

2-6 Beyond 5G に向けたワイヤレスエミュレータ仮想環境検証基盤技術、無線機実装技術

2-6 *Virtual Evaluation Environment Construction and Reconfigurable Radio Devices Implementation Technologies for Wireless Emulator to Promote Beyond 5G Systems*

児島 史秀 松村 武

KOJIMA Fumihide and MATSUMURA Takeshi

無線通信技術は Society5.0 の中核を担う社会基盤技術であり、多様なユースケースに対応するために、複数システムの連携による無線ネットワークの高度化・複雑化が進むものと考えられる。そのため、これまで以上に多くの機器が通信を行い、周波数の逼迫^{ひっばく}や周波数利用効率の劣化など、従前からの問題がより深刻化することが予見される。これらの問題に対し、新たな電波システムや既存システムとの共存技術の開発が推進されているが、実用化には多大な時間、費用を要する。ワイヤレスエミュレータは、仮想環境で電波システムの評価を行うための技術で、仮想空間上に物理環境を再現し、ユーザが定義したシナリオに基づき、物理的な無線機のみでなく、仮想的な無線機も用いた大規模実験が可能で、新しい概念の電波模擬システムである。このシステムを用いることで、新しい電波システムの設計、評価、検証を低コストかつ短時間で、再現性良く実施することが可能となる。

Wireless communication is a core infrastructure technology of Society 5.0, and it is expected that wireless networks will become more advanced and complex through the cooperation of multiple systems to support various use cases. As a result, existing problems such as frequency resource shortage and deterioration of frequency utilization efficiency will become more serious. To address these issues, development of new radio systems and coexistence technologies with existing systems is being promoted, but it takes a lot of time and cost for practical use. A wireless emulator is a new concept radio emulation system that reproduces a physical environment in a virtual space and enables large-scale experiments using not only physical radio devices but also virtual radio devices based on a user-defined scenario. Using this system, it becomes possible to design, evaluate, and verify new radio systems at low cost, in a short time, and with good reproducibility.

1 まえがき

Society5.0 時代において、無線通信技術はその中核を担う社会基盤技術としての役割が期待されており [1]、運用シナリオの多様化や、複数システムの連携による無線ネットワークの複雑化などが進むと考えられる。そのため、これまで以上に多くの機器が通信を行い、周波数の逼迫や周波数利用効率の低下など、従前からの問題がより深刻化することが予見される。これらの問題に対し、新たな電波システム開発や既存システムとの共存技術開発が推進されているが、実用化には多大な時間、費用を要する。特に実無線機による運用試験では、再現性を確保しつつ多様な環境で様々な

検証を行うことは難しく、まして数千台規模の大規模フィールド実証は非現実的といえる。本章では、このような新しい電波システムの設計、評価、検証を低コストかつ短時間で実施するため、様々な環境やシナリオが定義でき、物理的な試作機のみでなく、仮想的な無線機との相互接続による大規模実験環境が構築可能な、新しい概念の電波模擬システムの実現を目指したワイヤレスエミュレータの研究開発について述べる。

2 大規模仮想環境検証基盤の構築と、ワイヤレスエミュレーションシナリオの実行

本章では、ワイヤレスエミュレータにおいて、無線

機の配置や、電波伝搬特性等の状況に応じた無線通信システムの検証を仮想空間において実現するための基盤である大規模仮想環境検証基盤の構築と、当該基盤上で実施されるワイヤレスエミュレーションの詳細動作について述べる [2]。

2.1 大規模仮想環境検証基盤の概要

図1に、ワイヤレスエミュレータにおける大規模仮想環境検証基盤の概要を示す。ワイヤレスエミュレーションは、大きく三つの構成要素により実現される。すなわち、1) 大規模仮想環境検証基盤、2) 電波伝搬モデル・電波発射挙動モデル、そして、3) 疑似無線機等の外部接続無線機である。

大規模仮想環境検証基盤は、ワイヤレスエミュレーションの中心的な機構であり、複数の高性能サーバ等により構成される計算機環境である。当該基盤上に構成される仮想空間では、実際の無線機の機能、プロトコルスタックを適切にソフトウェアにより実装する仮想無線機が設置され、実際の無線通信に即して無線機間の電波的な相互作用を計算処理により導出していく。当該計算処理は、同じく同基盤に含まれる無線リンクエミュレータにおいて実施される。

電波的な相互作用の計算処理が、現実の無線通信の挙動を正確に反映するために参照されるのが、電波伝搬モデル・電波発射挙動モデルである。ワイヤレスエミュレーションにおいて参照されるこのようなモデルについては、現実の受信電界強度や伝搬遅延の数値を

必ずしも厳密に参照していないことを注記したい。なぜなら、電波伝搬等に関する情報は、ワイヤレスエミュレーションの最終的な目的である電波システムの挙動、すなわち動作性能が適切に模擬されるために必要な精度があれば良いからである。このため、後述するように実際の所要計算時間等の見地より、適切なモデル化が必要とされる。

ワイヤレスエミュレーション、すなわち無線リンクエミュレータ上の電波的な相互作用の計算処理については、仮想環境検証基盤の外部より接続される実体の無線機を受付けることも想定している。このような外部接続無線機には、ソフトウェア無線機等の汎用的な装置である疑似無線機のほか、商用機器(または試作機)等の実無線機も考えられる。本想定により、仮想無線機、疑似無線機どちらかのみでの評価だけでなく、双方間の検証である相互接続に関する評価も可能となっている [3]。

図2に、大規模仮想環境検証基盤を中心とするワイヤレスエミュレータの構成例を示す。図1において、無線機間の電波的な相互作用を模擬する無線リンクエミュレータは、仮想無線機間の場合と、疑似無線機間または疑似-仮想無線機の相互接続の場合では実装が異なる。前者では伝搬パラメータ計算エンジンを参照するソフトウェア(SW)によるSW無線リンクインタフェースで、後者ではFPGAで構成されたハードウェア(HW)無線リンクエミュレータでそれぞれ電波伝搬パラメータを参照した相互作用が実装される。

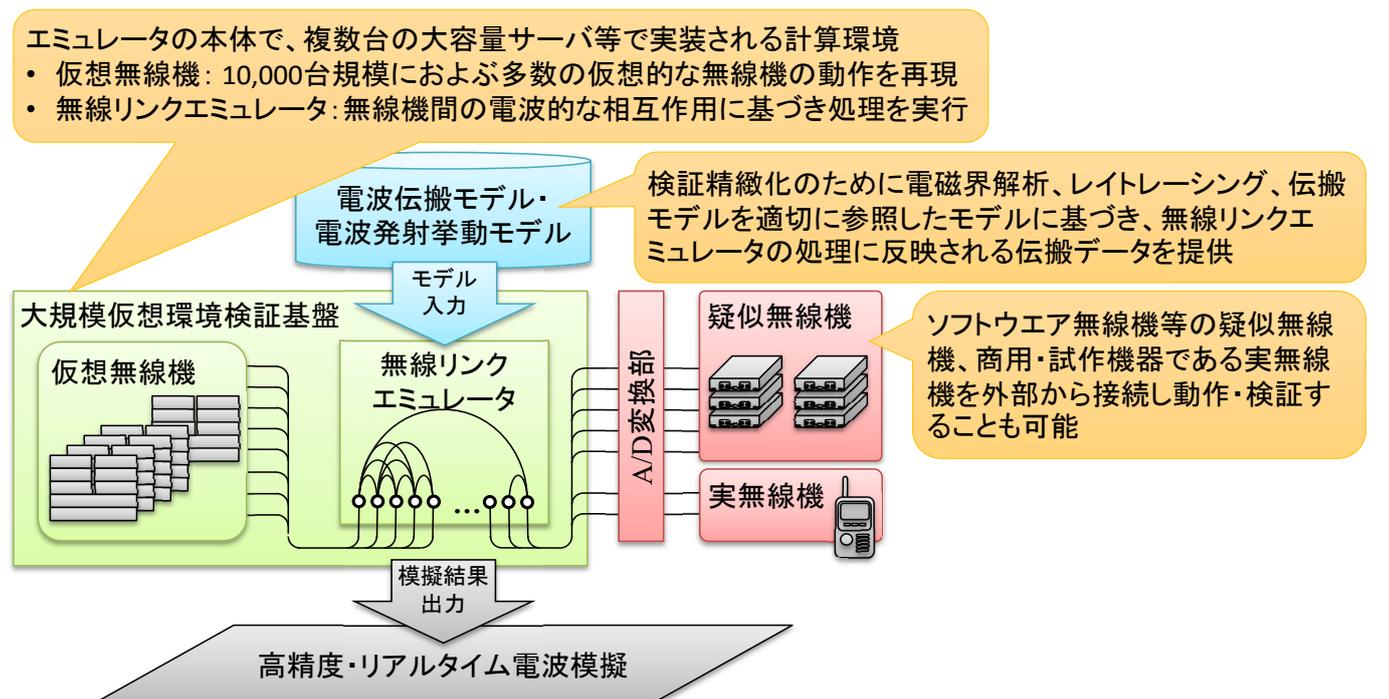


図1 ワイヤレスエミュレータにおける大規模仮想環境検証基盤の概要

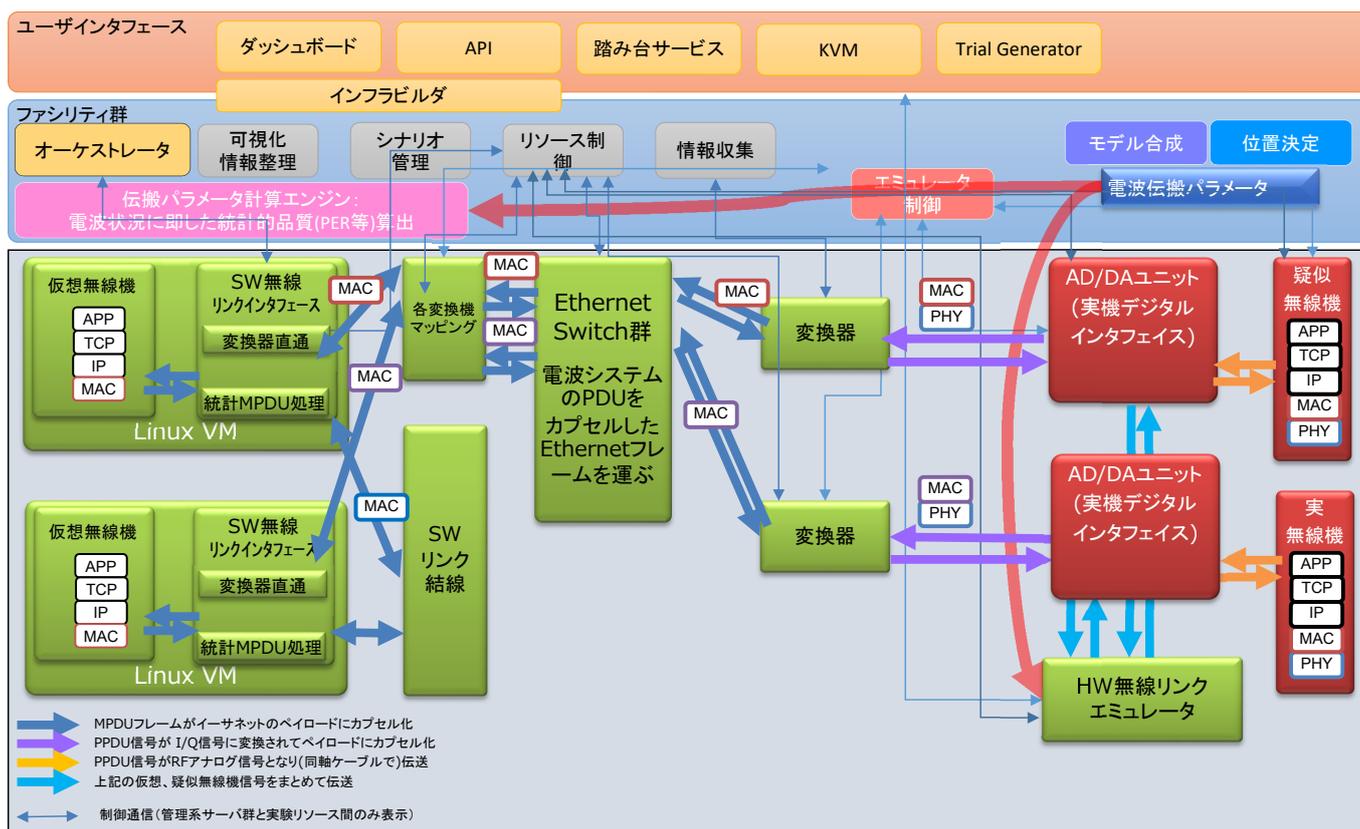


図2 ワイヤレスエミュレータの構成例

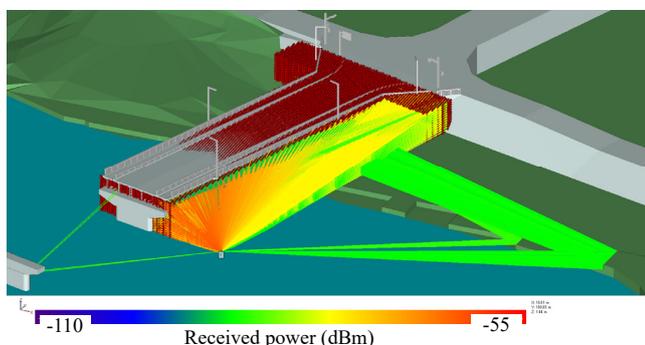


図3 ドローンのエミュレーションシナリオのための詳細データ

上述した電波伝搬モデル等については、検証対象である電波システムの空間上に格子点を配置し、各点における物理量により構成される場合がある。当該物理量の計算のためには、既存の汎用的な伝搬モデルを採用する場合（簡易データ）と、レイトレーシング手法等により、更に厳密な数値を求める場合（詳細データ）が存在する。図3に、電波システムとして橋梁エリアにおけるドローンを想定したシナリオのための詳細データの表示例を示す。

前章で述べたとおり、伝搬モデルの参照については、エミュレーション計算時間等を考慮し適切に行われる。図4に、ワイヤレスエミュレーションにおける伝搬モデルの参照例を示す。ここでは、ドローンシステムの

挙動について、簡易データを用いたシミュレーションを多数実施することによりドローン航路を選定し、その後詳細データを用いて厳密なエミュレーション評価を実施する様子を示している。

2.2 大規模仮想環境検証基盤における仮想無線機動作

本節では、ハードウェア無線リンクエミュレータにより実現される、大規模仮想環境検証基盤上の仮想無線機と、外部より持ち込まれる疑似無線機との電波的相互作用、すなわち相互接続の動作検証について述べる。特に本節では、IEEE 802.11g 無線標準規格に準ずる無線方式のプロトコルスタックのワイヤレスエミュレーションについて得られた成果を述べる。図5に、疑似無線機と仮想無線機の相互接続の際のスタック図を示す。仮想無線機同士の相互作用計算に用いられるSW無線リンクインタフェースでは、NICTで開発されたNEToriumに準じた制御の適用により、仮想無線機の信号として、PHYフレーム化しないカプセル化されたパケットに対する統計的な処理を行う[4]。

図6に、仮想無線機、疑似無線機に対して大規模仮想環境検証基盤において行われるワイヤレスエミュレーション処理を示す。上述のとおり、PHYフレーム化しないパケットを扱う仮想無線機では、フレー

