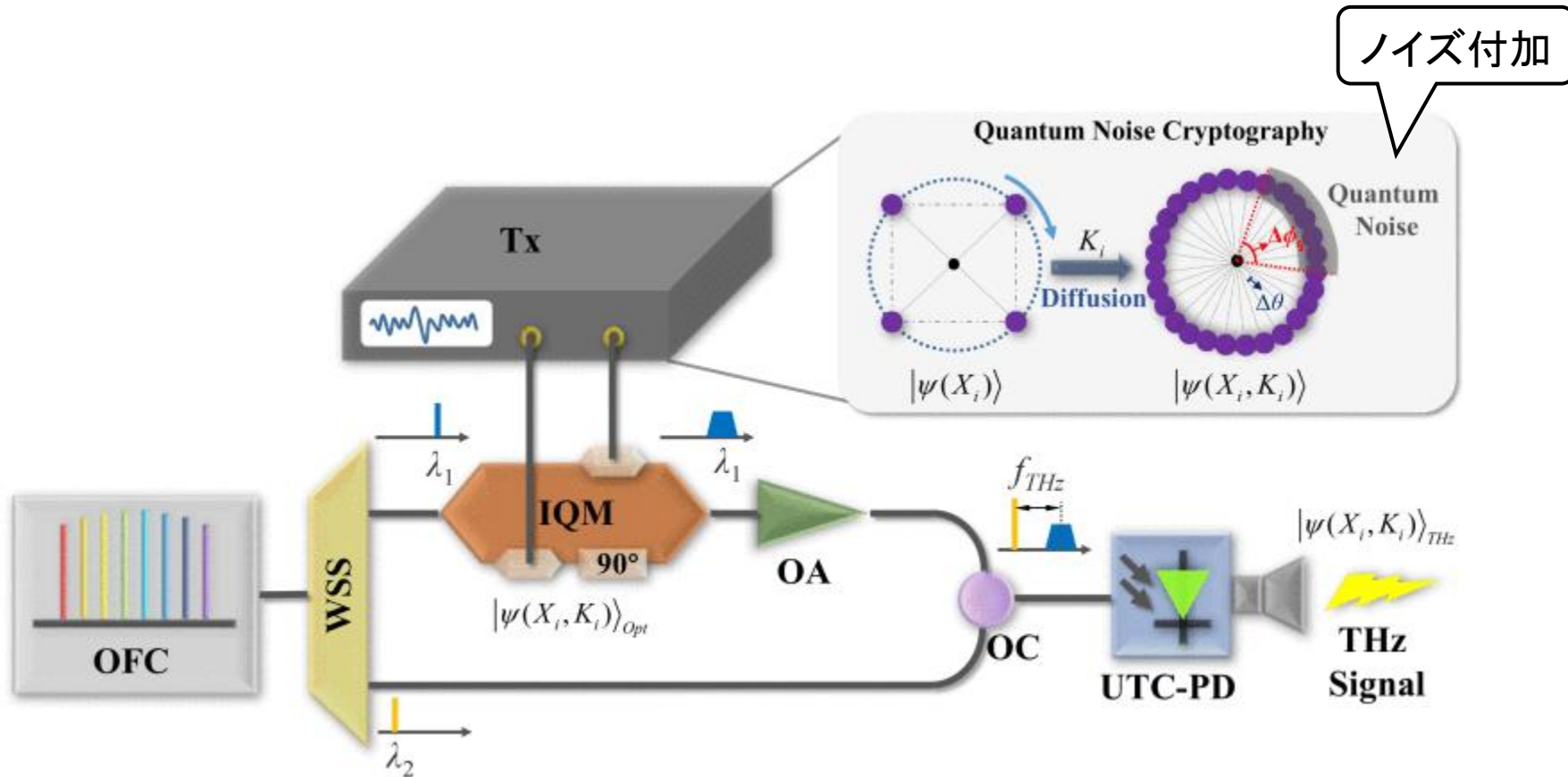
(b)



THz波無線通信におけるセキュリティの必要性
物理層セキュリティの研究開発

Quantum Noise Secured Terahertz Communications

L. Zhang, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 29.5: Terahertz Photonics, pp.1-10 (2022).



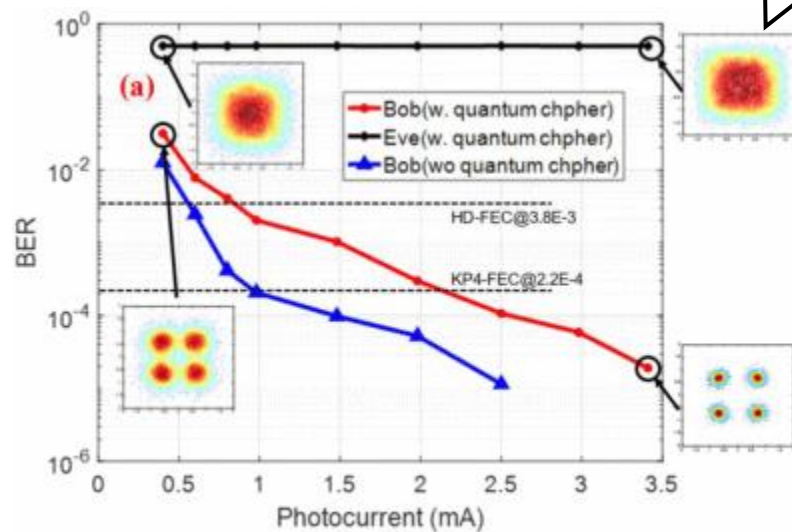
L. Zhang, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 29.5: Terahertz Photonics, pp.1-10 (2022).



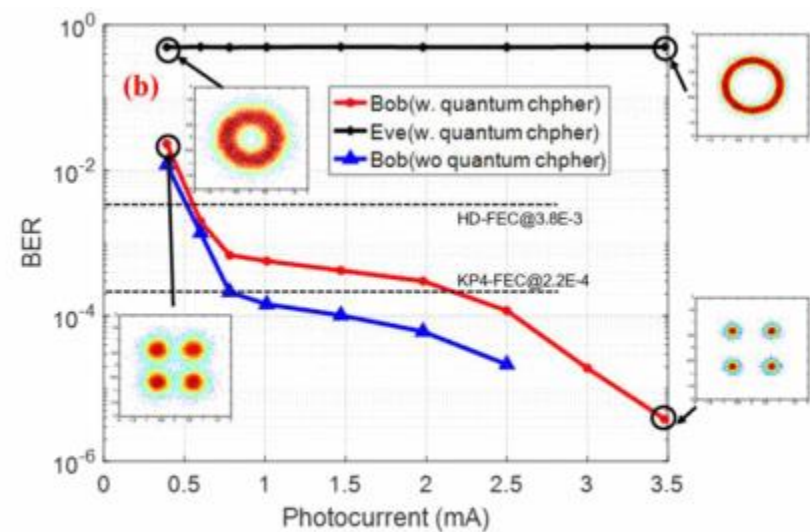
Quantum Noise Secured Terahertz Communications

L. Zhang, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 29.5: Terahertz Photonics, pp.1-10 (2022).

ノイズにより盗聴不能

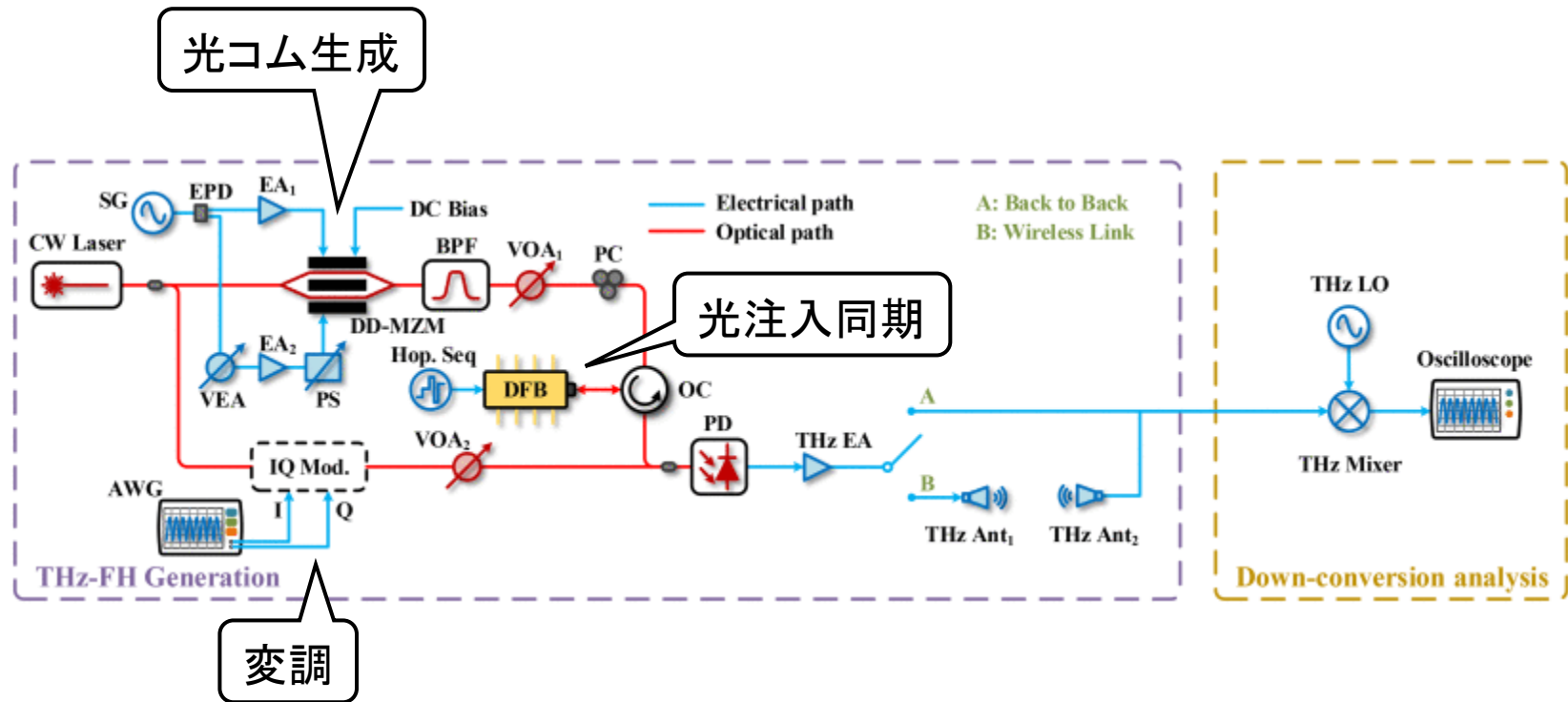


(a)

