

XGMF 6G無線技術プロジェクト 無線中継・反射板WG 白書概要

2025年9月30日

ホワイトペーパー概要

- タイトル : Repeater, Metasurface, and RIS/IRS
- 章構成 : 全6章 (全208ページ, 英文)
 - 1章 : Introduction
 - 2章 : Use cases and scenarios
 - 3章 : Technology trend survey
 - 4章 : Standardization survey
 - 5章 : Recent activities in Japan
 - 6章 : Summary



Section II

Use cases and scenarios

II. ユースケース・シナリオ 全体概要

論文・プレスを中心に調査を行い、中継器、メタサーフェス、およびIRS/RISに関する
ユースケース・シナリオを網羅的に整理

本章のコンテンツ一覧

● 中継器

1. オペレーティングモード
 1. 再生中継
 2. 非再生中継
 3. ビームフォーミング
2. ユースケース
 1. カバレッジ拡大
 2. 周波数利用効率改善
 - MIMO、適応変調、ビーム制御
 3. その他
 - 信頼性改善、電力効率改善

● メタサーフェス・IRS/RIS

1. オペレーティングモード
 1. パッシブ
 - 反射、透過、etc...
 2. アクティブ・ハイブリッド
 - 送信、受信、送受信
2. ユースケース
 1. カバレッジ拡大
 2. 周波数利用効率改善
 - MIMO、Beam Manipulation
 3. その他
 - 信頼性改善、物理層セキュリティ、センシング精度改善、電力効率改善、etc...

● 動作環境・設置シナリオ

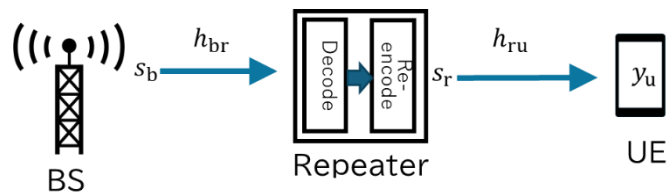
1. 動作環境
 - 屋内、屋外、ハイブリッド
2. 設置シナリオ
 - 固定設置、可搬型

中継器 オペレーティングモード

●再生中継：

- 受信した信号を復調・再変調し、増幅して再送信
- 非再生中継と比較して、中継による無線品質の劣化を回避可能

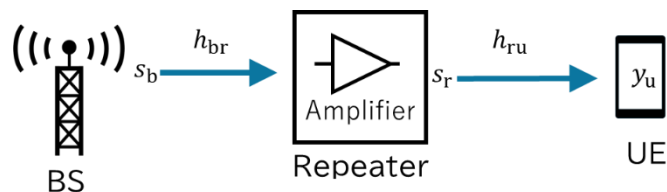
非再生中継



●非再生中継：

- 受信した信号をそのまま増幅して再送信
- 再生中継と比較して簡易な回路構成、かつ低遅延

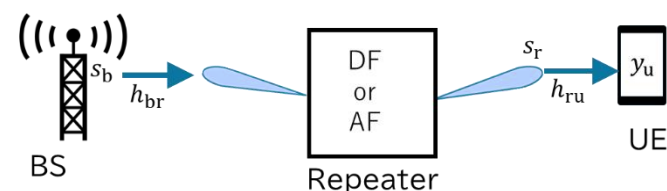
再生中継



●ビームフォーミング：

- 中継経路の信号強度を改善
- 再生/非再生を問わず対応可能

ビームフォーミング



中継器 ユースケース (1)

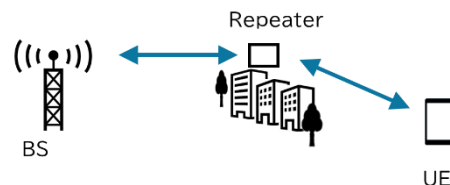
●カバレッジ拡大

- 建物等の遮蔽に対して、中継器によるエリア形成
- 複数中継器によるマルチホップも可能

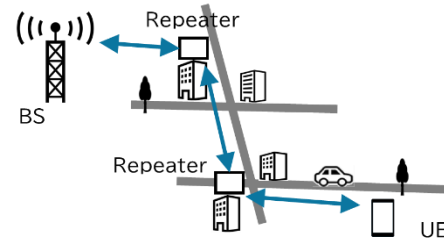
●MIMO

- 非再生中継による、空間多重を実現
 - 多数の中継器を配置し、チャネル品質に適応的に中継器を選択することでMU-MIMOやSU-MIMOを実現
- アンテナ素子を非対称に配置した中継器により見通し内空間多重 (LoS-MIMO) を実現
 - ドローン等に中継器を設置したとき基地局と中継器の距離が変化しても常に高い多重数を提供可能

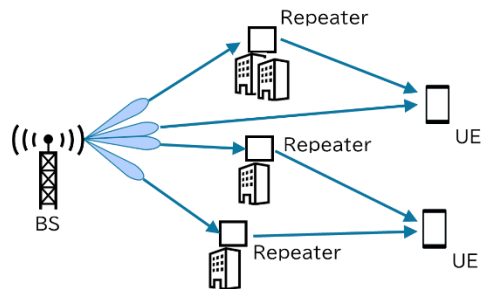
シングルホップ



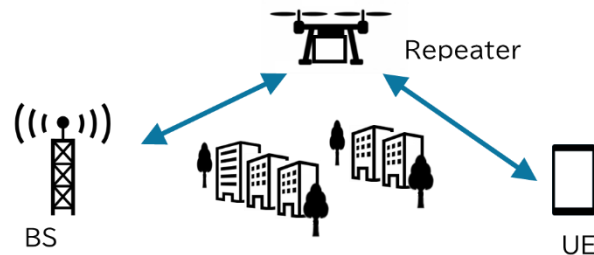
マルチホップ



MU-MIMO



LoS-MIMO



中継器 ユースケース (2)

●適応変調

- 中継器がない場合と比較して、中継器により十分な無線品質を提供することで、高次の適応変調が可能となり周波数利用効率を改善

●ビーム制御

- 無線品質に適応的なビームフォーミングにより、カバレッジ拡大、干渉低減等を実現

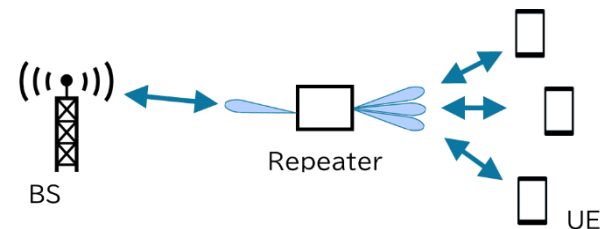
●信頼性改善

- 多数の中継器を設置することにより、ユーザが接続可能な多数のパスが形成（冗長化）される

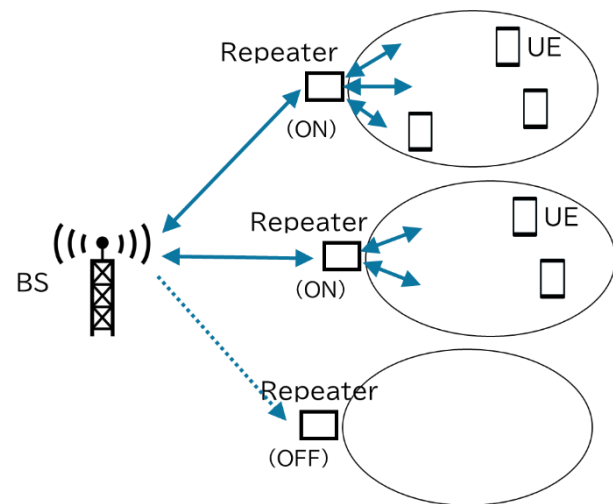
●エネルギー効率改善

- ON/OFF制御により、中継器が不要な場合にはOFFすることでエネルギー効率を改善可能

ビーム制御

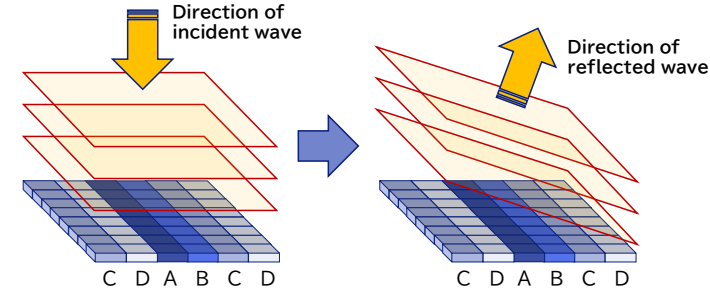


エネルギー効率改善



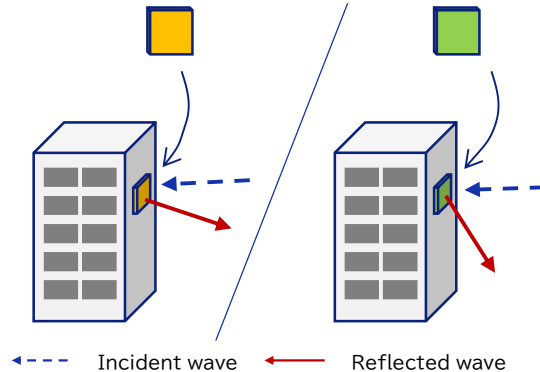
メタサーフェス・IRS/RISの概要

- 入射した電波を意図した方向に反射・透過等させるデバイスをメタサーフェス・IRS/RISと呼ぶ
- 半波長以下のサイズの多数の素子から構成され、各素子の位相を調整することにより反射・透過特性を制御する



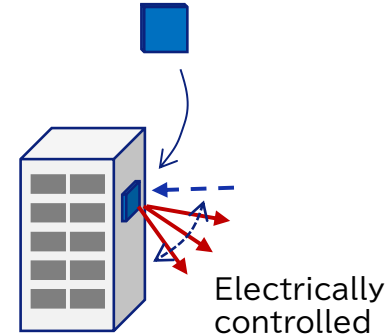
メタサーフェス

素子の形状で反射（透過）方向が決まる



IRS/RIS

電氣的に反射（透過）方向を制御



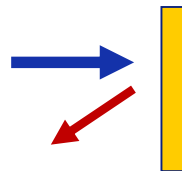
IRS (Intelligent Reflecting Surface) 、 RIS (Reconfigurable Intelligent Surface)

メタサーフェス・IRS/RIS オペレーティングモード

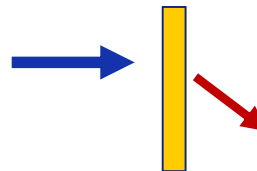
●パッシブ

- 反射
- 透過
- 吸収
- オムニ

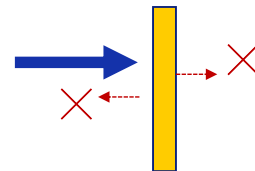
反射



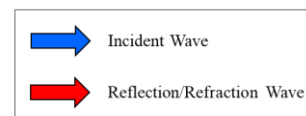
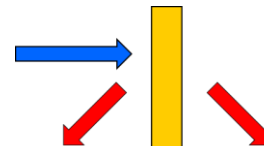
透過



吸収



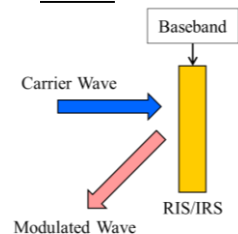
オムニ



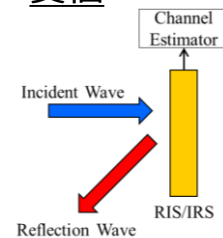
●アクティブ・ハイブリッド※

- 送信
- 受信
- 送受信

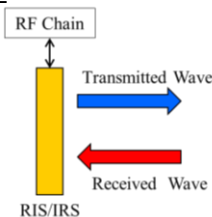
送信



受信



送受信



メタサーフェス・IRS/RIS ユースケース (1)

- カバレッジ拡大

- 建物等の遮蔽に対して、メタサーフェス・IRS/RISを介したパスを形成することによるエリア構築

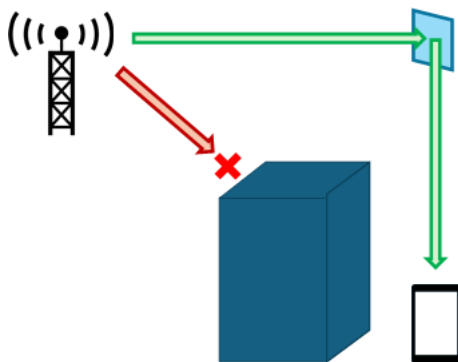
- MIMO

- IRS/RISを介したパスを形成することで、MIMOの空間多重数を改善

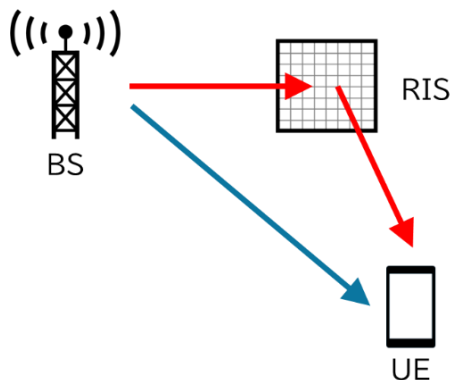
- Beam Manipulation

- IRS/RISのビーム方向や焦点位置の制御、およびカービングビームの形成等、柔軟なビーム制御により周波数利用効率を改善

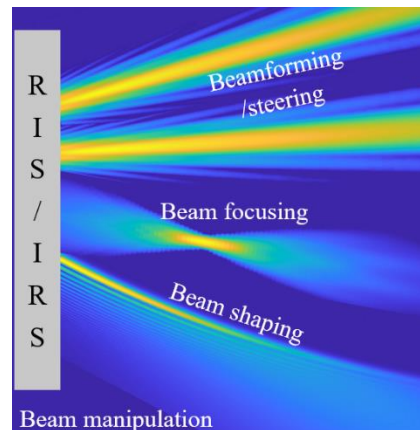
カバレッジ拡大



MIMO



Beam Manipulation



メタサーフェス・IRS/RIS ユースケース (2)

● 信頼性改善

- ・ 多数のパスを形成（冗長化）することで一時的に基地局との直接パスが遮蔽された場合でも、メタサーフェス・IRS/RISを介したパスで通信することが可能

● 物理層セキュリティ改善

- ・ 無線通信で秘匿情報をやり取りする場合に、電波が意図しない受信者の方向に飛来し盗聴されるリスクがあるが、メタサーフェス・IRS/RISにより電波の漏洩を抑止し、物理層セキュリティを改善

● センシング精度改善

- ・ 基地局の見通し外エリアにおいて、メタサーフェス・IRS/RISにより仮想的な見通しエリアを形成することで、ISAC (Integrated Sensing and Communication) におけるセンシング精度を改善

● エネルギー効率改善

- ・ メタサーフェスまたは低消費電力なIRS/RISの利用によるエネルギー効率改善
- ・ 仮想的な見通しエリアを形成による、無線電力伝送の給電デバイスの受信電力改善

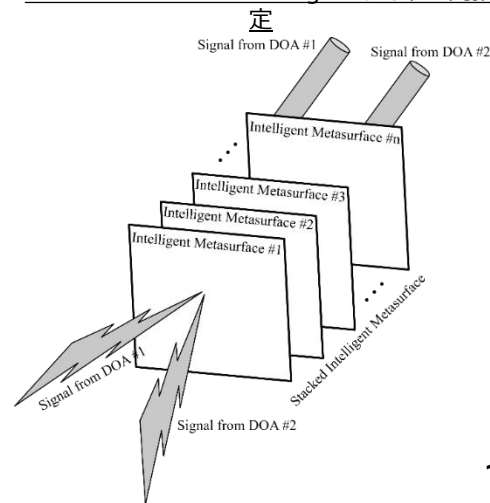
● リンクマネジメント

- ・ データセンタのラック内/間の通信にミリ波またはTHz波およびメタサーフェス・IRS/RISを利用し、ケーブルコスト削減および複雑な回線を回避する。

● Wave domain Processing

- ・ 従来RFフロントエンドやベースバンド信号処理部で行われている処理を、SIMs (Stacked Intelligent Metasurfaces) と呼ばれる多層IRS/RISにおいてリアルタイム処理する新たなコンセプト
- ・ 到来方向推定やマルチユーザ向けのビームフォーミングにおける利用が検討されている

