

# Sub-6 GHz 帯双角度チャネルサウンダの開発及び市街地環境における チャネル測定結果

金 ミンソク<sup>†</sup> 塚田 響<sup>†</sup> 高橋 莉玖<sup>†</sup> 鈴木 直也<sup>†</sup> 日野 一世<sup>†</sup>

沢田 浩和<sup>††</sup> 松村 武<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, 〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地

<sup>††</sup> (国研) 情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク研究センター

E-mail: <sup>†</sup>mskim@eng.niigata-u.ac.jp

**あらまし** 近年, 無線通信技術の発展と共に利用シナリオが多様化している. それに伴い, 新たな無線通信システムの設計・開発・評価に必要な高精度電波模擬技術の重要性も高まっている. このような課題を解決するために, 総務省の電波資源拡大のための研究開発「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」においてワイヤレスエミュレータの開発が進められている. 著者らは, この研究開発の一環として様々なシナリオにおいて Sub-6 GHz からミリ波帯までの広い周波数帯に対応する伝搬チャネルモデルの開発を行っている. 具体的には, 想定される利用シナリオおよび環境に対してより正確な伝搬チャネル特性を再現するために, サイト固有の特徴や振る舞いを実験的に解明し, チャネルモデルへ適用する手法を検討する. 本稿では, この研究開発で構築した Sub-6 GHz (2.4 GHz および 4.8 GHz) 帯チャネルサウンダの概要と市街地環境にて実施した伝搬チャネル測定およびその結果を紹介する.

**キーワード** 電波模擬, ワイヤレスエミュレータ, チャネルモデル, チャネルサウンディング, 市街地電波伝搬測定, 伝搬損失, 遅延広がり, 角度広がり

## Development of Sub-6 GHz Double-Directional Radio Channel Sounder and Urban Cellular Channel Measurement Results

Minseok KIM<sup>†</sup>, Hibiki TSUKADA<sup>†</sup>, Riku TAKAHASHI<sup>†</sup>, Naoya SUZUKI<sup>†</sup>, Issei HINO<sup>†</sup>,

Hirokazu SAWADA<sup>††</sup>, and Takeshi MATSUMURA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050, Nino-cho, Ikarashi, Nishi-ku,  
Niigata-shi, Niigata, 950-2102 Japan

<sup>††</sup> Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communication Technology  
E-mail: <sup>†</sup>mskim@eng.niigata-u.ac.jp

**Abstract** In recent years, usage scenarios have diversified with the development of wireless communication technology. The importance of high-precision radio wave emulation technology, which is necessary for designing, developing, and evaluating new wireless communication systems, is increasing. To solve these problems, a radio wave emulator is being promoted in the Ministry of Internal Affairs and Communications' research and development for expanding radio wave resources, "Research and development for the realization of high-precision radio wave emulator in cyberspace". As part of this research and development, the authors are developing propagation channel models that support a wide frequency band from Sub-6 GHz to millimeter-wave bands in various scenarios. Specifically, site-specific features and behaviors are experimentally characterized and applied to channel models to reproduce more accurate propagation channel characteristics for target usage scenarios and environments. This paper presents an overview of the Sub-6 GHz (2.4 GHz and 4.8 GHz) band channel sounder and introduces the propagation channel measurements conducted in an urban environment and the results.

**Key words** radio wave emulation, wireless emulator, channel model, channel sounding, outdoor urban radio channels, path loss, delay spread, angle spread

## 1. まえがき

サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（実空間）が高度に融合した「Society 5.0」の時代では、あらゆる人・モノが無線ネットワークにより連携する社会の実現が期待されており、様々な新しい無線システムの開発が進められている。新たな無線システムを開発するための評価・検証は、一般に実無線機を用いたフィールド試験によって行われるが、フィールド試験は多大な費用や時間を要するほか、気象や周辺環境の変化によって再現性が担保されないといった問題がある。特に、これまで以上に多くの機器が相互に通信を行うような Society 5.0 時代の無線システムの検証をフィールド試験で行うのは現実的とは言えない。このような課題を解決するため、ワイヤレスエミュレータの開発が期待されている。ワイヤレスエミュレータとは、電波の伝わり方や実際の地形などを仮想空間上に再現し、実空間同様にリアルタイムで無線機器の検証を可能とする Cyber Physical System (CPS) である。CPS ワイヤレスエミュレータの開発は、現在、総務省の電波資源拡大のための研究開発「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」（令和2年～5年）において進められている [1]。