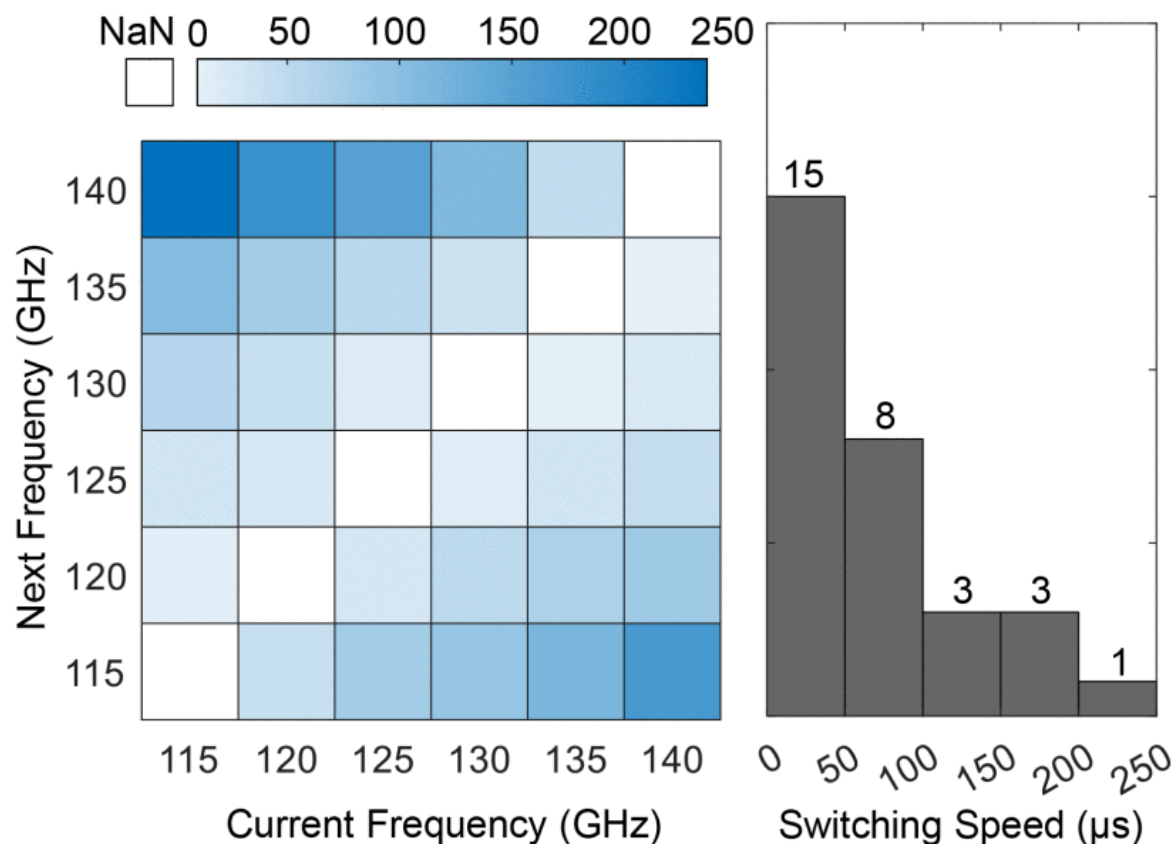


(b)

Ultra-Wideband Photonic Frequency-Hopping Waveform Generator
Enabled by Optical Injection Locking for Secure Terahertz Wireless Communications
Z. Yang, et al., J. Light. Technol. 42, pp.6788-6797 (2024).

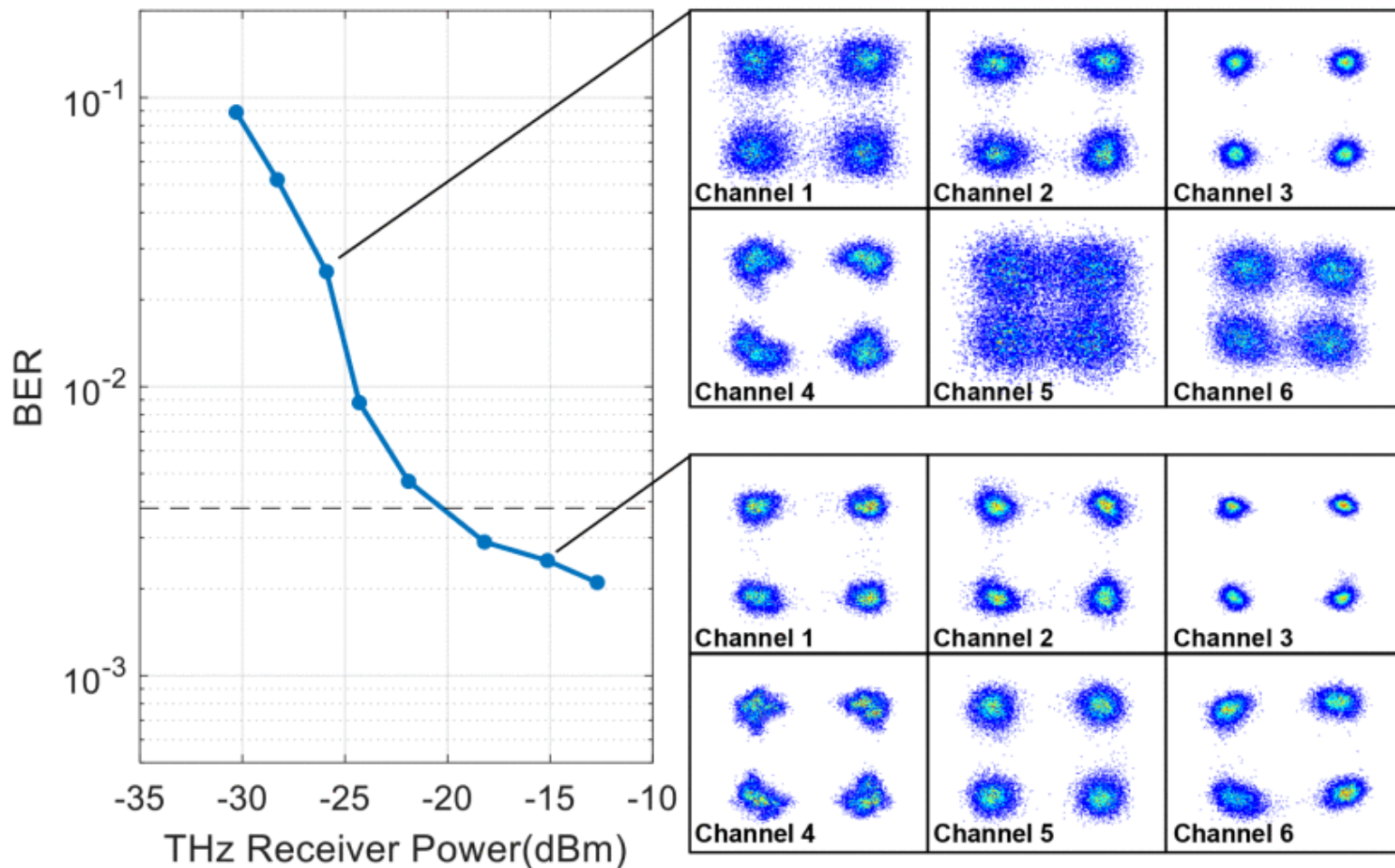


Ultra-Wideband Photonic Frequency-Hopping Waveform Generator
Enabled by Optical Injection Locking for Secure Terahertz Wireless Communications
Z. Yang, et al., J. Light. Technol. 42, pp.6788-6797 (2024).



マイクロ秒

Ultra-Wideband Photonic Frequency-Hopping Waveform Generator
Enabled by Optical Injection Locking for Secure Terahertz Wireless Communications
Z. Yang, et al., J. Light. Technol. 42, pp.6788-6797 (2024).