Wave Domain Processingによる到来方向推定



動作環境・設置シナリオ

●動作環境

- 屋内：
 - 廊下、角、階段などの電波の届きづらい場所を対策
- 屋外：
 - 建物・樹木の陰を対策、特に自動車・電車などの対策は高速なビーム追従が必要
- 屋外から屋内の対策：
 - 屋外基地局の電波が屋内に浸透する際に壁や窓ガラスで減衰する問題に対して、外壁や窓ガラス付近にレピータやメタサーフェス・IRS/RISを設置することで、屋内を対策する

●設置シナリオ

- 固定設置：
 - 基地局と同様に、屋上・街灯などに設置する
- 可搬設置：
 - UAVや自動車に設置し、一時的に発生する遮蔽の対策やイベント会場の対策を行う

Section III

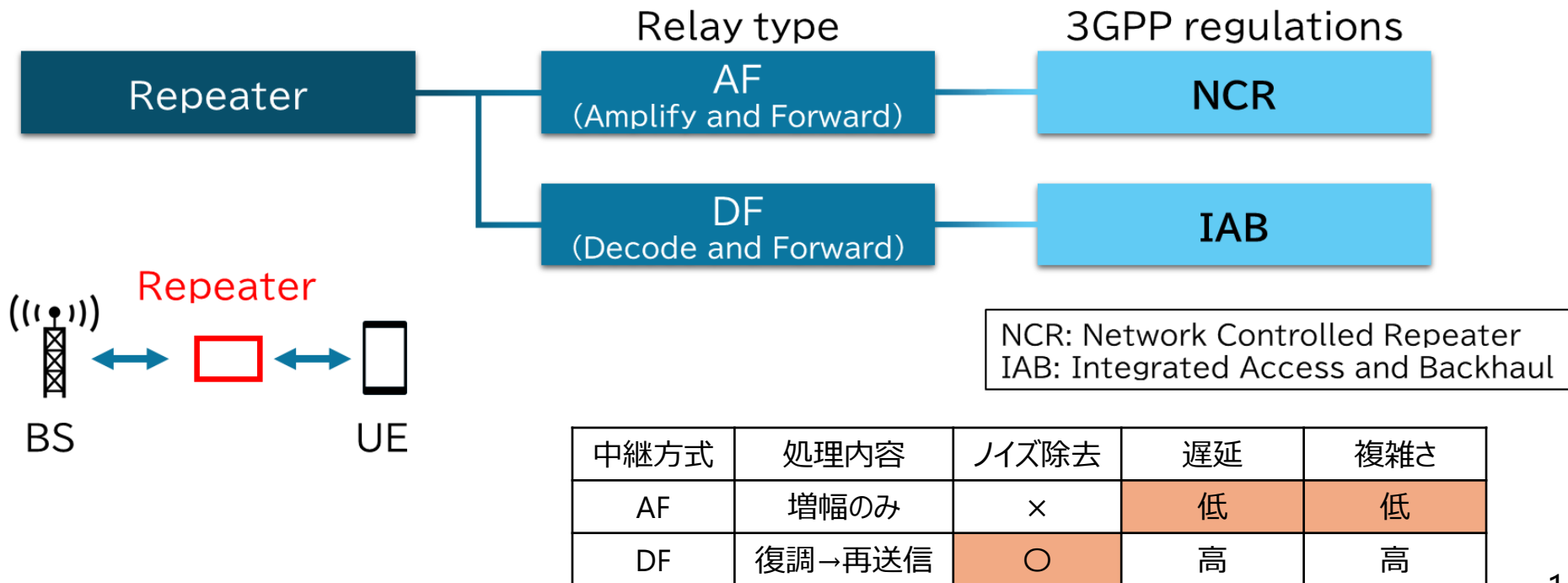
Technology trend survey

III. 技術動向の目次

1. Repeater、Metasurface、RIS/IRSのカテゴリ分類
2. 最新論文 & 最新記事から見える技術動向
3. 個別の技術動向
 - Repeater
 - Metasurface
 - RIS/IRS

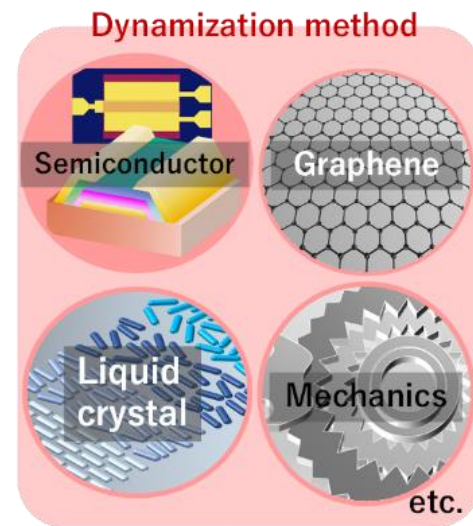
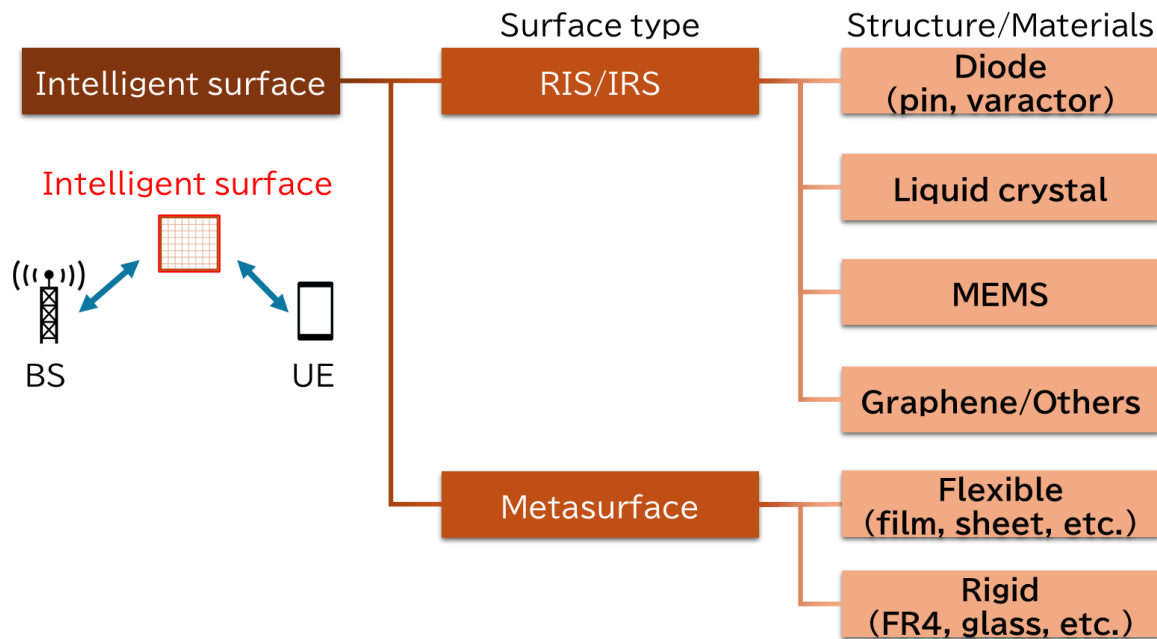
Repeaterのカテゴリ分類

- RepeaterはAF(増幅中継方式)とDF(復号中継方式)に大きく分類
- 国際標準プロジェクトの3GPPでは、NCRとIABとして標準化が推進中



Metasurface, RIS/IRSのカテゴリ分類

- RIS/IRSの構成は、ダイオード・液晶・メカニカル・グラフェンが主流
- Metasurfaceの構成は、フレキシブル素材とそれ以外に分類



RIS: Reconfigurable Intelligent Surface
IRS: Intelligent Reflecting Surface
MEMS: Micro Electro Mechanical Systems

(参考) Repeaterの最新論文 & 最新記事

- Repeaterに関連する2010年以降の論文 & 記事を周波数の観点で整理
- 詳細はXGMF6G無線技術白書を参照

Type	Frequency	
AF	Up to 24GHz	[III.3-23][III.3-39]
	24 to 100GHz	[III.3-26][III.3-29][III.3-31][III.3-37][III.3-40][III.3-41][III.3-47][III.3-50][III.3-51][III.3-53][III.3-54][III.3-57][III.3-86][III.3-89]
	Above 100GHz	
	NA	[III.3-30][III.3-34][III.3-42][III.3-46][III.3-55][III.3-68][III.3-75][III.3-76][III.3-81][III.3-83]
DF	Up to 24GHz	[III.3-78][III.3-84]
	24 to 100GHz	[III.3-66]
	Above 100GHz	
	NA	[III.3-34][III.3-43][III.3-49][III.3-58][III.3-59][III.3-60][III.3-63][III.3-71][III.3-72][III.3-79][III.3-80][III.3-82]
NCR	Up to 24GHz	[III.3-91]
	24 to 100GHz	[III.3-1][III.3-2][III.3-3][III.3-4][III.3-5][III.3-11][III.3-22][III.3-27][III.3-28][III.3-38][III.3-87][III.3-88][III.3-90]
	Above 100GHz	
	NA	[III.3-6][III.3-7][III.3-21][III.3-24][III.3-25]
IAB	Up to 24GHz	
	24 to 100GHz	[III.3-3][III.3-4][III.3-5][III.3-15][III.3-16][III.3-17][III.3-28][III.3-32][III.3-35][III.3-36][III.3-45][III.3-48][III.3-52][III.3-56][III.3-65][III.3-67][III.3-69][III.3-70][III.3-74][III.3-90]
	Above 100GHz	[III.3-33][III.3-36][III.3-77]
	NA	[III.3-6][III.3-12][III.3-14][III.3-18][III.3-19][III.3-20][III.3-25][III.3-44][III.3-61][III.3-62][III.3-64][III.3-73][III.3-85]
Others	Up to 24GHz	
	24 to 100GHz	[III.3-8]
	Above 100GHz	
	NA	[III.3-9][III.3-10][III.3-13]

(参考) Metasurface、RIS/IRSの最新採択論文 & 最新記事

- Metasurface、RIS/IRSに関連する2010年以降の論文 & 記事を周波数の観点で整理
- 詳細はXGMF6G無線技術白書を参照

Type	Frequency	
Metasurface	Up to 24GHz	[III.3-96][III.3-104][III.3-106][III.3-118][III.3-127][III.3-128][III.3-130][III.3-132][III.3-133][III.3-134]
	24 to 100GHz	[III.3-94][III.3-100][III.3-101][III.3-103][III.3-108][III.3-109][III.3-110][III.3-111][III.3-112][III.3-113][III.3-114][III.3-116][III.3-117][III.3-119][III.3-121][III.3-122][III.3-123][III.3-131]
	Above 100GHz	[III.3-92][III.3-95][III.3-102][III.3-115][III.3-124][III.3-125][III.3-126][III.3-129]
	NA	[III.3-93][III.3-97][III.3-98][III.3-99][III.3-105][III.3-107][III.3-120]
RIS/IRS	Up to 24GHz	[III.3-138][III.3-145][III.3-147][III.3-149][III.3-153][III.3-154][III.3-168][III.3-169][III.3-170][III.3-175][III.3-176][III.3-177][III.3-184][III.3-186][III.3-189][III.3-193][III.3-194][III.3-195][III.3-196][III.3-198][III.3-201][III.3-202][III.3-208][III.3-209][III.3-210][III.3-211][III.3-212][III.3-218][III.3-223][III.3-224][III.3-225][III.3-226][III.3-227][III.3-228]
	24 to 100GHz	[III.3-135][III.3-136][III.3-137][III.3-140][III.3-141][III.3-150][III.3-151][III.3-152][III.3-155][III.3-156][III.3-157][III.3-158][III.3-159][III.3-160][III.3-161][III.3-162][III.3-163][III.3-164][III.3-165][III.3-172][III.3-173][III.3-174][III.3-178][III.3-179][III.3-180][III.3-181][III.3-182][III.3-183][III.3-185][III.3-187][III.3-188][III.3-190][III.3-191][III.3-192][III.3-216][III.3-217][III.3-221]
	Above 100GHz	[III.3-139][III.3-142][III.3-143][III.3-144][III.3-146][III.3-148][III.3-171][III.3-197][III.3-204][III.3-205][III.3-206][III.3-207][III.3-213][III.3-214][III.3-215][III.3-219][III.3-220][III.3-229]
	NA	[III.3-166][III.3-167][III.3-199][III.3-200][III.3-203]

* LC: Yellow

* Diode: Green

* Graphene: Light Blue

* MEMS: Pink

* Others or Simulation: White

ユースケースとの関係性

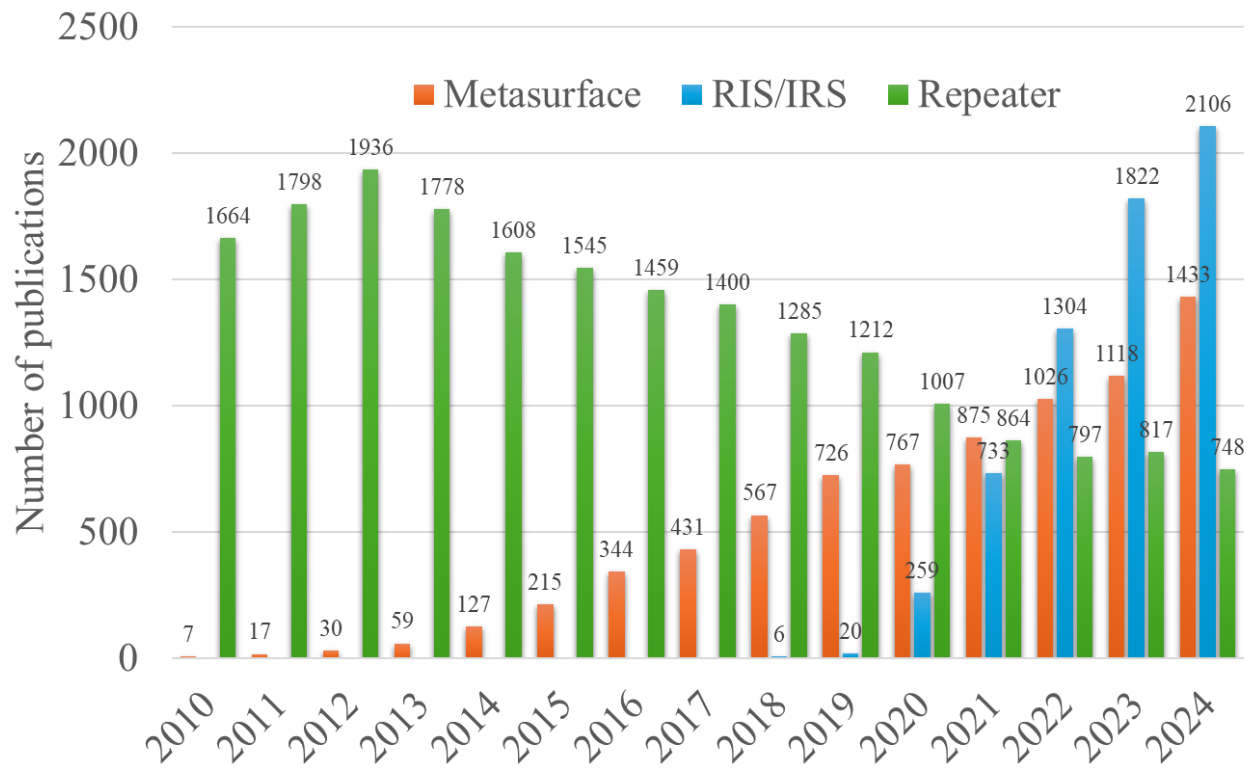
- “Repeater”と“RIS/IRS”は多様なユースケースで研究開発が進められている。
- “Metasurface”はカバレッジ拡張の研究開発が多数を占める

