



電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
IEICE Technical Committee of Antennas and Propagation

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

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

2023年2月17日

金 ミンソク・塚田 響・高橋莉玖・鈴木直也・日野一世
新潟大学 大学院 自然科学研究科

沢田浩和・松村 武
NICT



本研究の一部は、総務省の電波利用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(JPJ000254)」の成果である

研究背景

総務省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」（JPJ000254）R2～R5

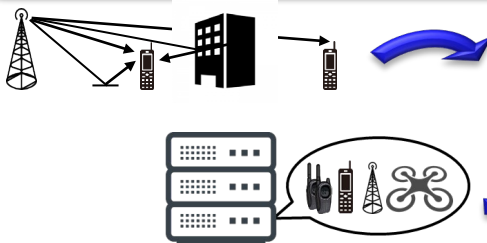
背景

- Society5.0時代は、これまで以上に多くの機器が通信を行い、通信量の増大による周波数逼迫、相互干渉による周波数利用効率の劣化など、様々な問題が発生する。
 - 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には多大な時間、費用が必要。
 - 実無線機による運用試験は特定環境下で実施されることが多く、様々な環境での検証が困難。また環境変動により再現性の担保が困難。
 - 実証フィールド環境に数千台規模の実無線機を設置しての大規模システム検証が困難。
- 新しい電波システムのデザイン、評価、検証を低コストかつ短時間で可能とするためには、様々な環境やシナリオを定義でき、物理的な試作機のみでなく、仮想的な無線機による実験環境が模擬可能な、新しい概念の電波模擬システムを開発する必要がある。

目的

様々な電波システムを、仮想空間上で高精度かつリアルタイムにエミュレーション可能な電波模擬システムを開発し、無線通信に関わる多様な事業者が、インフラ／システム／プラットフォーム／アプリケーション／サービスなどのデザイン、評価、検証が可能となるテストベッドを提供する。

ア: 電波伝搬を仮想空間上で高精度に模擬



イ: 疑似無線機で任意の電波システムを模擬



ウ: サーバ上に構築した仮想空間でリアルタイムにエミュレーション

1万台規模の
大規模評価

複数／異種
システムの
運用模擬

実機検証で
再現性のよい試
験環境を担保

開発／実験
／検証の
コストカット

ワイヤレスエミュレータ

- 様々なシナリオに対して適用可能性の優れた電波模擬の提供
 - 近距離エリア(送受信間距離: 数10～数100 メートル)
 - 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
 - レイトレーシングなど決定論的な手法
 - 中・遠距離エリア(送受信間距離: 数100～数キロメートル) 本研究
 - 伝搬チャネルモデルにより高精度電波伝搬の模擬
 - 決定論的+確率論的 チャネルモデル
- 本研究では、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する
 - 対象周波数 900 MHz, 2.4 GHz, 4.5 GHz, 28 GHz・60 GHz