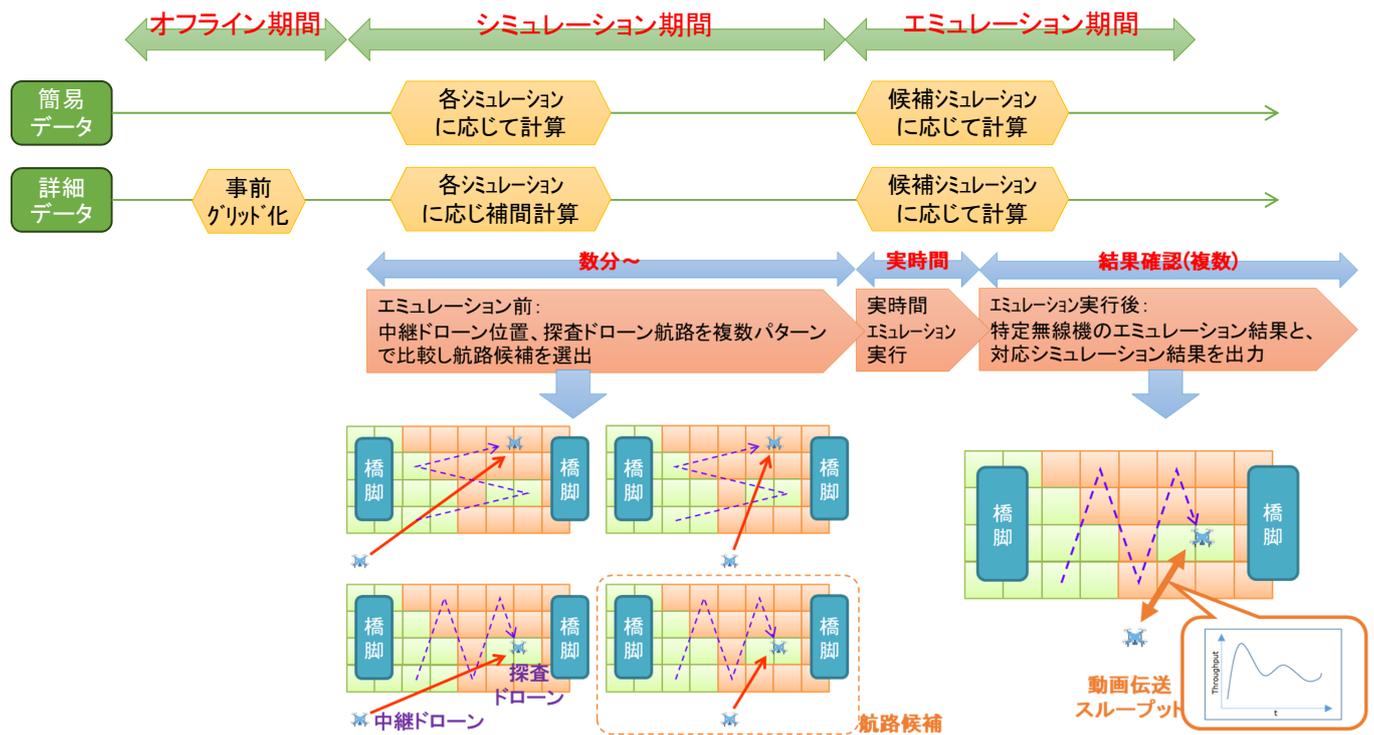


図4 ワイヤレスエミュレーションにおける電波伝搬データの参照例

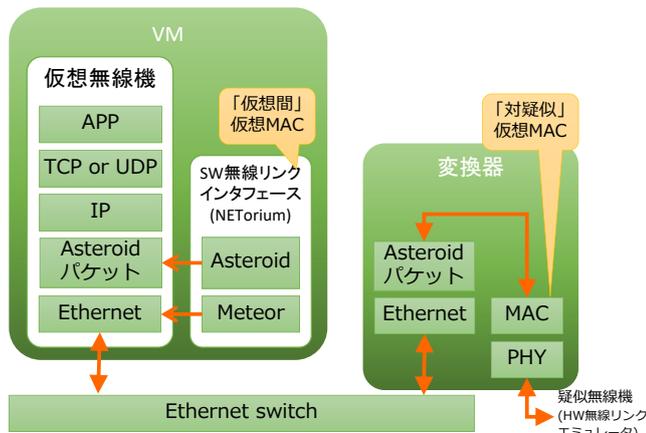


図5 相互接続時のスタック図

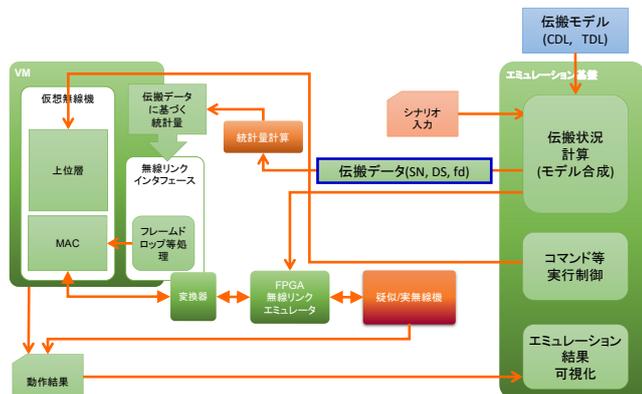


図6 仮想無線機、疑似無線機に対するエミュレーション処理の概要

ムドロップの処理は、伝搬路状況等に応じた統計量 (Packet Error Rate (PER) 等) に基づき実施される。

次に、疑似無線機と仮想無線機間の電波的相互作用について検証することを目的とする相互接続動作について述べる。図7に、相互接続を適用したエミュレーション評価の際の無線リンクエミュレータ処理の形態の種別を示す。前者は双方向の無線リンクそれぞれについて、受信側の無線機に起因する無線リンクエミュレータで各処理を行う例であり、対して後者は、画一的にHW無線リンクエミュレータで処理する例を示している。

非常に多数の無線機の動作を、仮想無線機とSW無線リンクインタフェースにより仮想空間上で効率的に検証するためには、前者である図7(a)の構成が考えられるが、システム内の無線機台数が適度に制限されているような場合には、後者である図7(b)の実装形態での評価も現実的であると考えられる。

図8に、図7(a)における疑似無線機の台数割合に対するリンク計算数を示す。ここでは、総数で10,000台の無線機動作の検証を想定し、仮想無線機のうち、実際に疑似無線機に干渉する仮想無線機台数の割合を R_{ivn} のパラメータで示している。

2.3 IEEE 802.11系プロトコルスタック準拠の仮想無線機動作検証

本節では、前節までに述べた、大規模仮想検証基盤

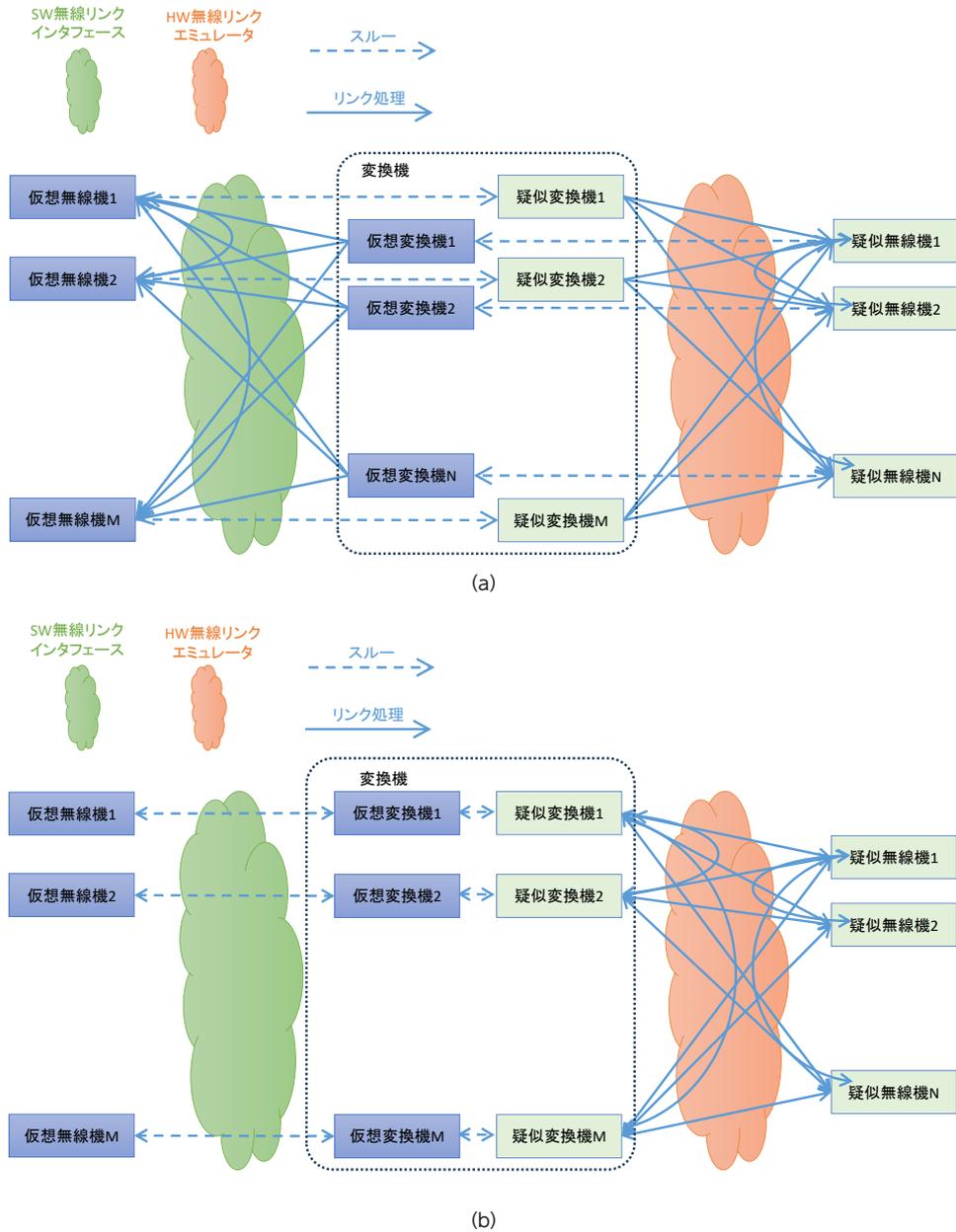


図7 相互接続時の処理：(a) 受信側で処理する場合、(b) ハードウェア無線リンクエミュレータで処理する場合

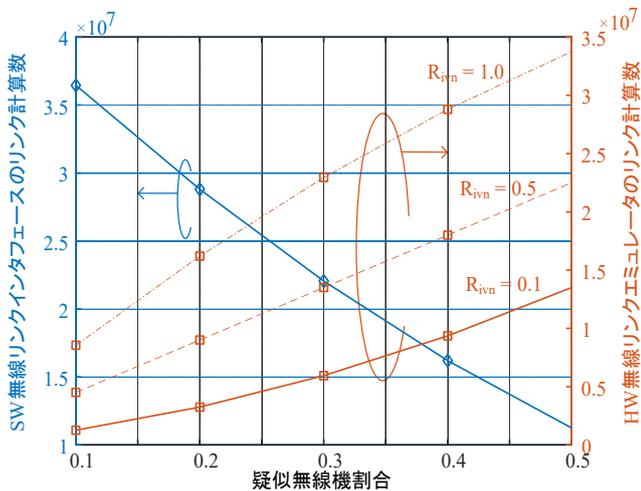


図8 疑似無線機の台数割合に対するリンク計算数

上に定義され動作する仮想無線機のうち、IEEE 802.11 規格準拠のプロトコルスタックについて述べる。図9に、IEEE 802.11g 仮想無線機のスループット特性に関するエミュレーション結果と理論値との比較を示す。開発された仮想無線機の特徴が、Bianchi モデルに基づく理論値に整合していることが確認できた [5]。また、本研究開発では、IEEE 802.11g 規格に基づく仮想・疑似無線機の実装に対して、異なる IEEE 802.11 系の標準規格として取り上げられた、IEEE 802.11ax 規格に基づく仮想無線機、疑似無線機の実装についても検討したのでこれについて述べる。IEEE 802.11ax 規格は、同一の 802 ワーキンググループに属する IEEE 802.11g 規格との共通点を残すものの、PHY 仕様の拡張や、新たな MAC 機能の追加が定義されてい

2 Beyond 5G の要素技術

る。本研究開発では、特にそのような MAC 機能の典型的なものとして、Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) 機能と、Multi User - Multi Input Multi Output (MU-MIMO) 機能の実装について述べる。

図 10 に、EDCA 機能、MU-MIMO 機能をそれぞれ実証、評価するための IEEE 802.11ax 動作網の例を示す。図 10 (a) は、端末 (STation (STA)) において、複数の Access Category (AC) にわたる EDCA トラフィックがアクセスポイント (Access Point (AP)) に宛てて発生する Up Link (UL) 型の動作網であり、対して、図 10 (b) は、AP において、複数の STA に宛てたトラフィックがそれぞれ発生し、MU-MIMO 機能により送信されるという Down Link (DL) 型の動作網である。

図 11 に、図 10 (a) に示した EDCA 機能の動作網において発生が予想される AC 同士の衝突について示す。このような AC の衝突には、図 11 のように、STA 内

衝突と、STA 間衝突がそれぞれ発生すると考えられる。STA 内衝突は、同一 STA 内で発生する複数 AC 間で作用する衝突を表し、対して STA 間衝突は、異なる STA 同士でそれぞれ送信される複数 AC 信号の間で更に発生する衝突を表している。本実証で適用した諸元を表 1 に示す。表 1 では、優先度の昇順に 4 種

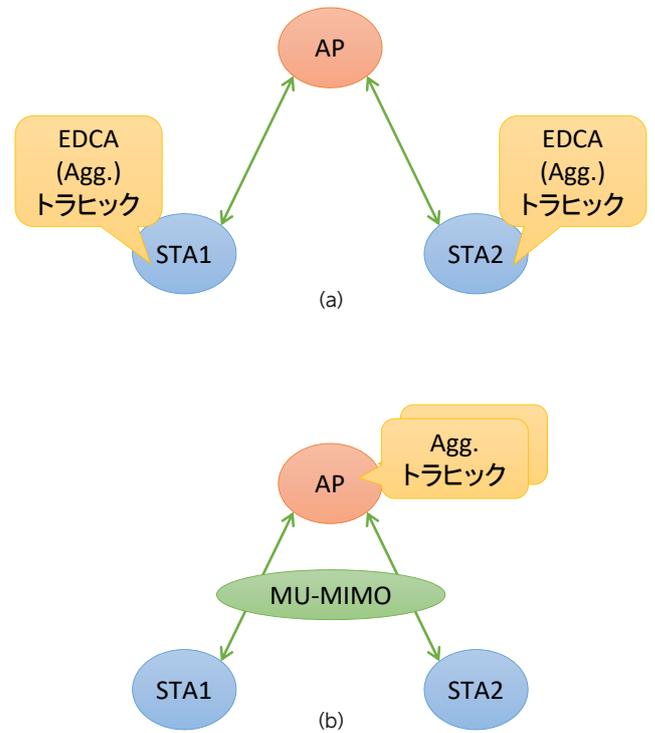


図 10 IEEE 802.11ax 無線機による動作網：(a) EDCA 機能評価のための DL 網 (b) MU-MIMO 機能評価のための UL 網

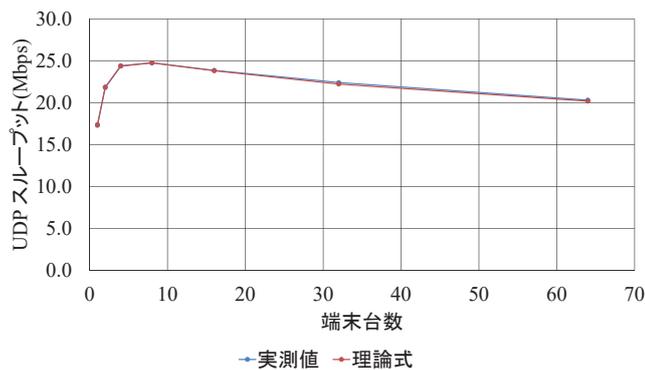


図 9 IEEE 802.11g 仮想無線機の基本特性

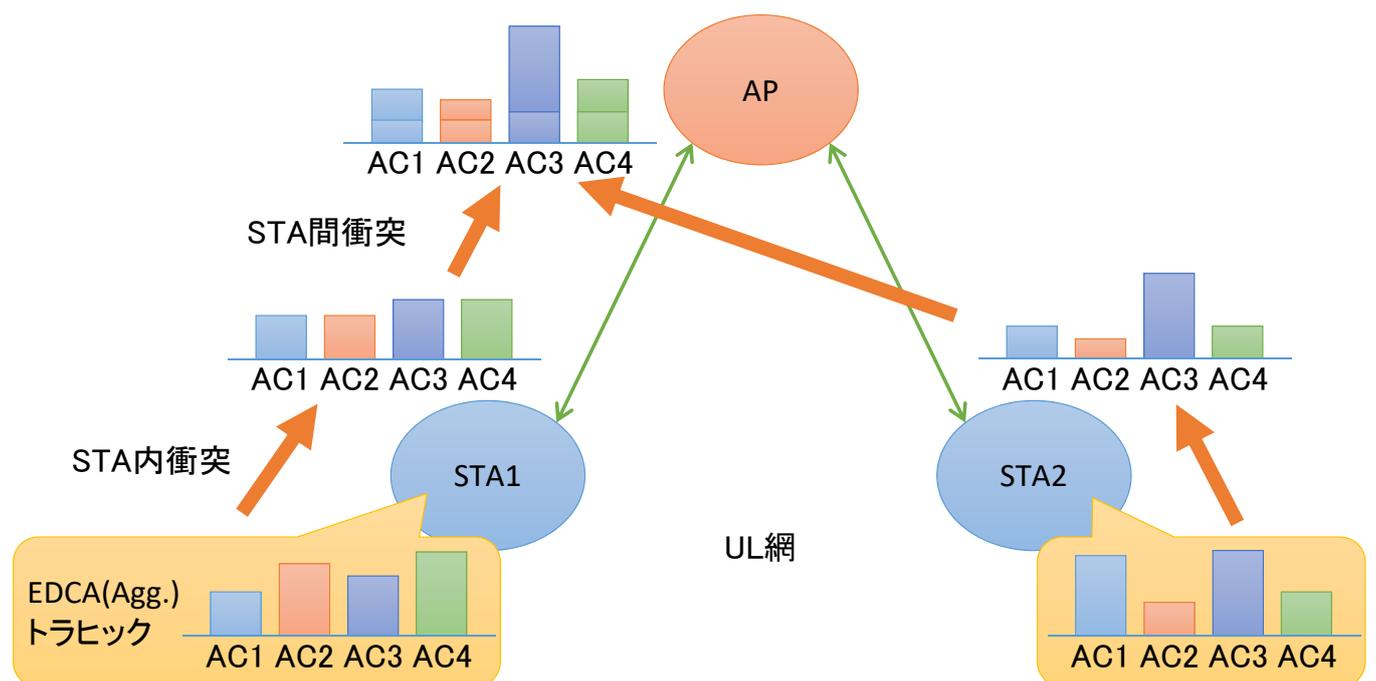


図 11 EDCA 機能動作網における AC 衝突の概要

表 1 EDCA 機能実証時の諸元

AC		iperf 設定スループット (Mb/s)
BK (Background)	バックグラウンド型通信	70
BE (Best effort)	最善努力型通信	70
VI (Video)	動画型通信	10
VO (Voice)	音声型通信	0.5

