

V2X 環境における無線伝送特性をデジタルツインで評価する ワイヤレスエミュレータを開発

概要

国立大学法人 京都大学大学院情報学研究科の原田博司教授の研究グループ（以下 京都大学）は、自動運転支援や交通事故の低減を目的とした V2X（Vehicle-to-Everything）¹ 環境において、実空間に無線機を設置して伝送試験を行うことなく、実環境における無線伝送特性を評価できるデジタルツイン技術²を用いたワイヤレスエミュレータ³を開発しました。本ワイヤレスエミュレータは、都市空間の 3D データ、基地局および端末の配置、利用する無線通信システムの情報および端末の移動パターンを入力することにより、端末移動時の電波伝搬特性を生成します。さらに、生成した電波伝搬特性を、電波伝搬環境を実験室内で再現するフェージングエミュレータに入力することにより、屋外実験を行うことなく、実環境における無線伝送特性を実験室内で評価できます。このワイヤレスエミュレータを用いて V2X 交差点環境における 5G 信号の伝送特性を評価し、屋外実験結果との比較により、実用レベルの再現性を有することを確認しました。本成果により、実空間に無線機を設置して伝送試験を行うことなく、現実の無線環境を模擬した検証が可能となり、V2X をはじめとする無線通信システムの研究開発および性能評価の効率化が期待されます。

■ポイント

- ・ 都市空間の 3D データ、基地局・端末の配置、無線通信システムの情報および端末の移動パターンから、実環境における電波伝搬特性を生成するデジタルツイン技術を用いたワイヤレスエミュレータを開発
- ・ 生成した電波伝搬特性から、端末移動時の連続的なチャネルインパルス応答を生成し、市販のハードウェアフェージングエミュレータと組み合わせることで、実環境における無線伝送特性を実験室内で評価できる環境を実現
- ・ V2X を想定した実際の交差点環境における 5G NR 信号の屋外実験結果と比較し、受信信号電力、遅延スプレッドおよび BLER 特性を評価した結果、実環境の無線伝送特性を一定の精度で再現・評価できることを確認

1. 背景

近年、第 5 世代移動通信システム (5G) を活用したさまざまなアプリケーションの研究開発が進められています。例えば、自動運転支援や交通事故の低減を目的とした V2X (Vehicle-to-Everything) では、5G などのセルラー通信技術を適用した Cellular-V2X の検討が進められています。V2X では、5.9 GHz 帯の利用が検討されており、交差点に設置された路側機を介して車両間で情報を共有することにより、交通事故の防止や交通流の円滑化を図ることが期待されています。このような V2X 通信システムの性能を評価するためには、実環境における電波伝搬特性および 5G システムの伝送特性を把握する必要があります。しかし、5.9 GHz 帯で屋外実験を実施するためには、詳細な干渉評価や周波数共用の検討が必要となります。また、交差点は車線数や道路構造、周辺建物の配置、都市部・郊外といった周辺環境が大きく異なるため、多様な環境における評価が求められます。このため、実環境における実証実験には多大な時間とコストを要するという課題があります。これらの課題を解決する手段として、ワイヤレスエミュレータの活用が期待されています。ワイヤレスエミュレータは、地図・地形データを基に実環境を仮想空間上にデジタルツインとして再現し、無線機の位置や周波数、送信電力、アンテナ特性などの無線利用条件を入力することで、実環境に近い電波伝搬特性を生成します。さらに、生成した電波伝搬特性をソフトウェアまたはハードウェアにより再現し、実無線機またはソフトウェアで実装した無線機エミュレータを接続することで、実環境における大規模な実証実験を行うことなく、各種無線通信システムの性能を評価できます。一方、従来のワイヤレスエミュレータでは、大規模計算機や大規模なハードウェア無線リンクエミュレータを必要とするため、より簡便な構成で実現可能なワイヤレスエミュレータの開発が課題となっています。また、生成した電波伝搬特性と実環境における測定結果との比較による妥当性の検証も十分に行われていません。