開発中の CPS ワイヤレスエミュレータは、様々なシナリオに対して適用可能性の優れた電波伝搬モデルを提供するため、環境変動特性及び構造・材料特性を含めた周辺環境の精緻な三次元 (3D) モデル化に基づいたレイトレーシング法などの決定論的な手法により高精度に電波伝搬を模擬する。計算量の観点から、近距離エリア（送受信間距離：数 10～数 100 メートル）においてはレイトレーシング法をベースとし、中・遠距離エリア（送受信間距離：数 100～数キロメートル）においては、伝搬チャネルモデルをベースとしてワイヤレスエミュレータを実現する [2]。著者らは、この研究開発の一環として様々なシナリオにおいて Sub-6 GHz からミリ波帯までの広い周波数帯に対応する伝搬チャネルモデルの開発を行っている。

伝搬チャネルモデルについては、伝搬路を完全にランダムに生成する確率論的モデルでは柔軟性が高いが、ワイヤレスエミュレータに求められる精度や再現性の担保といった点で問題がある。著者らの先行研究など [3] においても確率論的モデルでは正確に表現できないことが分かっている。また、3D モデルの精度などの影響で決定論的手法では再現が難しい樹木や看板などの相互作用による伝搬経路も比較的高い電力で観測されることが分かった [3], [4]。このため、本研究では、直接波や環境支配的な構造物による主要な伝搬経路を簡易なレイトレーシングによって決定論的に表現し、樹木や看板などに起因する伝搬経路を確率的に表現する準決定論的ハイブリッドチャネルモデルを検討する。具体的には、想定される利用シナリオおよび環境に対してより正確な伝搬チャネル特性を再現するために、サイト固有の特徴や振る舞いを実験的に解明し、チャネルモデルへ適用する手法を開発する。

本稿では、この研究開発の一環として開発した Sub-6 GHz (2.4 GHz および 4.8 GHz) 帯チャネルサウンダの概要および市街地環境にて実施した伝搬チャネル測定とその結果を紹介

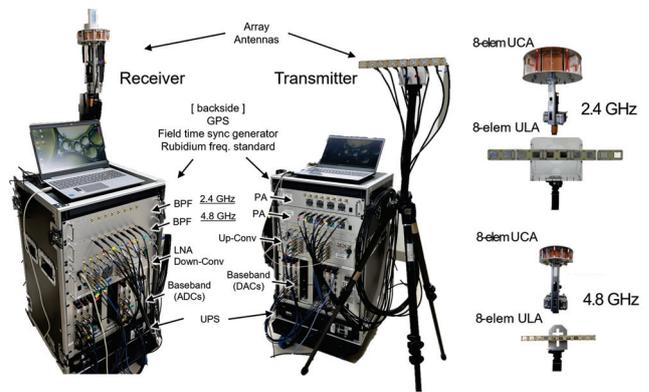


図 1 開発したチャネルサウンダの外観（左）とアレーアンテナ（右）

表 1 System parameters

Parameters	2.4-GHz band	4.8-GHz band
Carrier frequency	2.462 GHz	4.85001 GHz
Signal bandwidth	40 MHz	99.9 MHz
Delay resolution	25 ns	10 ns
Sounding signal	Multitone ( $N = 200$ )	Multitone ( $N = 510$ )
FFT points, $N_f$	4,096	
Sampling rates	800 MSa/s	
Sub-carrier spacing	195 KHz (FDM: 48.83 KHz)	
Delay span	5.12 $\mu$ s	
FDM symbol duration	20.48 $\mu$ s	
Total symbol duration	100 $\mu$ s (18.08 (dummy) + 81.92 (STDM symbol))	
Antenna element	ULA : 75° HPBW, 6.5 dBi UCA : 90° HPBW, 4.0 dBi	

する。

## 2. チャネルサウンダの開発

### 2.1 ハードウェア構成

開発したチャネルサウンダの外観を図 1 に示す。本装置の構成は、2.4 GHz 帯（中心周波数：2.462 GHz）と 4.8 GHz 帯（中心周波数：4.85001 GHz）の二つの周波数帯の RF 周波数変換回路とアレーアンテナをそれぞれ搭載し、使用周波数を選択する仕組みとなっている。詳細なシステムの仕様を表 1 に示す。ここで、各周波数帯において送受信チャネルは  $8 \times 8$  MIMO で構成され、広帯域双角度チャネル特性が取得できる。信号帯域幅は、それぞれ 40 MHz, 99.9 MHz となり、遅延分解能はそれぞれ 25 ns, 10 ns である。また、サウンディング信号のトーンの間隔は両周波数帯ともに 195 kHz であり、最大遅延はともに 5.12  $\mu$ s である。図 1 に示すように、送受信アンテナは 8 素子の等間隔リニアアレー (ULA) および等間隔円形アレー (UCA) を使用した。各素子の半値電力ビーム幅 (HPBW) は、水平面内では ULA で 90°, UCA で 74° である。また、アンテナ利得は ULA が 4 dBi 程度、UCA が 6.5 dBi 程度である。