TEST	AC	STA1	STA2	STA3	STA4
AP-1STA	BK	14.6			
	BE	66.4			
	VI	10.0			
	VO	0.5			
AP-2STA (1)	BK	12.1	-		
	BE	59.9	-		
	VI	-	10		
	VO	-	0.5		
AP-2STA (2)	BK	14.9	-		
	BE	-	62.2		
	VI	10.0	-		
	VO	-	0.5		
AP-2STA (3)	BK	-	15.9		
	BE	60.5	-		
	VI	10.0	-		
	VO	-	0.5		
AP-4STA	BK	14.3	-	-	-
	BE	-	54.9	-	-
	VI	-	-	10.0	-
	VO	-	-	-	0.5

図 12 IEEE 802.11ax 仮想無線機を用いた EDCA 機能の実証結果

の AC を明示していて、表 1 にそれぞれ詳細を説明している。

図 12 に、本実証において得られた結果を示す。数値はいずれも表 1 に示す諸元に基づく実証で得られたスループット特性 (Mb/s) を示す。図 12 の結果より、適用する STA の台数や、設定する AC に応じて、図 11 に示したような、性質の異なる AC 衝突による影響について、それぞれ該当する AP、STA の設置状況に応じて確認することができた。本実証より、開発された IEEE 802.11ax 仮想無線機により、EDCA 機能を適用する電波システムの事前性能評価の可能性について示すことができた。

本研究開発にて検証する疑似無線機と仮想無線機の相互接続動作について、変換器の実装による IEEE 802.11g 仮想無線機と、IEEE 802.11g 疑似無線機との相互接続動作について述べる。図 13 に、相互接続動作のための構成を示す。図 6 において示した処理の方針に基づき、仮想無線機間でやり取りされるカプセル

化されたデータを変換器により PHY フレーム化し、ハードウェア無線リンクエミュレータに伝えることにより、疑似無線機で扱う PHY フレーム化データとの相互作用を可能としている。

図 14 に、図 13 の構成に基づき実装した IEEE 802.11g 仮想無線機 2 台と、疑似無線機 1 台の相互接続実証の様子を示す。本実証では、相互接続された仮想無線機と疑似無線機の双方の上位層において、Linux-OS ベースのアプリケーション (例えば iperf) を実行する動作が確認できた。

次に、IEEE 802.11ax プロトコルスタックの相互接続について検証を行った結果について報告する。図 15 に、前述の MU-MIMO 機能の実装を前提とした上での、IEEE 802.11ax プロトコルスタックの相互接続動作の例を示す。ここでは、4 台の STA が MU-MIMO 機能を実施する様子を示して、1 台の疑似無線機が、STA として機能する場合、AP として機能する場合でそれぞれの動作について示したものである。

2 Beyond 5G の要素技術

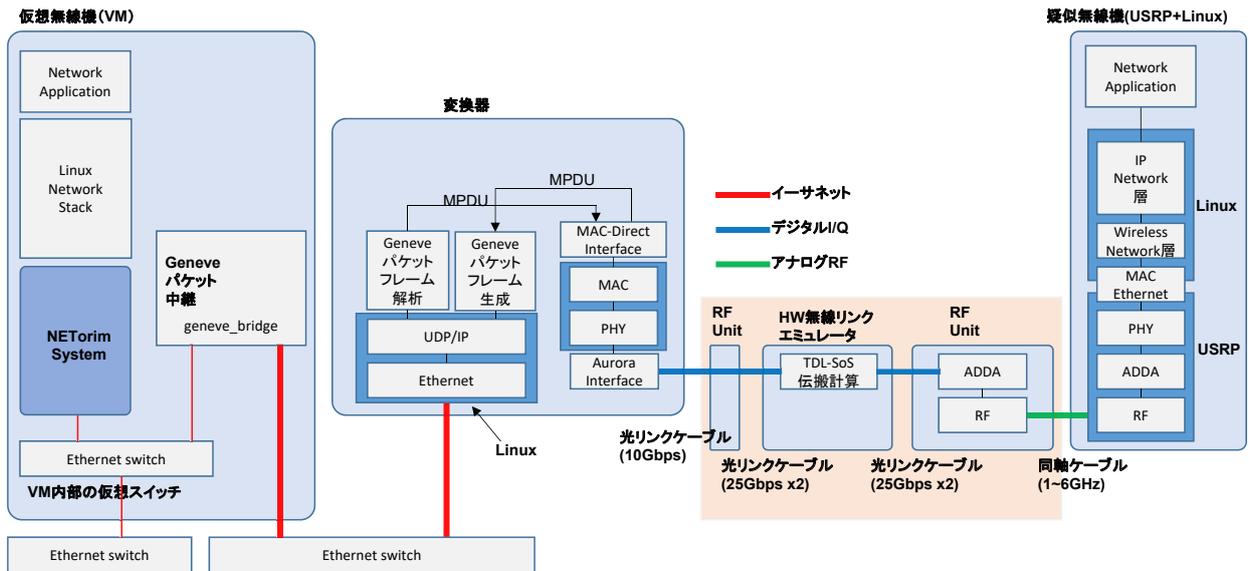


図 13 IEEE 802.11g プロトコルスタックの相互接続動作の構成概要

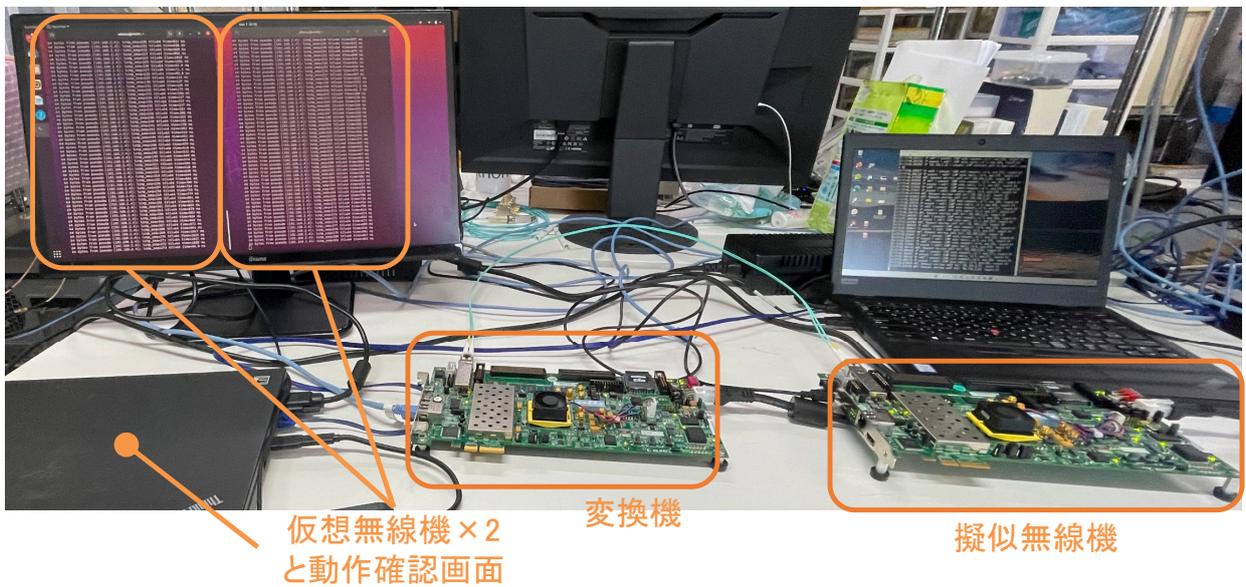


図 14 IEEE 802.11g プロトコルスタックの相互接続動作の様子

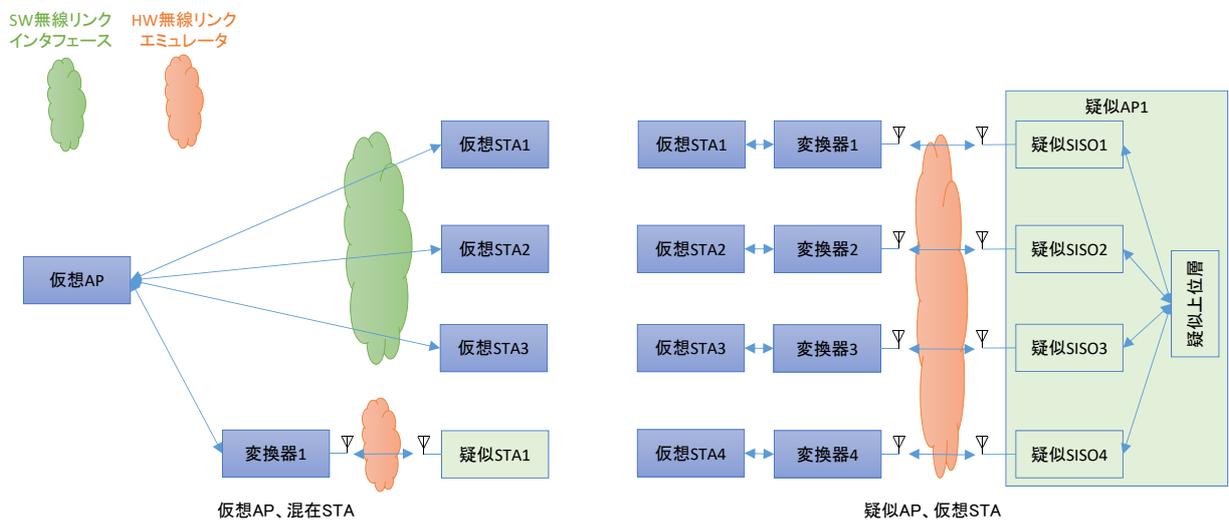


図 15 MU-MIMO 機能を実装した相互接続動作の例

図 16 に、IEEE 802.11ax プロトコルスタックを適用した相互接続動作において必要となる大規模仮想環境検証基盤による疑似無線機の制御の概念を示す。前述のとおり、USRP 等の汎用型無線機により実装される疑似無線機に対して、大規模仮想環境検証基盤からは、仮想無線機と同様の制御を実施するために、仮想無線機のそれとの整合性が確保されたインタフェースが必要であり、図 16 では、これをシナリオ実装インタフェース

フェースとして定義し実装する形態について示されている。

疑似無線機は、実体の無線機であり、同様に実体である HW 無線リンクエミュレータと併せ、ワイヤレスエミュレーションにおける動作場所が制限される場合がある。このような状況下では、図 16 で示された大規模仮想環境検証基盤による制御が、ローカル環境、または局所的なオーケストレータに準ずる構成により代替的に実施される場合がある。図 17 には、このような制御形態について概念を示している。

本研究開発における成果である IEEE 802.11ax プロトコルスタックの相互接続動作の基本的な特性について検証することを目的として、まずは AP-STA の対一通信トポロジを仮想無線機により構成し、A-MPDU 伝送の基本特性を取得した。図 18 に、得られた結果を示す。仮想無線機による構成ではあるが、本測定は相互接続動作を想定したものであることから、必要なアクセス制御については、変換機や、疑似無線機の実装を想定しながら下位制御層においてデータ結合処理等について実施するものとした。結果、図 18 に見られるように、このような下位制御層処理による遅延等の影響で、本測定については、本来得られる特性と比較し、スループット特性が劣化していることが確認された。本研究開発では、想定されるワイヤレスエミュレーションを実施するために、このような制御遅延等の改善についても検討した。

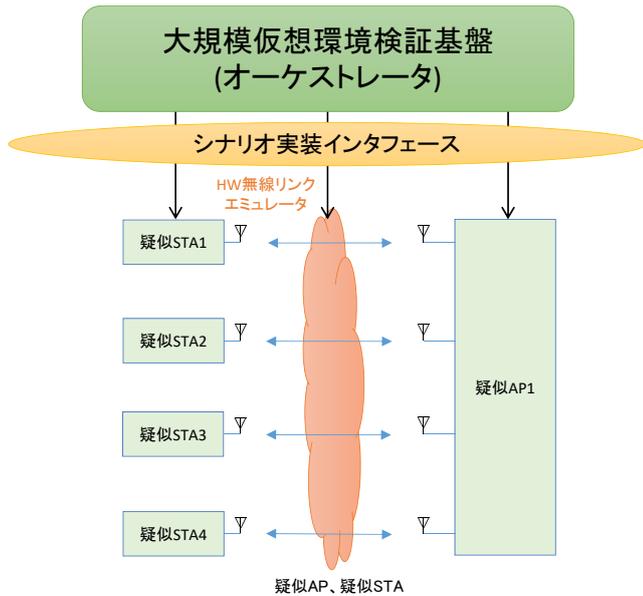


図 16 疑似無線機に対する大規模仮想環境検証基盤による制御の概念

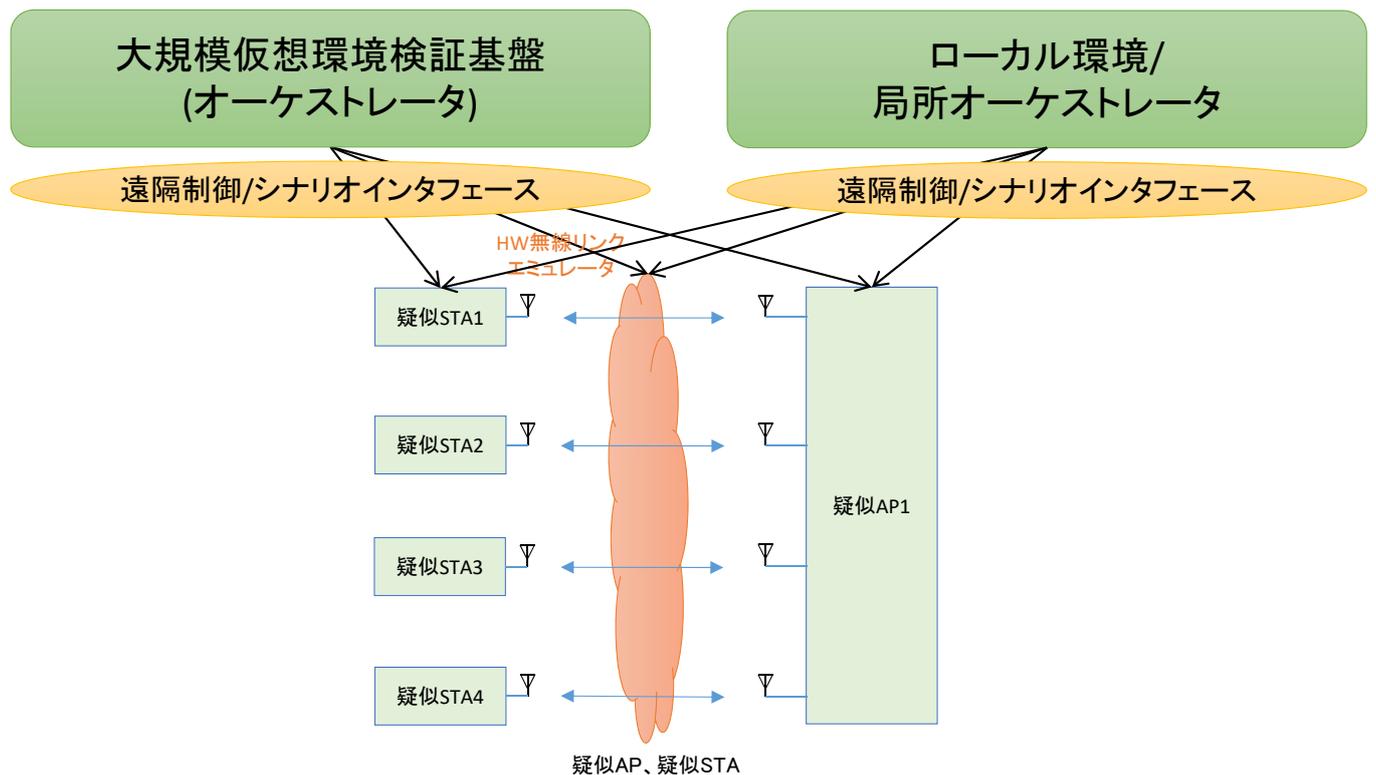


図 17 ローカル環境/局所オーケストレータによる疑似無線機制御

802.11ax 20MHz ch BCC NSS=1									
MCS	PHY Rate [Mbps]	最大Symbol数	最大PSDU長 [octets]	最大aggregation数	UDP (机上計算値) [Mbps]	UDP (仮想無線機測定値) [Mbps]	疑似無線機遅延測定※1 (msec)	UDP(疑似無線機最大値)※2 [Mbps]	
0	8.6	55	804	0	0.00	N.A.	N.A.	N.A.	
1	17.21	55	1608	1	12.18	12.3	3.52	3.31	
2	25.81	55	2413	1	16.40	16.4	2.96	3.93	
3	34.41	55	3217	2	24.88	25.3	3.90	5.98	
4	51.62	55	4826	3	37.87	37.9	4.47	7.82	
5	68.82	55	6435	4	50.49	50.5	5.18	9.00	
6	77.43	55	7239	4	54.53	54.6	5.07	9.20	
7	86.03	55	8043	5	63.11	63.1	5.84	9.98	
8	103.24	55	9652	6	75.74	75.8	6.62	10.56	
9	114.71	55	10725	7	84.60	84.6	7.24	11.26	