本報告の内容

■ 高精度サイトスペシフィックモデルの開発

- 測定値に基づくモデル
- 機械学習を用いた拡張

多くの高分解能角度チャネル測定データの取得が必須である

■ 高分解能角度チャネル測定の課題

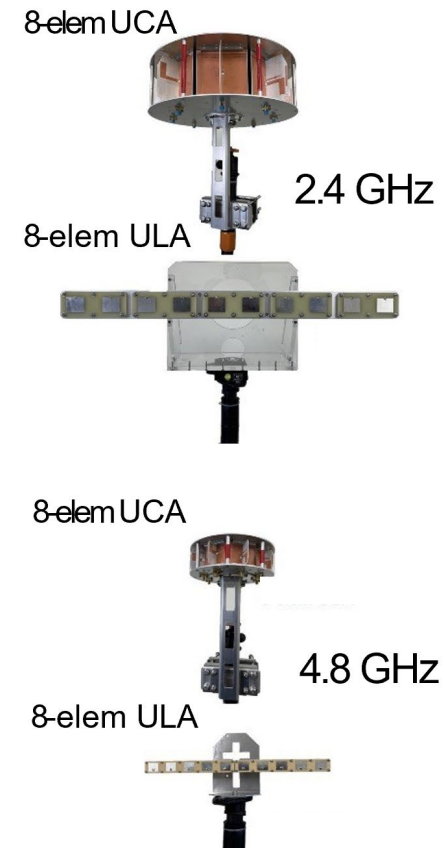
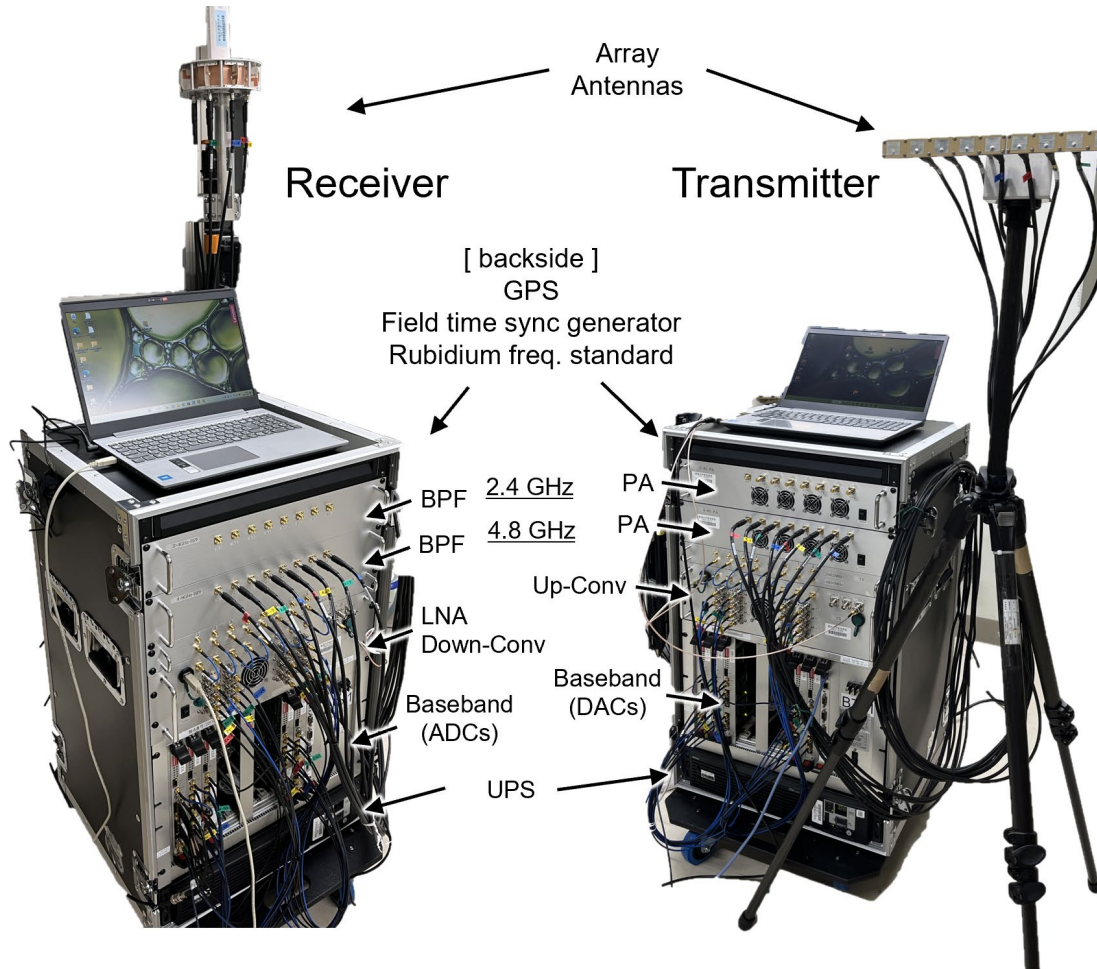
- アンテナ回転型 測定時間が非常に長い(数時間／1ポイント)
- アレーアンテナ型 高費用と校正の煩雑さ

■ 本報告

- Sub-6GHz フルアレーMIMOチャネルサウンダの開発
 - MIMO多重により高速MIMOチャネル測定を実現 ⇒ 走行測定
 - MIMOビーム形成により双角度遅延電力スペクトルを取得
- 市街地環境における測定結果の可視化
 - マイクロセル・マクロセル シナリオ
 - 2.45 GHz・4.85 GHz帯の走行測定
 - チャネル統計特性: large-scale parameters (LSPs)

MIMOチャネルサウンダ

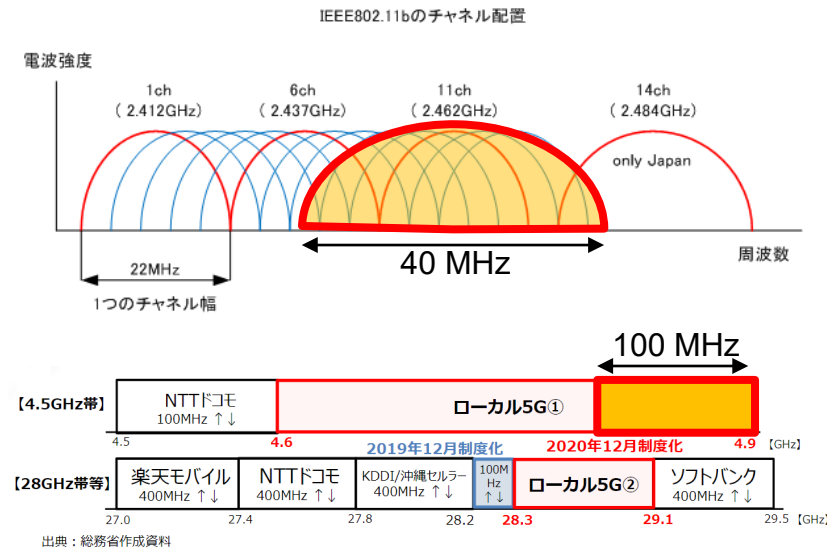
- 2.4GHz・4.8GHz帯切り替え
- 8×8MIMO構成(フルアレー方式)