送受信両側において GNSS (GPS) 衛星により送信される 1 pps 信号と同期した 10 MHz ルビジウムクロック基準を使用し、送受信間周波数同期およびトリガパルスのタイミング同期

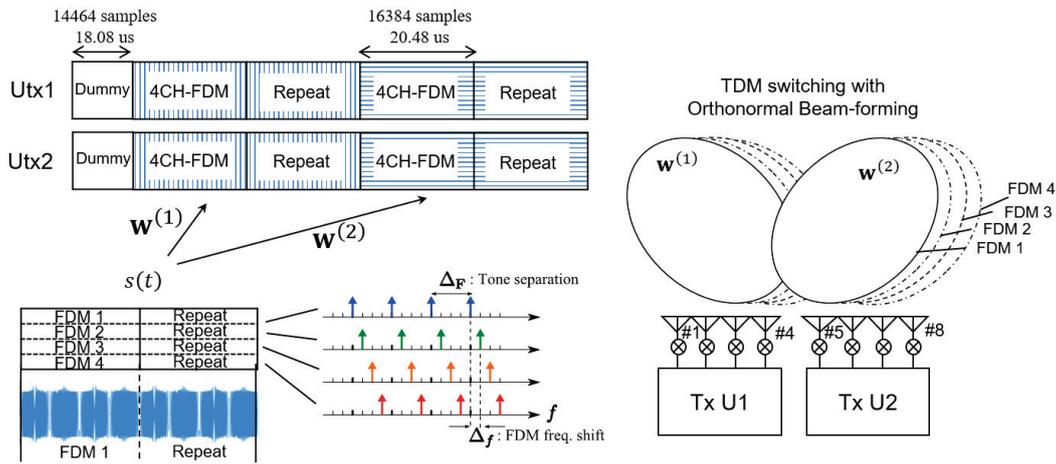


図2 FDM と STDM を併用した  $8 \times 8$  MIMO 多重法

を行う。測定データブロックの取得のための送受信機のスナップショットやり取りは、内部で生成されたトリガパルスに基づいて実行される。このトリガパルスは、送受信機を物理的に切り離す前にケーブル接続でそのタイミングを合わせるトリガ同期を行う。これにより絶対遅延時間測定が可能となる。但し、長時間にわたる測定において発生する緩やかな遅延時間オフセットは、線形モデルに基づいて後処理で修正する。本システムは、一定時間間隔で連続的にスナップショットが取得できるタイムグリッドモード測定機能を有し、今回の市街地測定は、約  $0.5 \text{ s}$  間隔で  $3,000$  スナップショット（約  $26$  分間取得分、スナップショット平均数：4）を取得するタイムグリッドモードを用いて行った。

## 2.2 MIMO 多重法

開発したチャンネルサウンダは、MIMO ソフトウェア無線テストベッドを使用し、アンテナと同数の送受信回路を有するフル MIMO アーキテクチャとなっている。同時送受信を可能とするため、図 2 に示す MIMO 多重法を用いた。ここで、送受信機ともに 4 ポートを 1 ユニットとして、ユニット単位で運用できるスケラブルな構成である。ユニット内の信号に対して、周波数シフトを用いた周波数分割多重法（frequency division multiplexing: FDM）により直交化する。さらに、2つの送信ユニットの信号は、直交符号を用いた時空間分割多重（space time division multiplexing: STDM）を用いて多重する。受信側でフーリエ変換、STDM 信号分離、FDM 周波数の再配置、周波数領域等化によりすべての送受信アンテナの組み合わせに対応する伝達関数を得る。詳しい仕組みについては先行研究 [5], [6] を参考にされたい。また、著者らがこれまで開発したチャンネルサウンダの情報はホームページにて公開している [7]。

## 2.3 キャリブレーション

無線伝送システムと同様に、ADC・DAC のチャンネルスキューや振幅の不均衡、RF 送受信機の I/Q インバランス、キャリアリーク、回路の非線形性、局部発振器の位相雑音、周波数誤差などのさまざまなハードウェアの不具合により、チャンネルサウンダの測定精度が低下するため、適切なキャリブレーションが必要である。本システムにおいては、トリガパルス同期、