※ 1 PHYHWを通して疑似無線機中間層からAMPDUを送ったときの、対向中間層に到達するまでの時間遅延を計測した。
 ※ 2 PHYHW時間遅延値をもとに、PHYHWがパイプライン動作をしないという仮定のもと、伝送可能な最大スループットを想定した値を計算した。

図 18 AP-STA 仮想無線機構成における A-MPDU 伝送の基本特性

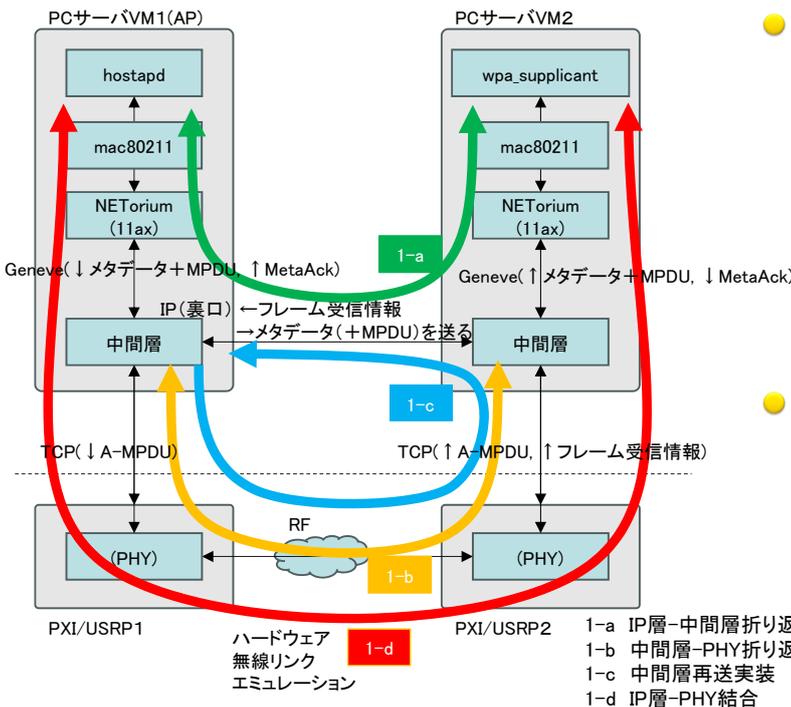


図 19 中間層上部制御改善による特性改善の概要

- 中間層上部:
 - ▶ UDPソケットの受信に変更

	NETorium直結	+中間層上部	+北陸-横須賀遅延
ping (ms)	0.31	10.6→1.5	38.0→15.6
iperf UDP (Mb/s)	718	67.5→560	22.3→36.2

- 中間層下部:
 - ▶ Python→C、phy_emu. 高速化
 - ▷ PHYエミュレータの遅延が 0.3ms→0.09ms

図 19 に、大規模仮想環境検証基盤と仮想無線機が北陸エリアに存在し、対して変換機並びに疑似無線機が横須賀エリアに置かれた想定で、図 18 に見られた劣化を低減するために、中間層上部における制御を改善した場合の特性概要を示す。具体的には、UDP ソケットの実装形態の改善により、それまで生じていた制御遅延が大幅に減少した結果、動作特性としても、特性の改善が見られた。本実証においては加えて、中間層下部の制御として、プログラムの変更等による特性改善

が確認できている。

以上のような改善の後に、同様に大規模仮想環境検証基盤と仮想無線機が北陸エリアに存在し、対して変換機ならびに疑似無線機が横須賀エリアに存在する場合のスループット特性について、図 20 に示す。ここでは、MCS、アンテナ数 (NSS) に依存する「Rate Index」の変化に対するスループット特性を検証した。図 20 の結果より、北陸 - 横須賀間動作時特性 (灰色) が、シミュレーション値、ローカル仮想無線機の特性に近づ

仮想 + PHY エミュレータ(北陸一横須賀) 評価

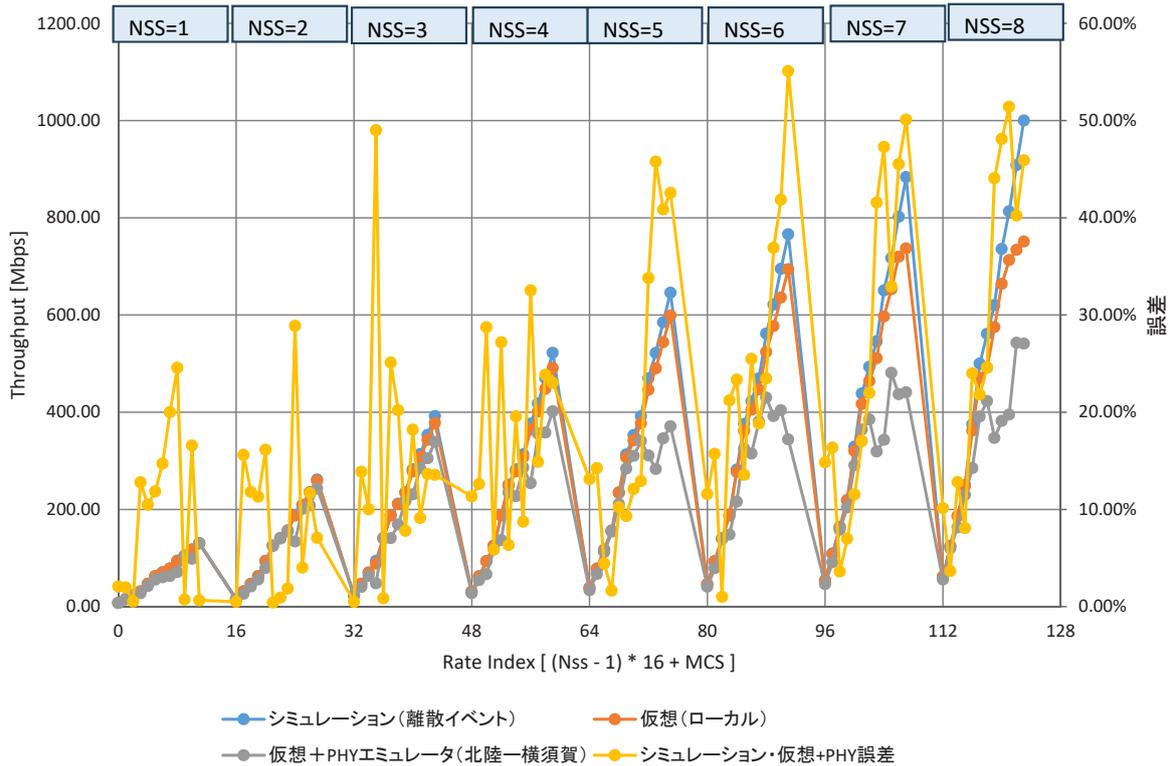


図 20 Rate Index に対するスループット特性

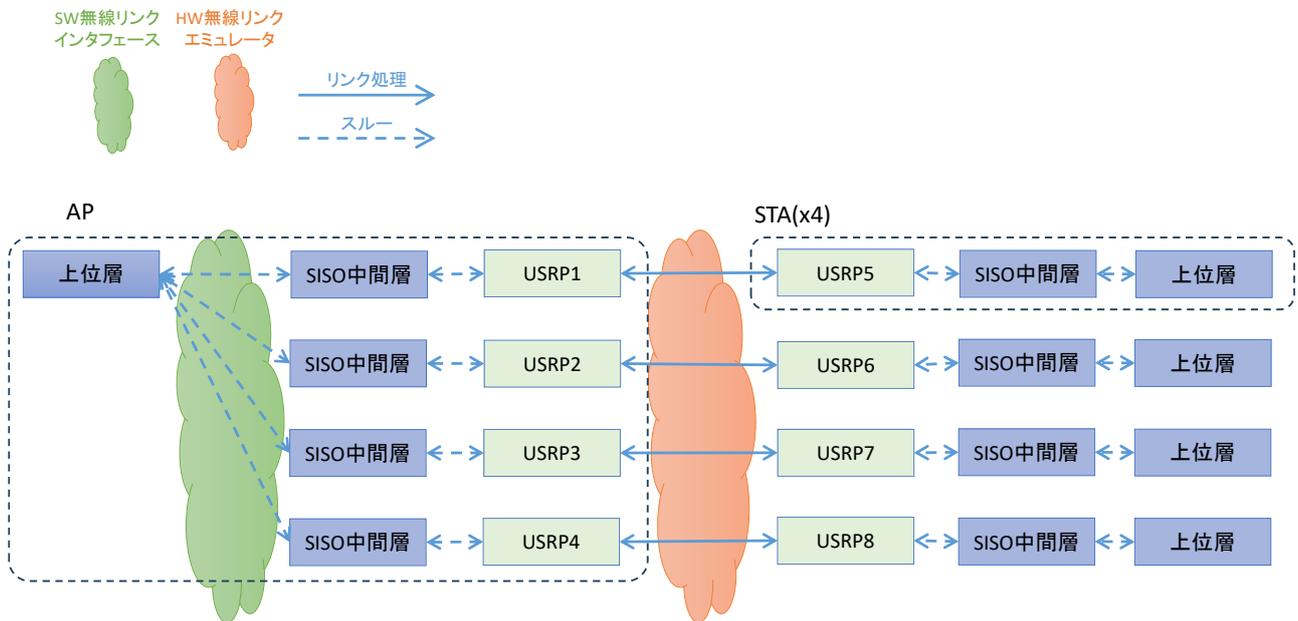


図 21 相互接続実証において想定した無線網トポロジ

いたことが確認された。

本節では、これまでの基本的な設計検討と評価を踏まえ、実際の疑似無線機との接続実証についても述べる。図 21 に、接続実証において想定した無線網トポロジを示す。

図 22 に、IEEE 802.11ax 相互接続実証の様子を示す。図は、これまでの想定どおり、大規模仮想環境検証基

盤と仮想無線機が北陸エリアに存在し、横須賀エリアの変換機及び疑似無線機とは遠隔接続で動作する様子を示している。

図 23 に、図 22 にて示した相互接続実証において確認された、アプリケーションの動作例を示す。実証したアプリケーションは、ping と iperf である。いずれのアプリケーションについても、Linux OS に準拠する

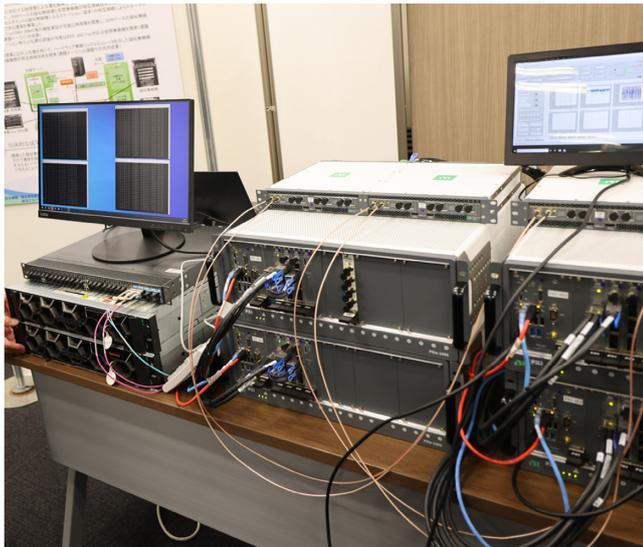


図 22 相互接続実証

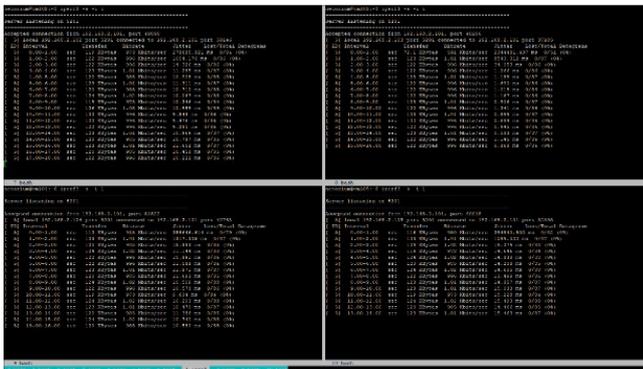


図 23 IEEE 801.11ax 相互接続実証におけるアプリケーション (iperf) 動作

ものであり、本研究開発において実装された仮想無線機、疑似無線機いずれのプロトコルスタックにおいても適合し、想定どおりの動作が実現されることが確認できた。

2.4 5G NR プロトコルスタック準拠の仮想無線機動作検証

本節では、5G NR プロトコルスタックのワイヤレスエミュレーションにおける適用と動作について検討した内容を報告する。図 24 に、5G NR プロトコルスタックの実装概要を示す。本研究開発では、OAI (OpenAirInterface) 準拠のソフトウェアの実装を想定している。図は、大規模仮想環境検証基盤を構成する複数サーバ上に、OAI-5G NR スタック、エミュレーションファシリティ、ダッシュボードを実装し、協調動作させる形態を示して、5G NR の複数 UE はサーバ内複数 VM 上に実装されている。

5G NR プロトコルスタックの実装にあたり、実際のワイヤレスエミュレーションを実施する際に、5G NR 方式を用いたアプリケーションの動作と検証についても必要となる。本研究開発において、このようなアプリケーションとして有望と考えているもののひとつに、Full-Duplex (FD) 伝送が考えられる。このことから、FD アプリケーションの可視化を適切に実施することを前提とし、FD パラメータの出力を想定し、エミュレータ結果出力の設計を行った。具体的には、FD の