チャネルサウンダの仕様

■ パラメータ

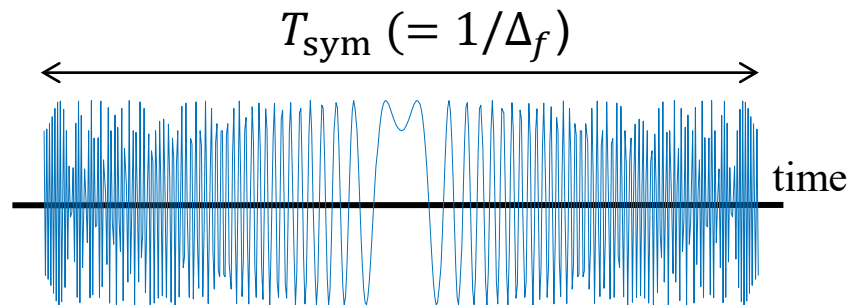
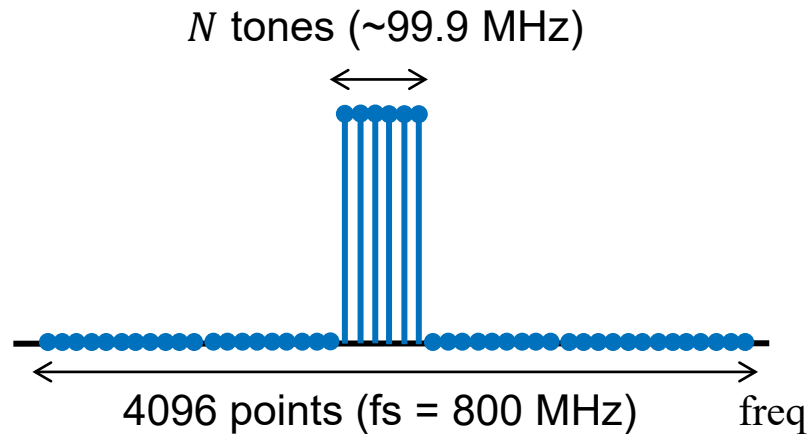
Parameters	2.4-GHz band	4.8-GHz band
Carrier frequency	2.462 GHz	4.85001 GHz
Signal bandwidth	40 MHz	99.9 MHz
Delay resolution	25 ns	10 ns
Sounding signal	Multitone ($N = 200$)	Multitone ($N = 510$)
FFT points, N_f	4,096	
Sampling rates	800 MSa/s	
Sub-carrier spacing	195 KHz (FDM: 48.83 KHz)	
Delay span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