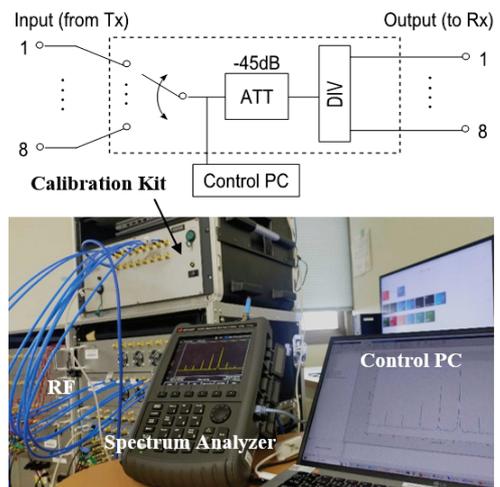


図3 キャリブレーションキットを用いた I/Q インバランス自動補償の様子

ADC・DAC チャンネルスキューなどのベースバンド回路調整、I/Q インバランスやキャリアリークなどの RF 回路補償 [8]、送受信アンテナポート間のシステム伝達特性を後処理で削除するための Back-to-back 測定といった手順でキャリブレーションを行う。今回構築した  $8 \times 8$  MIMO アーキテクチャの場合、キャリブレーションの手順は以下ようになる。

- 送受信筐体間のトリガパルス同期
- ADC と DAC のスキュー調整（それぞれ 16 個）
- 送受信回路の I/Q インバランスおよびキャリアリーク補償（それぞれ 8 機）
- アンテナポート間伝達関数の測定（64 回測定）

上記の作業に対して、多チャンネルスイッチと分配器を用いた  $8 \times 8$  キャリブレーションキットを開発し、作業の高速かつ効率的を実現している。図 3 にキャリブレーションキットを用いた I/Q インバランスの補償を行う様子を示す。

## 3. 電波伝搬測定

### 3.1 測定シナリオ

上述のチャンネルサウンダを用いて、横浜市中区の市街地環境

表 2 測定シナリオ

Scenarios	Area	BS Antennas	MS Antennas
Urban Macro (UMa)	Kanai Area (R1, R2, R3), Yokohama Daiichi Yuraku Bldg.	8-elem ULA Height: 33 m Direction: N 	8-elem UCA Height: 2.7 m (on vehicle roof) 
	China Town (R4, R5), NTTCom Yokohama Yamashita Bldg.	8-elem ULA Height: 34 m Direction: SE 	
Urban Micro (UMi)	Streets (R6), Yokohama World Porters	8-elem UCA Height: 3 m 	

で、2.4 GHz 帯および 4.8 GHz 帯の伝搬チャネル測定を実施した。表 2 に測定ルートの詳細を示す。Urban Macro (UMa) シナリオは、横浜第一有楽ビルの屋上を基地局 (BS) としたみなとみらい地区と関内エリアを含む 3 ルートと NTTCom 横浜山下ビルの屋上を BS とした中華街周辺の 2 ルートとし、Urban Micro (UMi) シナリオは、横浜ワールドポータスの交差点周辺の 1 ルートを対象とした。測定は、BS が送信側 (Tx) で移動局 (MS) が受信側 (Rx) となった下り回線で行った。UMa シナリオにおいては、BS アンテナ (ULA) を地上から約 33 ~ 34 m のビルの屋上に設置し、MS アンテナ (UCA) を地上から約 2.7 m の高さで測定車の屋根の上 (ルーフ) に設置した。送受信間の最大距離は約 2 km であり、測定環境はビル密集地であるため、受信ルートの大半は見通し外である。一方、UMi シナリオにおいては、BS と MS アンテナの両方とも UCA を用いて測定を行った。BS アンテナ高は、地上から約 3 m と低めに設置し、MS アンテナ高は、UMa と同様に地上から約 2.7 m で測定車のルーフに設置した。送受信間の最大距離は約 500 m であり、BS 周辺 (交差点) の受信点では見通し内となっている。測定の間、車両は 20 km/h 以下の速度で走行し、一定時間間隔 (約 0.5 s) でチャネル伝達関数を取得した。

### 3.2 多次元電力スペクトル

送受信側において、8 素子 ULA、または 8 素子 UCA を使用して測定を行った。それぞれのアンテナは放射指向性を持っており、送受信側でビーム形成を行うことによりアンテナパターンの影響を排除し多次元電力スペクトルを合成することが可能である。ここで、合成ビームのサイドローブによる干渉は避けられないことに注意されたい。