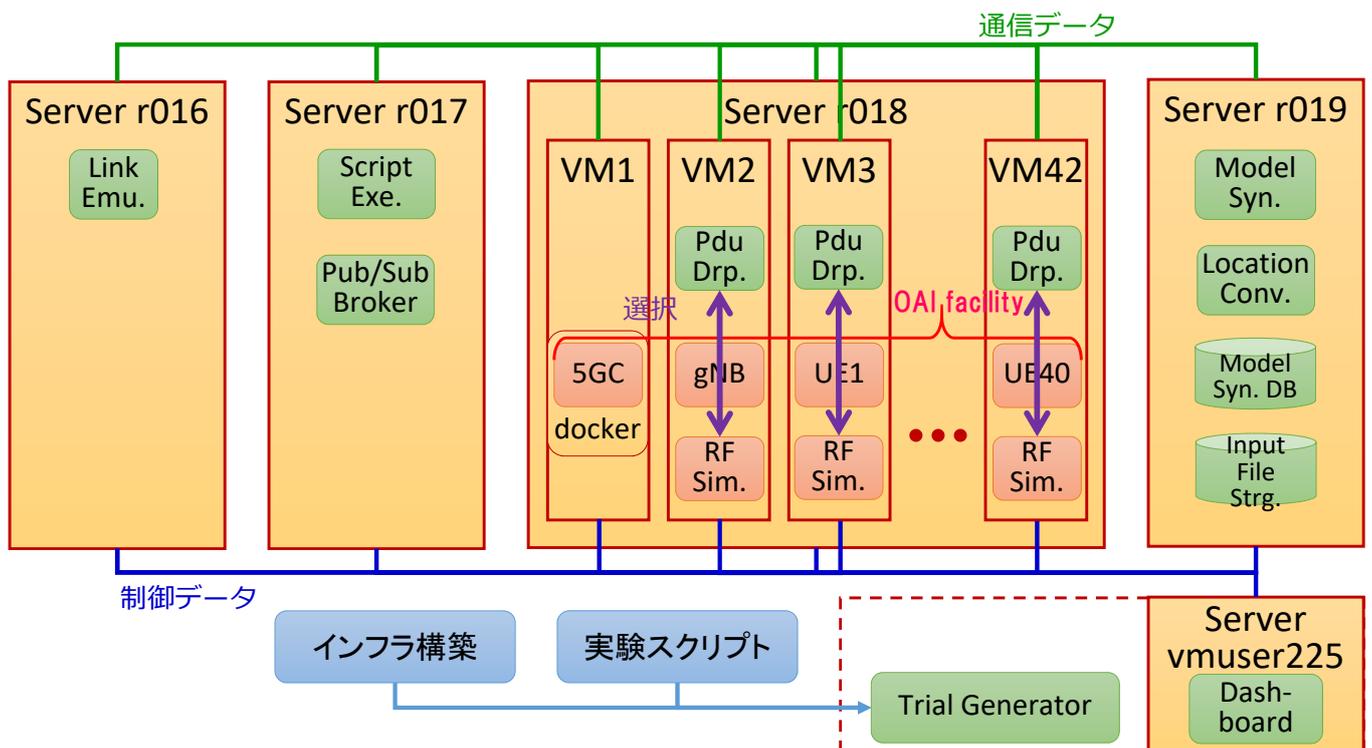


図 24 OAI に基づく 5G NR プロトコルスタックの実装概要

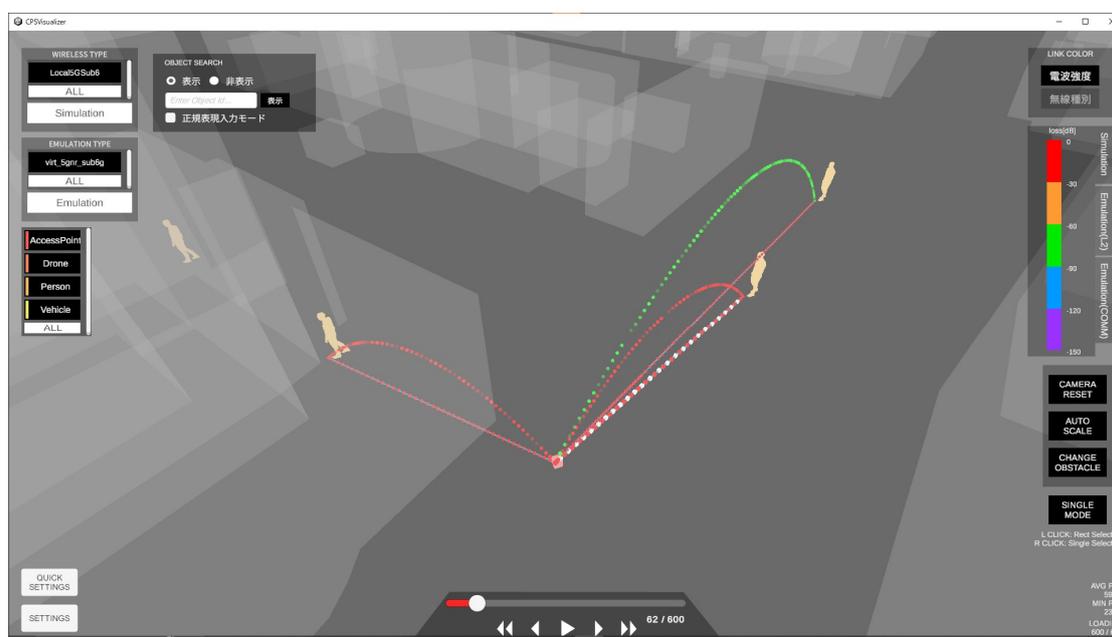
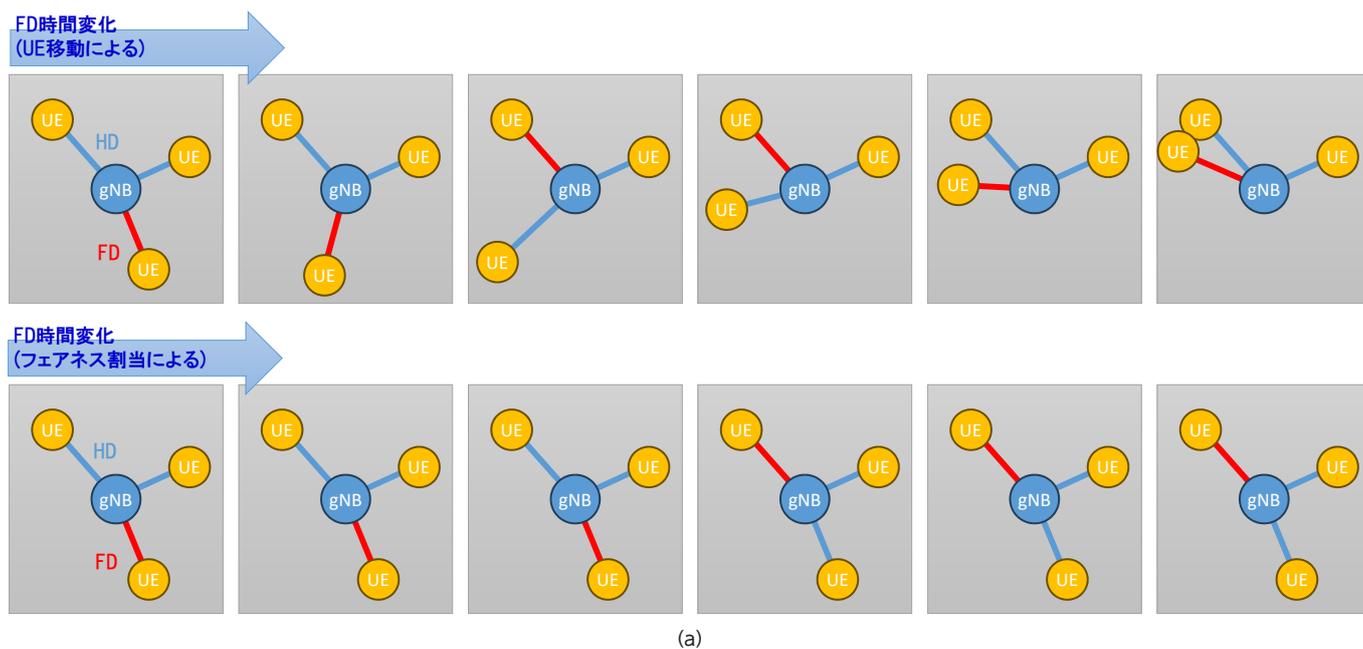


図 25 FDアプリケーション可視化イメージ：(a) FDアプリの時間的な状態変動の様子 (b) 大規模仮想環境検証基盤上ビジュアライズのイメージ

ON/OFF だけでなく、割当スロット種別等の出力を想定したエミュレーション構造(出力データ構造)が必要となり、これを実現するための出力パラメータの増設を行った。図 25 に、FD アプリケーションの可視化イメージを示す。図 25 (a) は、5G NR システムの gNB - 複数 UE の網構造における FD アプリケーション動作の時間的な変化(左→右)を示したものであり、上段は UE が移動することにより、また下段は当該網構造におけるフェアネス割当制御により、いずれも gNB にアクセスする各リンクの FD/HD 状態が変動していく様子を示している。また図 25 (b) は、図 25 (a) に示し

た各リンクの FD/HD 状態を、後述する可視化において、受信電界強度や、スループット等の伝送特性と並列して表示することを検討し、線種描画が切替えられている様子を示している。

2.5 エミュレーション結果の管理・ビジュアライズに関する検討

本節では、ワイヤレスエミュレーションの利用シーンに直結する利用者側のインターフェースについて述べる。図 26 に、大規模仮想環境検証基盤の利用者側インターフェースの概要を示す。一部のインターフェースは、

2 Beyond 5G の要素技術

図2にも示したが検証時の地形や電波伝搬状況、さらには無線機の移動に至るまでの各機能が Application Programming Interface (API) 等の形式で明示化され、設定と動作の明示化が図られている。エミュレーションの実行に際し、入力可能となるパラメータ例は次のとおりである。

- 無線システム
- 無線周波数
- 無線機の3次元軌道
- 伝搬モデル(自由空間、奥村秦、本プロジェクトの独自モデルなど)
- エミュレーション対象空間(候補より選択)
- データ転送を行うシナリオ

本稿における仮想環境検証基盤へのエミュレーション各パラメータの入力及び設定を簡易化するために、

トライアルジェネレータ (Trial Generator (TG)) という機構を開発している。図27に、TGの概要を示す。TGは、利用者から統一形式で提供された設定ファイルを元に、エミュレーションの各ファシリティ向けに必要な情報の複製や新規生成を行い、各ファシリティに対応したファイル形式に変換し、各入力ファイルとして提供する。TGの主な機能としては、1) 利用者への統一した設定記述文法の提供、2) オブジェクトの形状などの一括設定、3) 1つの入力ファイルから10種類を超える設定ファイルの自動生成、4) 利用者が気にしない暗黙的な設定記述の自動生成等が挙げられる。

図28に、ワイヤレスエミュレーションの結果出力の例を示す。ここでは、本研究開発にて検討対象とした電波システムのうち、スマートオフィス及び5G NRシステムに関するエミュレーションの実施結果を示して

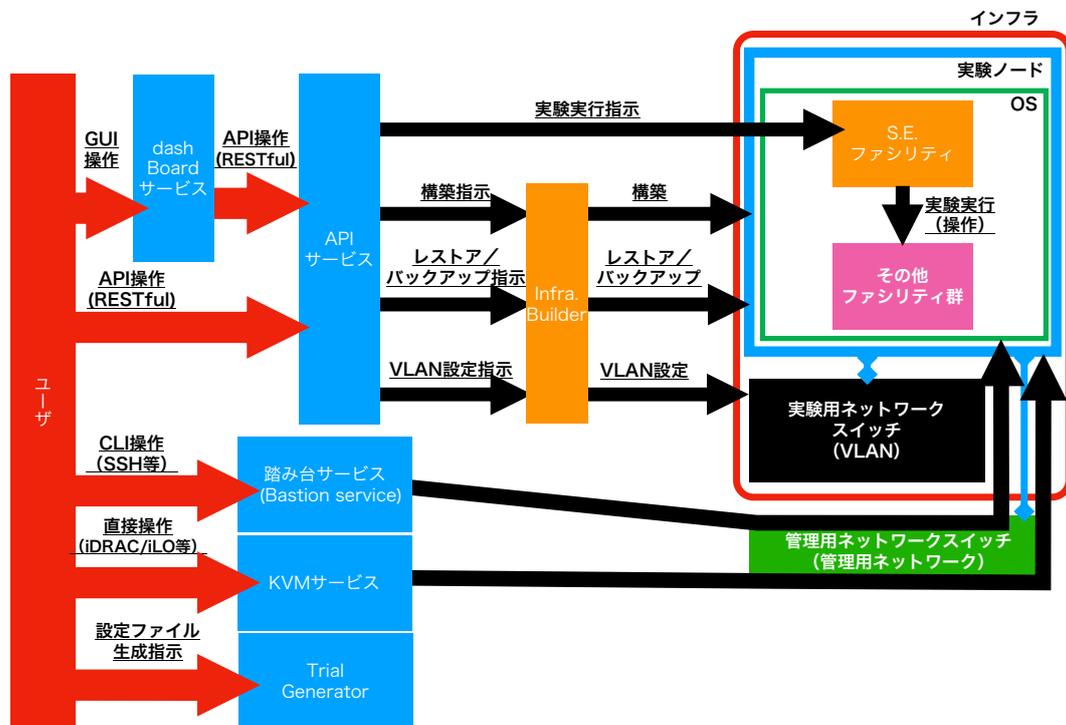


図26 大規模仮想環境検証基盤の利用者側インタフェースの概要

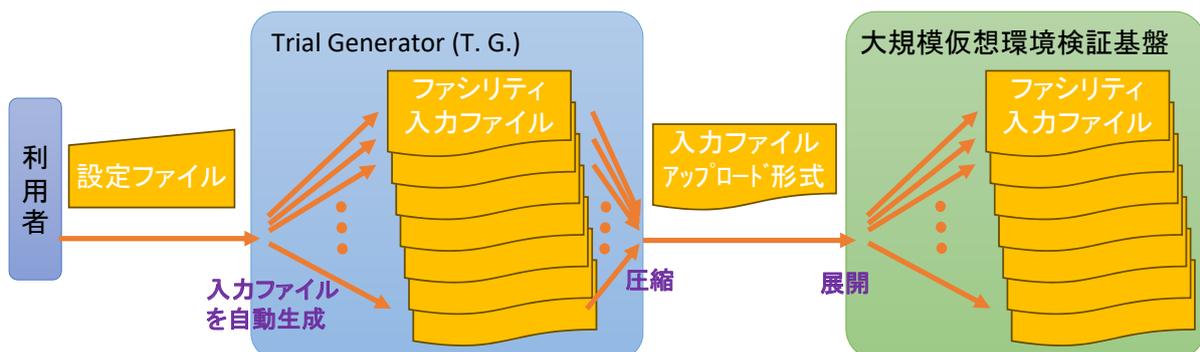
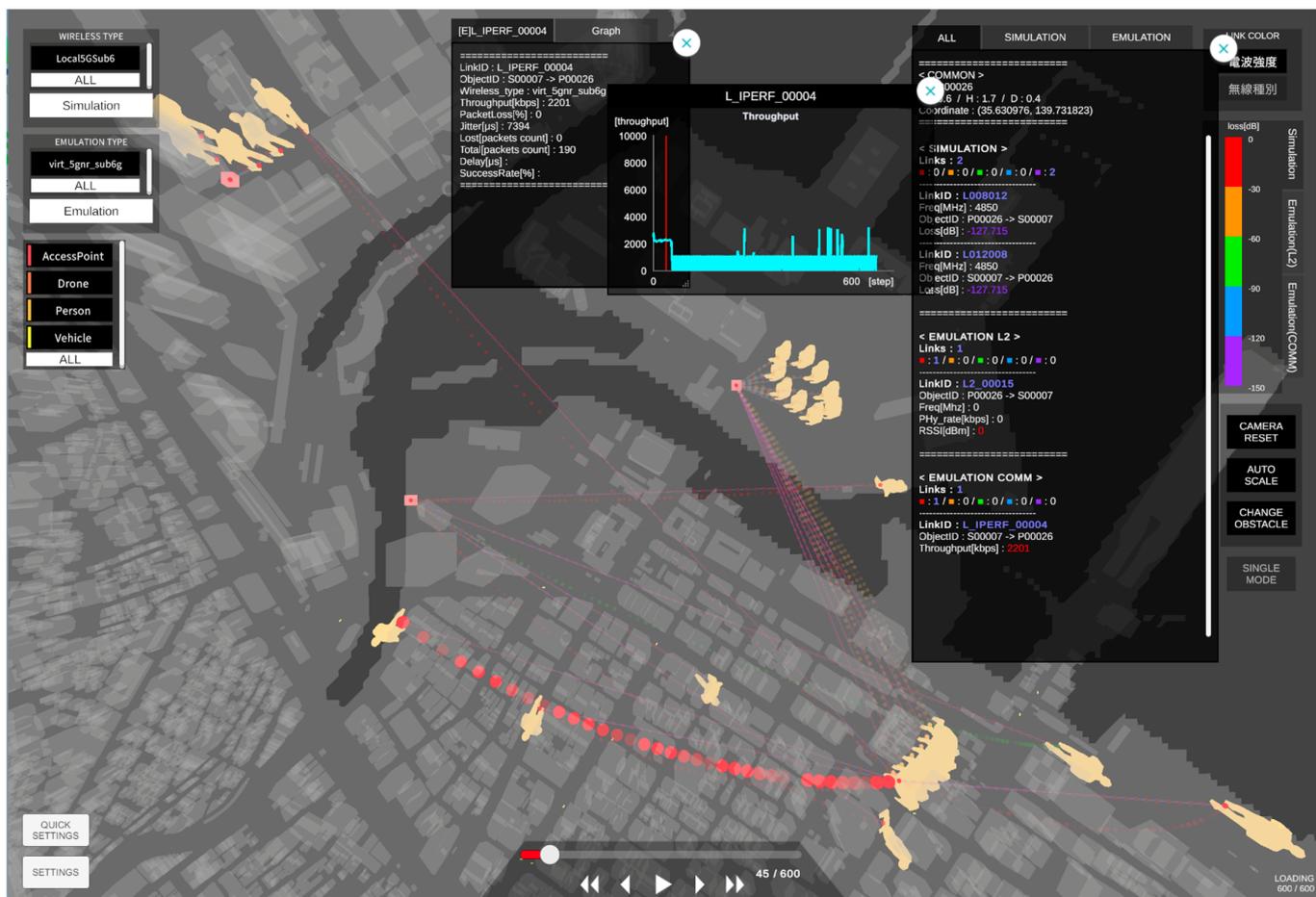


図27 TGの概要



(a)