THz波無線通信における 物理層セキュリティについて

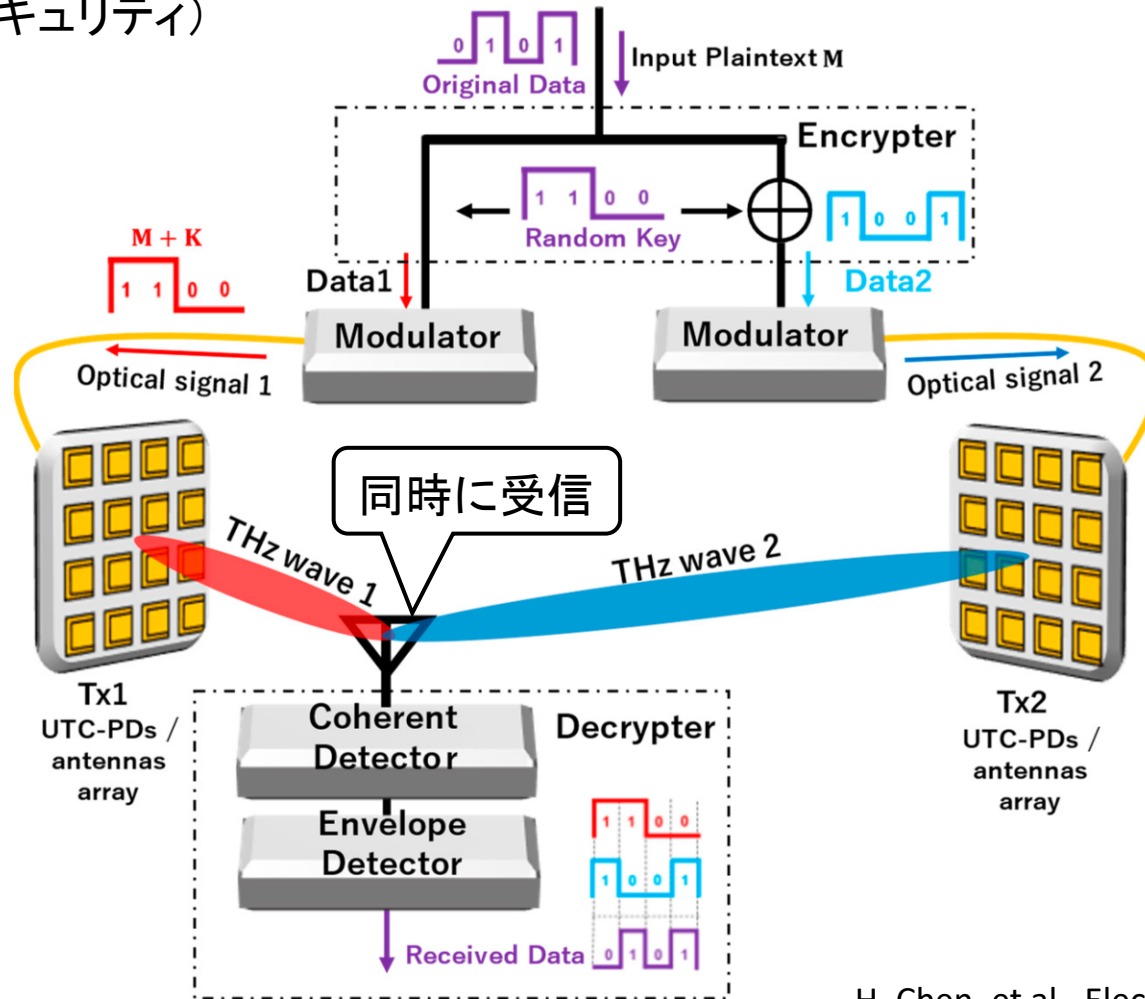
通信モデルの物理層でセキュリティを向上

- 量子ノイズ
- 周波数ホッピング など

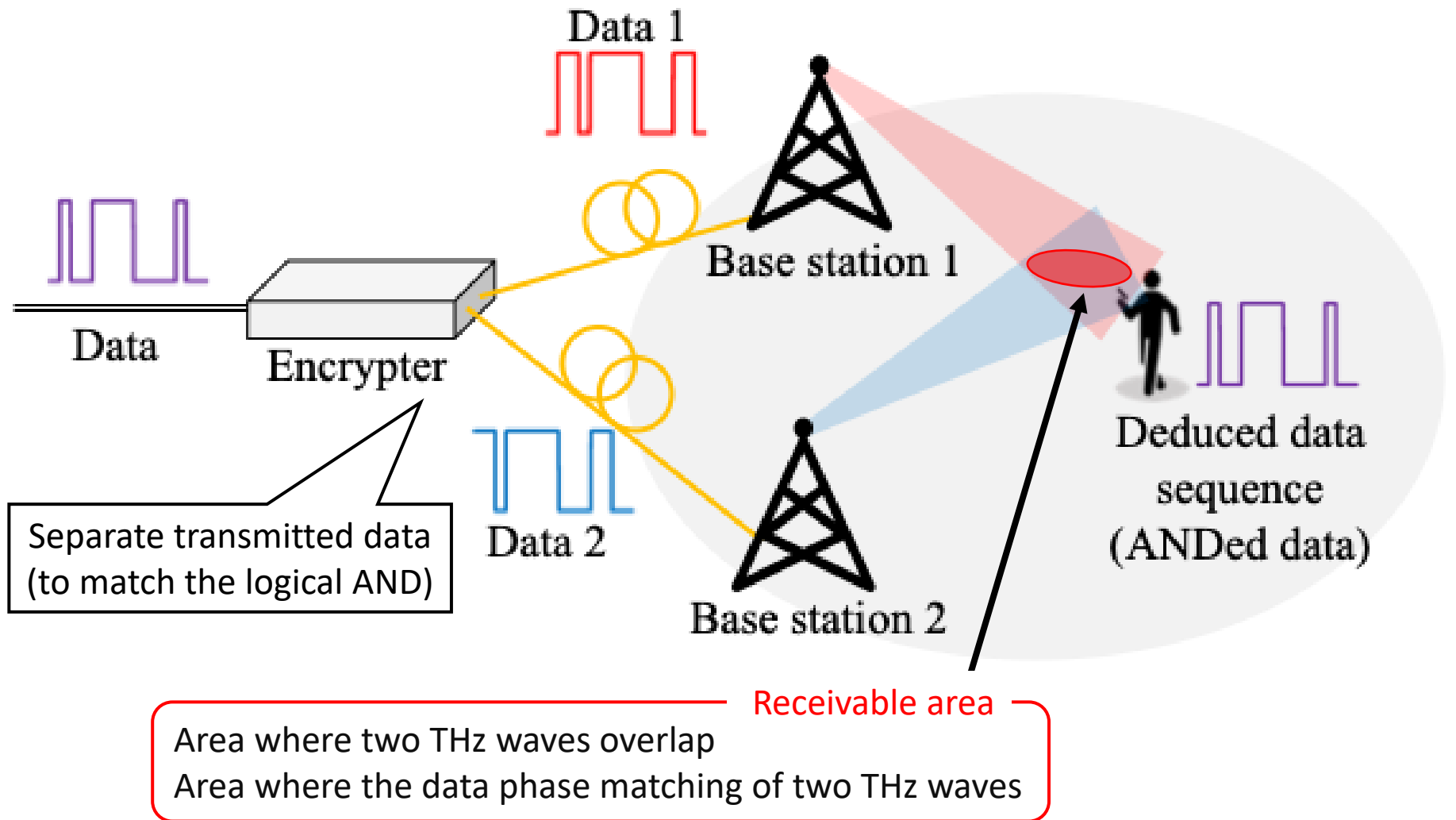
SCOPEでの成果について

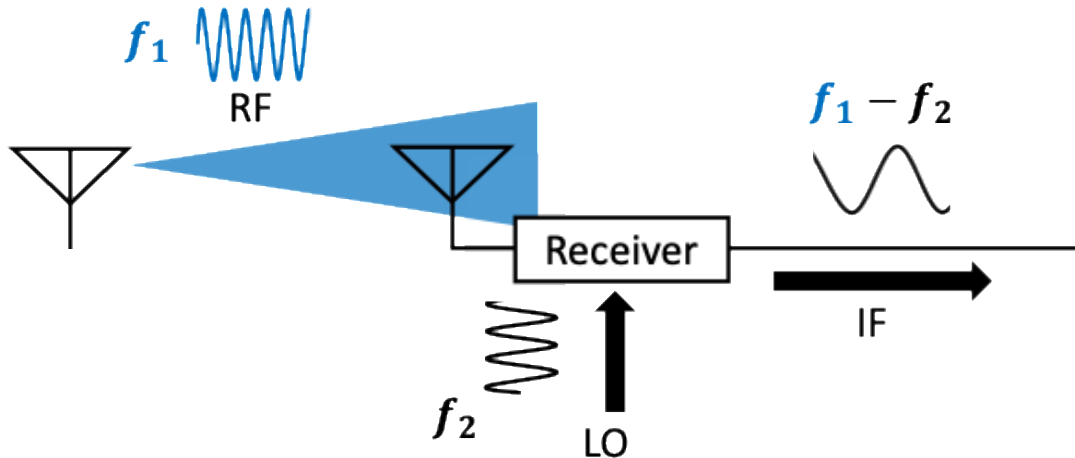
電波有効利用促進型研究開発(先進的電波有効利用型)

- 高指向性テラヘルツ波による高セキュリティ無線通信技術の研究開発
(物理層セキュリティ)