送信電力：約23 dBm/Ant

サウンディング信号

■ 無変調マルチトーン



帯域幅

$$BW \approx 99.9 \text{ MHz @} 4.8 \text{ GHz} \\ (N = 510)$$

$$BW \approx 40.0 \text{ MHz @} 2.4 \text{ GHz} \\ (N = 200)$$

オーバーサンプリング

$$8\text{倍 @} 4.8 \text{ GHz}$$

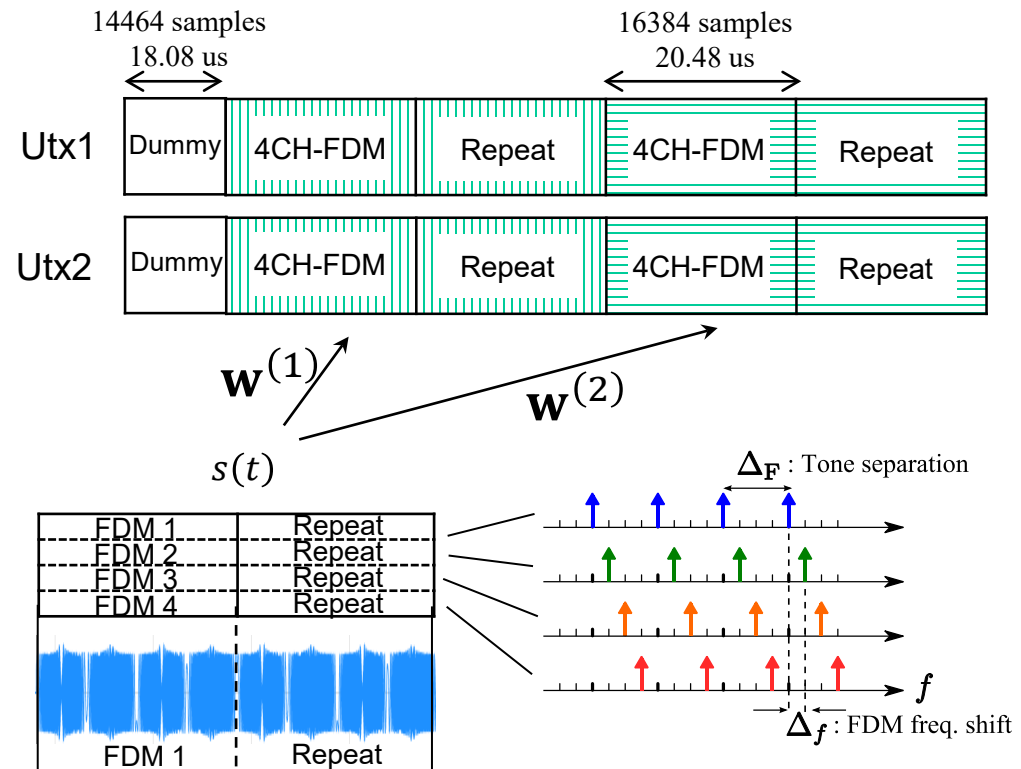
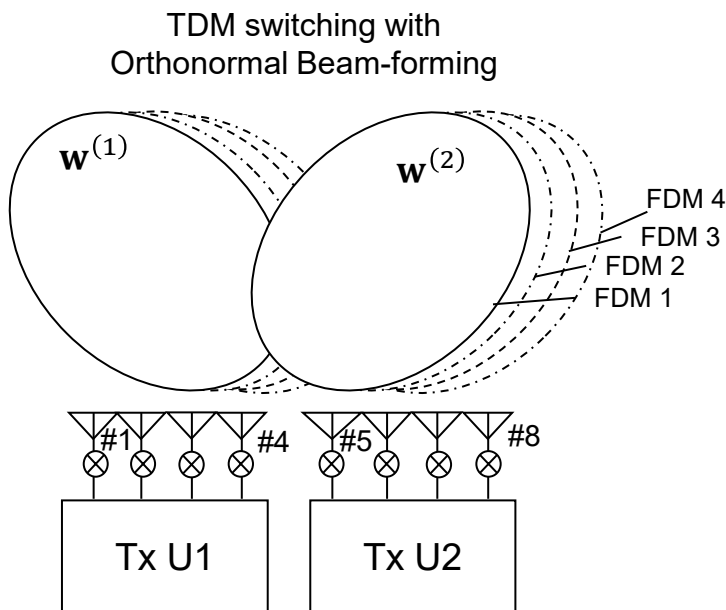
$$20\text{倍 @} 2.4 \text{ GHz}$$

トーン間隔

$$\Delta_f = \frac{800 \text{ MHz}}{4096} = 195 \text{ KHz}$$

MIMO多重法

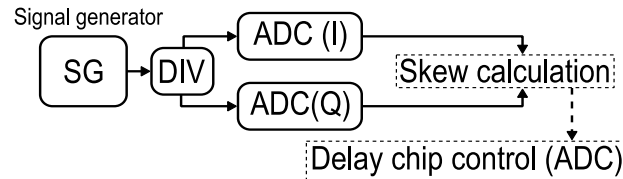
- FDM(周波数多重)・STDM(時空間多重)のハイブリッド方式
 - ユニット内 FDM
 - ユニット間 STDM



補償プロセス

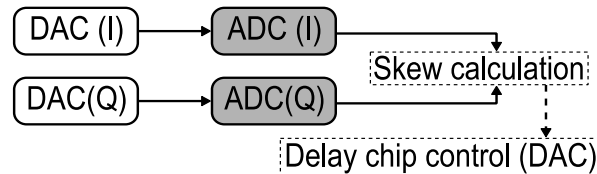
(a) Compensation of ADC

By : delay chip
Ref. : SG



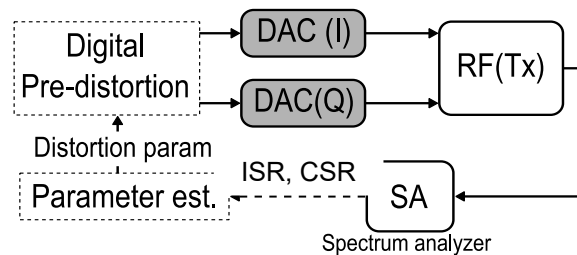
(b) Compensation of DAC

By : delay chip
Ref. : calibrated ADCs



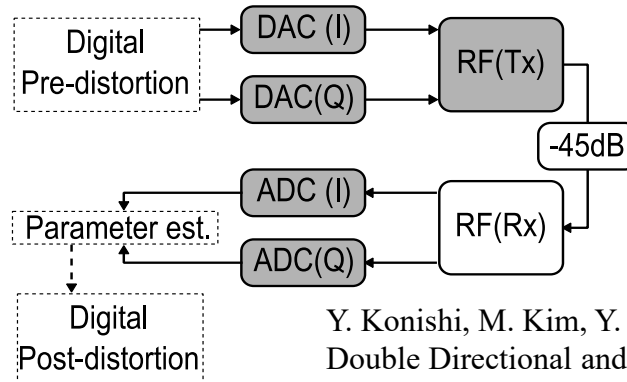
(c) Compensation of RF (Tx) (IQ modulator)