$k$  番目のサブキャリアにおいて送受信方位角 ( $\varphi_T, \varphi_R$ ) に対する双角度伝達関数は、水平面送受信アンテナパターン  $\mathbf{A}_T[k, \varphi_T] \in \mathbb{C}^{8 \times 1}$ 、 $\mathbf{A}_R[k, \varphi_R] \in \mathbb{C}^{8 \times 1}$  を用いた送受信ビーム形成で次式のように求められる。

$$G[k, \varphi_T, \varphi_R] = \mathbf{C}_R^{-1} \mathbf{A}_R^H[k, \varphi_R] \mathbf{H}[k] \mathbf{A}_T^*[k, \varphi_T] \mathbf{C}_T^{-1} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{H}[k]$  は MIMO 伝達関数行列である。また、アンテナ利得の補償係数は、次式のように求められる。

$$C_T = \mathbf{A}_T^H[k, \varphi_T] \mathbf{A}_T[k, \varphi_T] \quad (2)$$

$$C_R = \mathbf{A}_R^H[k, \varphi_R] \mathbf{A}_R[k, \varphi_R] \quad (3)$$

式 (1) で得られた双角度伝達関数  $G$  を逆フーリエ変換して得られた双角度インパルス応答を  $g$  とすると、多次元電力スペクトルは次式のように表される。

$$P[n, \varphi_T, \varphi_R] = |g[n, \varphi_T, \varphi_R]|^2 \quad (4)$$

電力遅延プロファイル (power delay profile: PDP) は、式 (4) を用いて次式のように計算される。

$$P_h[n] = \frac{\Delta_{\varphi_T} \Delta_{\varphi_R}}{B_T B_R} \sum_{\varphi_T} \sum_{\varphi_R} P[n, \varphi_T, \varphi_R] \quad (5)$$

ここで、 $\Delta_{\varphi_T}$  と  $\Delta_{\varphi_R}$  は、スペクトルの角度分解能で、 $B_T$  と  $B_R$  は送受信ビームフォーミングの半電力ビーム幅 (HPBW) である。今回は、 $\Delta_{\varphi_T} = \Delta_{\varphi_R} = 6^\circ$  で、 $B_T \approx B_R \approx 12^\circ$  (ULA)、 $24^\circ$  (UCA) となった。また、送受信側においての方位角電力スペクトル (azimuth power spectrum: APS) はそれぞれ次式で表される。

$$P_T[\varphi_T] = \frac{\Delta_{\varphi_R}}{B_R} \sum_{\varphi_R} \sum_n P[n, \varphi_T, \varphi_R] \quad (6)$$

$$P_R[\varphi_R] = \frac{\Delta_{\varphi_T}}{B_T} \sum_{\varphi_T} \sum_n P[n, \varphi_T, \varphi_R] \quad (7)$$

### 3.3 伝搬特性の解析

図 4 にすべてのシナリオにおいて 2.4 GHz と 4.8 GHz の広域伝搬パラメータ (large-scale parameters: LSP) の解析結果を示す。具体的には、測定データから多次元電力スペクトルを合成し、式 5 の PDP から伝搬損失 (PL) と遅延広がり (DS) を求め、式 7 の APS から送信側角度広がり (ASD) と受信側角度広がり (ASA) を求めた。ここで、PDP に閾値 (雑音電