Category	Use case		
Repeater	Coverage enhancement	Single hop	23
		Multi hop	12
	Spectral efficiency	MIMO	6
		AMC	9
		Reliability	11
	Others	-	10
Metasurface	Coverage enhancement	-	41
	Spectral efficiency	MIMO	0
		Beam Manipulation	0
	Others	Reliability	0
		Physical layer security	0
		Sensing capabilities	0
		Energy efficiency	1
		Link management	0
		Wave domain processing	0
		Others	1

Category	Use case		
RIS/IRS	Coverage enhancement	-	21
	Spectral efficiency	MIMO	6
		Beam Manipulation	13
	Others	Reliability	4
		Physical layer security	3
		Sensing capabilities	2
		Energy efficiency	1
		Link management	3
		Wave domain processing	20
		Others	21

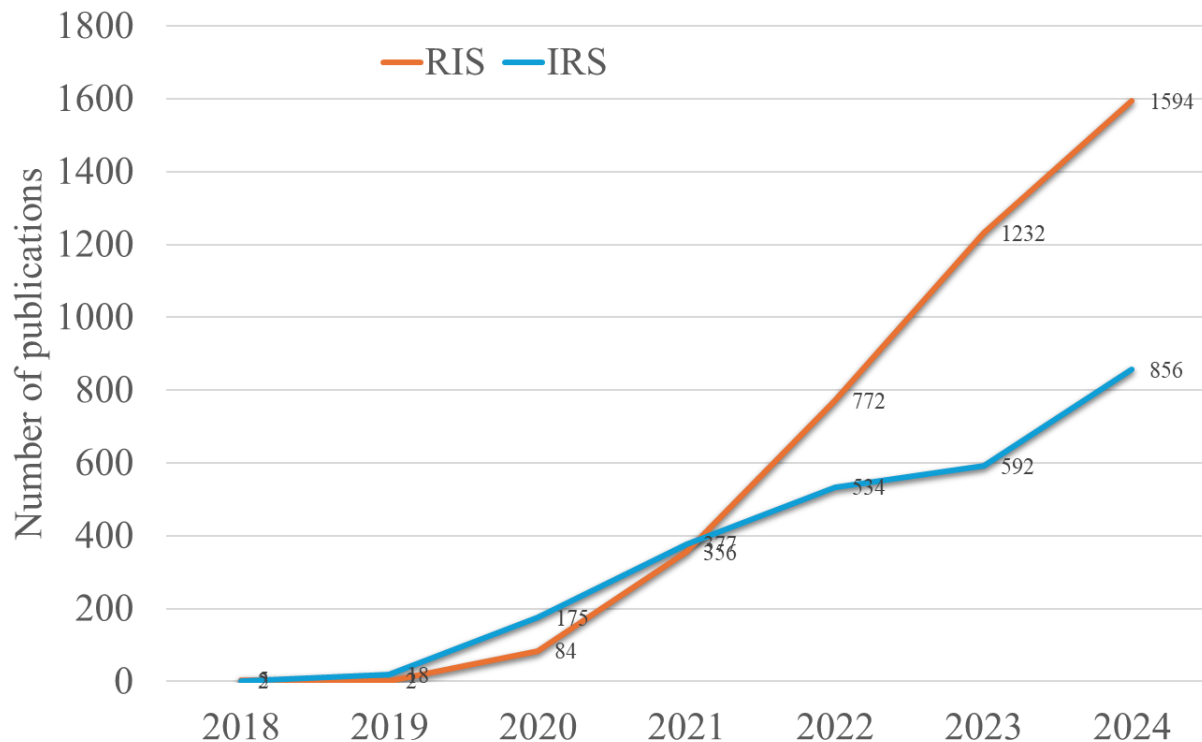
採択論文数の推移

- 2010年以降のIEEE Xplore掲載論文から各キーワードがタイトルに含まれる論文を抽出
- Repeaterは減少傾向、RIS/IRS・Metasurfaceは急激に増加



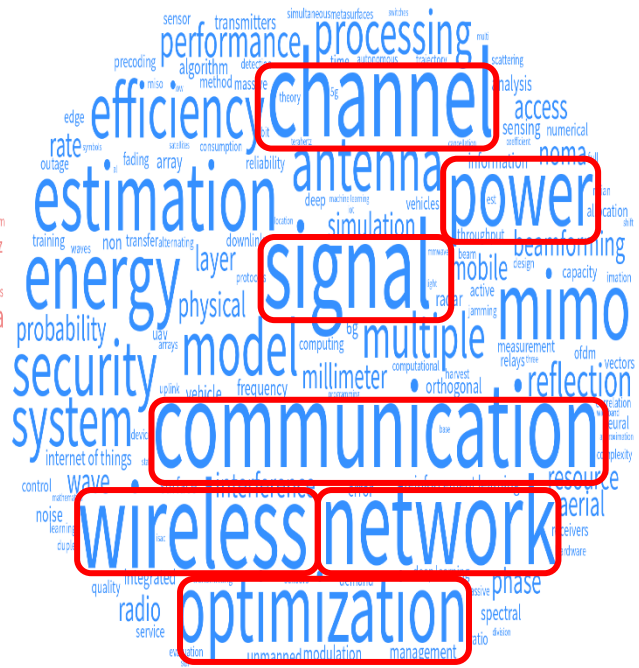
RIS ? IRS ?

- RISの論文数はIRSの論文数の約2倍となるが、両ワードともに使用されている。

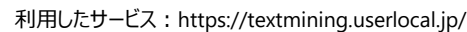


-

RIS/IRS

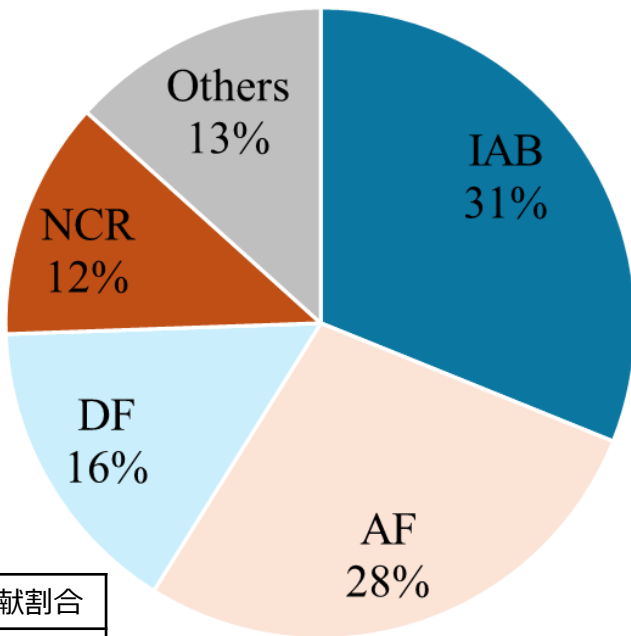


-

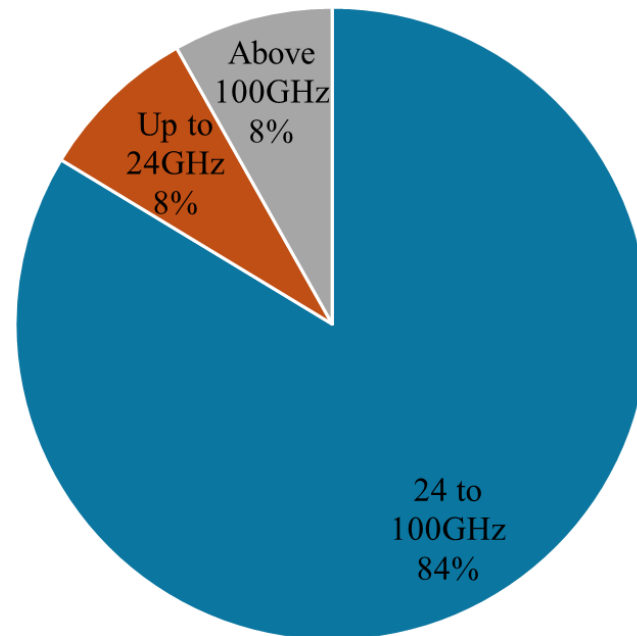


Repeaterの技術動向

- AF(NCR含む)とDF(IAB含む)の文献数の割合に大差はない
- 24GHz以上の周波数の検討が多数を占める



Technical category

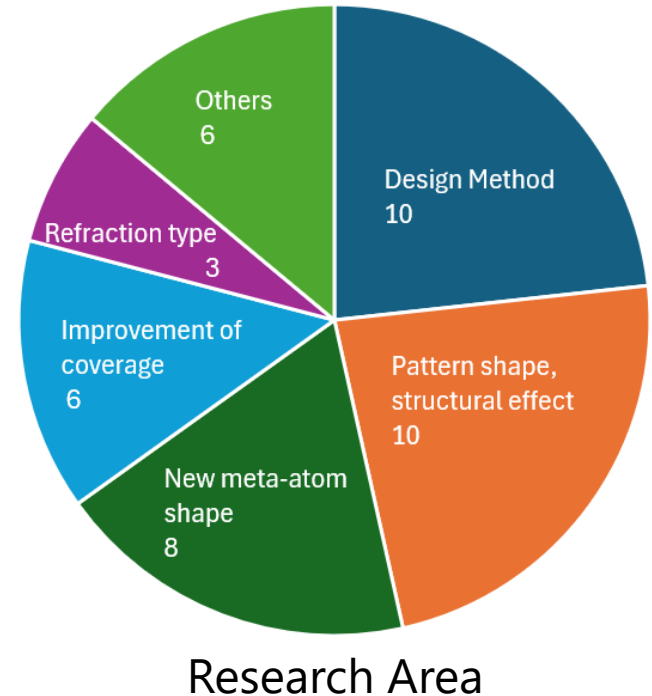
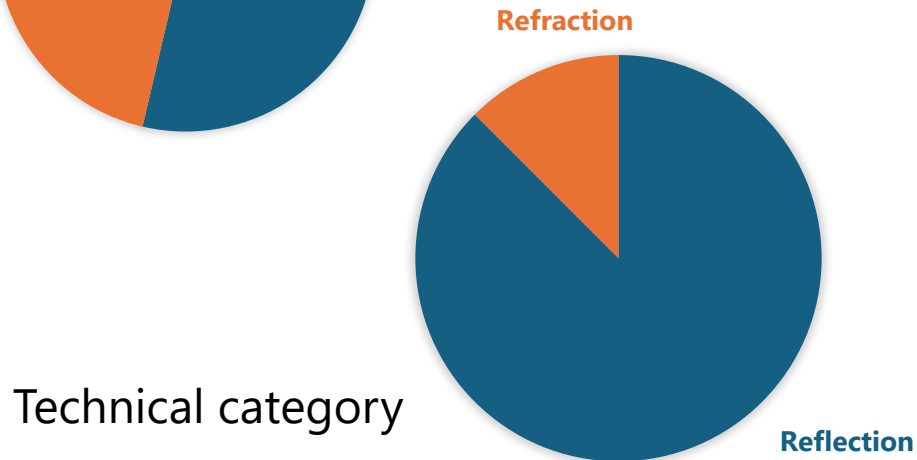
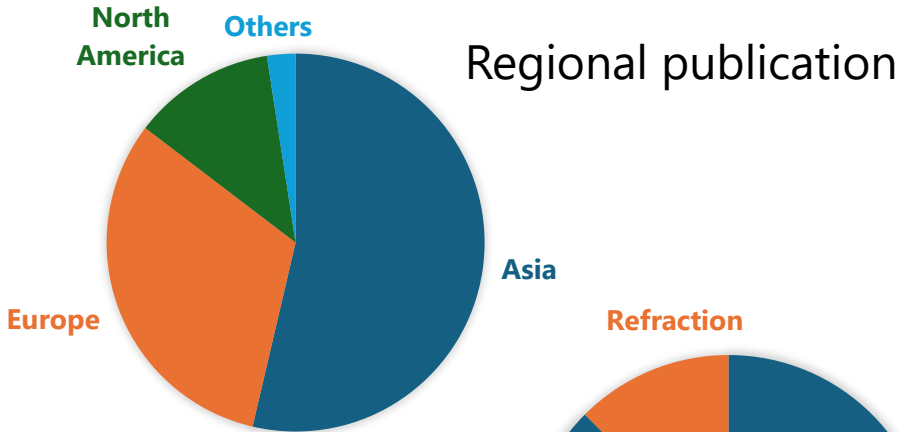


Frequency category

中継方式	文献割合
AF(NCR)	43%
DF(IAB)	44%

Metasurfaceの技術動向

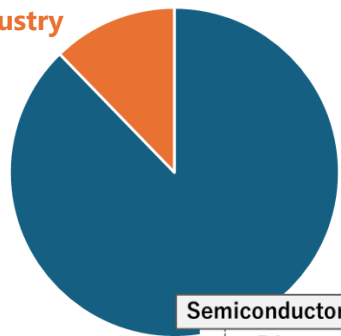
- アジアとヨーロッパの文献数が全体の8割、屈折よりも反射の検討が人気
- 構造に関する検討が大多数を占める