(b)

図 28 ワイヤレスエミュレーションの結果出力例：(a) スマートオフィスシステム (b) 5G NR システム

WPTシステム	ステップ1、WPT管理環境			ステップ1、WPT一般環境			ステップ2以降		
	周波数帯	920M	2.4G	5.7G	920M	2.4G	5.7G	920M	2.4G
該当電波システム	工場			オフィス			スマートメータ	ドローン	B5G/ITS
共存シナリオ	シナリオA			シナリオB	シナリオC	シナリオD	シナリオE	シナリオF	

(a)

共存シナリオ	シナリオA	シナリオB	シナリオC	シナリオD	シナリオE	シナリオF
被干渉システムパターン	WLAN	WLAN/ロボット	WLAN/ロボット	RFID	WLAN/ロボット	WLAN/DSRC
共存条件	キャリアセンス	キャリアセンス/ 運用調整	キャリアセンス/ 運用調整	パッシブタグ 準拠	キャリアセンス/ 運用調整	離隔距離/ 運用調整

(b)

図 29 WPTシステムに関するワイヤレスエミュレーション機能拡張検討の概要：(a) WPTシステムの分類と、共存シナリオへの対応 (b) 各共存シナリオの共存条件

いる。図 28 (a) では、オフィスフロアにおいて、人が手元で操作する無線端末や、天井のアクセスポイント (Access Point (AP)) 等を含めた約 50 台の無線機が設置され、想定する無線利用シナリオに即して移動や通信を行う様子が時系列にわたって表示される。図中、直線で表示されるのは、参照される電波伝搬モデルに即した無線機間の伝搬損失を示している、対して曲線は、本エミュレーション中で実際のプロトコルスタックに即し実施された通信アプリケーション (本事例では iperf を実施) 性能を示している。このようなワイヤレスエミュレーションの実施と可視化により、実際の電波発射試験を行わずとも、AP の最適な配置検討等について、単純な電波伝搬計算等でなく、実際のアプリケーション性能を参照しながら進められることが予想される。また、図 28 (b) では、屋外エリア (横浜みなとみらい地区をモデル化) に数か所の基地局 (gNB) を設置し、10 数台の端末 UE が、それらのいずれかにアクセスし、通信を行っている様子を示している。図 25 にイメージを示したとおり、このような 5G NR システムの可視化については、FD アプリケーションの動作についても、適切なグラフィックにより明示化し、当該アプリケーションの実装に際して有意義な検証に資することが予想されている。

2.6 ワイヤレスエミュレータによるシステム間共存に関する検討

本節では、ワイヤレスエミュレータによる異種システム間共存に資する検証として、WPTシステムに関するワイヤレスエミュレーション機能拡張検討につい

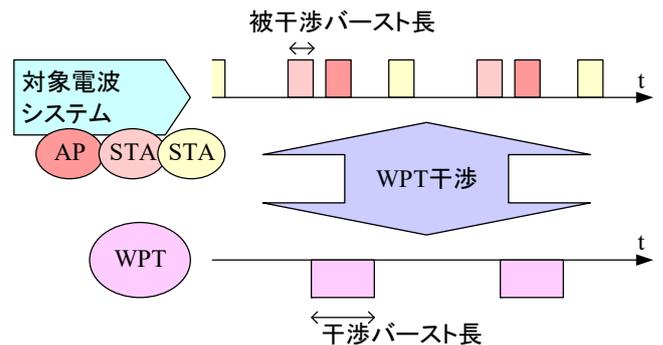


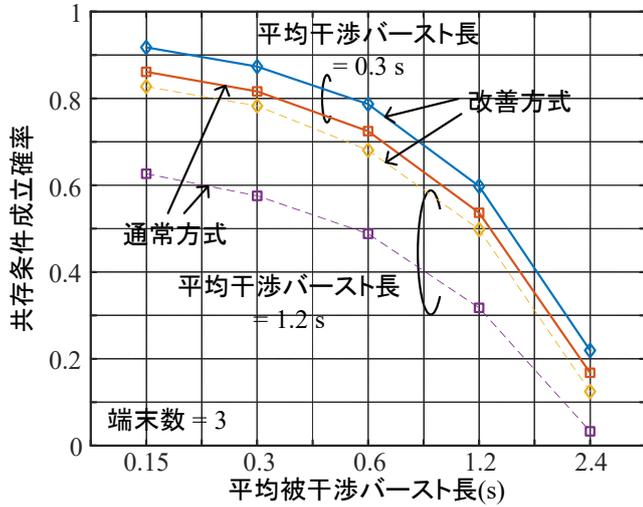
図 30 対象電波システムに対する WPT システムからの干渉状況

て述べる。図 29 に、当該機能拡張検討の概要を示す。図 29 (a) は、これまで「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムに関する情報通信審議会」等にて検討されてきた WPT システムの分類と、本研究開発において取り上げている電波システムとの対応について示している。本研究開発では、図 29 (a) のように、このような対応について、それぞれ共存シナリオとして、シナリオ A からシナリオ F までの 6 つの定義を行った。図 29 (b) は、このような共存シナリオそれぞれについて、上記審議会等で考えられている被干渉システムパターンと、共存条件についてまとめたものである。

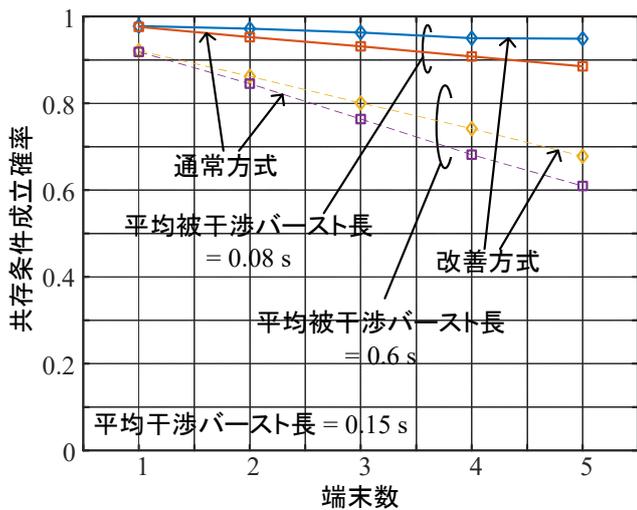
本研究開発においては、図 29 に示した共存シナリオのうち、シナリオ A として定義される、ステップ 1、WPT 管理環境におけるスマート工場システムに対する、WPT システムとの共存動作に関して、ワイヤレスエミュレーションによる動作特性検証の実現性について検討する。図 29 (b) に示したとおり、被干渉システムパターンとしては WLAN システムである

IEEE 802.11g プロトコルスタックを実装した仮想無線機によるエミュレーション評価を想定した。

図30に、本研究開発において想定する対象電波システムに対する WPT システムからの干渉状況を示す。



(a)



(b)

図 31 共存条件成立確率：(a) 端末数をパラメータとして評価 (b) 干渉バースト長をパラメータとして評価

対象電波システムの動作だけでなく、干渉 WPT システムの動作はいずれも図のように、バースト的に与えられるものと仮定し、それぞれの期間長を、被干渉バースト長、干渉バースト長として定義する。平均的な被干渉バースト長を Frame Period (FP)、平均的な干渉バースト長を、Coexistence Period (CP) として定義し、ワイヤレスエミュレーションにおいてはそれぞれ次の数式で与えられるとした。

$$FP=96 \times 2^{FO} \text{ (ms)} \quad (1)$$

$$CP=96 \times 2^{CO} \text{ (ms)} \quad (2)$$

式(1)、式(2)に示すとおり、FP と CP はそれぞれパラメータである Frame Order (FO)、Coexistence Order (CO) により決定されるとした。

共存シナリオであるシナリオ A において、IEEE 802.11g プロトコルスタックに対する WPT システムとの共存条件の成立確率について、計算機シミュレーションによる評価を行った。図 31 に、評価結果を示す。本評価にあたり、図 30 における対象電波システム側で、動作する各無線機の被干渉バースト長のタイミングについて特に制御を行わない方式を通常方式、対して、無線機同士で、当該被干渉バースト長のタイミングを合わせる等して、WPT システムからの干渉の影響を受けることを減らすような制御を行う方式を改善方式として、それぞれ特性比較を行った。

図 32 に、以上の計算機シミュレーションの評価結果を踏まえ共存条件成立確率を加味したワイヤレスエミュレーション結果を示す。ここでは、共存条件成立確率が 100 % の場合、80 % の場合 (それぞれ、WPT time factor = 0 %、20 %) について、ワイヤレスエミュレーション結果である UDP スループットの比較を行い、特性の劣化を確認することができた。本実証により、WPT システムの影響を前述の計算機シミュレーション結果のようにモデル化することで、ワイヤレスエミュレーション内で反映することができ、それによって生じる対象電波システムの特性評価が可能となることを示した。

TX Power [dBm]	PL [dB]	RSSI [dBm]	SNR [dB] (noise floor - 95dBm)	PER [%]	WPT time factor [%]	UDP throughput [Mbps]
18	80	-62	33	0.32%	0.0%	5.33
18	80	-62	33	0.32%	20.0%	4.25
18	108	-90	5	9.29%	0.0%	4.84
18	108	-90	5	9.29%	20.0%	3.89

図 32 WPT システムによる影響を加味したワイヤレスエミュレーション結果

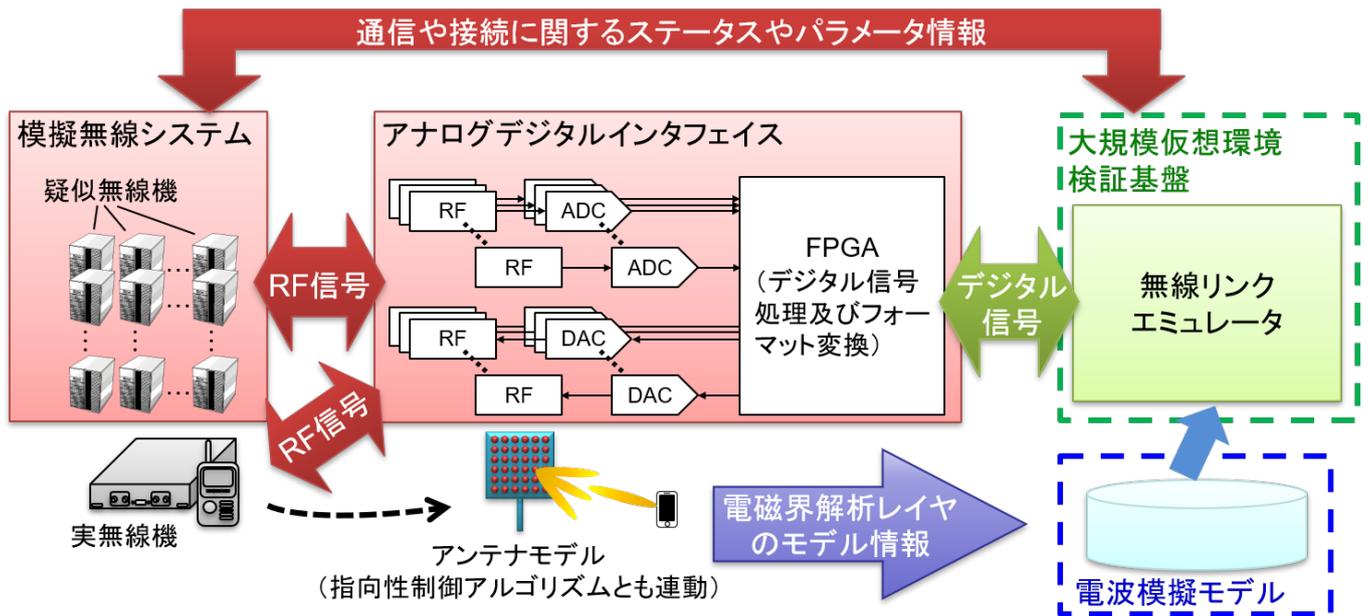


図 33 電波模擬統合プラットフォームの概要

3 無線通信システム評価のための電波模擬統合プラットフォーム

3.1 概要

大規模仮想環境検証基盤における B5G を志向した電波模擬統合プラットフォームは、2030 年頃の社会実装が想定される B5G の電波検証、無線通信システム検証などに資する模擬無線システムの実現を目的としている。そのため、5G NR(New Radio)や IEEE 802.11ax などの無線通信システムの評価が可能であり、評価環境としてもミリ波帯・準ミリ波帯や 400 MHz 信号帯域幅に対応している。加えて、現実的な実無線機の模擬を実現するためにアンテナ放射パターンを反映し、ビームフォーミング機能の検証にも活用できる。本節では、電波模擬統合プラットフォームの構成、主要な構成要素、5G NR の実装とそれを用いた評価について述べる。

3.2 電波模擬統合プラットフォームの構成

電波模擬統合プラットフォームの概要を図 33 に示す。本プラットフォームは主に模擬無線システムとアナログデジタルインタフェイス (ADDA IF) で構成され、模擬無線システムを構成する疑似無線機もしくは実無線機の RF 信号を ADDA IF でデジタル信号に変換し、大規模仮想環境検証基盤の HW 無線リンクエミュレータに入出力する [6]。HW 無線リンクエミュレータの対応リンク数は、標準仕様において最大 256 × 256 リンクである。横須賀の YRP2 番館 5 階に設置した電波模擬統合プラットフォームの外観を図 34 に示す。各構成要素の詳細については次節以降に詳述する。

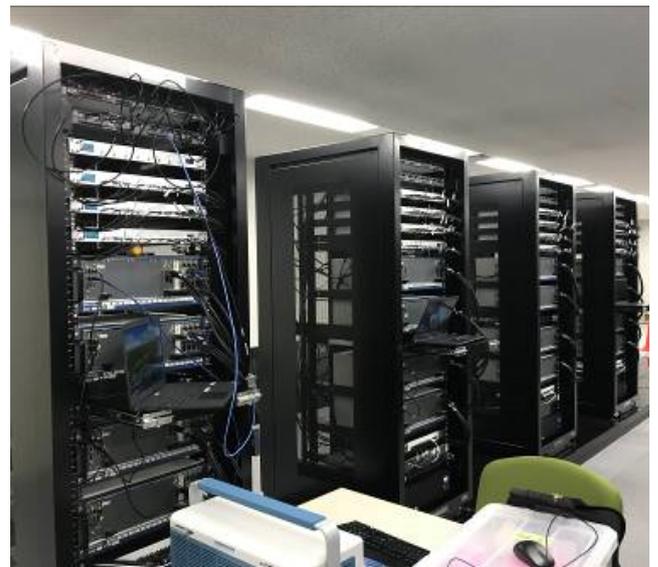


図 34 電波模擬統合プラットフォームの外観

3.3 模擬無線システム

模擬無線システムは、ソフトウェアで再定義可能なソフトウェア無線機 (Software Defined Radio, SDR) をベースとした疑似無線機を用いて構成している。1 台の疑似無線機は送受信それぞれ 4 ポートに対応しており、64 台の疑似無線機により送受信それぞれ最大 256 ポートに対応する。具体的な実装としては、送受信それぞれ 64 ポートの疑似無線機を 1 構成単位 (1 Quadrant) とし、4 Quadrant が結合されて送受信それぞれ最大 256 ポートのシステムを構成する。各 Quadrant は 1 台のメイン PC によって制御され、メイン PC からは HUB を介し、LAN ケーブルによって 16 台の PXI システム (NI 製のテストエンジニア用コン

ピュータ)が接続されている。1つのPXIシステムに疑似無線機が1台接続され、1 Quadrant 当たり送受信それぞれ64ポートに対応する。本疑似無線機には5G NRやIEEE 802.11axに準拠した無線通信システムを適用できる。一定の専門的な知識は必要であるが、各無線通信システムのパラメータをカスタマイズすることもでき、様々な評価が可能である。また、これらの疑似無線機群には操作制御装置からアクセスでき、オンサイトでの操作に加えてVPNを介して外部のユーザからも利用可能な構成にもできる。

3.4 アナログデジタルインタフェイス

ADDA IFの構成と外観を図35に示す。ADDA IFは、実無線機の送信部及び受信部にそれぞれ接続されるADC、DAC及びHW無線リンクエミュレータへの経路割当て処理を行うFPGA部で構成される。ADC、DACのいずれも最大6GHzに対応し、帯域幅は400MHzまで対応できる。無線機の送信信号が入力されるADCは、入力信号電力範囲を $-40 \sim +15$ dBmとした。無線機の受信信号を出力するDACは、出力信号電力範囲を $-110 \sim -20$ dBmを目安に設計した。なお、実装回路の周波数特性の影響により、これらの値は周波

数によって異なる。また、400 MHz帯域内の周波数特性は、HW無線リンクエミュレータと結合したADCからDACまでの入出力特性として ± 2 dB以下を目標とした。