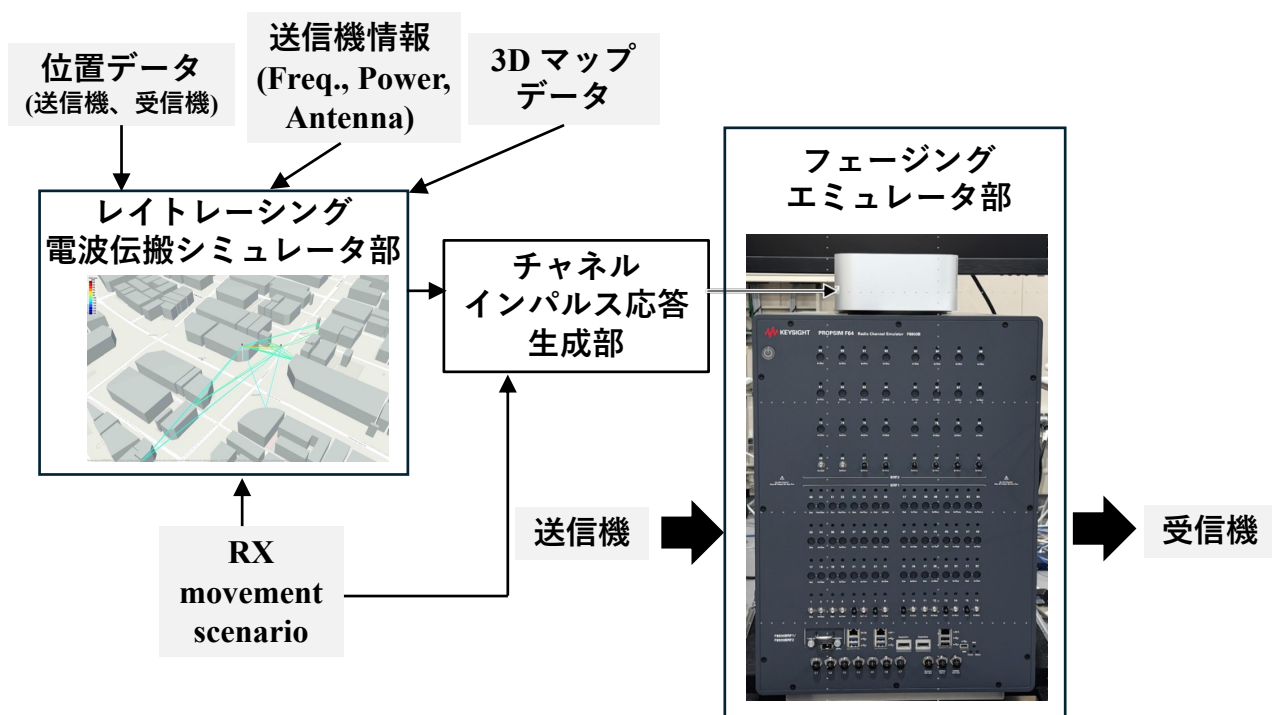


図 1 デジタルツイン技術を用いたワイヤレスエミュレータの概要



図2 開発したワイヤレスエミュレータと評価システム

2. 研究開発の概要

V2X 環境において、実空間に無線機を設置して伝送試験を行うことなく、実環境における無線伝送特性を評価できるデジタルツイン技術を用いたワイヤレスエミュレータを開発しました。本ワイヤレスエミュレータは、レイトレーシング電波伝搬シミュレータ部、チャネルインパルス応答生成部、およびフェージングエミュレータ部から構成されます（図1）。各部では、以下の開発を行いました。

- ・ レイトレーシング電波伝搬シミュレータ部：送信機および受信機の位置、送信機の情報（周波数、送信電力、アンテナ関連情報）、ならびに受信機の移動シナリオに基づいて、3D 地図環境上でレイトレーシングによる電波伝搬シミュレーションを行い、各受信位置における電波伝搬特性を算出します。
- ・ チャネルインパルス応答生成部：レイトレーシング電波伝搬シミュレータ部により得られたマルチパス成分から、チャネルインパルス応答を生成します。その際、フェージングエミュレータ部における演算負荷を低減するため、マルチパス成分のクラスタリングおよび不要なパスの削減を行います。さらに、受信機の移動に伴う各地点間のフェージングによるチャネル変動を再現するため、各地点におけるクラスタおよびパスの対応付け（カップリング）を行い、補間処理によって連続したチャネルインパルス応答を生成します。
- ・ フェージングエミュレータ部：チャネルインパルス応答生成部で生成されたチャネルインパルス応答を、電波伝搬環境を実験室内で再現する市販のハードウェアフェージングエミュレータに入力します。これにより、屋外実験を行うことなく、実環境における電波伝搬環境を実験室内で再現します。

以上説明した各機能は、PC 上で動作するソフトウェアとして提供されます。このソフトウェアと市販のハードウェアフェージングエミュレータを組み合わせることにより、本ワイヤレスエミュレータを構成します(図 2)。

3. 研究開発成果の評価

研究開発したワイヤレスエミュレータの妥当性を検証するため、V2X を想定した実際の交差点環境において 5 GHz 帯を用いて実施した屋外実験の測定結果と、本ワイヤレスエミュレータにより得られた評価結果を比較しました。レイトレーシング電波伝搬シミュレータおよび送信信号に用いた主なパラメータを、それぞれ表 1、表 2 に示します。