RIS/IRSの技術動向

- 企業よりもアカデミアからの論文が主流。様々な構造が検討されている。
- RIS/IRSの検討は“構造”から“Beam manipulation”へ

Industry



Academia

Semiconductor

Discrete

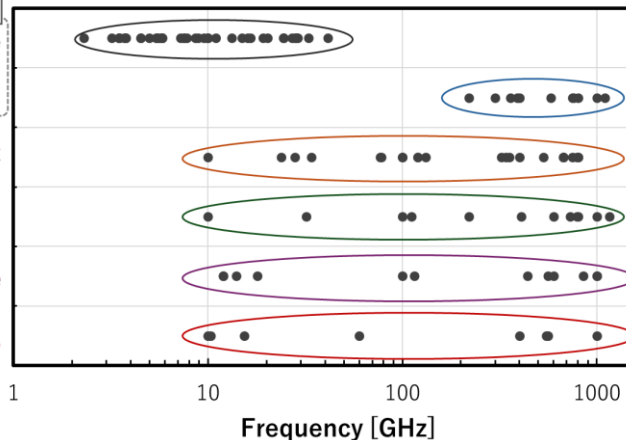
Integrated

LC

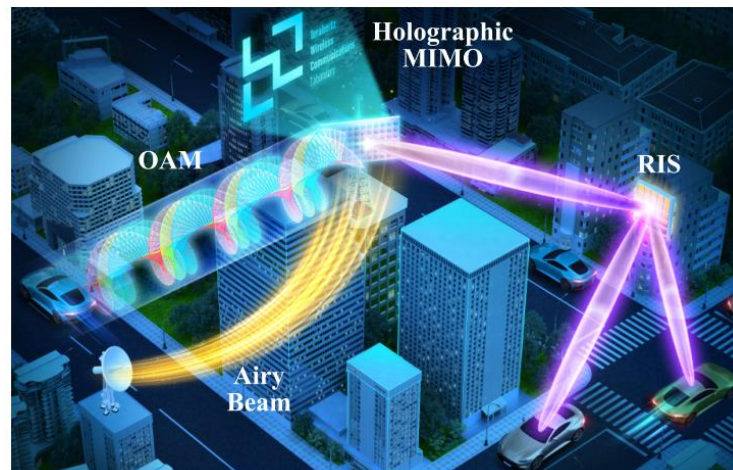
PCM

Graphene

MEMS



Beam Manipulation



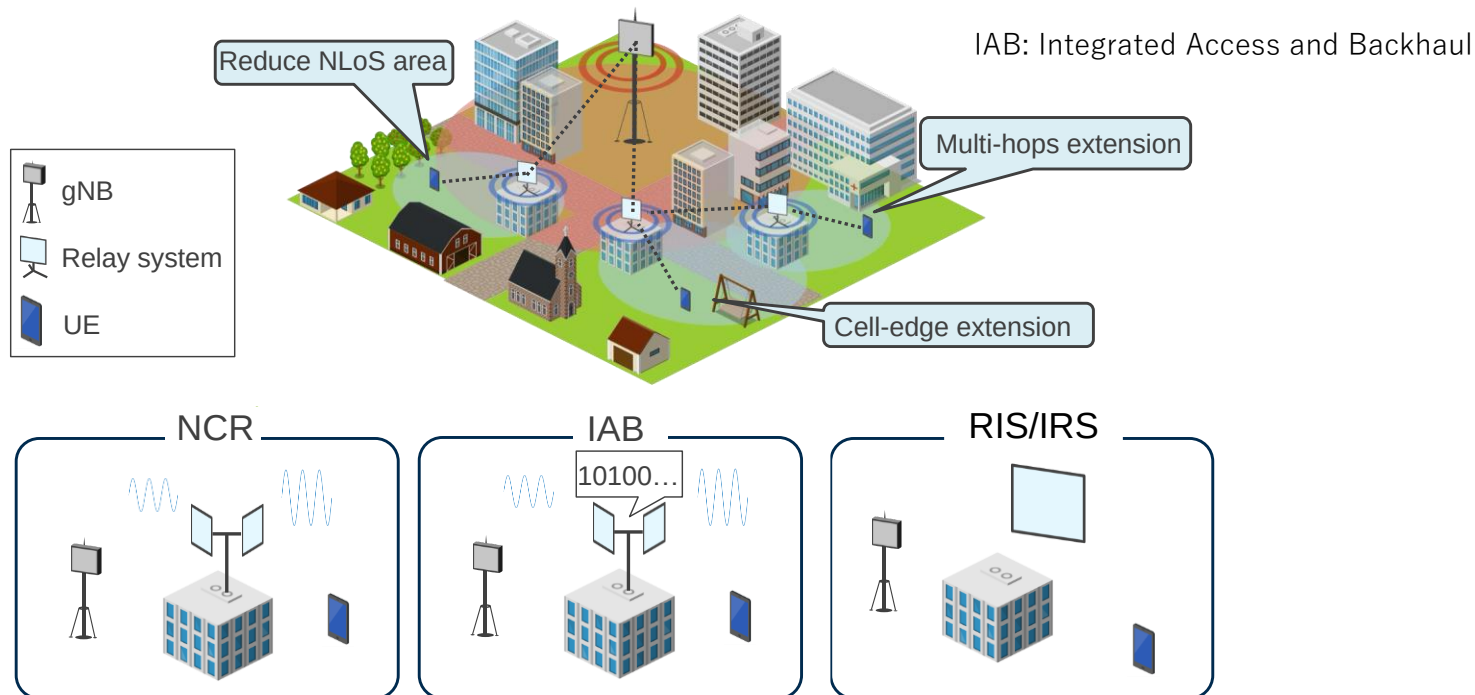
LI, Mingxiang, et al. "Beam Manipulation for Terahertz Communications: A New Quality Productive Force." *arXiv preprint arXiv:2503.22158* (2025).

Section IV

Standardization survey

標準化動向セクションの概要

無線中継・反射板技術における標準化動向ではNCR、IAB、RIS/IRSを説明
主に議論・策定されている内容を説明し、最後に必要となる機能を纏めている



NCRの標準化動向

- NCR (Network-Controlled Repeater) とは：
 - ✓ 基地局からのアナログ信号に対して非再生中継することでカバレッジを拡張する技術
 - ✓ 3GPP Release 17より議論が始まり、Release 19よりTSにて策定が開始
(下記表で38.806を中心に整理)

項目	Release 17	Release 18	Release 19
対象リピータ	RFリピータ (Type 1-C, 2-O)	RFリピータ (Type 1-C, 2-O)	NCRを本格追加 (Type 1-H, 2-O)
機能強化	基本的なリピータのRF特性を規定	一部追加拡張、詳細な動作条件の整理	NCRに対応するためのビーム制御、TDD制御、オンオフ制御、モビリティ制御などが新規導入
適用範囲	FR1/FR2のリピータ	FR1/FR2のリピータ	FR2を含むミリ波領域でのNCR動作を強化
新しい概念	特になし	特になし	NCR-MTとNCR-Fwdのノード概念が追加
構成の違い	通常リピータの送受信仕様	通常リピータの送受信仕様	SCI情報、ビームマネジメント、タイミング制御、オンオフ制御といったネットワーク連携仕様が明記
規格の厚み	基本的なRF性能中心	同上 (細かい補足あり)	無線リンクモニタリングや再確立、Timing Advance調整など端末連携仕様が詳細化

NCRの標準化動向の詳細

3GPP Release 18までに標準化で策定された機能概要を示す。

- **Gain Control (Side Control Information):**

NCR動作を制御し、雑音抑制と指向性向上を図る情報。

- **Beam Control:**

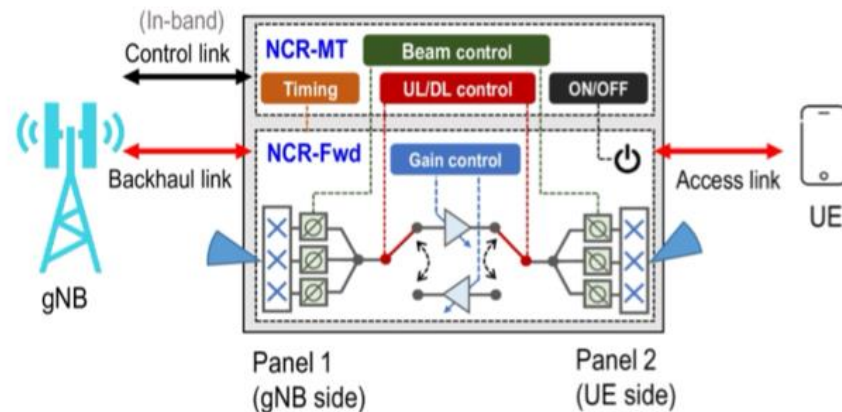
移動やチャネル変動に応じた送受信ビームの動的制御。

- **Timing and UL/DL Control:**

上下通信のタイミングとTDD設定を適切に制御。

- **ON-OFF Control:**

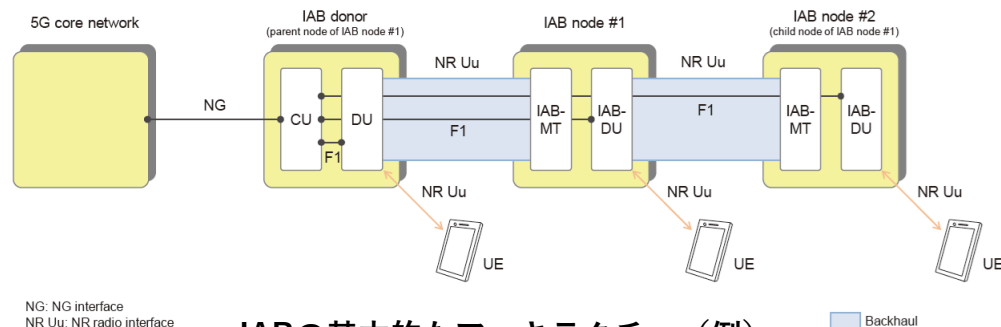
利用状況に応じたNCRのオン・オフ切り替えによる干渉抑制と省電力化。



NCRにおける基本構成

IABの標準化動向

- IAB (Integrated Access Backhaul) とは：
 - ✓ 無線アクセスとバックホールを統合して効率的なデータ通信を実現
- 主に3GPPのReleases 16, 17, 18において標準化されている
 - ✓ Rel-16：IABの基本アーキテクチャが提案された。E2Eの接続性とコアネットワーク（CN）の管理の重要性が強調された
 - ✓ Rel-17：マルチホップ通信の機能が拡張され、新しいIABノードが導入された。さらに、QoS（Quality of Service）の管理が強化
 - ✓ Rel-18：現在進行中。AIと自動化技術の統合でネットワーク管理の効率化。エネルギー効率の改善やセキュリティの強化も重要なテーマ



IABの基本的なアーキテクチャ（例）

IABの標準化動向の詳細

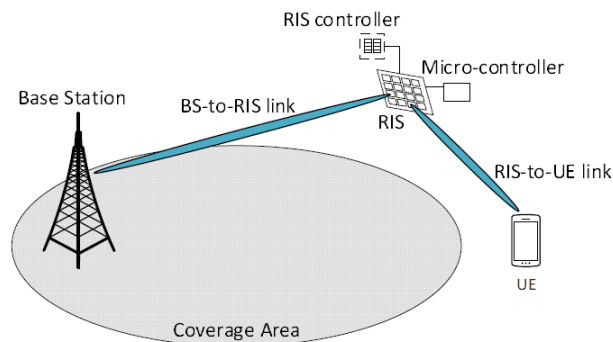
- Rel-16 :
 - ✓ リモートRANとCN間のデータ通信の最適化を目的
 - ✓ IABノードは無線アクセスとバックホールの機能を統合
 - ✓ さまざまなタイプの無線インターフェースをサポート
 - ✓ 新しいインフラを構築できない地域や迅速な展開が求められる地域での展開を想定。一時的な需要の増加に対する柔軟な対応も可能
- Rel-17 :
 - ✓ 異なるタイプのIABノード間でより柔軟な接続が可能
 - ✓ 複数のノードを介してデータを送信できるマルチホップ通信
 - ✓ アーキテクチャの強化、先進的な管理機能、およびセキュリティ要件
 - ✓ さまざまなユースケースに適したネットワーク展開が可能

RIS/IRSの標準化動向

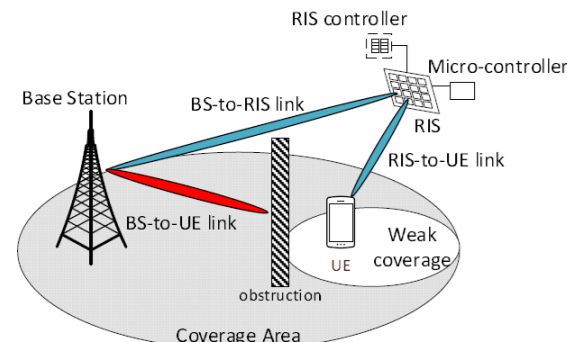
- RIS (reconfigurable intelligent surface)
/ IRS (intelligent reflecting surface) とは：
 - ✓ 反射特性を可変できる反射板。RIS/IRSを構成する素子にて反射される際の位相を制御することにより、所望の方向に反射用のアナログビームを向けることが可能
- 各標準化団体における標準化動向
 - ✓ 3GPP：2021年6月に開催されたRel.-18 workshopでRISをSIに含める提案がなされたものの、合意には至らず
 - ✓ ETSI：RISに関するIndustry Specification Group (ISG) を2021年9月に設立。RISに関するpre-standardization researchを実施し、複数のGroup Report (GR) を出版
 - ✓ ITU-R：Report ITU-R M.2516-0 (11/2022)およびRecommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023)において、IMTシステムやビームフォーミングの性能改善に資する技術としてRISに言及

RIS/IRSの標準化動向の詳細

- ETSI ISG RISは以下の3件のGroup Report (GR) を出版
 - ✓ ETSI GR RIS 001 V1.1.1 (2023-04) Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Use Cases, Deployment Scenarios and Requirements
 - ✓ ETSI GR RIS 002 V1.1.1 (2023-08) Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Technological challenges, architecture and impact on standardization
 - ✓ ETSI GR RIS 003 V1.1.1 (2023-06) Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Communication Models, Channel Models, Channel Estimation and Evaluation Methodology



(a) coverage hole in an outdoor scenario



(b) weak coverage that can happen in both outdoor and indoor scenarios

ETSI GS RIS 002 で示されているRISによるカバレッジ拡大シナリオの例

RIS/IRSに関する将来的な標準化トピック

- RIS/IRSに関する標準規格策定に向けては、以下の点について詳細な議論が必要になると考えられる
 - ✓ RIS/IRSの利用方法：端末（UE）の移動に際してRIS/IRSのビームトラッキングを行うことを想定するか否か？
 - ✓ RIS/IRSの構成：RIS/IRSを構成する素子数や素子間隔、素子の配置を規定すべきか否か？
 - ✓ RIS/IRSが構成するビームの指示方法：RIS/IRSのビーム制御に際して、各素子の位相制御重みを直接的に指示するか、あるいはコードブックを構成してビーム番号のみを指示するか？

NCR・IAB・RIS/IRSの標準化動向のサマリー

NCR・IAB・RIS/IRSの標準化状況

	NCR	IAB	RIS/IRS
Use Case / Deployment Scenario	Supported [1]	Supported [5]	Discussed [7, 8]
Channel Model	Discussed [2]	Discussed [2]	Discussed [9]
Control/Signaling	Supported and Discussed [1, 3, 4]	Supported [6]	Discussed [7]
Interference Management	Not Yet	Not yet	Not yet

Supported : TSにて規定されている項目

Discussed : TSでは規定されていないが、他の文書に記載がある項目

Section V

Recent Activities in Japan

V1.1 Field evaluation of mmWave relays in various topologies

課題

- ミリ波は5Gにおける大容量通信の成功の鍵となった一方で、伝搬損失が大きく直進性が強い特性から基地局あたりのカバレッジが小さくなるのが課題とされてきた。
- 日本ではミリ波も含めた面的な5Gの展開が義務となっているが、基地局を増やすだけでは採算が取りにくく、安価にカバレッジを広げる手段が求められている。

アプローチ

- 東京科学大学大岡山キャンパスに構築されているプライベート5Gフィールドにドナー・サービス局分離型のアナログ中継局（リピータ）を複数設置し、ミリ波5Gの通信エリアを面的に拡張。
- 基地局から2組のリピータを経由した無線マルチホップ構成においても下り1Gbps以上のスループットが達成可能なことを確認
→ミリ波5Gにおけるリピータ導入で期待される効果の高さと効率性を実証。