H. Chen, et al., Electronics 12, pp.2029 (2023).



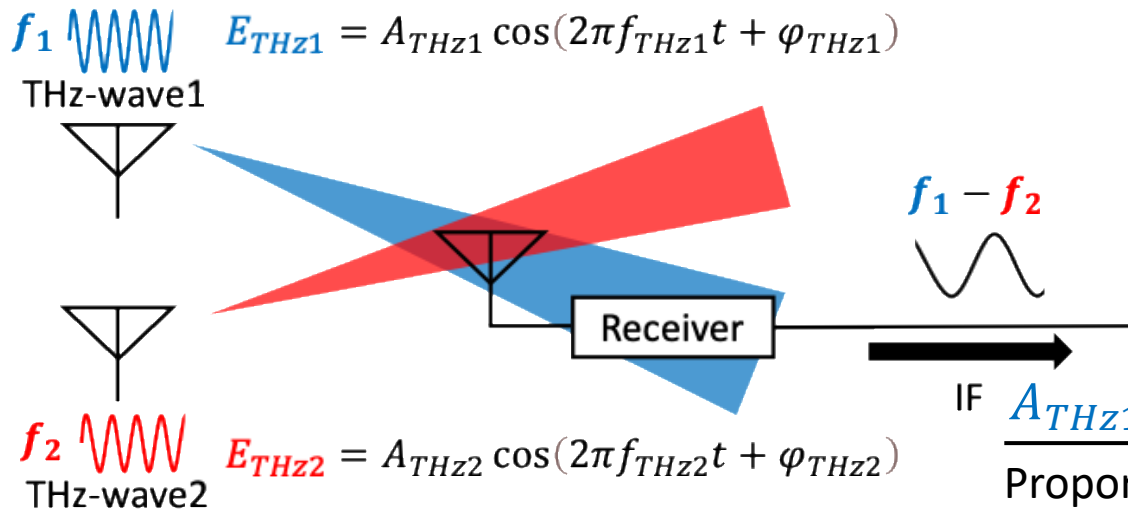


Conventional heterodyne detection

Mixing the received **RF** with **LO**



Improved reception sensitivity



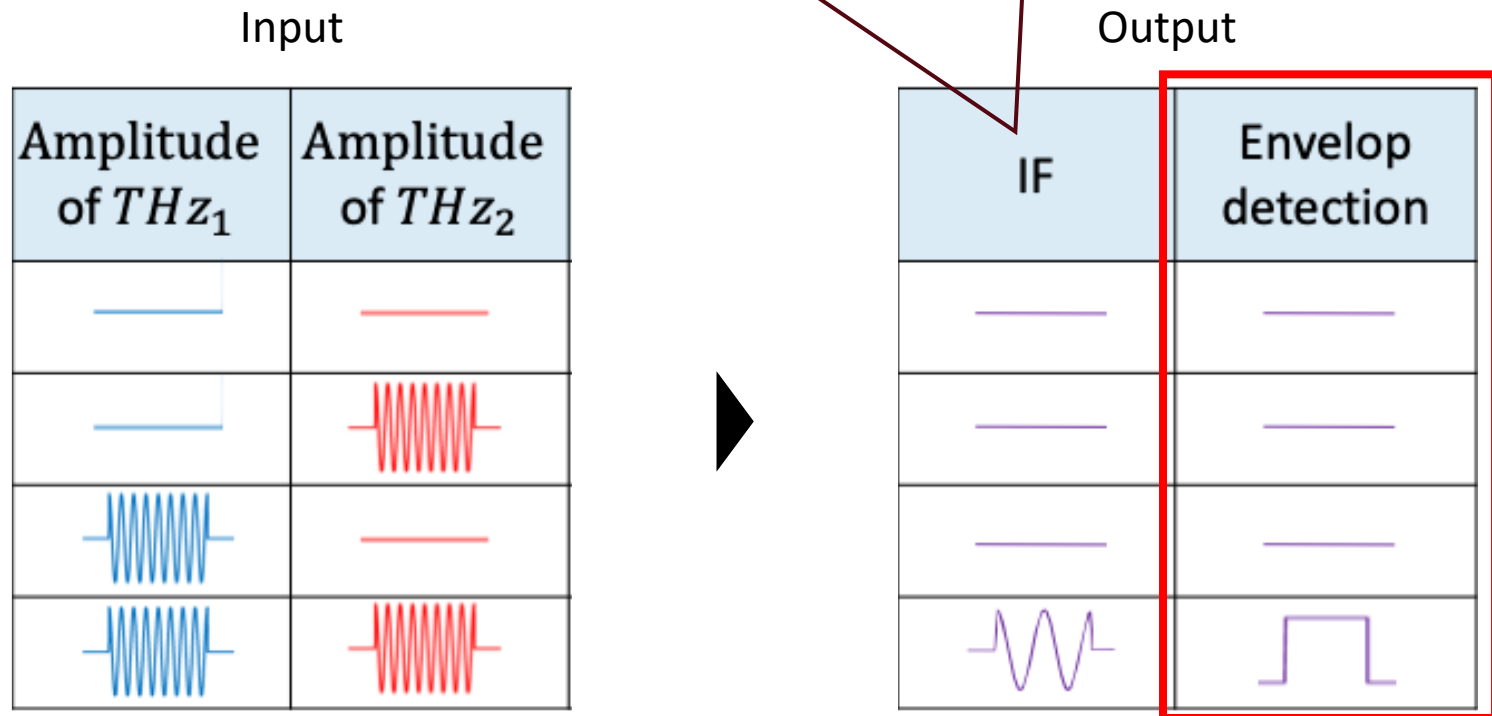
Heterodyne detection in this system

Receives **two THz waves** as **RF**

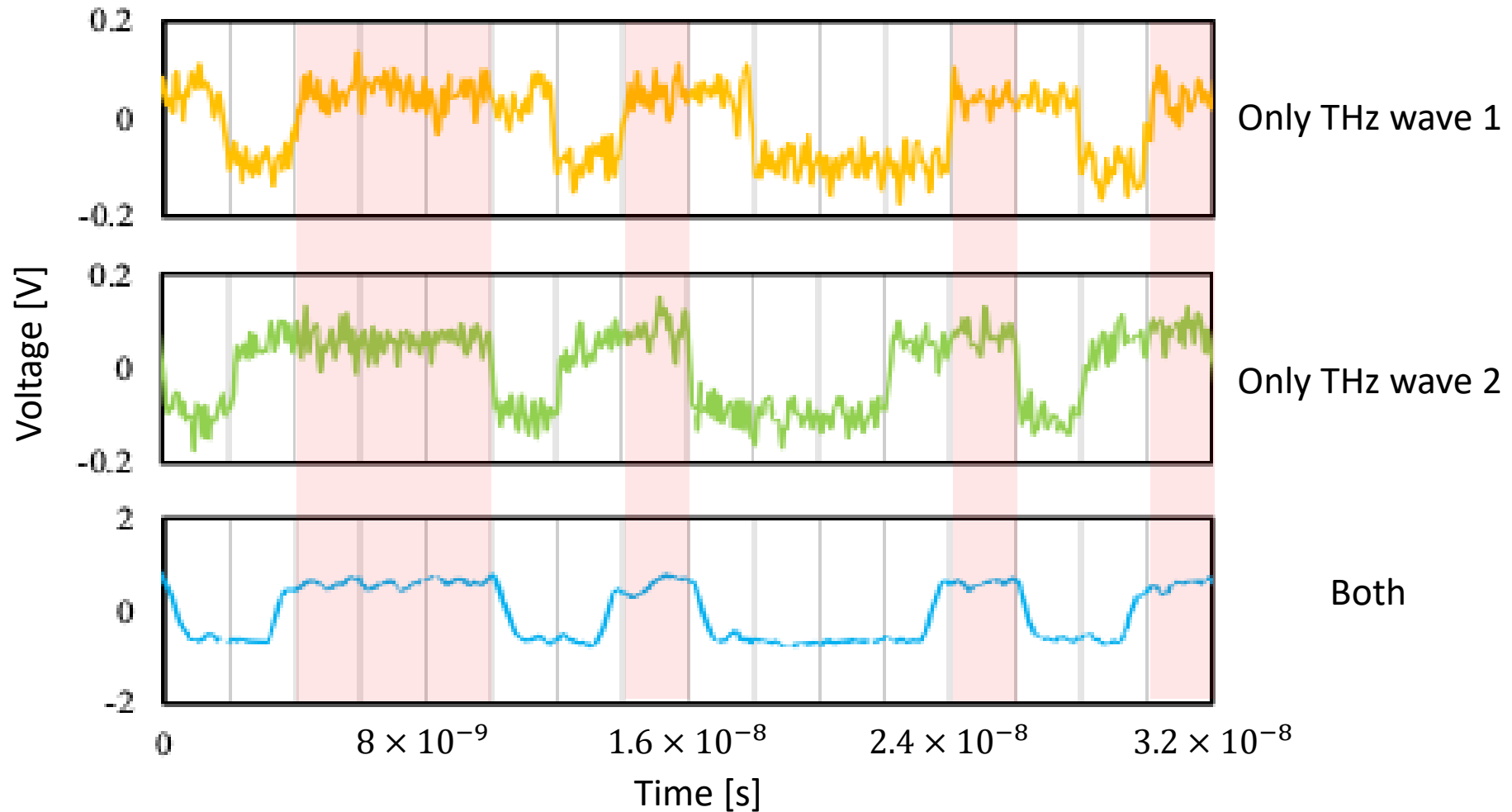
$$\text{IF } \frac{A_{THZ1} A_{THZ2}}{\text{Proportional to the amplitude}} \cos\{2\pi(f_{THZ1} - f_{THZ2})t\}$$

Proportional to the amplitude

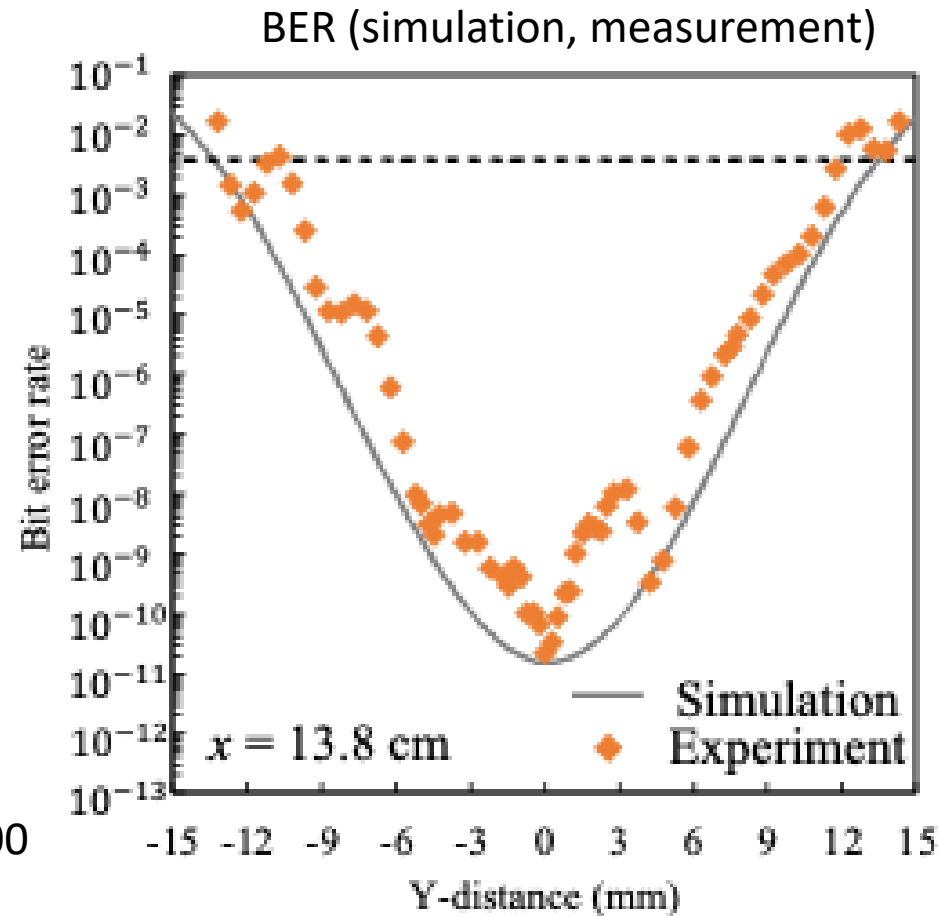
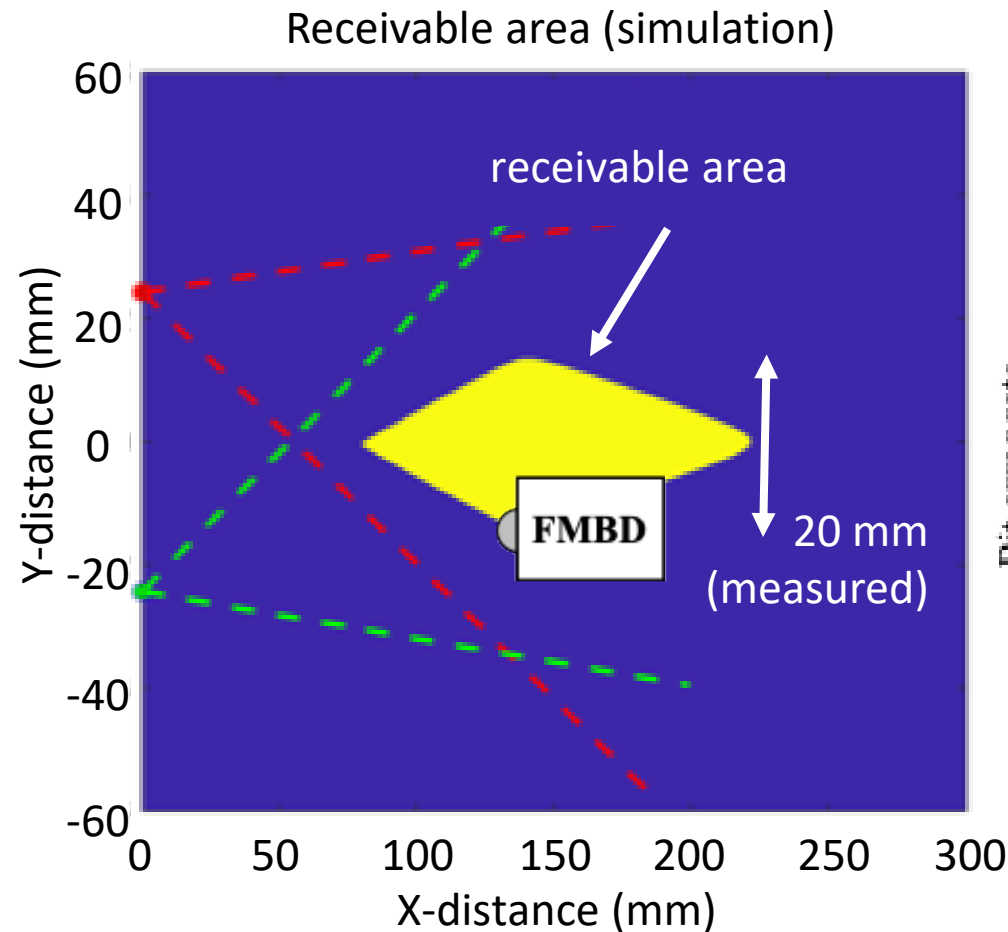
$$\text{IF} : \frac{A_{THz1} A_{THz2}}{\text{Proportional to the amplitude}} \cos\{2\pi(f_{THz1} - f_{THz2})t\}$$