By : digital calibration
Ref. : calibrated DACs



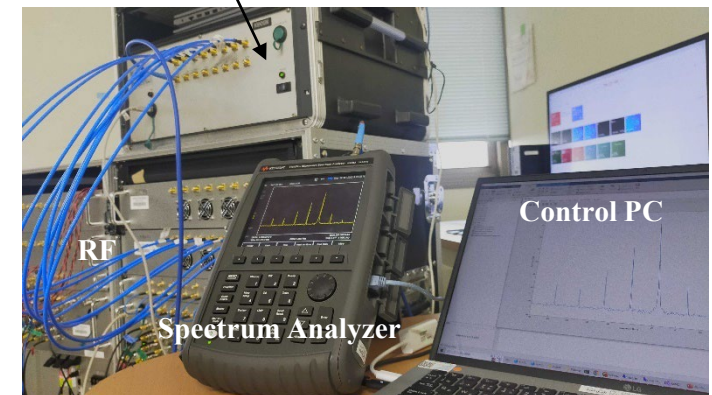
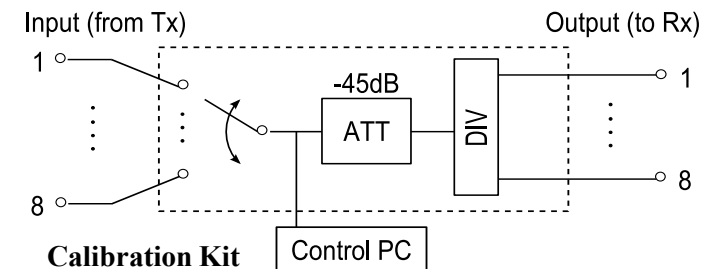
(d) Compensation of RF (Rx) (IQ de-modulator)

By : digital calibration
Ref. : calibrated DACs
calibrated ADCs
calibrated RF(Tx)