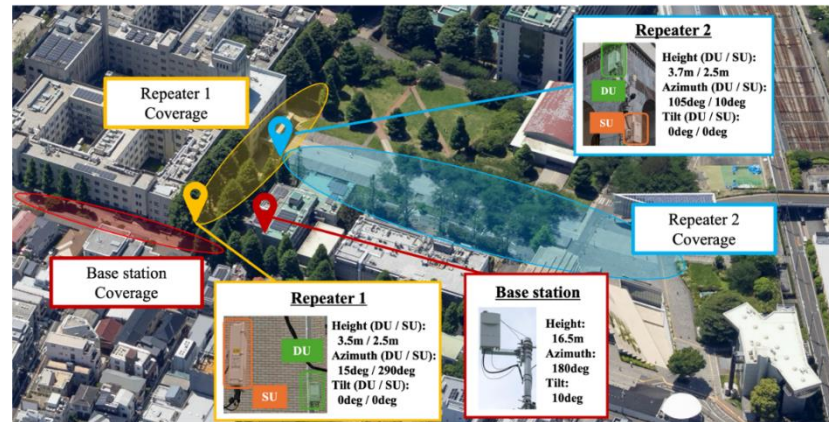


図1 大岡山プライベート5Gフィールド。

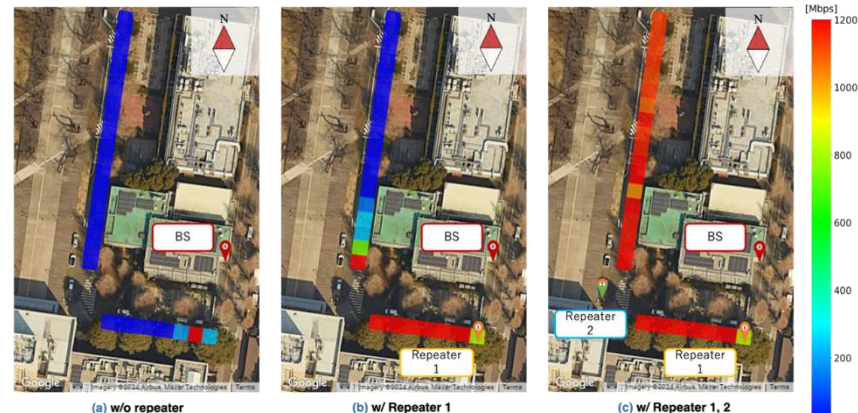


図2 実験結果(PDSCHスループット)。

V.1.2. mmWave massive analog relay MIMO

課題

- ミリ波帯など高周波数帯では伝搬損失が大きく反射や回折も少ないためカバレッジが限定的になる。また、マルチパス環境の形成が困難であり、伝搬路相関が高いため多重化による大容量通信が困難。
- 従来のAF中継では複数の中継器を用いた適応的ビームフォーミングが考慮されていない。多数用いる場合、中継経路選定に膨大な計算コストがかかる。

アプローチ

- 多数のAF中継器からUEの位置に基づき最短経路順に中継器を選択。動的制御により見通し外領域含め通信路を構築。マルチホップ化と複数経路を構築することで多様な環境で多重化(MIMO)による大容量通信の実現を目指す。

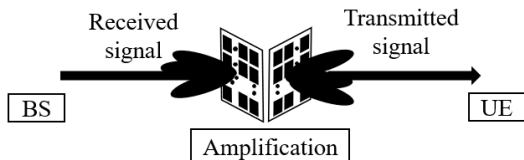


図1 RS (Relay station): AF中継器

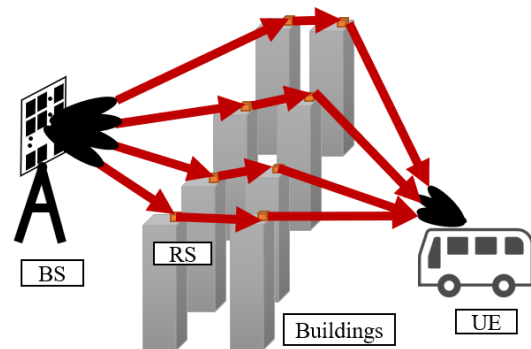


図2 システムモデル: mmWave massive analog relay MIMO

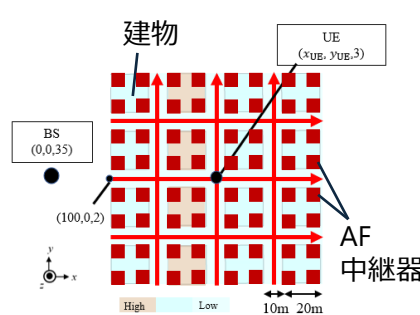


図3 シミュレーション環境

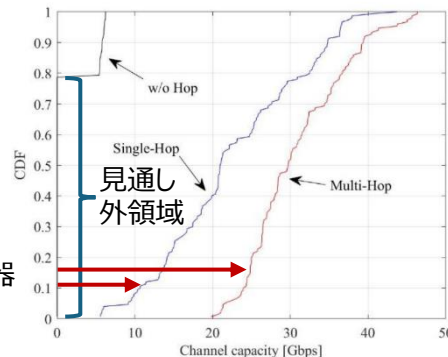


図4 シミュレーション結果

シミュレーションにより見通し外領域含めて大容量通信ができることを確認

V.1.2. mmWave massive analog relay MIMO

課題

- ミリ波帯など高周波数帯では伝搬損失が大きく反射や回折も少ないためカバレッジが限定的になる。また、マルチパス環境の形成が困難であり、伝搬路相関が高いため多重化による大容量通信が困難。
- 従来のAF中継では複数の中継器を用いた適応的ビームフォーミングが考慮されていない。多数用いる場合、中継経路選定に膨大な計算コストがかかる。

アプローチ

- 多数のAF中継器からUEの位置に基づき最短経路順に中継器を選択。動的制御により見通し外領域含め通信路を構築。マルチホップ化と複数経路を構築することで多様な環境で多重化(MIMO)による大容量通信の実現を目指す。

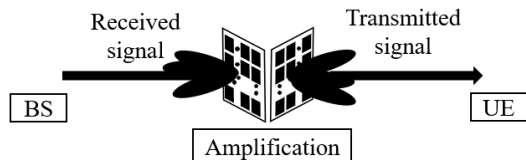


図1 RS (Relay station): AF中継器

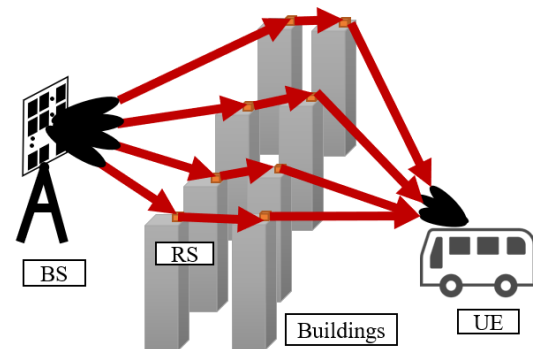


図2 システムモデル: mmWave massive analog relay MIMO

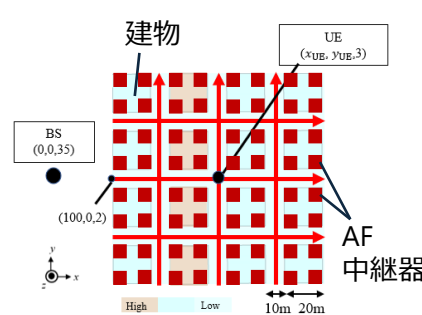


図3 シミュレーション環境

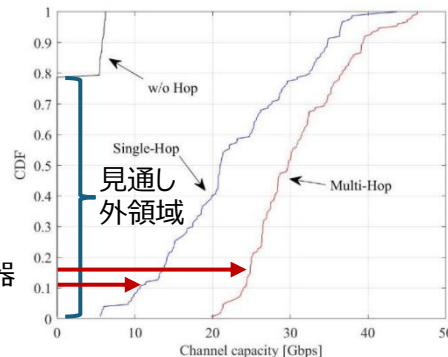


図4 シミュレーション結果

シミュレーションにより見通し外領域含めて大容量通信ができることを確認

V.1.4. Phased array antenna system for 6G analog repeater system

・課題

mmWAVEのエリア改善を目的としたレピータシステムが検討されている

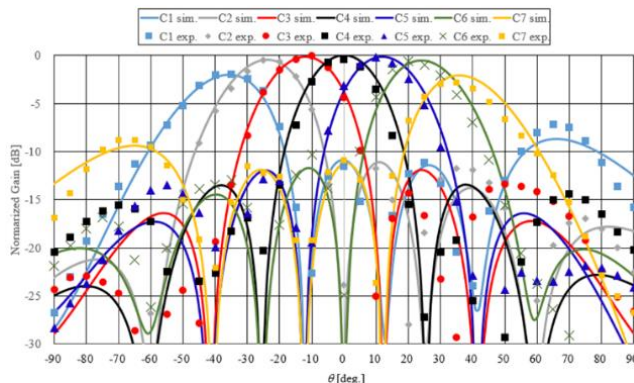
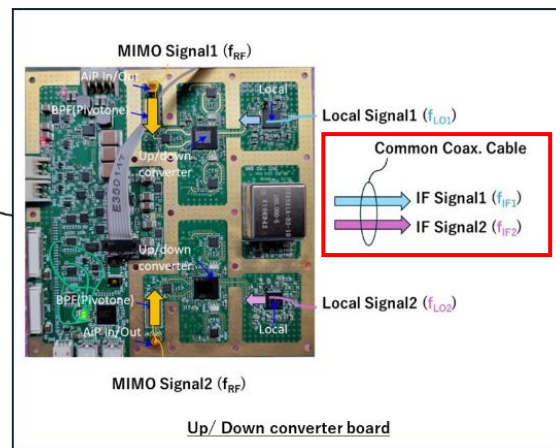
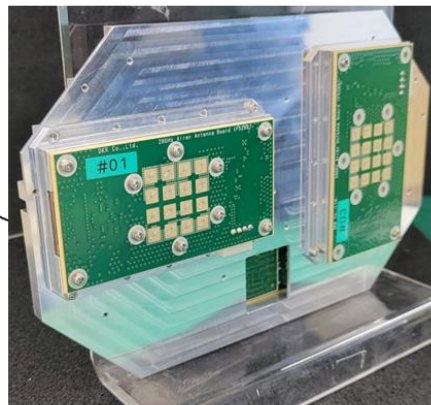
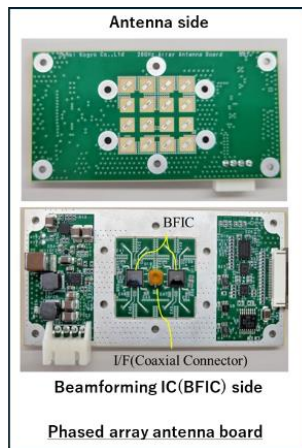
➡レピータは、端末の近くに配置・多数配置、が必要となるケースが考えられる。そのため、設置性の観点から、小形であることが望まれる。

・本報告概要

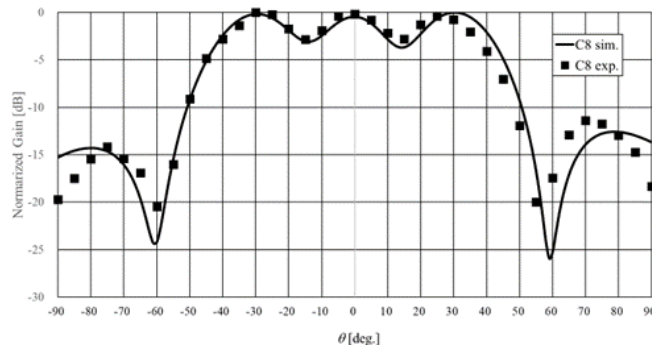
6G向け小形アナログレピータシステム用として、低出力フェーズドアレーアンテナとアップ/ダウンコンバータから構成されるシステムを提案する。

小形筐体内部で、2枚のフェーズドアレーモジュールの回転によりVH偏波/±45°偏波対応を切り替えられる（コスト低減に寄与）。ドナー用として高利得ビームフォーミングパターン、サービス用として広角ビームパターンを検討している。

MIMO用の2系統の信号はアップ/ダウンコンバータによって、異なる中間周波数 f_{IF1} 、 f_{IF2} に変換される。これにより、ドナー/サービス間は1本の同軸ケーブル接続で、MIMO対応が可能となる。



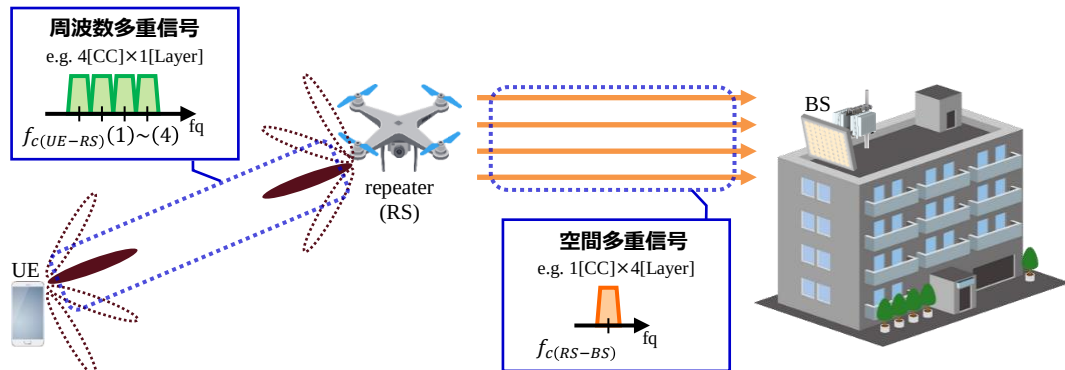
高利得ビームパターン



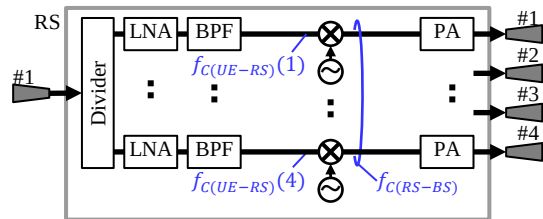
広角ビームパターン

V.1.5 Research on low latency relay technology to extend millimeter wave area

- 5G-NRの大容量・低遅延特性を維持しつつ、効率的にミリ波のカバレッジを拡張し、設置や移動の柔軟性を確保する中継器を開発
- 屋内外での評価を行い有効性を確認



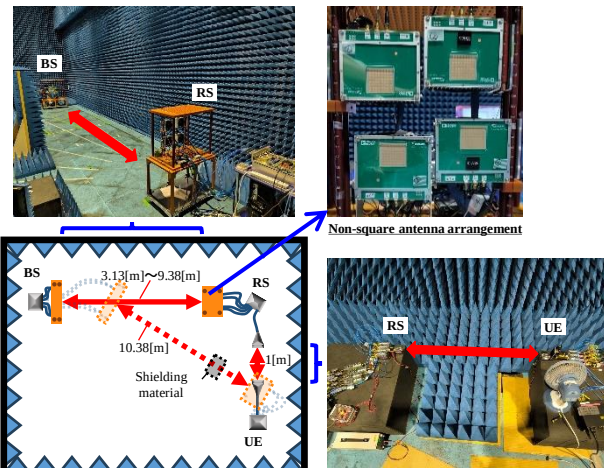
提案アナログ中継方式



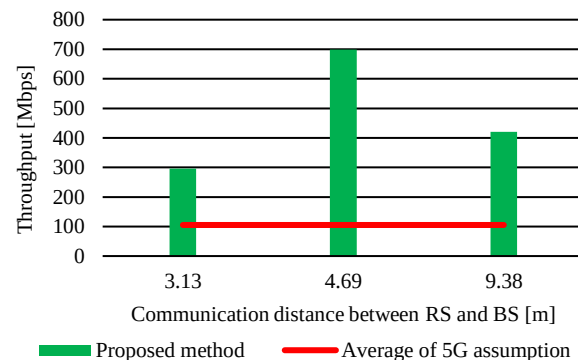
中継局回路構成 (UL)