Heterodyne detection output **matches the AND operation**



Demonstrated AND operation using terahertz wave signals between two data



Y-direction length (receivable area) : 20mm (measured)

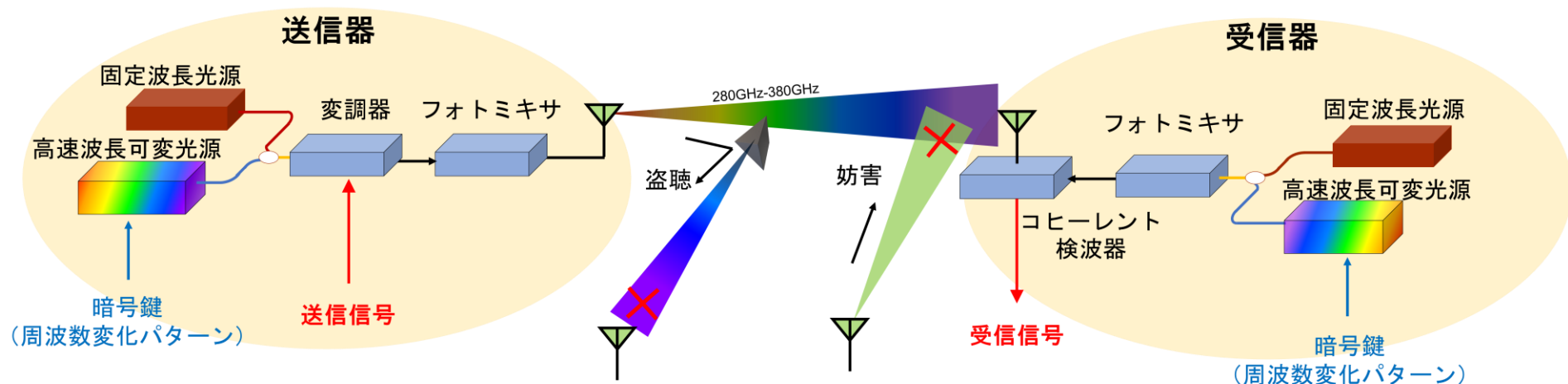
Demonstrated the limitation of the receivable area

SCOPEでの成果について

- 2つのTHz波ビームを同時に受信する
- コヒーレント検波によりANDの結果が得られる
- 受信可能領域が限定される

FORWARDでの研究開発内容 について

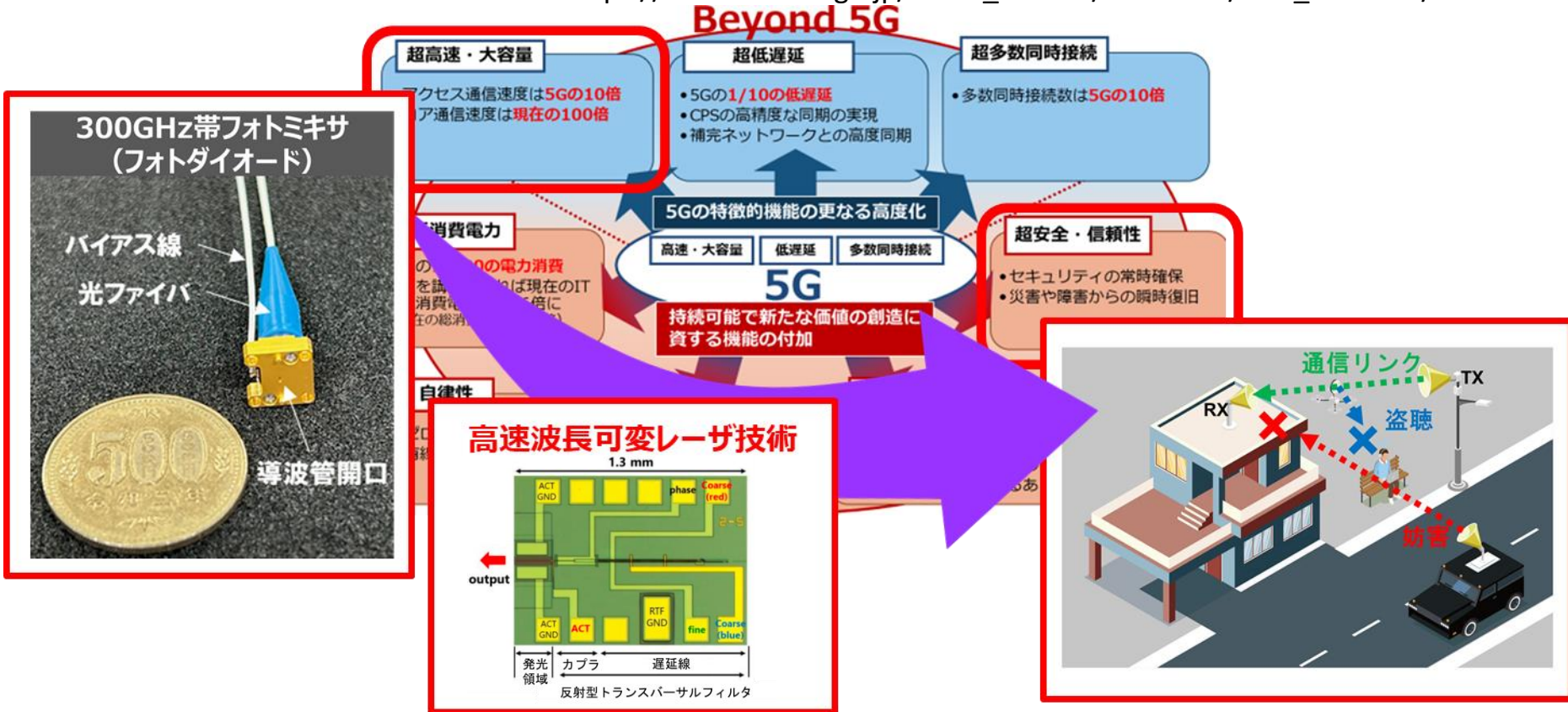
Beyond 5G/6Gへの導入を目指した周波数ホッピング無線通信の基盤技術を確立する



- 日本が世界をリードする光通信技術を最大限に活用
- フォトミキシングと波長可変レーザの高速波長切替性能とを組み合わせ
- 300GHz帯無線周波数をランダムに切り替えることで周波数軸で暗号化
- 盗聴に対して高セキュリティ、妨害に対してロバスト

総務省「Beyond 5G 推進戦略」より、Beyond 5G に求められる機能

https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/B5G_sokushin/index.html



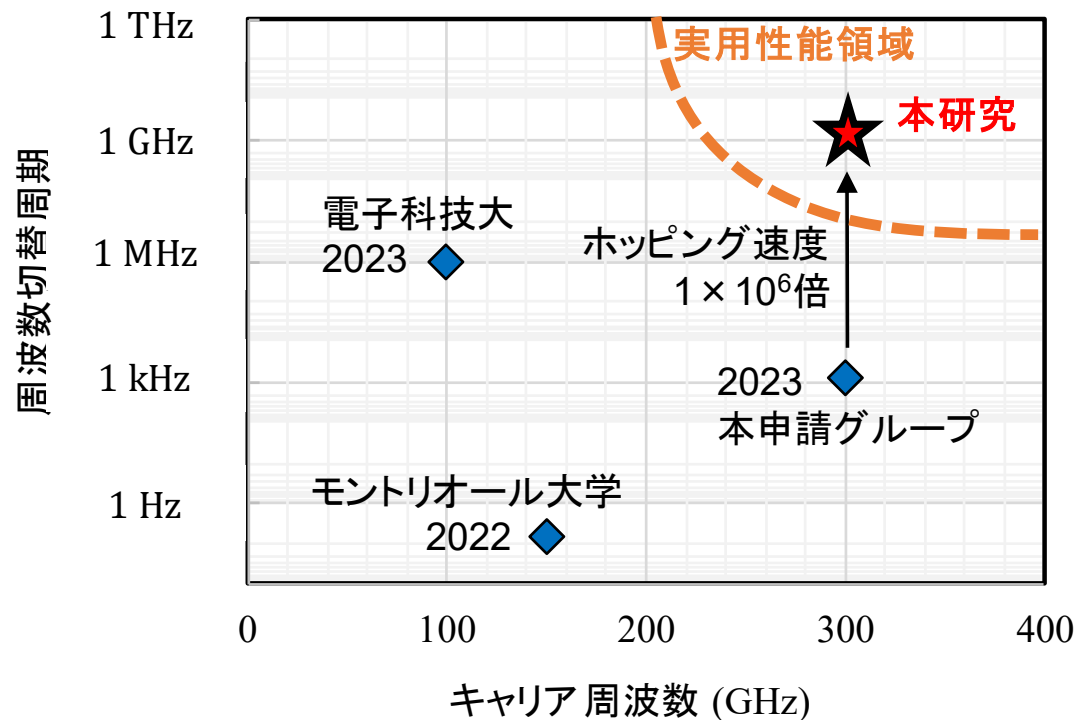
Y. Saito, et al., Optica 34, pp.23-26 (2021).