: calibrated element

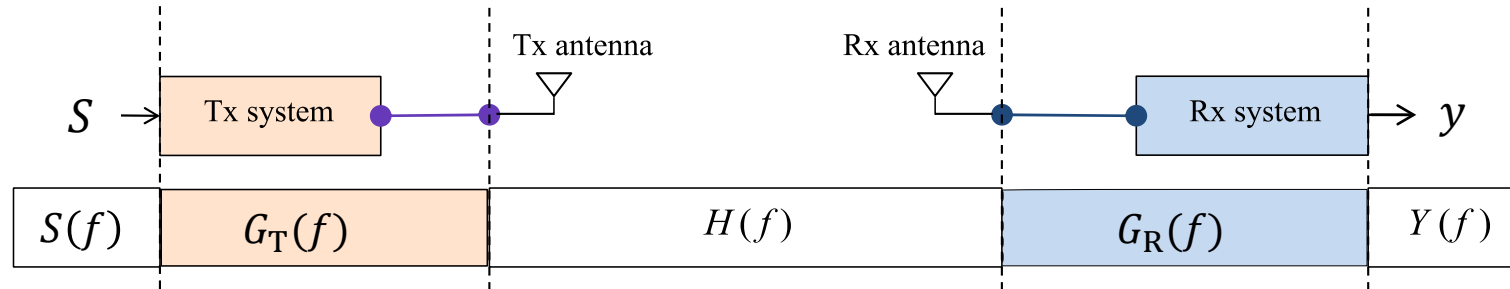
I/Q インバランス自動補償



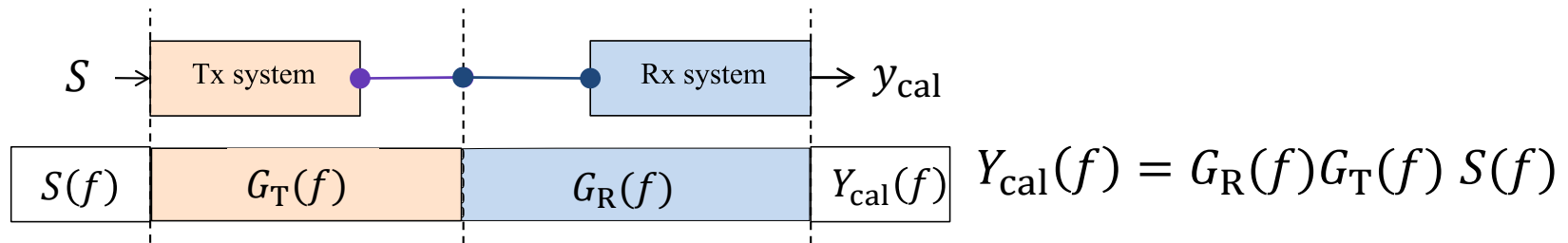
Y. Konishi, M. Kim, Y. Chang, J. Takada, "Versatile Radio Channel Sounder for Double Directional and Multi-link MIMO Channel Measurements at 11 GHz," *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E97-C, No.10, pp. 994-1004, Oct. 2014

Back-To-Back校正

■ 回路固有の伝達特性の除去



■ Back-to-back (B2B) 校正



測定した伝達関数

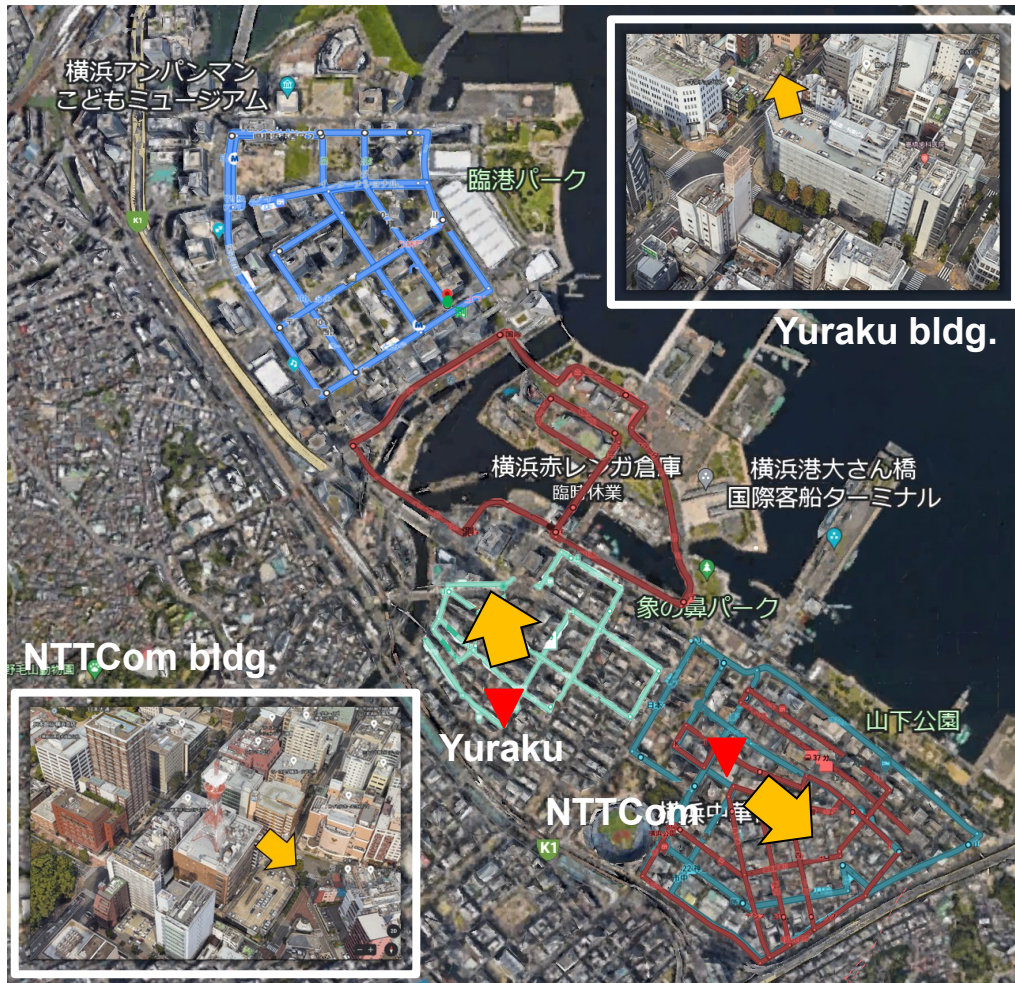
$$Y(f) = G_R(f)H(f)G_T(f)S(f)$$

B2B校正

$$\Rightarrow H(f) = \frac{Y(f)}{G_R(f)G_T(f)S(f)} = \frac{Y(f)}{Y_{cal}(f)}$$

測定エリア

- 横浜市関内地区（送受信間距離：最大 約3 km）
 - 関内駅，中華街，ワールドポーターズ



測定シナリオ

■ 横浜市の市街地において3エリアの走行測定を実施

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		

双角度遅延電力スペクトル

- 双角度伝達関数 (angle resolved transfer function)

$$G(f, \phi_T, \phi_R) = C_R^{-1} \mathbf{A}_R^H(f, \phi_R) \mathbf{H}(f) \mathbf{A}_T^*(f, \phi_T) C_T^{-1}$$

$$\begin{aligned} C_T &= \mathbf{A}_T^H(f, \phi_T) \mathbf{A}_T(f, \phi_T) \\ C_R &= \mathbf{A}_R^H(f, \phi_R) \mathbf{A}_R(f, \phi_R) \end{aligned} \quad \text{補償係数}$$