試作中継局回路



電波無響室内での評価環境



評価結果

V.1.6 Wireless transport technology for Xhaul

課題

周波数資源が限りある背景のもと、ミリ波アンライセンスバンド技術を実無線アクセスやXhaulに活用する

アプローチ

60GHz無線LANを実無線アクセスならびに再生中継型リピータ機能を備える5G-GWにより60GHzミリ波による無線アクセスシステムをITS向けに構築。5G-GWには併せて79GHzミリ波レーダによるセンシング機能と機械学習による予測機能を搭載し、端末である車両の無線品質を予測することで遮蔽などが生じる場合はマクロセルへの切り替えを実施して通信がシームレスに継続できる仕組みを構築。実証実験にてその妥当性を検証済。

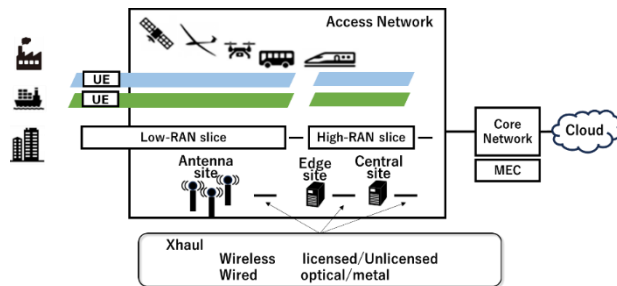


図1 RANアーキテクチャとXhaul技術について

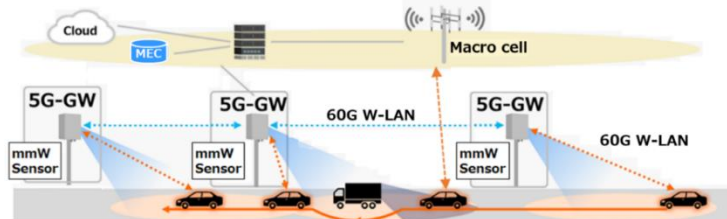


図2 モビリティ対応ミリ波伝送システム



図3 実証実験システム

無線品質予測機能のある場合は、ミリ波無線アクセスとマクロセル間でのシームレス切替を実現

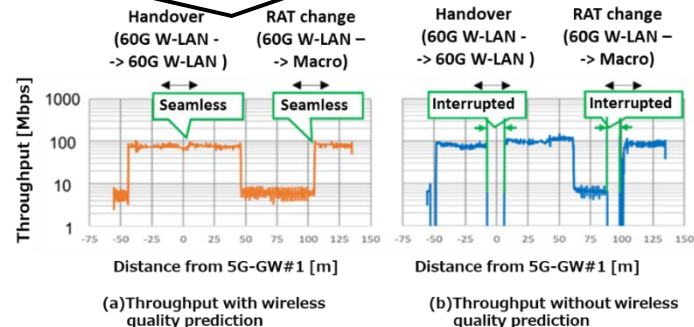
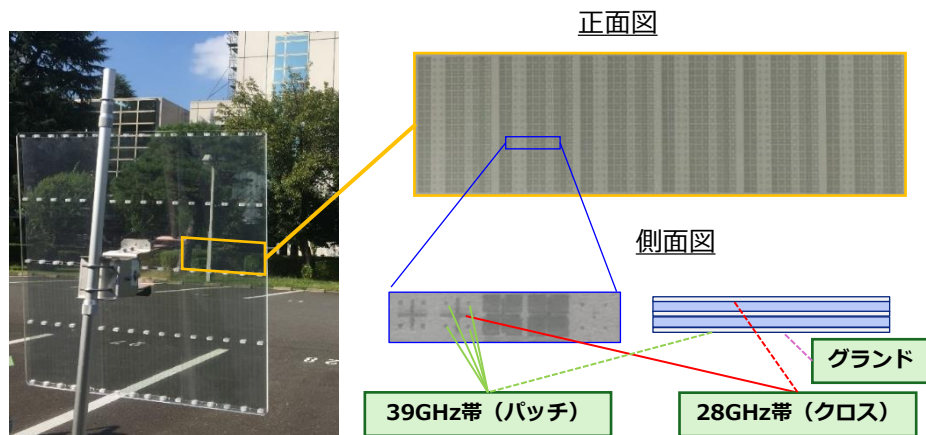


図4 無線品質予測機能の有無での検証結果

V.2.2 Optically Transparent Dual-band Metasurface Reflector

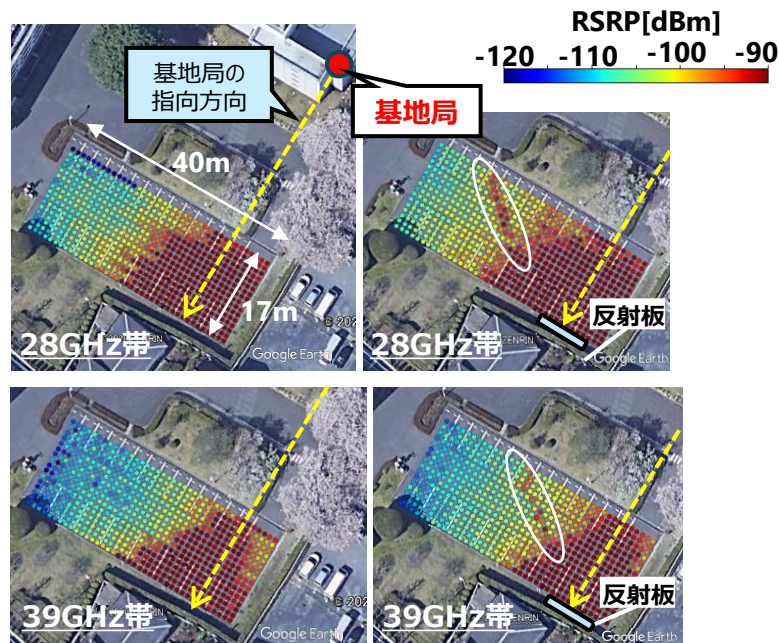
- 反射板の設置場所の確保を容易とするデュアルバンド透明メタサーフェス反射板を実現
- 商用相当の基地局を利用した実証実験により、両バンドで約10dBの電力改善効果を確認

反射板の構造



- 反射素子とグランドに透明導電性フィルムを利用し、設置が目立たない透明な構造を実現
- 多層化技術を活用して素子配置を最適化し、1枚で5Gの28GHz帯と今後の割当候補の39GHz帯の両バンドに対応

反射板の設置効果



V.2.3 Metasurface technologies for controlling radio waves in specific directions

【背景】

- 高周波帯における屋内外のカバレッジの課題を解決する技術の1つとして、メタサーフェスが期待されている。

【課題】

- 従来の透過型メタサーフェス素子の設計手法(ABCD行列法)では、透過特性は最適化するまで分からず、設計の見通しが立てづらい。
- メタサーフェス素子の設計検討に比べて、実験によるメタサーフェスの有効性の報告例が少ない。また、同じ環境で反射型と透過型を実験した報告も少ない。

【アプローチ】

- 最終特性を事前に見積もるため、透過型メタサーフェス素子の設計手法としてバンドパスフィルタの設計理論を適用する。共振器間の結合制御により、良好な反射特性を実現する。
- 反射型メタサーフェスは透過型メタサーフェスを基に設計し、同じ屋外環境における受信電力改善効果を透過型および反射型メタサーフェスでそれぞれ確認する。

【結論】

- 良好なバンドパス特性を有する透過型メタサーフェス素子を設計した。(図1)
- 設計した透過型および反射型メタサーフェスについて、受信電力改善に対する有効性をそれぞれ示した。(図2)

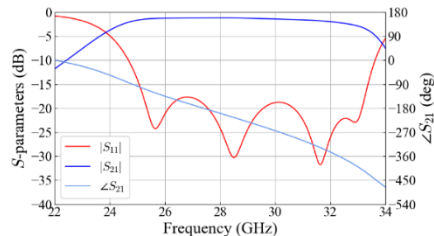
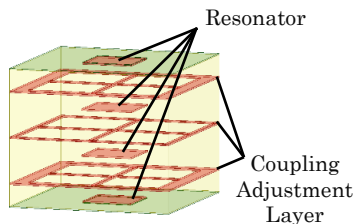
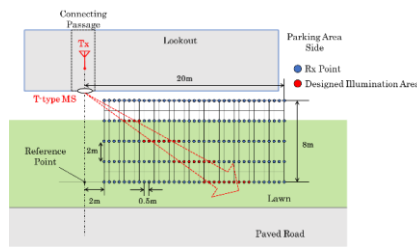
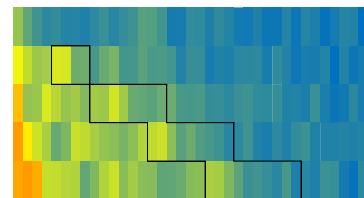


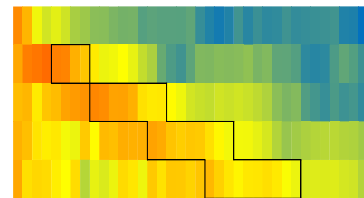
図1. 提案した透過型メタサーフェス素子と設計結果



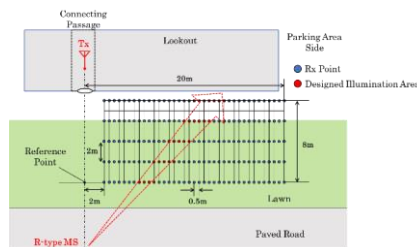
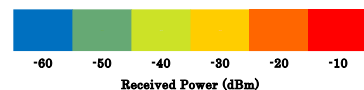
(a) 透過型メタサーフェスの実験環境



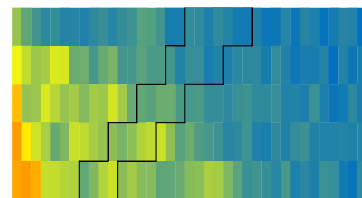
(b) 透過型メタサーフェスなし



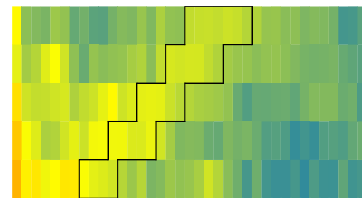
(c) 透過型メタサーフェスあり



(d) 反射型メタサーフェスの実験環境



(e) 反射型メタサーフェスなし



(f) 反射型メタサーフェスあり

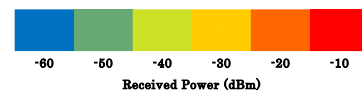


図2. 実験環境と屋外測定の結果

v.2.4. Social implementation technology for passive reflector that support the Sub6 band and above, and the results of verification

・課題

設置・維持コストが小さいパッシブかつStaticタイプのメタサーフェス反射板(Reflectarray :RA) を社会実装するにあたっては、反射性能だけではなく種々の考慮すべき点があることが判ってきた。

・アプローチ

RAの反射面を仮想分割し、領域毎に入射／反射方向の組み合わせを設定する。これにより、球面波補正や反射ビームプロファイルの調整に対応し、設置状況に合わせた効率よいエリアカバーを可能とする。併せて、必要な反射電力の確保や、普及が先行しているSub6帯に対応するための設計／製造技術の開発も進める。

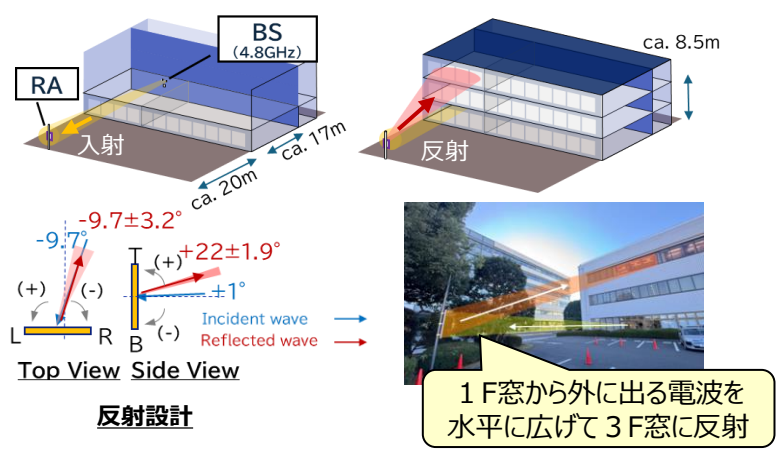


図2：Sub6帯用RAの検証レイアウト

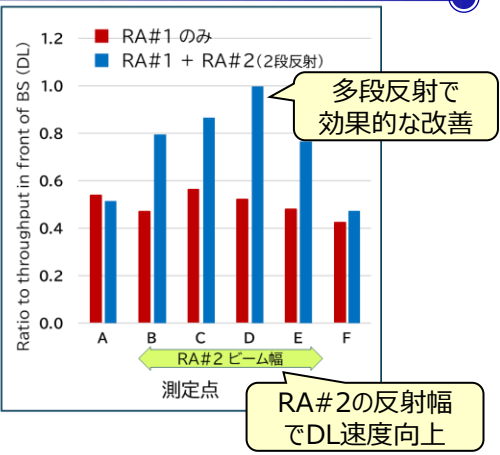
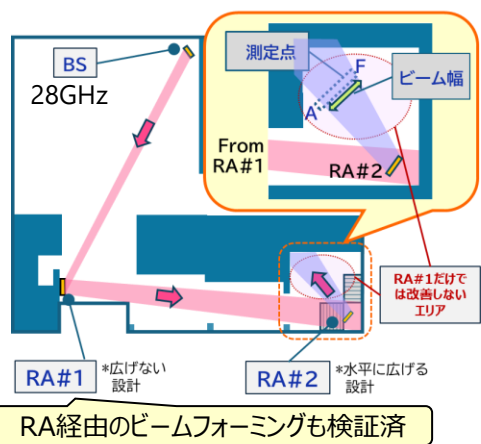


図1：反射波の拡がり方が異なるRA2枚を組み合わせた通信速度改善

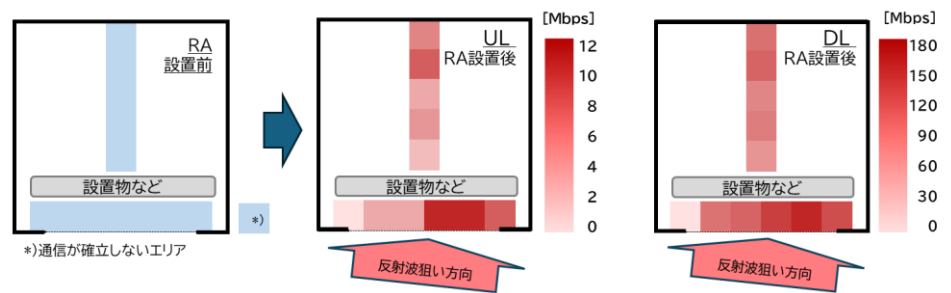


図3：Sub6帯用RA設置によるスループット改善効果

V.2.6. Reconfigurable metasurface reflector with multi sheets/sliding sheets

・課題

5GmmWAVEのエリア改善を目的としたメタサーフェスが検討されている⇒電源不要の一方、一般的なメタサーフェスは反射波の方向を変更できない

・本報告概要

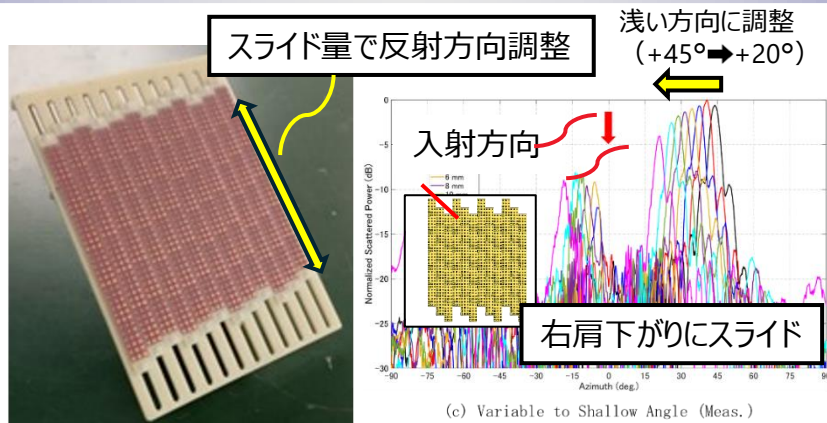
電源を必要とせずに、反射波制御可能な2種類のメタサーフェス反射器を提案する。

①スライド式メタサーフェス反射板

②マルチシート式メタサーフェス反射板

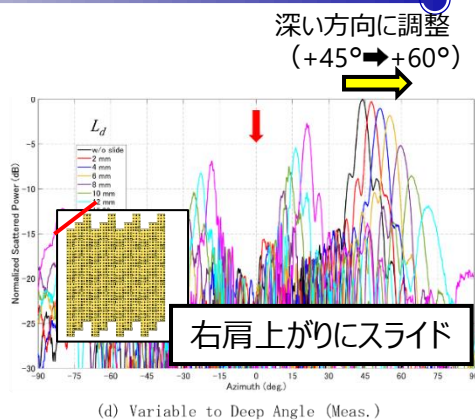
①のメタサーフェスでは、短冊状のメタサーフェスのスライド量を変化させることで、反射方向を 40° 以上の範囲で調整可能