表 1 レイトレーシングパラメータ

Parameters	Values
Carrier frequency	5.25 GHz
Transmitter power	15 dBm
Tx antenna height	13.5 m
Rx antenna height	1.6 m
Reflection	6
Diffraction	1
Scatter	off
Conductivity	5.24
Relative permittivity	0.169 S/m

表 2 送信信号パラメータ

Parameters	Values
Carrier frequency	5.25 GHz
Bandwidth	100 MHz
Transmitter power	15 dBm
Subcarrier spacing	60 kHz
IFFT size	2048
CP length	144
MCS	7
MCS index table	1
Modulation scheme	QPSK-OFDM
Coding rate	0.5137
Number of PRBs	132
Transport block size	21000 bit

評価では、任意波形発生器を用いて生成した中心周波数 5.25 GHz、帯域幅 100 MHz の 5G New Radio(NR) 信号を使用しました。送信機は交差点の一角に高さ 13.5 m で設置し、受信機は移動車両に搭載しました。受信車両の走行経路として、交差点を右折するルート (ルート 1) および直進するルート (ルート 2) の 2 つを設定しました(図 3)。また、屋外実験とワイヤレスエミュレータによる評価では、同一の送信信号生成装置を使用しました。

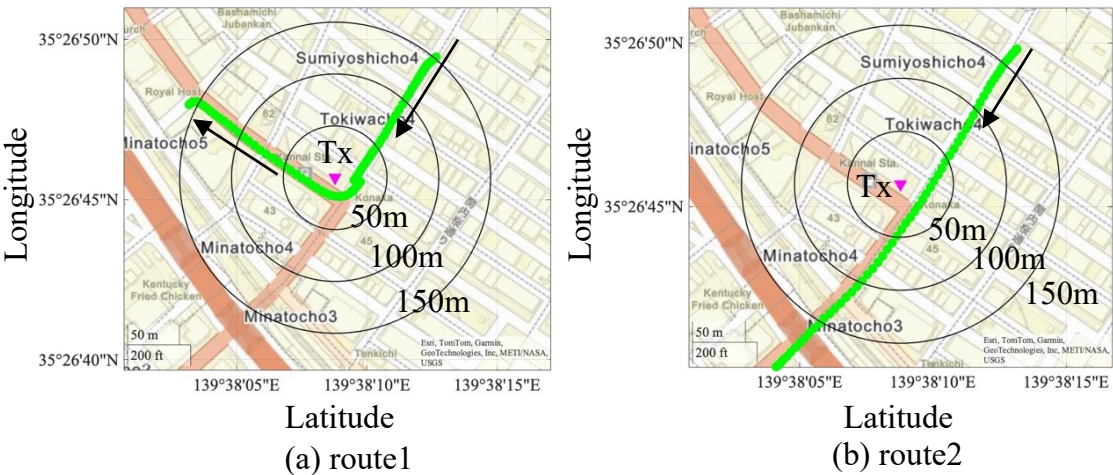


図 3 車両の移動経路

屋外実験とワイヤレスエミュレータによる評価結果について、受信信号電力および遅延スプレッドの累積分布、ならびに 5G NR 信号の BLER (Block Error Rate) 特性を比較しました (図 4、図 5)。その結果、受信信号電力および遅延スプレッドには一部差異が見られたものの、実環境では車両、歩行者、街路樹など、3D 地図データではモデル化されていない物体による遮蔽の影響を受けることを考慮すると、両者は非常に近い分布となることを確認しました。また、BLER 特性について、V2X 通信システムの BLER 要求値である 10^{-1} 以下を受信可能条件と定義して比較した結果、受信可能エリアの割合の差異は、ルート 1 およびルート 2 のいずれにおいても 15% 以下となりました。

以上の結果から、開発したワイヤレスエミュレータを用いることにより、実際の交差点環境における 5G NR システムの物理層伝送特性を一定の精度で再現・評価できることを確認しました。

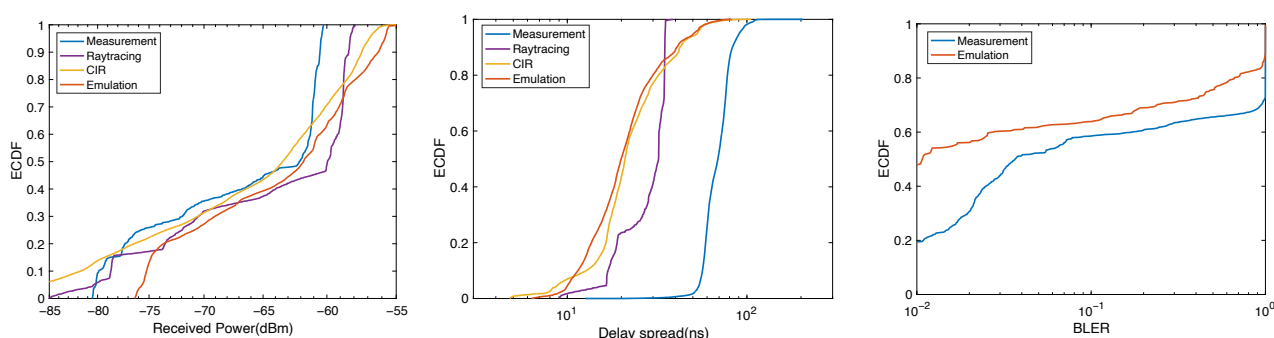


図 4 屋外実験とワイヤレスエミュレータによる評価結果 (ルート 1)