フォトミキサ※と波長可変レーザ※を組み合わせた周波数ホッピングを考案
※どちらも日本が先行する優位技術

周波数ホッピングは近年急速に関心が高まっている
しかし高周波帯での実現は非常に困難

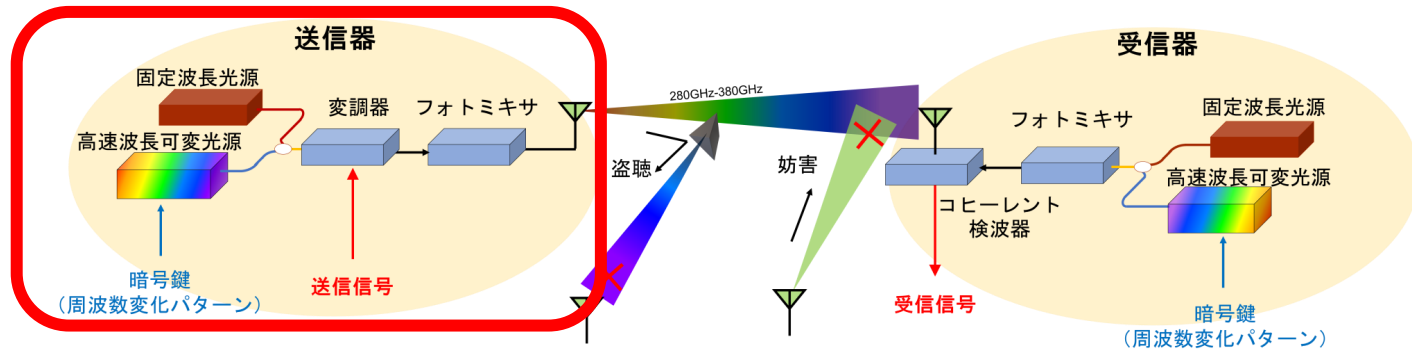
Z. Yang, et al., J. Light. Technol. 42, pp.6788-6797 (2024).

K. Nallappan, et al., Optics Express 30, pp.27028-27047 (2022).

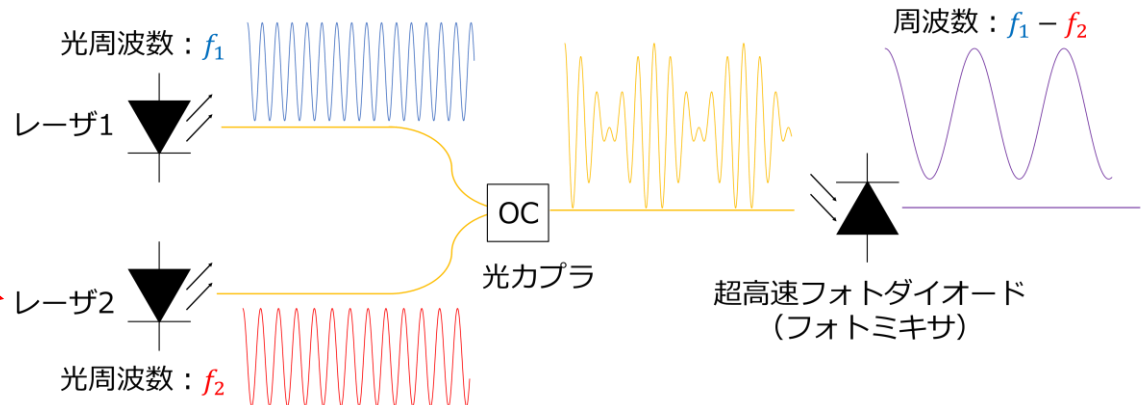
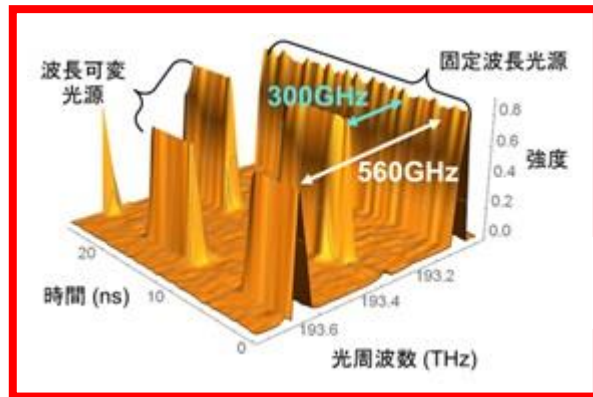


- 無線周波数200GHz以上の周波数ホッピングは、フォトミキシングと高速波長可変レーザ技術を有する当研究Gのみが実現している
- 1kHzでのホッピング原理を実証済、1GHzの実用性能を実現する

300GHz帯高速周波数ホッピング

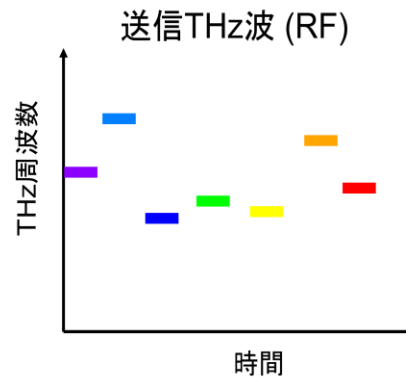
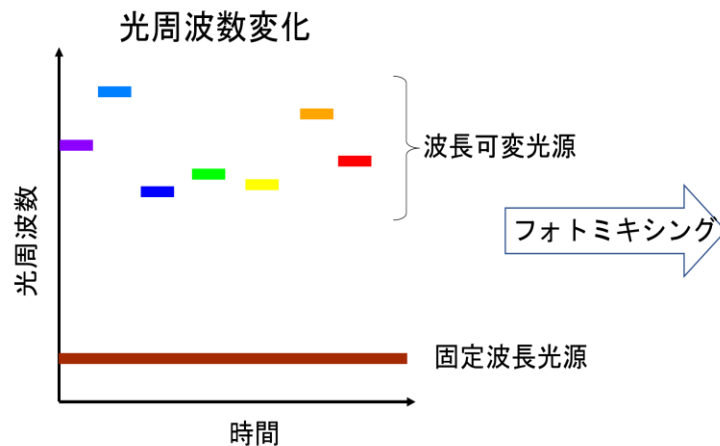
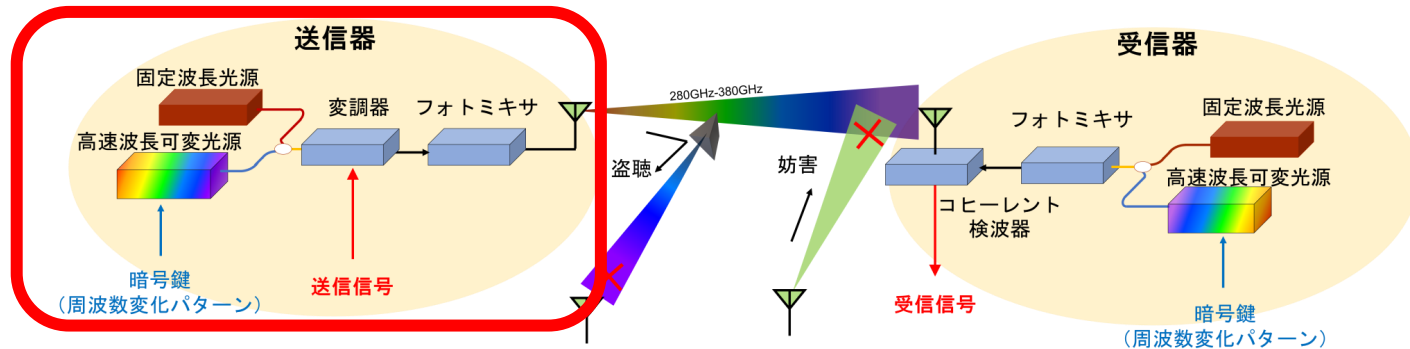


N. Seiki, et al., 2022 APMC, pp.52-54 (2022).



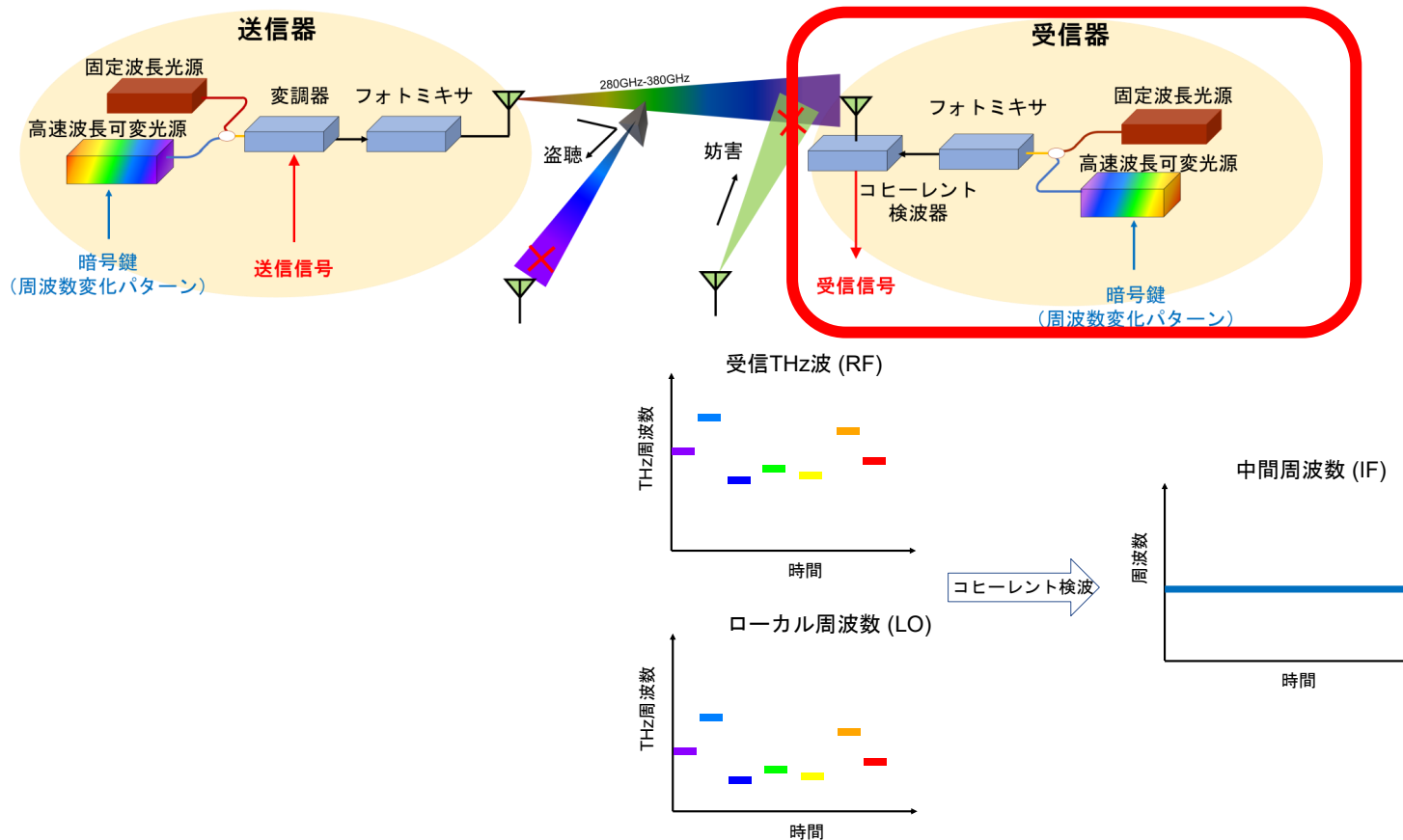
- フォトミキシングにより2光波の差周波が生成される
- 光波の波長(光周波数)変化によりテラヘルツ波の周波数が変化する
- NTT開発の高速波長可変レーザ(2ナノ秒で切替)を利用(共同研究成果利用)