ワイヤレスエミュレータでの実無線機評価では、入出力レベルのダイナミックレンジを十分に確保する必要がある。特にDACは無線機の受信信号を出力するため、前述の仕様から、少なくとも90 dBのダイナミックレンジが必要である。さらに、レイリーフェージングによる受信信号電力の瞬時変化も考慮すれば、110 dBのダイナミックレンジの確保が理想である。一方、DACで用いたDAC ICのダイナミックレンジが約50 dBであるため、DACの出力に接続した高周波回路に多段の可変減衰器(ATT, Attenuator)を挿入し、無線機への入力レベルを調整できる設計とした。シナリオの進行に沿ってパスロスを変化させる場合には、シナリオ上で想定される無線機の受信信号電力に合わせて可変ATTとHW無線リンクエミュレータのパスロスを調整する。

3.5 ハードウェア無線リンクエミュレータ

HW無線リンクエミュレータでは、6タップを基本構成とするTDL(Tapped Delay Line)パス演算部によって1リンクの電波伝搬を模擬する[7]。図36に、パス演算部のブロック構成を示す。標準信号帯域幅は100 MHzで、動作クロックは200 MHz、遅延分解能は5 nsである。初段に固定の遅延を与え、タップ間の遅延は独立かつ可変に設定できる。初段の固定遅延及び初段を含む各タップ間の遅延は最大 $5.12 \mu\text{s}$ まで設定できる。したがって、本パス演算部で設定可能な最大遅延は $35.84 \mu\text{s}$ である。

TDLからの出力IQ信号の振幅ダイナミックレンジは、後段の複素乗算器の仕様により25 bitに制限される。TDLに入力されるIQ信号(すなわち、AD変換されたRF信号)の振幅ダイナミックレンジが15 bitの場合、フェージングによる振幅変動は10 bitとなる。また、複素乗算器に入力されるパスロス値のダイナミックレンジは17 bitであり、出力IQ信号の振幅ダイナミックレンジは、理想的には42 bitとなる。

パス演算部はFPGA(Field-Programmable Gate Array)ボード(AMD Alveo U250)に実装している。1枚のFPGAボードのパス演算処理の規模は 16×16 リンクで、256枚のFPGAボードにより 256×256 リンクを実現している。なお、最大リンク数は、最大信号帯域幅、TDLのタップ数、タップ間隔の分解能、最大遅延等とトレードオフの関係にある。例えば、信号帯域幅400 MHz、タップ数24、最小タップ間隔5 ns、最大遅延 $70 \mu\text{s}$ の条件では、同じ規模の構成で扱える

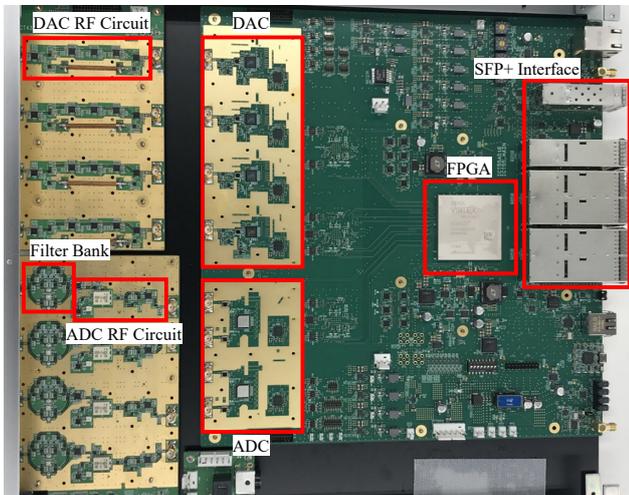
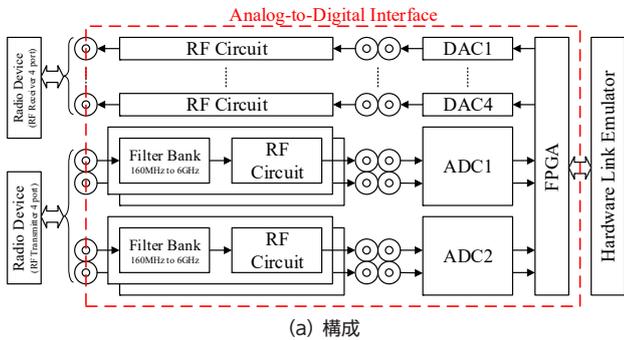


図35 アナログデジタルインタフェイスの構成と外観

2 Beyond 5G の要素技術

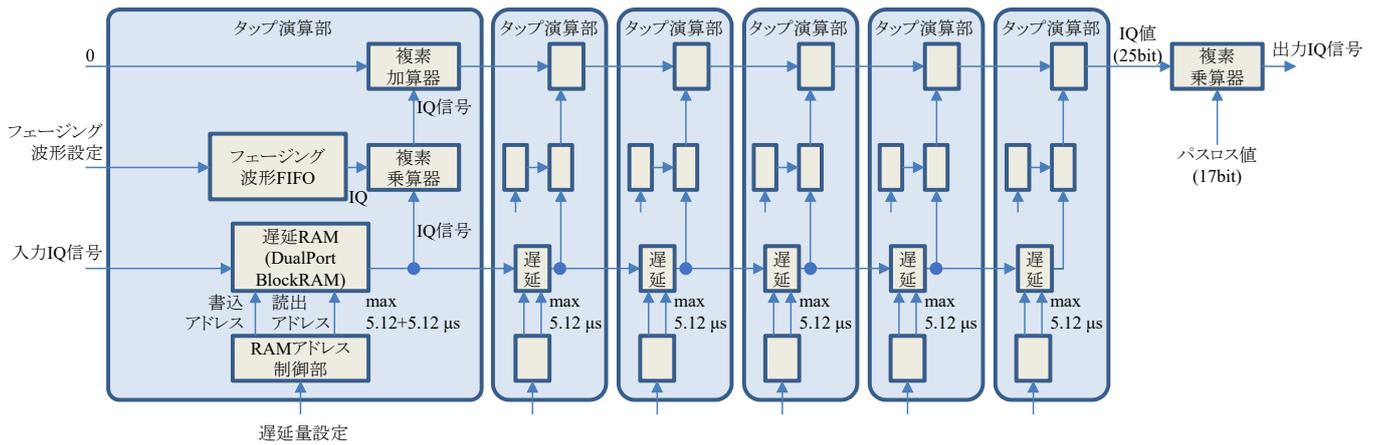


図 36 6タップのTDLパス演算部

表 2 5G NR の主な仕様

項目	仕様
通信規格	5G NR
対応周波数	Sub-6 GHz 帯
信号帯域幅	100 MHz
サブキャリア間隔 (SCS)	30 kHz
空間多重	SISO、DL 2 layer、DL 4 layer、DL 2 × 2 MIMO、DL 4 × 4 MIMO
一次変調	QPSK、16QAM、64QAM、256QAM
符号処理 / 復号処理	PDSCH 及び PUSCH の LDPC 符号化 / 復号化 PDCCH 及び PUCCH の Polar 符号化 / 復号化

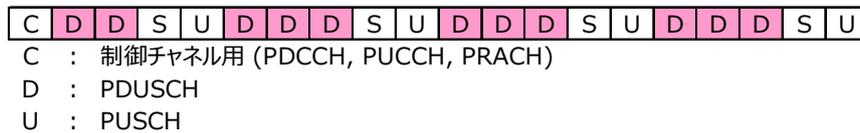


図 37 20 スロットのリソース割当て

最大リンク数は 64×64 となる。

3.6 5G NR 実装技術

5G NR の主な仕様を表 2 に示す [8]。対応周波数は疑似無線機の仕様である 10 MHz から 6 GHz までの任意の周波数に対応可能とするが、測定及び性能評価は 5G 及びローカル 5G の運用周波数帯、すなわち、3.7 GHz 帯、4.7 GHz 帯で実施する。また、100 MHz 帯域幅、サブキャリア間隔 30 kHz とする。図 37 に全 20 スロットのリソース割当てを示す。PDSCH (Physical Data Shared Channel) に割り当てる PRB (Physical Resource Block) を 0 ~ 273 (273 PRB) とし、割り当てる OFDM シンボルを 1 ~ 11 (11 Symbol) としている。図 38 に gNB と UE の 1 対 1 通信における 4×4 MIMO の有線接続による評価系の構成例を示す。可変 ATT

に加えてスプリッタを使用して gNB の各送信ポートからの信号を UE の受信 4 ポートに分配している。

図 38 の測定系を用いて、1 対 1 (DL 4×4 MIMO) 時の各一次変調の通信基本特性として送信波形、送信スペクトラム、コンスタレーション、スループットなどの基本特性を確認した。図 39 に、代表的な評価結果として 256QAM の条件における評価結果を示す。いずれの一次変調についても、送信側の UI 上で理想的なコンスタレーション配置を示している。また、良好な送信スペクトラムが得られており、スループットも送受でほぼ劣化がなく良好な結果であった。

3.7 電波模擬統合プラットフォームの評価

開発した HW 無線リンクエミュレータ及び ADDA IF を結合し、HW 無線リンクエミュレータとしての性

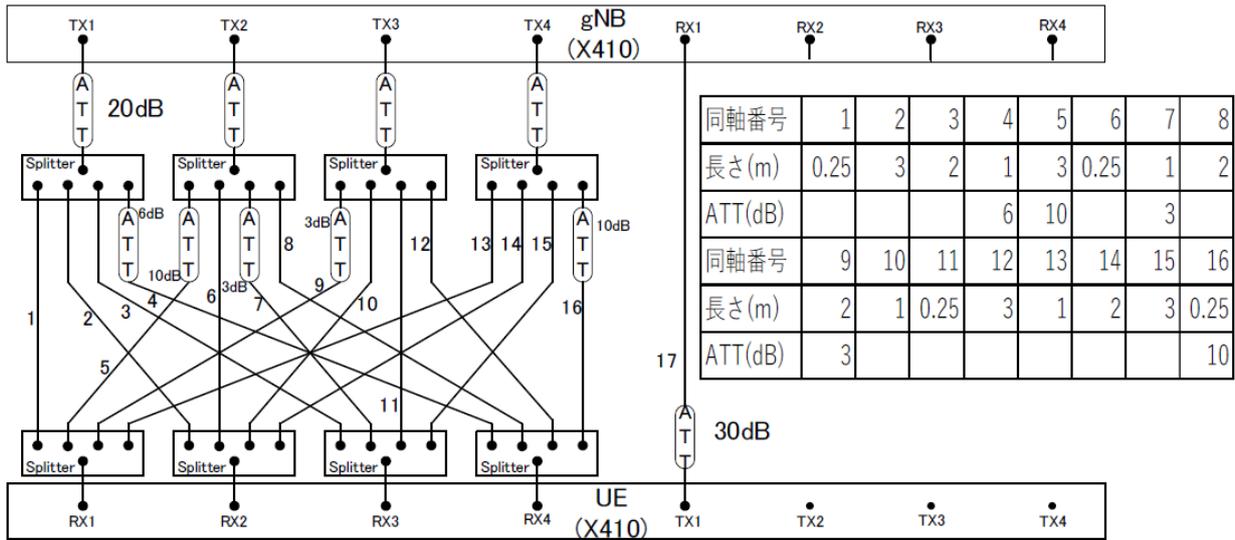


図 38 疑似無線機による 1 対 1 (4 × 4 MIMO) 接続構成例



(a) gNB DL 動作確認画面



(b) gNB UL 動作確認画面



(c) UE DL 動作確認画面



(d) UE UL 動作確認画面

図 39 1 対 1 (DL 4 layer, 256QAM) 基本特性測定結果

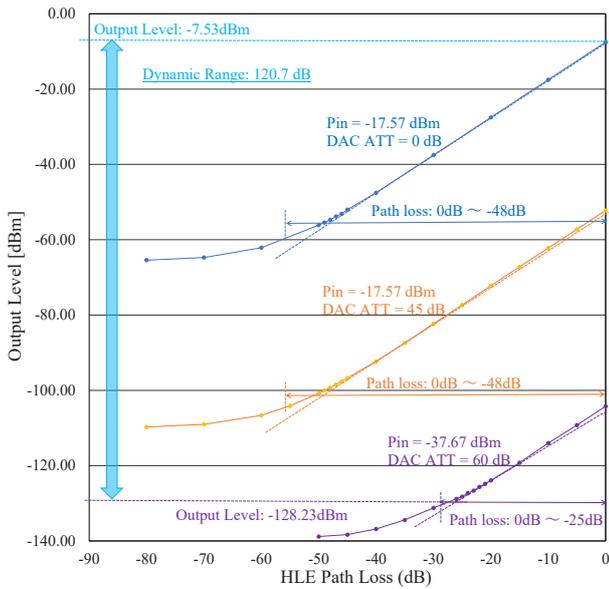


図 40 HW 無線リンクエミュレータの信号出力レベルのダイナミックレンジ評価

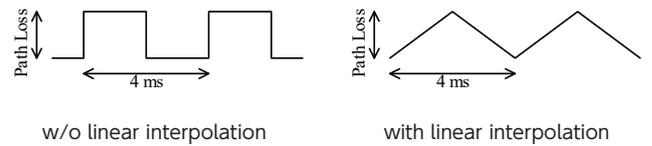
能評価及び検証を行った [7]。基本特性の評価は主に無変調連続波 (Continuous Wave, CW) を用いて実施し、総合的な評価項目は、これまでに開発した 5G NR を実装した疑似無線機 [8] を用いて通信性能を評価した。また、商用フェージングエミュレータとして PropSim (Keysight 製) を用いた比較評価も行った。

3.7.1 処理遅延

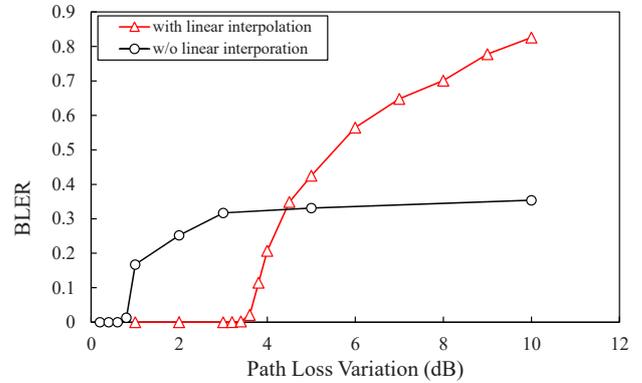
HW 無線リンクエミュレータの基本的な処理遅延時間を評価するため、ADDA IF と HW 無線リンクエミュレータを結合し、図 36 の初段の固定遅延及び各タップ間の遅延をいずれも $0 \mu\text{s}$ に設定し、ADC の入力ポートから HW 無線リンクエミュレータを経由して DAC の出力ポートまでの信号の伝送時間を測定した。DAC に実装した FIR (Finite Impulse Response) フィルタの段数や通過帯域の調整により、 $2.74 \mu\text{s}$ の処理遅延時間が得られた。これは商用フェージングエミュレータの処理遅延時間 $2.56 \mu\text{s}$ とほぼ同等である。

3.7.2 ダイナミックレンジ

HW 無線リンクエミュレータのパスロスと ADDA IF の DAC の ATT 設定を変化させて、実無線機の受信ポートに入力される信号レベルのダイナミックレンジを測定した。4.05 GHz で CW を用いた測定結果を図 40 に示す。ADC への入力レベルを -17.57 dBm とし、DAC の可変 ATT を 0 dB に固定して HW 無線リンクエミュレータのパスロスを変化させた場合、約 48 dB のダイナミックレンジが確保でき、DAC の最大出力として -7.53 dBm が得られた。ここで DAC の出力が ADC への入力に対して増幅されているが、これは DAC の高周波回路部に実装した増幅器の影響によ



(a) 線形補完



(b) パスロス変動量に対する BLER 特性

図 41 パスロス変化時の通信特性への影響

る。また、ADC への入力レベルを -37.67 dBm とし、DAC の可変 ATT を 60 dB に固定して HW 無線リンクエミュレータのパスロスを変化させた場合、約 25 dB のダイナミックレンジが確保でき、DAC の最小出力として -128.23 dBm が得られた。したがって、HW 無線リンクエミュレータのパスロスに対して可変 ATT を適切に設定することで、最大 120.7 dB のダイナミックレンジが得られることが確認できた。なお、 5 GHz 以上の高い周波数帯では、実装部品の周波数特性などの影響によりダイナミックレンジが縮小される。一例として、 5.6 GHz 帯のダイナミックレンジは 100.6 dB であった。

シナリオの進行に沿って電波伝搬条件が変動する場合、出力の条件に合わせて HW 無線リンクエミュレータのパスロスと DAC の可変 ATT の組み合わせを変える必要がある。この時、パスロスと可変 ATT の変化が急峻であると通信特性に影響を及ぼす恐れがあるため、変化を緩和するために線形補間の適用を検討した。パスロス及び可変 ATT の変化と線形補間の有用性を評価するため、図 41 (a) の 4 ms 周期の単純変化をパスロスに与える条件と変化点の間を線形に補間する条件を適用し、256QAM に設定した 5G NR を用いてパスロスの変化量に対する BLER (Block Error Rate) を評価した。パスロス変動の範囲を $0\text{--}10 \text{ dB}$ として測定した結果を図 41 (b) に示す。線形補間無しの場合では、パスロスが 1 dB 変化するだけで BLER が劣化した。線形補間ありでは、パスロスが 3 dB 変化しても BLER は劣化しなかった。 2 ms で 3 dB の変化