②のメタサーフェスでは、反射方向を少しずつ変えたシートを組み合わせることで、反射波のビーム幅を広げることができた。

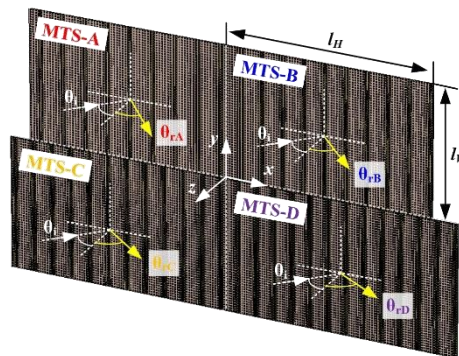


(a) Prototype of Metasurface Reflector

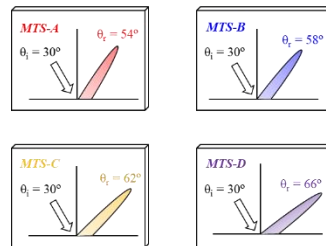
①スライド式メタサーフェス反射板



(d) Variable to Deep Angle (Meas.)

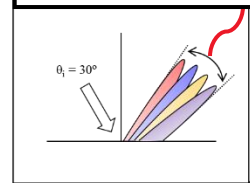


Sub-MTSs (Narrow Beam)



Multi-Sheet MTS

4方向の反射波により
広角ビーム形成



Design Frequency at 28.25 GHz

②マルチシート式メタサーフェス反射板

V.2.7 An Efficient Beam Searching in Hybrid Intelligent Reflecting/Refracting Surfaces (IRS)-Aided mmWave 6G Network

- 背景：Hybrid Intelligent Reflecting/Refracting Surfaces(HIRS)は任意の方向に電波を反射または屈折させることが出来るデバイスであり、高周波帯域における屋内外のカバレッジの課題を解決す技術として期待されている(図1)。
- 課題：HIRSは反射領域と屈折領域の両方でユーザを探索する必要があり、許容ビーム探索時間内にユーザを探索できない可能性がある。
- アプローチ：最小限のオーバーヘッドとビーム探索時間制約を満たしつつ、全UEの合計SNRが最大化する屋内および屋外ビーム幅を探索する、HIRSに最適化された階層型ビーム探索(HBS)方式を提案した。(図2, 図3, 図4)

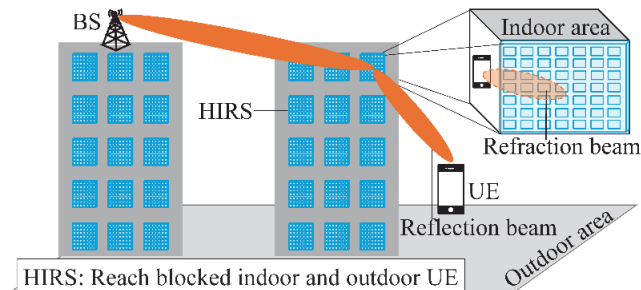


図1. HIRS支援6Gミリ波ネットワークのシナリオ

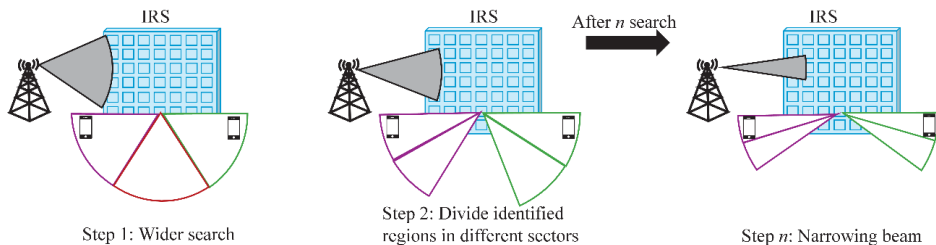


図2. IRSを用いた階層型ビーム探索

$$\text{Maximize: } E[SNR_{total}]$$

$$= \frac{E[SNR_{in}(W_{in}) \times N_{in} + E[SNR_{out}(W_{out}) \times N_{out}]}{N_{total}}$$

Subject to:

Constraint 1: $BST = BST_{in}(W_{in}) + BST_{out}(W_{out})$

Constraint 2: $-\alpha \leq \phi_{in}^i, \phi_{out}^j \leq \alpha$

Constraint 3: $SIN_{edge}^i(W_{in}, r_{in}), SOUT_{edge}^j(W_{out}, r_{out}) \geq S_{th}$
where $i \in (1, NB_{in}), j \in (1, NB_{out})$

変数	内容	変数	内容
W_{in}/W_{out}	屋内/屋外ビーム幅	r_{in}/r_{out}	屋内/屋外最大通信距離
SNR_{total}	全UEの合計SNR	α	ハードウェアビーム角度制限
SNR_{in}/SNR_{out}	屋内/屋外SNR	S_{th}	SNR閾値
N_{in}/N_{out}	屋内/屋外UE数	NB_{in}/NB_{out}	屋内/屋外ビーム数
BST	ビームサーチ時間	SIN_{edge}^i	i 番目ビームによる屋内エッジSNR
BST_{in}/BST_{out}	屋内/屋外ビームサーチ時間	$SOUT_{edge}^j$	j 番目ビームによる屋外エッジSNR

図3. 目的関数と制約条件

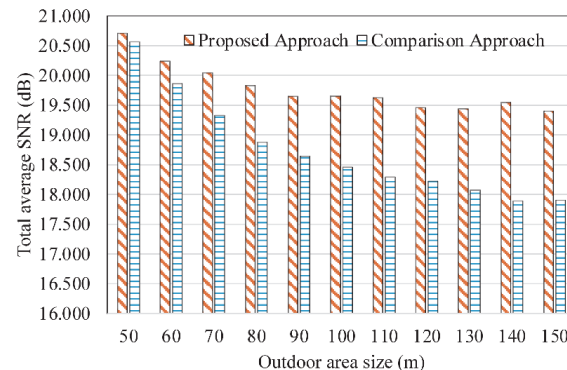


図4. 屋内領域のサイズは50m、屋内と屋外の両方ユーザー数を15、屋外領域のサイズを50-150mに変化した際のSNRのシミュレーション結果。屋内と屋外に等しくビーム幅を割り当てる手法と提案手法を比較。提案手法は一貫して高いSNRが得られている。

V.2.10 Beam squint-aware frequency resource allocation for IRS-aided communication

- 背景：高周波帯通信では、遮蔽物による減衰や回折のしにくさが課題となるが、Intelligent Reflecting Surface (IRS) はこれを解決する有力な技術として注目されている。
- 課題：IRSは一般に時分割制御を前提としており、1スロットにつき1ユーザのみをサポートできる。このため、多ユーザ通信を行うには1ユーザあたりに多くのリソースブロックが割り当てられる必要があるが、この場合、周波数ごとに反射方向がずれる「ビームスクイント」現象により、周波数利用効率が低下する恐れがある。(図1)
- アプローチ：ビームスクイントを逆に活用することで周波数分割での多ユーザ通信を実現し、IRS制御と周波数リソース割当を最適化することで、周波数効率を最大化する手法を提案した。(図2, 図3)

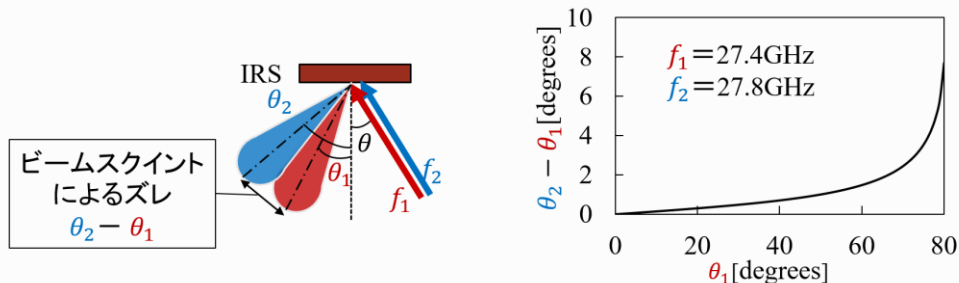


図1 ビームスクイントによる周波数ごとの反射方向ずれ

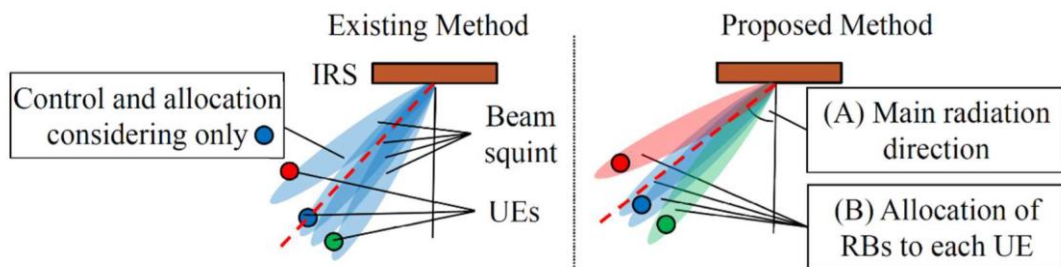


図2. ビームスクイントを活用したIRSによる多ユーザ通信支援

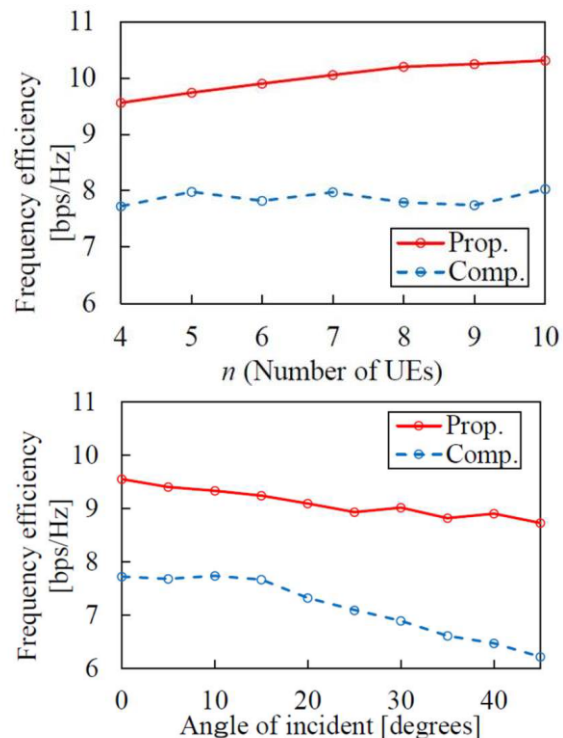


図3. 提案手法と従来手法の周波数効率の比較結果。

- 上) ユーザ数の増加に対する周波数効率の変化を示しており、ユーザ数が多いほど提案手法の優位性が顕著になる。
 下) BSからの入射角を変化させた場合の結果であり、入射角が大きくなるにつれて従来手法の性能が劣化するのに対し、提案手法は安定した性能を維持している。

V.2.11. Prototype and Evaluation of Intelligent Reflecting Surface for 60 GHz Band

課題

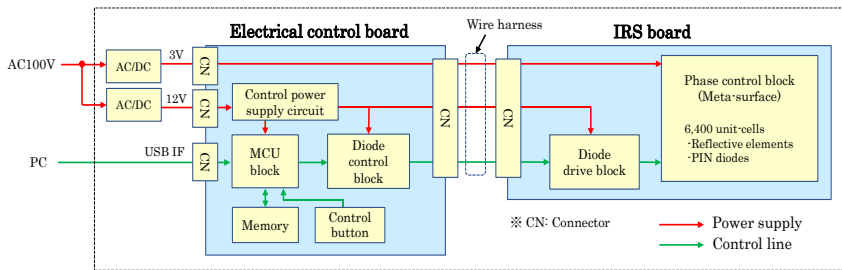
B5G/6Gでの使用が検討されているミリ波帯やサブテラヘルツ帯は、強い直進性と大きな伝搬損失により建物など遮蔽物の裏側に回り込みにくく、通信範囲が著しく狭くなる。

アプローチ

電波の反射方向を制御可能なIRS(Intelligent Reflecting Surface)により、通信可能なエリアを拡大する。

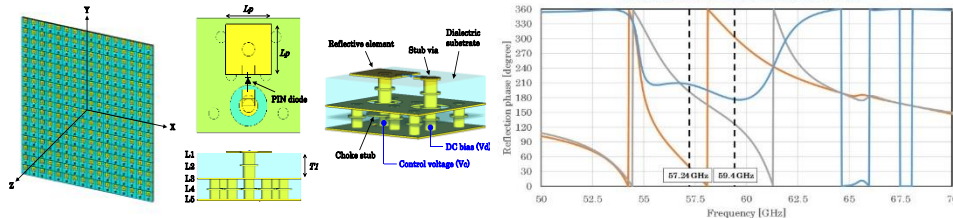
⇒60GHz帯IRSのプロトタイプを開発

装置構成

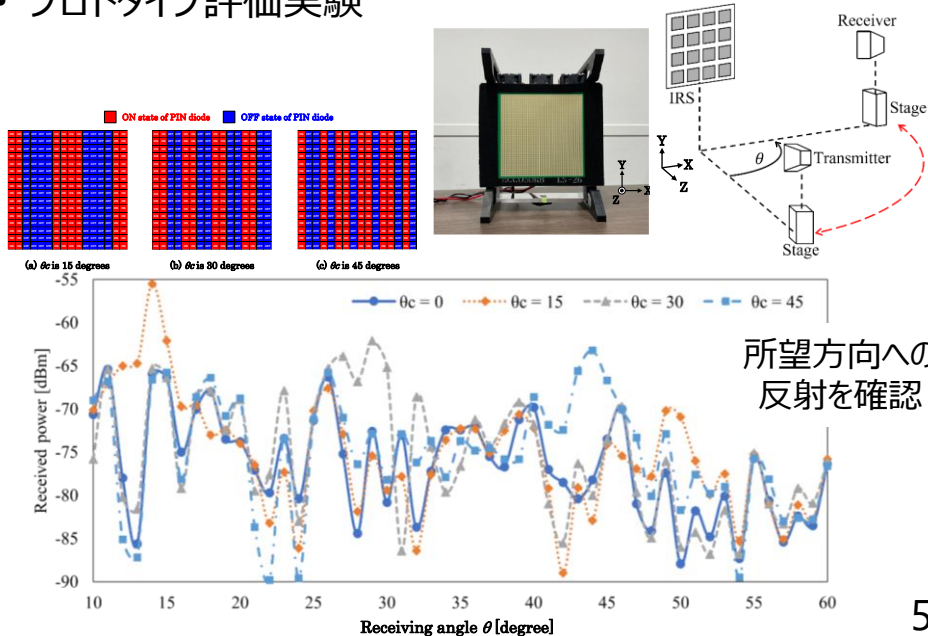


使用周波数	60GHz帯
反射素子	80×80=6400素子, 2.5mm(半波長)ピッチ
反射位相制御	PINダイオードによるON/OFF(0/180°)制御
対応偏波	垂直偏波