300GHz帯高速周波数ホッピング



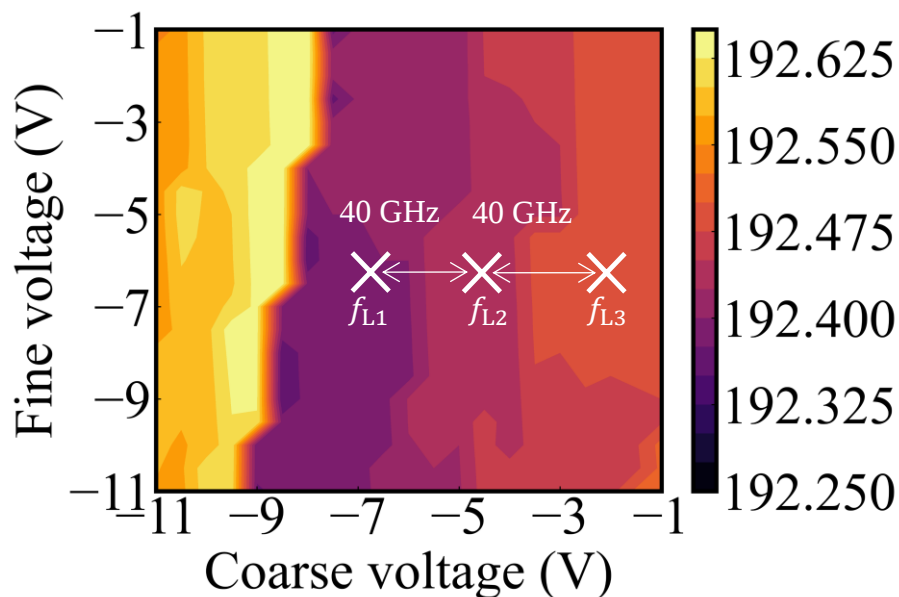
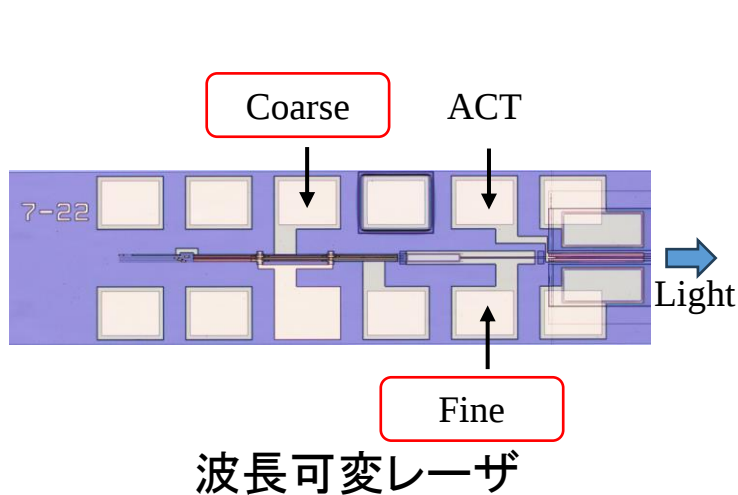
- 光波長を100nsでランダムに切り替えてフォトミキシング
- 300GHz帯10Gbit/sバーストデータ(データ長100ns)を周波数ホッピング

300GHz帯周波数ホッピングコヒーレント検波



- 送信器と同期した周波数ホッピングローカル信号でコヒーレント検波
- 10Gbit/sデータが周波数一定のIFに変換
- 第三者はIF周波数がランダムに変わるためデータを解読不可