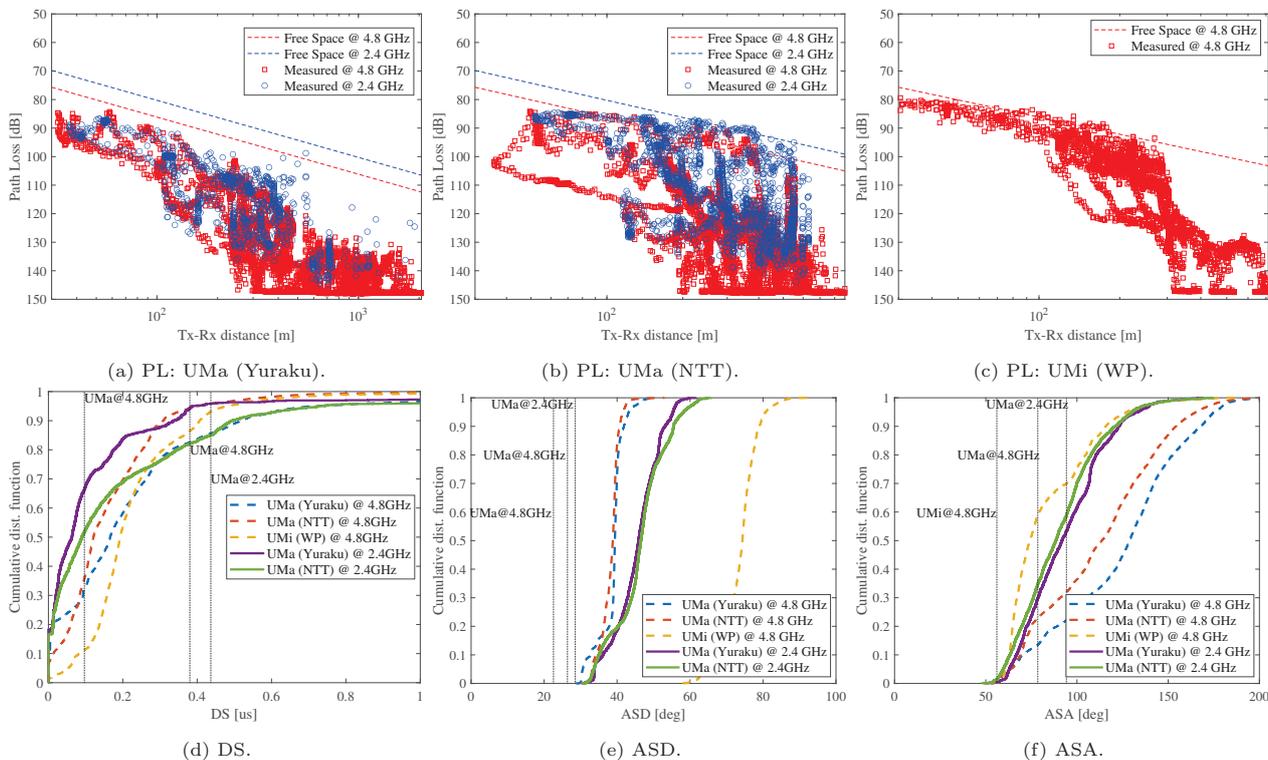


図 4 LSP の解析結果

力レベル+マージン)を適用し抽出された信号成分のみを計算の対象とした。2.4 GHz において無線 LAN からの干渉で雑音電力レベルが異常に高くなり、信号成分が観測できない場合は無効と判定し解析から排除した。ASA と ASD については、有効な DS が抽出できた測定点に対して、次の 3GPP の計算式を用いて計算した。

$$\sigma_{ASD/ASA} = \sqrt{-2 \ln \left( \left| \frac{\sum \exp(j\varphi_{T/R}) P_{T/R}(\varphi_{T/R})}{\sum P_{T/R}(\varphi_{T/R})} \right| \right)} \quad (8)$$

PL の結果 (図 4(a)~図 4(c)) から、2.4 GHz のデータが無効処理により少なくなっているが、概ね 4.8 GHz と同様な傾向であることが分かる。また、ITU-R 勧告 P.1411-11 site-general model (見通し外用) と概ね一致していることを確認できた [9]。DS (図 4(d)) については、平均が 60 ~ 190 ns に分布し、シナリオや周波数による依存性はあまり見られない。ASD (図 4(e)) については、4.8 GHz の方が 2.4 GHz に比べて大きくなっているが、ASA (図 4(f)) においては、その傾向が逆になっていることが分かる。今回は、膨大な測定結果をすべて網羅し可視化したが、伝搬メカニズムの場所依存性を考慮し、モデルを細分化する必要があると思われる。さらに、2.4 GHz と 4.8 GHz の周波数依存性の場所特性が解明できるよう、より詳細な解析を行っていく予定である。

#### 4. まとめ

本稿では、新たな無線通信システムの設計・開発・評価に必要な高精度電波模擬技術を実現するために推進されているワイヤレスエミュレータの研究開発を紹介した。また、この研究開発の一環として構築した Sub-6 GHz (2.4 GHz および 4.8 GHz)