設計



プロトタイプ評価実験



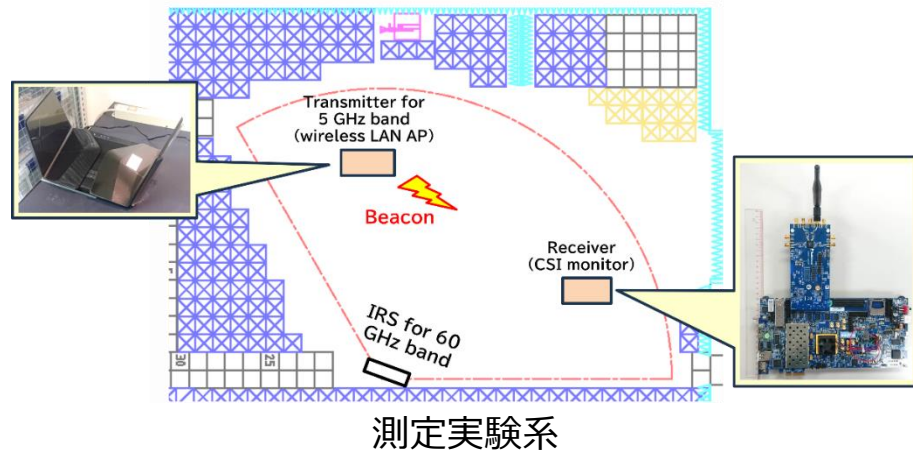
V.2.12 Experimental evaluation of impact of intelligent reflecting surface for 60 GHz band on radio channel in Sub-6 GHz band

● 背景

- ある周波数帯においてIRSを導入・制御することによって、他の周波数帯の伝搬路が変動すると、周波数帯毎に独立にリソース割り当てを行うことが困難となる

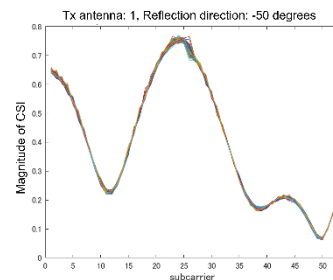
● IRSの帯域外伝搬路変動評価実験

- 電波暗室内において60 GHz帯向けIRSのプロトタイプ (V.2.11節) の反射特性を変化させて、5 GHz帯の伝搬路に与える影響を無線LAN信号を用いて観測

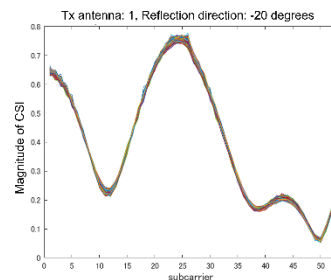


● 実験結果

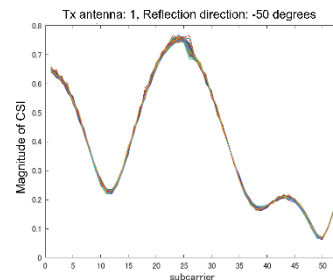
- 60 GHz帯IRSの反射特性の変化が5 GHz帯伝搬路に与える影響は非常に小さいことを確認



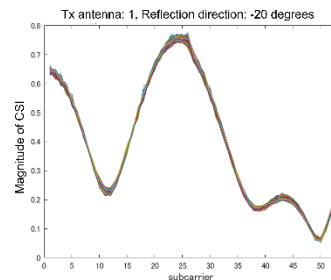
IRS反射方向：-50度



IRS反射方向：-20度



IRS反射方向：10度

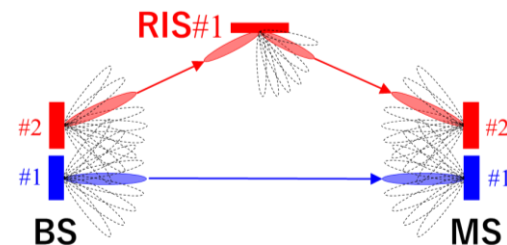


IRS反射方向：40度

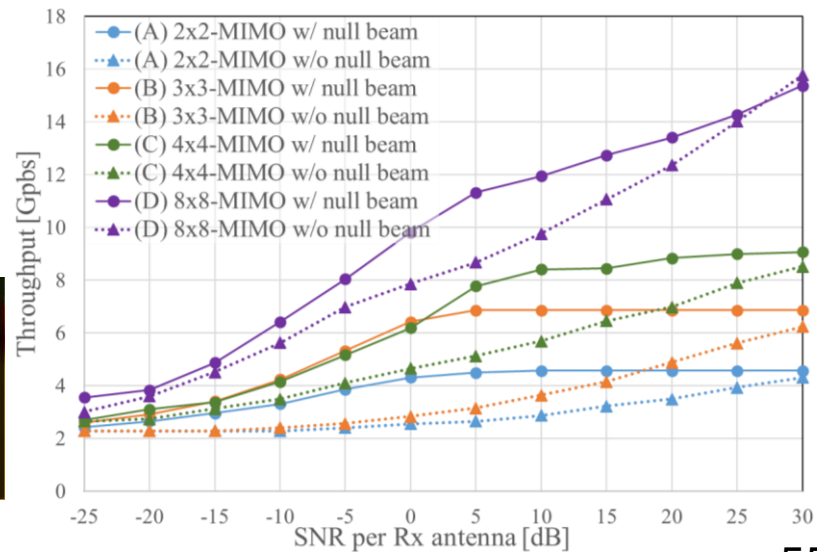
測定結果 (各サブキャリアの絶対振幅)

V.2.13 システムレベルおよびリンクレベルシミュレーションによるRISを活用した6Gシステムの性能評価

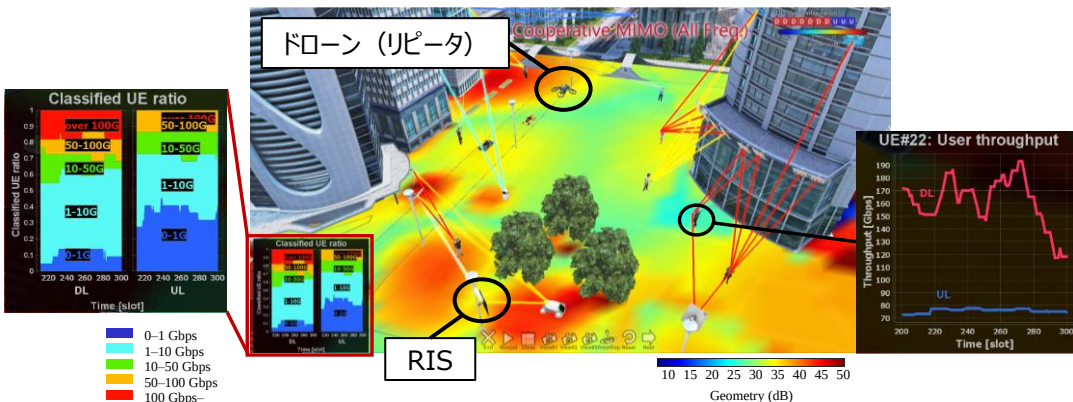
- システムレベルシミュレータ（6Gシミュレータ）の開発
 - ✓3Dマップ上で6Gシステムの性能を可視化
 - ✓FR3を含む候補周波数帯域とRIS/リピータを使用した6Gのユースケースを総合的に評価
- リンクレベルシミュレータの構築およびリンクレベル評価
 - ✓RISを用いてマルチパスを形成し、MIMO容量向上に活かすためのビーム選択アルゴリズムを提案
 - ✓従来のビーム選択アルゴリズムより高いスループットが得られることを評価・確認



RISを活用したシステムのビーム選択例



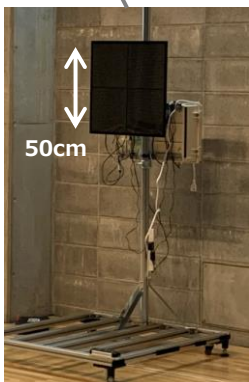
SNR対スループット特性（リンクレベル）



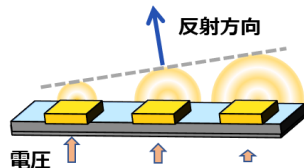
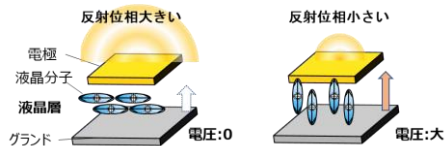
RISを含むシステムの評価結果（6Gシミュレータ）

V.2.14. Liquid crystal reconfigurable intelligent surface

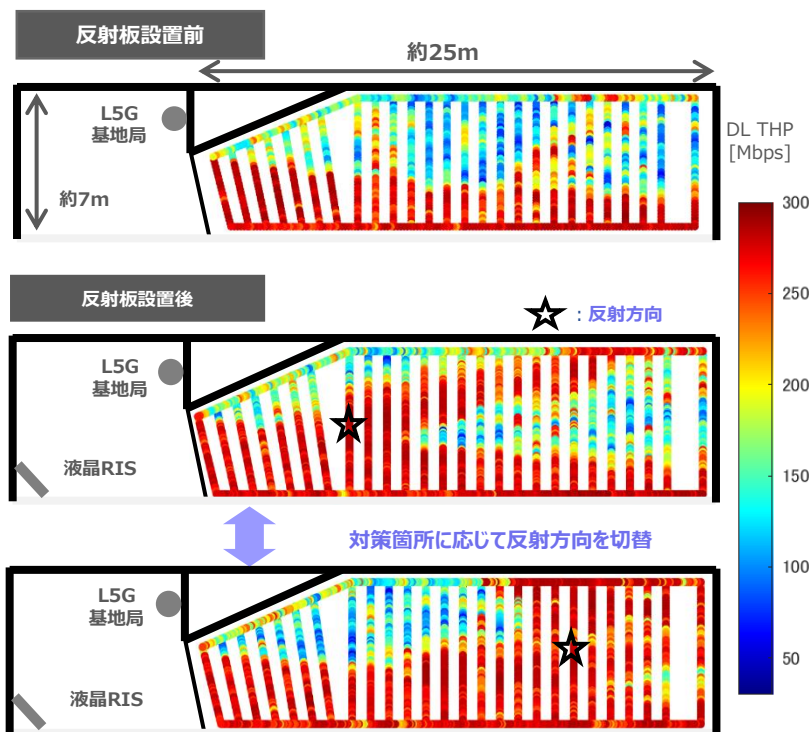
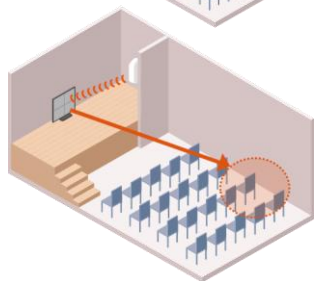
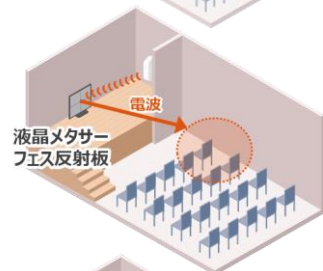
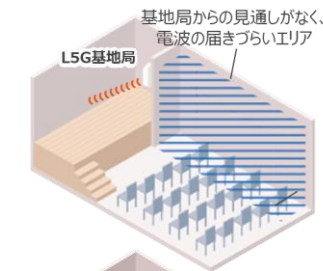
- 液晶を用いたRISを開発し、屋内L5G環境において有効性を検証



RISの構造・動作原理



液晶RIS
(株式会社ジャパンディスプレイ製)



本実験実験は東京都立大学のローカル5G実証サイトを利用させていただきました

V.2.15 Multishape Radio and Its Experimental Studies using Airy and Bessel beams in Sub-THz Bands: RIS Perspective on Beam Manipulation

● 概要

6G時代の無線通信技術の発展に向け、RISによるビーム操作技術は、電波制御により干渉を抑えるほか受信電力を向上させる重要な役割を担う。本研究では、Sub-THz帯におけるMultishape Radio技術の取り組みとして、AiryビームとBesselビームによる無線通信の性能改善を検討する。

● Multishape Radio技術の概念・例

従来の無線通信で十分に活用されていない近傍界における独特な電磁波特性を活用することで、無線技術の可能性を拡張

- Airyビーム：非対称的に表れるサイドローブの特徴を活用し、干渉の少ないマルチストリーム伝送に有効

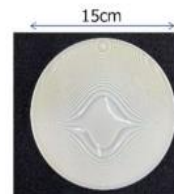
- Besselビーム：一定距離において電波が広がらない特徴を活用し、受信電力を向上

● 実験・結果

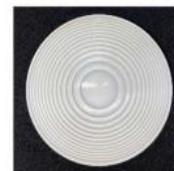
誘電体レンズを使用してAiryビームとBesselビームを生成し、RISによるビーム操作技術の有効性を検証

- Airyビーム：136–168 GHz帯で4ストリーム同時伝送により、414.94 Gbpsを達成

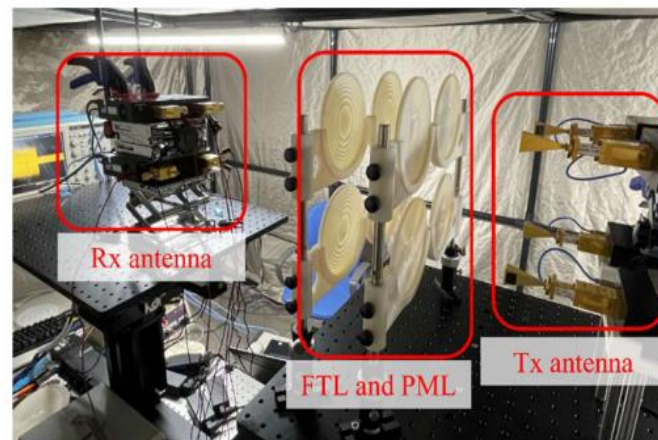
- Besselビーム：141 GHzの無線信号を用い、0.1～0.5 mの伝送距離で、受信電力を10 dB改善



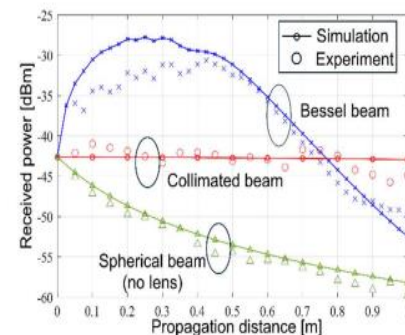
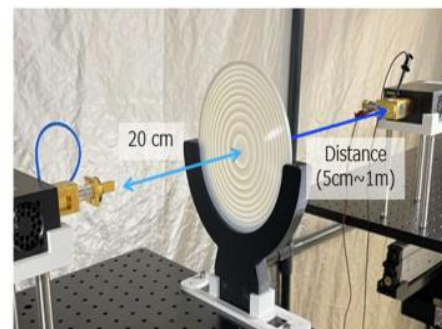
PML



FTL



Airyビームを用いた4多重低干渉伝送 (424.94 Gbps)



Besselビームを用いた受信電力向上 (10 dB 改善)