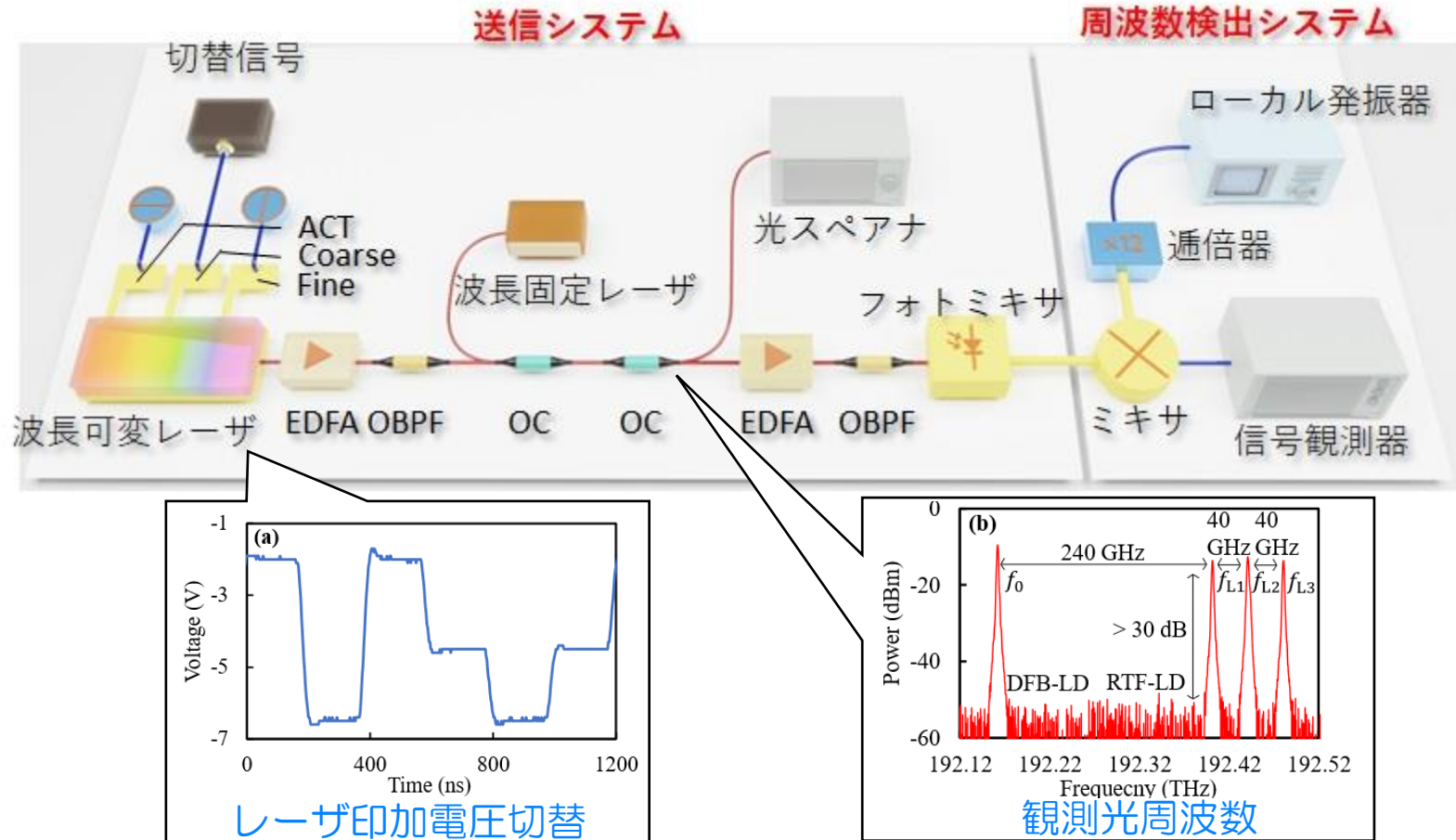
300GHz波を生成する波長可変レーザーの高速光周波数切替条件を決定



Coarse電圧/Fine電圧－光周波数 の関係

- 波長可変レーザーの波長マップ(電圧－光周波数 特性)を完成
- 40GHzステップでの光周波数切替条件を決定

300GHz帯周波数ホッピング送信システムの構築



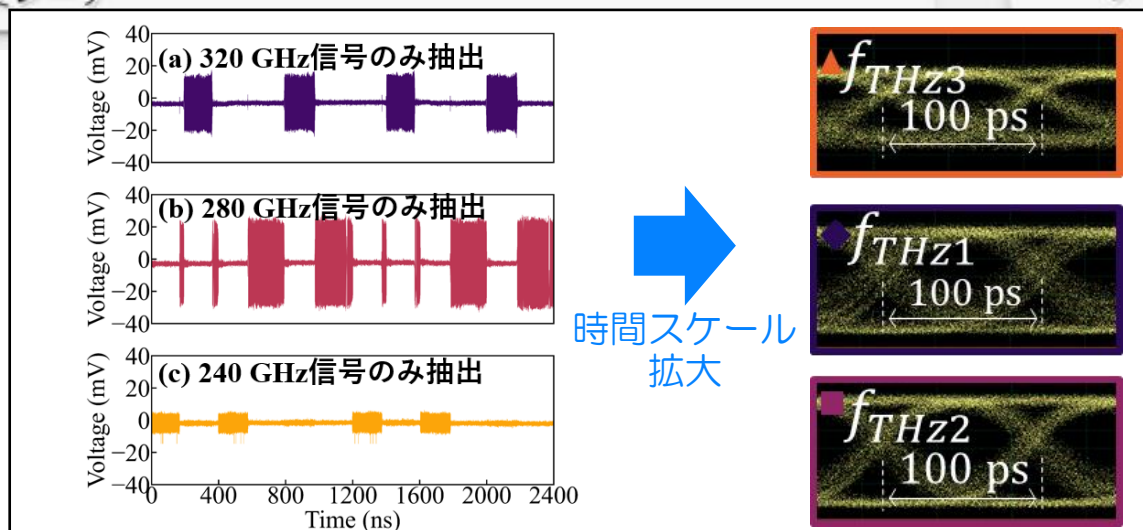
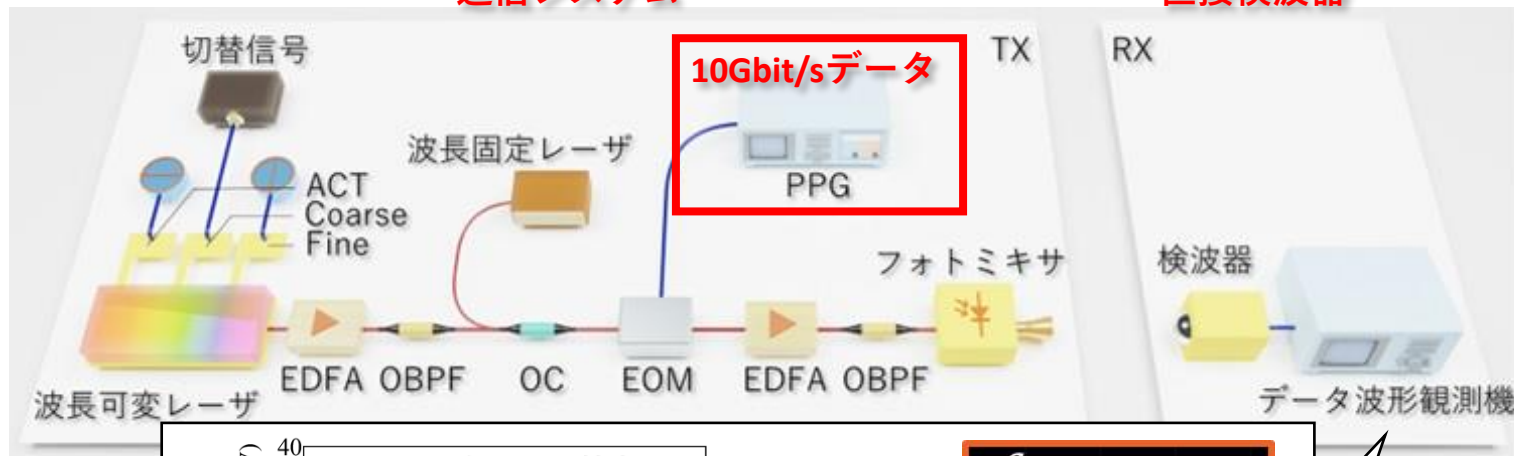
- 周波数ホッピング送信システムを構築(受信はホッピング未対応)
- 40GHzステップ光周波数切替を実現

300GHz帯周波数ホッピング信号検波に成功

S. Ye, et al., Optics Letters 50, pp.3070-3073 (2025).

送信システム

直接検波器



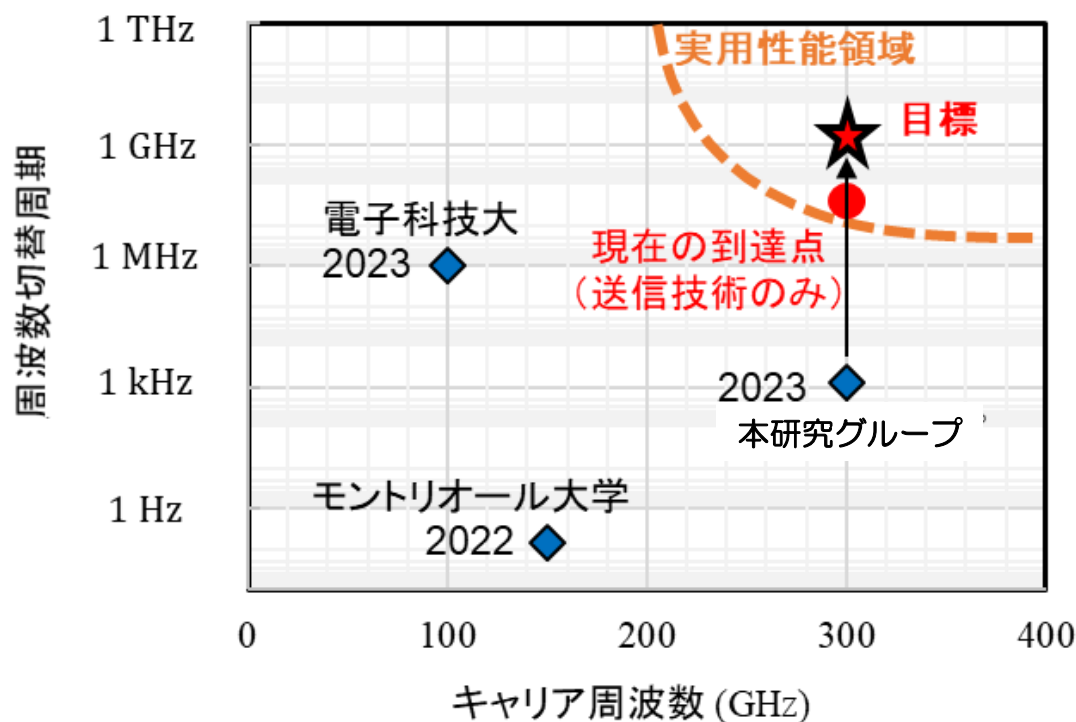
- 300GHz帯40GHzステップ50ns周波数ホッピングに成功
- 10Gbit/s周波数ホッピングデータのアイパターンを確認

ナノ秒

300GHz帯40GHzステップで50nsの周波数ホッピングに成功

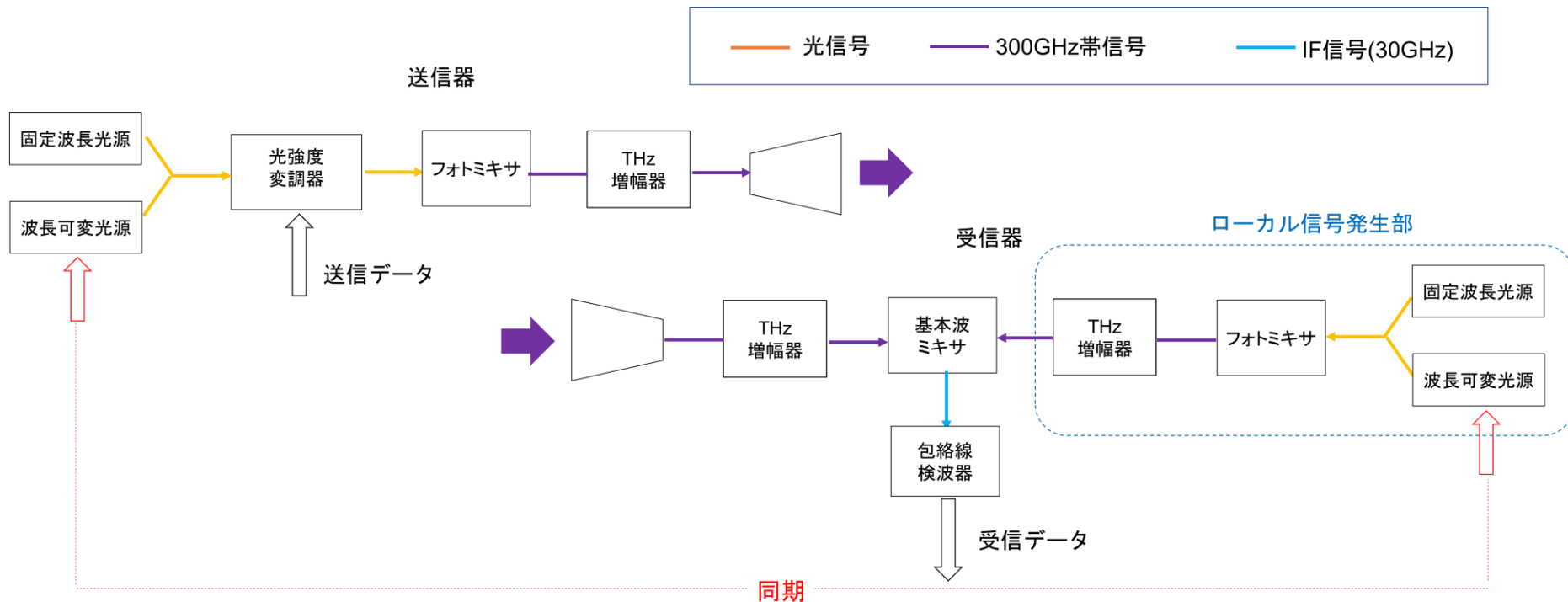
Z. Yang, et al., J. Light. Technol. 42, pp.6788-6797 (2024).

K. Nallappan, et al., Optics Express 30, pp.27028-27047 (2022).



- 送信システムは動作確認完了
- 周波数同期する受信システムの考案、開発が今後の課題

300GHz帯周波数ホッピング通信実験



- 開発した送信・受信技術を組み合わせて通信システムを構成

FORWARDでの研究開発内容 について

- フォトミキシングと高速波長可変レーザを活用
- 高速THz波周波数ホッピング無線通信システムの開発
- 高速周波数ホッピングに成功

- THz波無線通信における物理層セキュリティについて
- SCOPEでの成果について
- FORWARDでの研究開発内容について

本研究開発は総務省FORWARD(受付番号JPMI241010003)の委託を受けたものです。

総務省SCOPE(受付番号#195010002)による成果を含みます。
NTT先端集積デバイス研究所との共同研究による成果を含みます。

ご清聴ありがとうございました