- 双角度遅延電力スペクトル

$$P(\tau, \phi_T, \phi_R) = |g(\tau, \phi_T, \phi_R)|^2$$

$$\text{ここで, } g(\tau, \phi_T, \phi_R) = \mathcal{F}^{-1}[G(f, \phi_T, \phi_R)]$$

- スペクトル合成

$$\underbrace{P_\tau(\tau)}_{\text{PDP}} = \frac{\Delta\phi_T \Delta\phi_R}{B_T B_R} \sum_{\phi_T} \sum_{\phi_R} P(\tau, \phi_T, \phi_R)$$

$$\underbrace{P_T(\phi_T)}_{\text{APS@Tx}} = \frac{\Delta\phi_R}{B_R} \sum_{\tau} \sum_{\phi_R} P(\tau, \phi_T, \phi_R)$$

$$\underbrace{P_R(\phi_R)}_{\text{APS@Rx}} = \frac{\Delta\phi_T}{B_T} \sum_{\tau} \sum_{\phi_T} P(\tau, \phi_T, \phi_R)$$

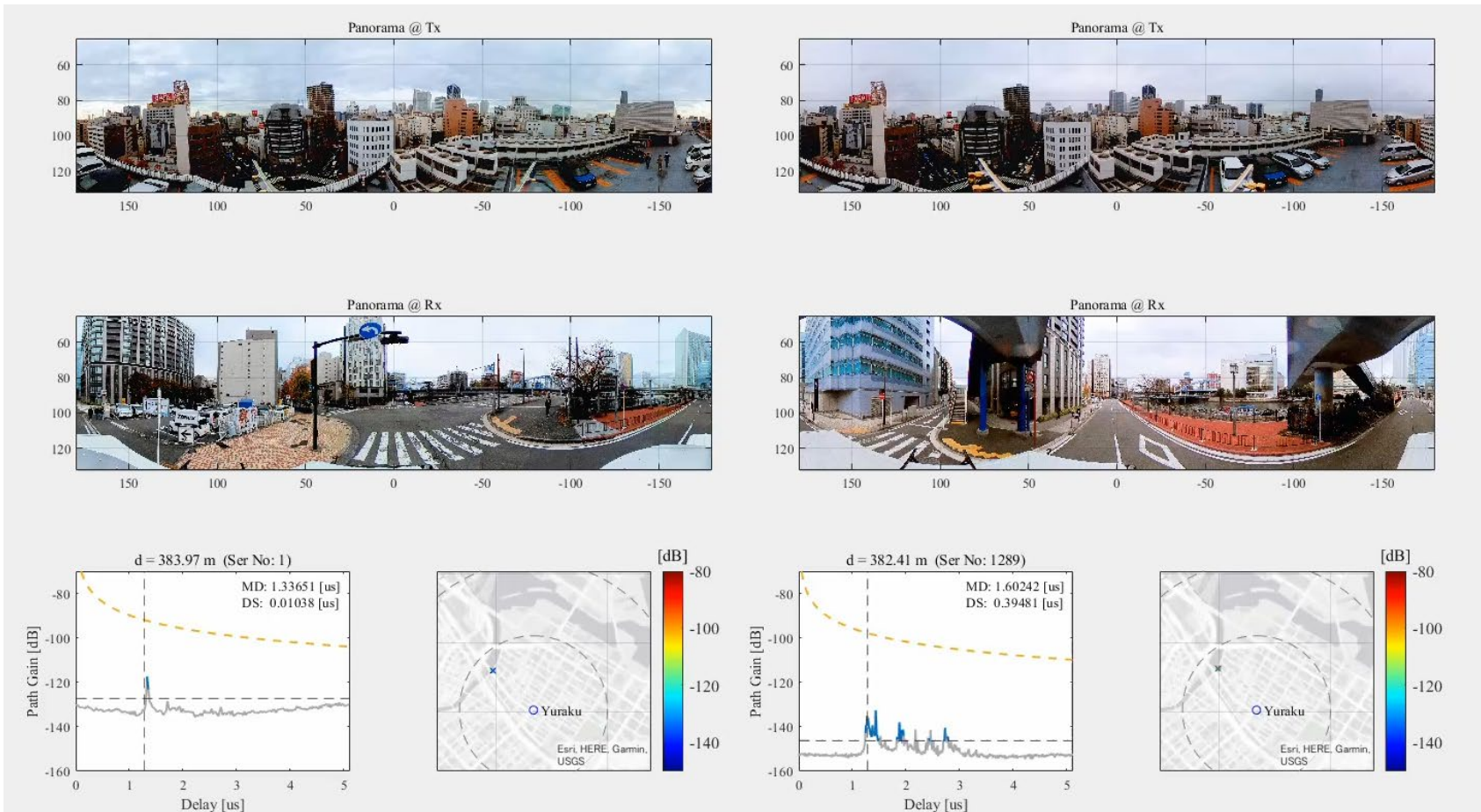
B_T, B_R	3-dB BW
$\Delta\phi_T, \Delta\phi_R$	Angular resolution