(左：受信信号電力、中：遅延スプレッド、右：BLER 特性)

Measurement: 屋外実験の測定結果

Raytracing: レイトレーシング電波伝搬シミュレータ部の生成結果

CIR: チャネルインパルス応答生成部の生成結果

Emulation: フェージングエミュレータ部の生成結果

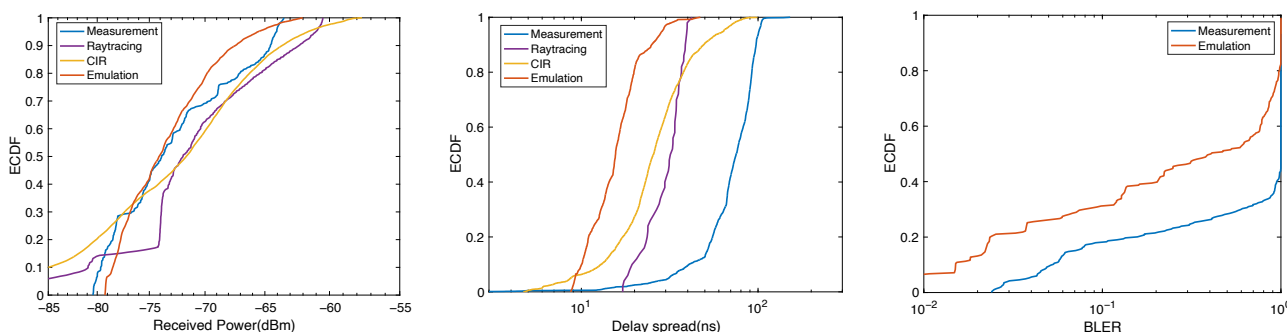


図 5 屋外実験とワイヤレスエミュレータによる評価結果 (ルート 2)

(左：受信信号電力、中：遅延スプレッド、右：BLER 特性、凡例は図 4 と同じ)

4. 波及効果、今後の予定

今回、屋外実験を行うことなく、実環境における無線伝送特性を実験室内で評価できるワイヤレスエミュレータを開発しました。本成果により、現実の無線環境を実験室内で模擬した検証が可能となり、V2X 環境にお

ける路側機の設置場所などを事前に検討できるようになります。また、さまざまな環境を想定した伝送試験を実験室内で行うことが可能となるため、V2X における無線通信システムの研究開発および性能評価の効率化が期待されます。また本成果は、8 月 27 日に開催される電子情報通信学会無線通信システム（RCS）研究会で発表を行う予定です。

5. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は国立研究開発法人情報通信機構（NICT）の委託研究（JPJ010017C07501）および総務省の「電波資源拡大のための研究開発（JPJ000254）」における受託研究の一環として実施されたものです。

<用語解説>

1. V2X（Vehicle-to-Everything）

V2X（Vehicle-to-Everything）は、車両と周囲の車両、道路インフラ、歩行者、ネットワークなどとの間で無線通信を行う技術です。自動運転支援や交通事故の低減、安全な自動運転を支える通信技術として注目されています。V2X には、車車間（Vehicle-to-Vehicle：V2V）通信、車両・インフラ間（Vehicle-to-Infrastructure：V2I）通信、車両・歩行者間（Vehicle-to-Pedestrian：V2P）通信、および車両・ネットワーク間（Vehicle-to-Network：V2N）通信などが含まれます。

2. デジタルツイン

物理空間（現実世界）に存在する都市空間、人、モノなどの情報を、仮想空間（サイバー空間）上に再現する技術です。現実世界の状態や変化を仮想空間上に再現することにより、さまざまな評価を行うことができます。

3. エミュレータ

実際の装置やシステムの動作や特性を、コンピュータや専用装置上で再現するシステムです。実際の装置や環境を用意することなく、実運用に近い条件でシステムの動作や性能を評価することができます。

4. 5G New-Radio

第 5 世代移動通信システム（5G）で採用されている無線通信方式です。高速・大容量通信、低遅延通信、多数の端末の同時接続など、さまざまなユースケースに対応した柔軟な無線通信を可能にします。