表 3 パス間相関値の測定結果

Emulator	Combination of Path (Tap)	No. of waves	Random Fluctuation	Correlation
HLE	1 (1), 2 (1)	10	No	0.339
HLE	1 (1), 2 (1)	10	Yes	0.037
HLE	2 (1), 3 (1)	10	Yes	0.038
HLE	1 (1), 2 (2)	10	Yes	0.042
HLE	3 (3), 4 (5)	10	Yes	0.038
HLE	1 (1), 2 (1)	20	Yes	0.040
HLE	1 (1), 2 (1)	30	Yes	0.035
HLE	1 (1), 2 (1)	60	Yes	0.042
Commercial	1 (1), 2 (1)	-	-	0.041

※ HLE: ハードウェア無線リンクエミュレータ

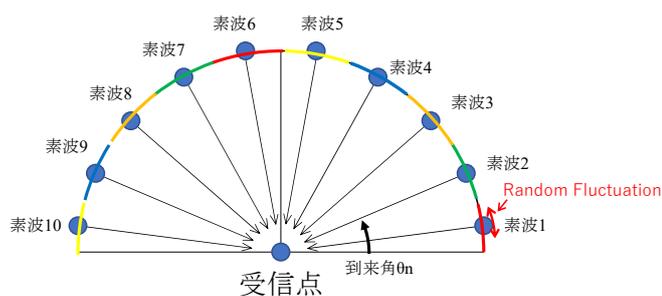


図 42 10 素波によるレイリーフェージング生成

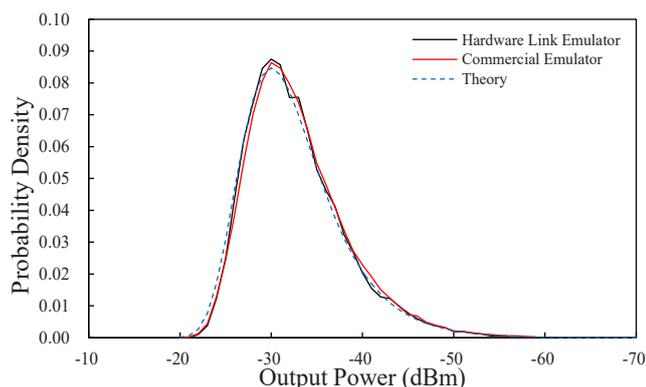


図 43 10 素波によるレイリーフェージング生成

は送信点から 1 m の地点で 450 m/s の移動に相当する非現実的な速度であり、本線形補間の手法は十分に効果があると言える。また、この結果は、シナリオと連動して HW 無線リンクエミュレータのパスロスと DAC の可変 ATT の組み合わせを変更する場合、1 dB ごとに切り替えても通信特性に影響を与えないことを示唆している。なお、図 41 (b) の結果では、線形補間無しの場合には大きくパスロスを変化させても BLER は 0.3 までしか劣化しなかった。これは通信特性がパスロスの変化点のみで劣化し、変化のない区間は安定した通信特性が得られているためと考えられる。

3.8 レイリーフェージング

多数の散乱物が存在する環境では、異なる経路を伝搬する多くの素波が受信機に到来する。この際、到来波の位相関係によって受信信号のレベルが大きく変動する。これをフェージングと呼ぶ。特に見通し内の到来波が存在しないレイリーフェージングでは、受信信号レベルが急激に落ち込む頻度が高くなる。HW 無線リンクエミュレータでは、各タップにおいて 10 個の素波を到来波として重畳することでフェージングを表現する。図 42 に評価に使用したレイリーフェージング生成モデルの概要を示す。受信点を中心として、角度 0-180° の半円弧を 10 等分し、各円弧の中央点から受信点に向かって同一強度の信号が到来することでレイ

リーフェージングを生成する。ここで、各円弧の中央点から、円弧長の ± 20 % の範囲で一様分布の乱数を与え、パス間の相関を低減する手法も適用する。

図 43 に 3.7 GHz の CW を用いたレイリー分布の測定結果を示す。ドップラ周波数は 342.59 Hz とし、90396 サンプルの出力電力の変化を確率密度として示している。参考に、商用フェージングエミュレータとの比較を示す。レイリー分布の特性は理論値及び商用フェージングエミュレータを用いた測定結果と良く一致した。

次に、パス間の相関を評価した。SG (Signal Generator) から ADDA IF の ADC に CW を入力し、HW 無線リンクエミュレータの異なるパスもしくは異なるタップを経由して、異なる DAC に入力する。DAC で変換されたアナログ信号を異なる SA (Signal Analyzer) に入力し、振幅レベルの時系列変動の相関値を取得した。ここで、2 つの SA 間でクロックを共有し、測定タイミングのずれを軽減した。パスとタップの組み合わせや評価条件を変えて評価した結果を表 3 に示す。まず、素波の到来角に乱数を与えない条件では相関値が 0.339 であった。これに対し、乱数を与えることで相関値は 0.037 と大幅に改善することが確認できた。タップやパスの組み合わせを変えて評価した結果、最大相関値は 0.042 で、パスやタップの依存性はみられなかった。商用フェージングエミュレータを用いた場合の相関値は 0.041 であり、同等の性能であることが確認できた。また、素波数を 20、30、60 と増やしても相関値に大きな改善は見られず、素波数は 10 で十分であることが確認できた。

3.9 3GPP モデルによる評価

HW 無線リンクエミュレータは、一つのリンクの基本パス数を 6 とするが、2 つ以上のリンクを結合

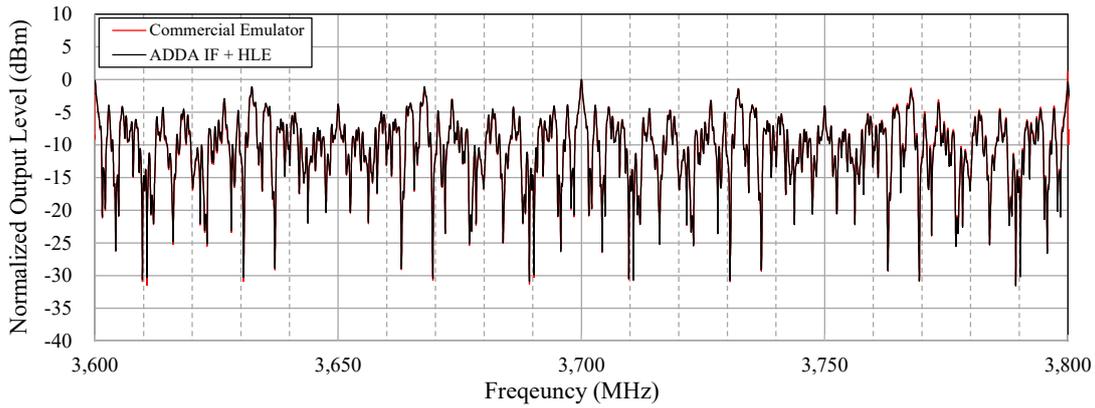


図 44 EVA モデル適用時の周波数特性

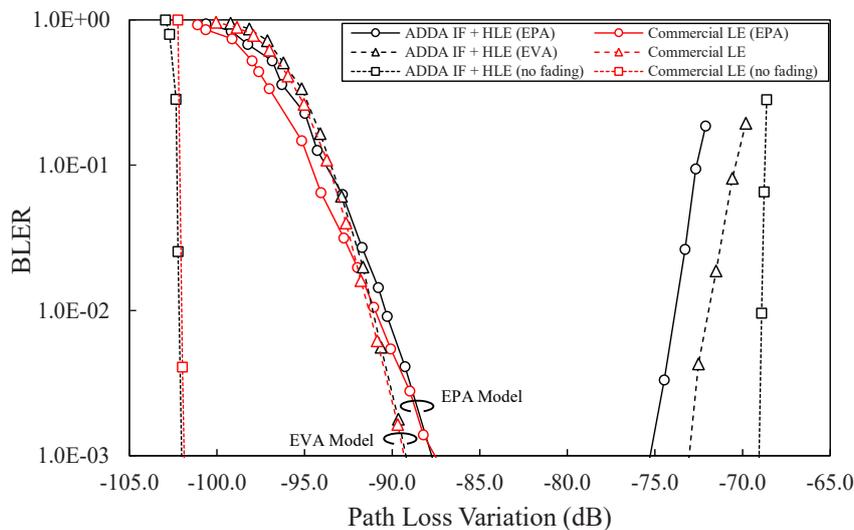


図 45 マルチパスフェージング適用時の 5G NR による BLER 評価結果

して7パス以上のチャンネルモデルに対応できる。本節では、2つのリンクを結合し、3GPPの規格であるEPA (Extended Pedestrian A mode) モデルとEVA (Extended Vehicular A mode)モデル [9]を適用し、周波数特性及び5G NRを用いた通信特性を評価した。

まず、EPAモデル及びEVAモデルを適用し、ドップラ周波数を与えずに静特性として周波数特性を評価した。無線リンクエミュレータ及び商用フェージングエミュレータにそれぞれチャンネルモデルパラメータを適用し、SGから連続波(CW)を入力し、200 MHz以上の帯域幅をスイープさせてSAで周波数特性を評価した。なお、エミュレータ内部の周波数特性及び出力特性をあらかじめ取得し、それらの特性を補正した上で比較評価を行った。図44に、一例としてEVAモデル適用時の周波数特性を示す。商用エミュレータを用いて測定した周波数特性とよく一致している。

次に、中心周波数を3.7 GHzとし、EPAモデル、EVAモデルを用いてドップラ周波数3 Hzの条件で、QPSKの5G NRによる通信特性を評価した。5G NRは

AGC (Automatic Gain Control) 機能を実装しておらず、Attach時に受信ゲインが決まる設計であるため、Attachレベルを-80 dBmとして受信ゲインが一定になるように調整して評価した。図45に受信電力に対するBLER特性の評価結果を示す。比較評価のため、商用フェージングエミュレータを用いた測定結果も示す。EPAモデル、EVAモデルのいずれも、商用フェージングエミュレータとはほぼ同等のBLER特性が得られ、特性差は約1 dBであった。なお、商用フェージングエミュレータでは、出力範囲としてRSRP \geq -75 dBmには対応できておらず、BLERの測定ができなかった。それに対し、本無線リンクエミュレータは強入力時の特性劣化まで評価できており、出力性能が優れていると言える。

3.10 周波数特性補正

無線リンクエミュレータの最大周波数帯域幅は400 MHzで設計している。これは5G NRで規定される最大帯域幅に対応するだけでなく、例えば隣接チャ

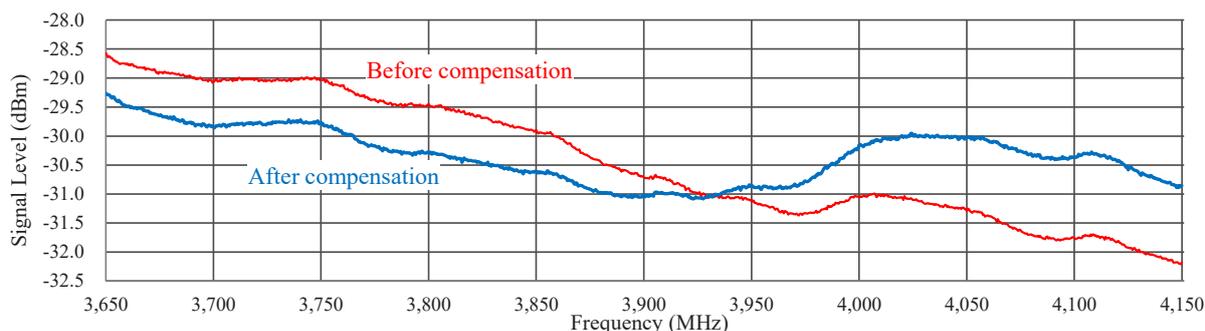


図 46 イコライザによる周波数特性補正



図 47 シンポジウムでのデモ展示の様子

ネルを対象とした干渉耐性の評価等に対応することを目的としている。一方で、主に ADDA IF の高周波回路素子の影響などにより、周波数によっては 400 MHz 帯域幅で 4.0 dB 以上の周波数特性が生じる。この周波数特性を補正するため、ADDA IF にイコライザ (EQ, Equalizer) を実装した。EQ は 4 段の FIR フィルタによるシンプルな構成とした。

補正効果の測定結果の一例を図 46 に示す。3.9 GHz を中心として ± 200 MHz の範囲での周波数特性は、補正無しでは 3.5 dB 以上のレベル差を有していたが、EQ に適切なパラメータを設定することで、2.0 dB 以下に抑制できることが確認できた。なお、400 MHz 帯域幅の周波数特性は概ね単調変化であり、4.5 GHz 帯や 5.2 GHz 帯など、複数の周波数帯で十分に補正できることも確認した。また、5G NR を用いて通信特性に影響がないことも確認できた。

4 統合実証

「令和 5 年度ワイヤレスエミュレータ利活用シンポジウム」において、統合実証のデモを行った。具体的には、図 47 に示すように、ワイヤレスエミュレータを利用した 5G NR 疑似無線機の評価環境として、総合テストベッド研究開発推進センターが開発した北陸の TG に設定したシナリオに基づいて、横須賀に設置した疑似無線機、ADDA IF 及び HW 無線リンクエミュ

レータのパラメータを遠隔で変化させ、東京の可視化画面上に表示させる評価系を構築することに成功した。また、横須賀に設置した 5G NR を実装した疑似無線機を東京から個別に遠隔制御できる環境も構築し、遠隔制御画面上に無線リンクエミュレータを介した 5G NR の詳細な通信特性を表示させて確認できることを示した。さらに、評価環境の可視化画面上に評価対象である 5G NR 基地局及び端末を表示させ、端末の移動に伴い変化するリンク状態を ADDA IF 及び HW 無線リンクエミュレータのパラメータ制御により無線リンクエミュレータに反映させ、さらに 5G NR の通信状態として受信電界強度やスループットなどを評価できることを実証した。デモにおいては、シナリオと連動した通信品質等の評価環境の構築と実証に成功した。

謝辞

本研究開発は、総務省の「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化に向けた研究開発 (JPJ000254)」によって実施した成果を含む。

【参考文献】

- 総務省, “Beyond 5G 推進戦略 – 6G へのロードマップ,” 2020 年 6 月.
- F. Kojima, T. Miyachi, T. Matsumura, H. Sawada, H. Harai, and H. Harada, “A Large-Scale Wireless Emulation Environment with Interaction between Physical and Virtual Radio Nodes for Beyond 5G Systems,” IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Kyoto, Japan, 2022, pp. 1–6, Sept. 2022.
- NICT 報道発表, “仮想空間上で電波利用システムを模擬・評価するワイヤレスエミュレータを用いて Wi-SUN FAN 無線機 10,000 台の通信試験に成功,” https://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/PL/PL_2024_01.html, <https://www.nict.go.jp/press/2024/01/31-1.html>
- K. Akashi et al., “NETorium: high-fidelity scalable wireless network emulator,” Proc., AINTEC 2016, pp.25–32, 2016.
- G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.18, no.3, pp.535–547, March 2000.
- 松村, 沢田, 宮地, 児島, 原井, 原田, “[依頼講演]サイバーフィジカル融合によるワイヤレスシステムエミュレーション用プラットフォーム,” 信学技報, vol.121, no.145, SRW2021-26, pp.39–44, 2021 年 8 月.
- 松村, 児島, 原井, 高田, 原田, “[依頼講演]ワイヤレスエミュレータによる実無線機評価のための無線リンクエミュレータの設計開発及び検証,” 信学技報, vol.123, no.436, SRW2023-75, pp.112–117, 2024 年 3 月.
- T. Matsumura, H. Kawasaki, and K. Iibuka, “SDR-based 5G NR System

2 Beyond 5G の要素技術

Verification with Video Transmission for Wireless Emulator," Proc. WPMC2023, Nov. 2023.

- 9 ETSI, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 10.3.0 Release 10)," June 2011.



児島 史秀 (こじま ふみひで)

ソーシャルイノベーションユニット
総合テストベッド研究開発推進センター
研究開発推進センター長
博士(工学)
無線通信、MAC、ワイヤレスエミュレーション、
テストベッド
【受賞歴】

2019年 第64回 前島密賞
2018年 第55回 電子情報通信学会 業績賞
2014年 第12回 産学官連携功労者表彰 総務
大臣賞



松村 武 (まつむら たけし)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
ワイヤレスシステム研究室
室長
博士(工学)
無線通信、無線デバイス、ネットワーク
【受賞歴】

2022年 第33回電波功績賞総務大臣表彰