帯チャンネルサウンダの概要と市街地環境にて実施した伝搬チャネル測定およびその結果を説明した。

#### 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みます。

#### 付 録

各シナリオにおける LSP の空間特性を、それぞれ図 5、図 6、図 7 に示す。

#### 文 献

- [1] 仮想空間における電波模擬システム技術の高度化, <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/emulator/index.htm>
- [2] 高田潤一, “サイバーフィジカル融合による電波模擬システム技術のための電波伝搬モデル,” 信学総大, BI-11-5, 2021 年 3 月。
- [3] H. Tsukada, K. Kumakura, S. Tang, M. Kim, “Millimeter-Wave Channel Model Parameters for Various Office Environments,” *IEEE Access*, Vol.10, pp. 60387–60396, Jun. 2022.
- [4] 鈴木直也, 塚田 響, 高橋莉玖, 金 ミンソク, “24 GHz 及び 60 GHz 帯伝搬チャネル同時測定によるマルチパスクラスタの周波数依存性の考察,” 信学技報, AP2022-113, 2022 年 10 月。
- [5] M. Kim, J. Takada, Y. Konishi, “Novel Scalable MIMO Channel Sounding Technique and Measurement Accuracy Evaluation with Transceiver Impairments,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol.61, No.12, pp. 3185–3197, Dec. 2012.
- [6] M. Kim, J. Takada, K. Saito, “Multi-Dimensional Radio Channel Measurement, Analysis and Modeling for High Frequency Bands,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E101-B, no. 2, pp.293–308, Feb. 2018.
- [7] Radio Channel Sounder, <http://radio.eng.niigata-u.ac>.

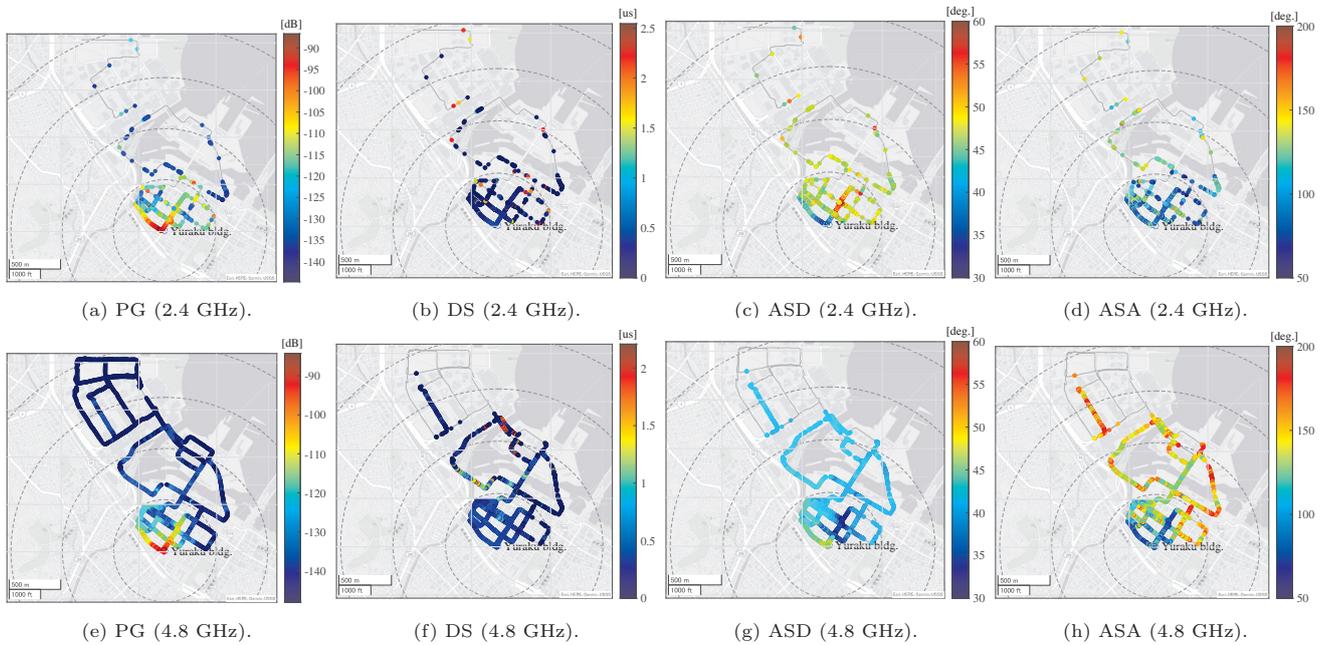


図5 LSPの空間分布：横浜第一有楽ビル周辺関内エリア (UMa 環境)

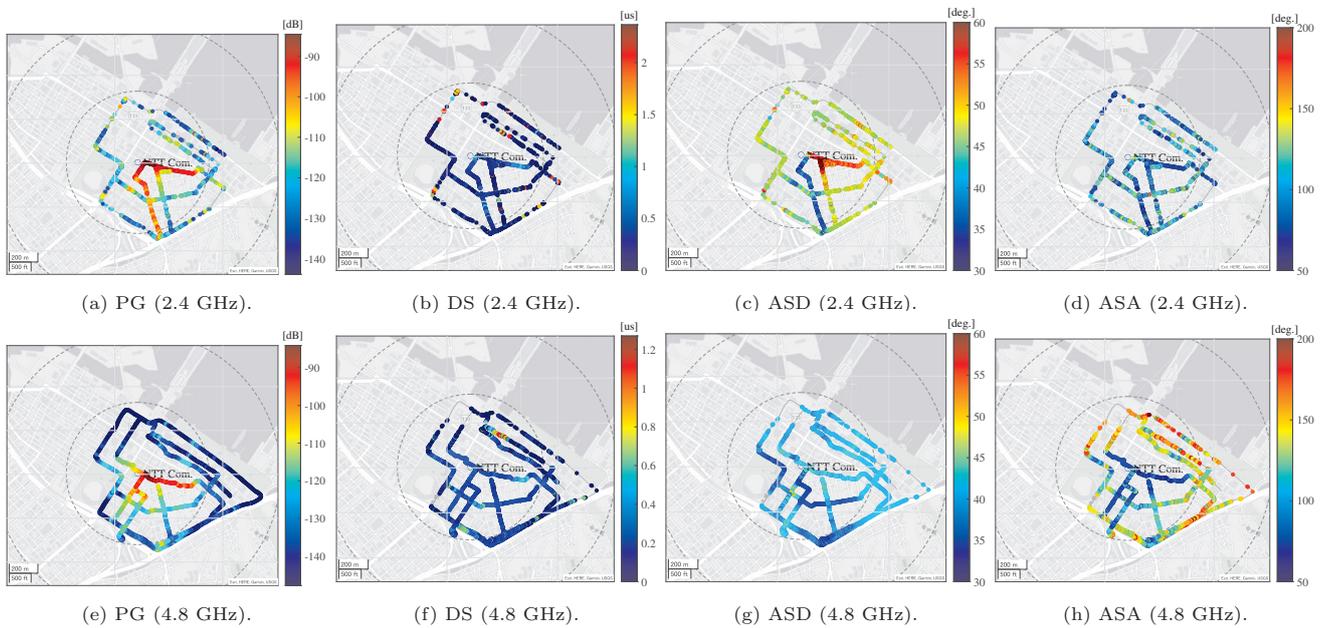


図6 LSPの空間分布：NTTCom 横浜山下ビル周辺中華街エリア (UMa 環境)

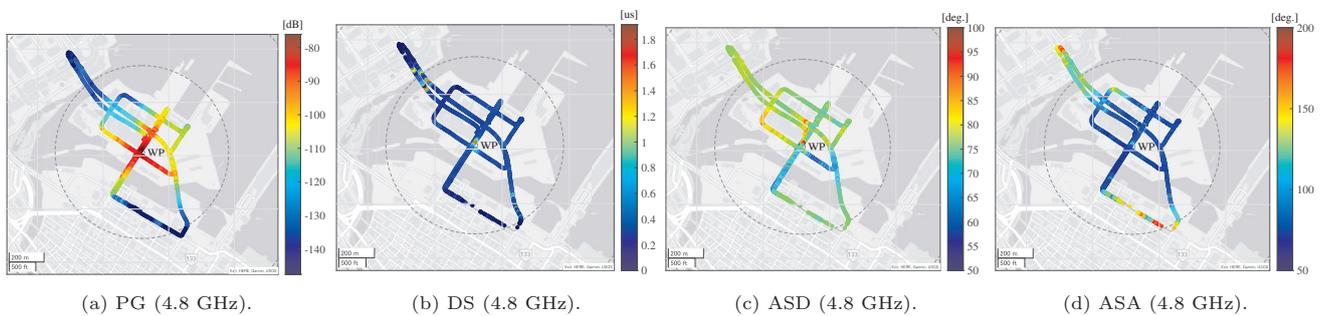


図7 LSPの空間分布：横浜ワールドポーターズ交差点 (UMi 環境)

jp/channel-sounders/.

[8] M. Kim, Y. Maruichi, J. Takada, "Parametric Method of Frequency-dependent I/Q Imbalance Compensation for Wideband Quadrature Modulator," *IEEE Trans. Mi-*

*crowave Theory Tech.*, Vol.61, No.1, pp. 260–270, Jan. 2013.

[9] 高橋莉玖, 塚田響, 鈴木直也, 日野一世, 金ミンソク, "市街地マクロセル環境における Sub-6 GHz 帯伝搬チャネル特性," 電子情報通信学会総合大会, 2023 年 3 月