測定データの可視化

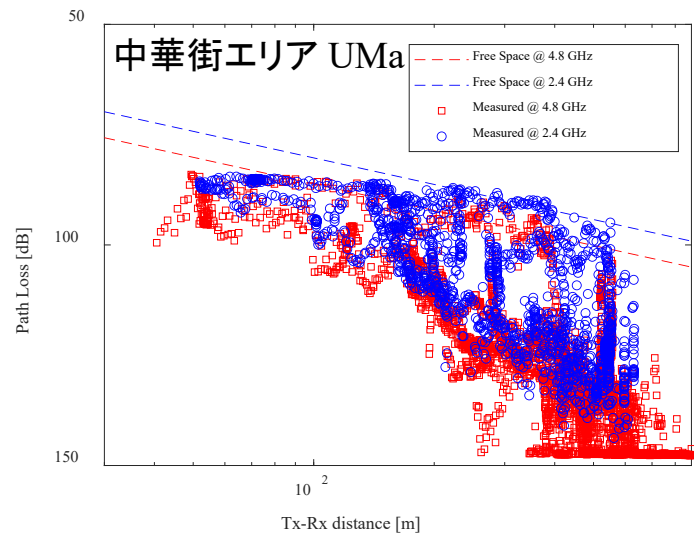
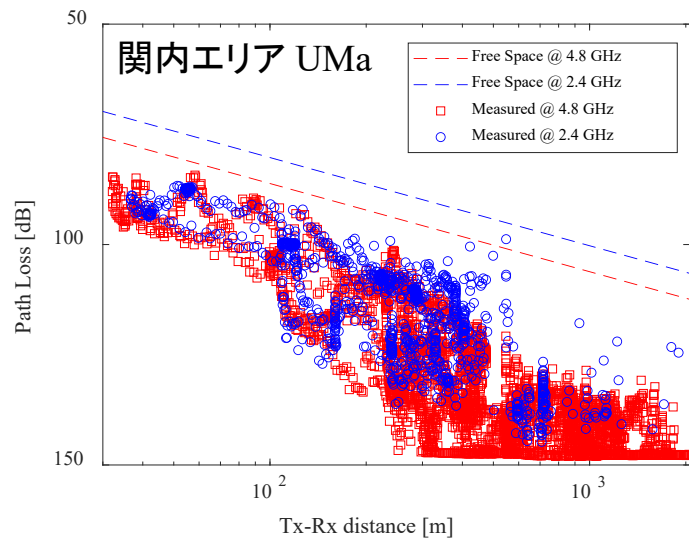
- ノイズレベルに対する閾値の設定
- 2.4 GHzは干渉の影響が大きい⇒有効性判定

2.4 GHz

4.8 GHz

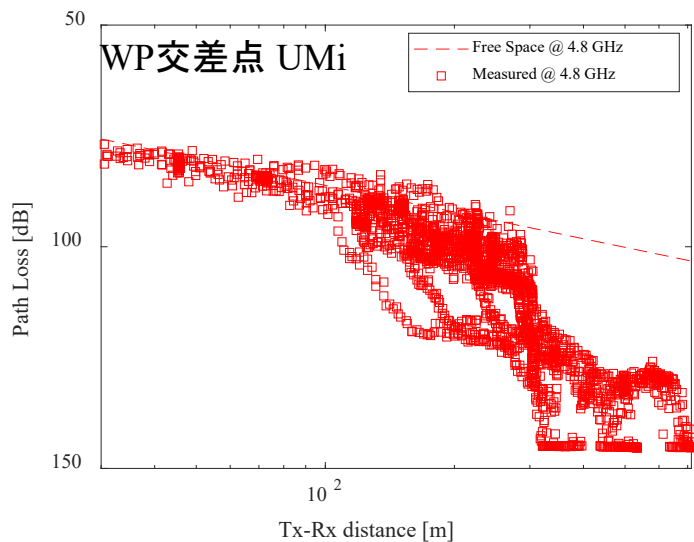


伝搬損失 (PL)

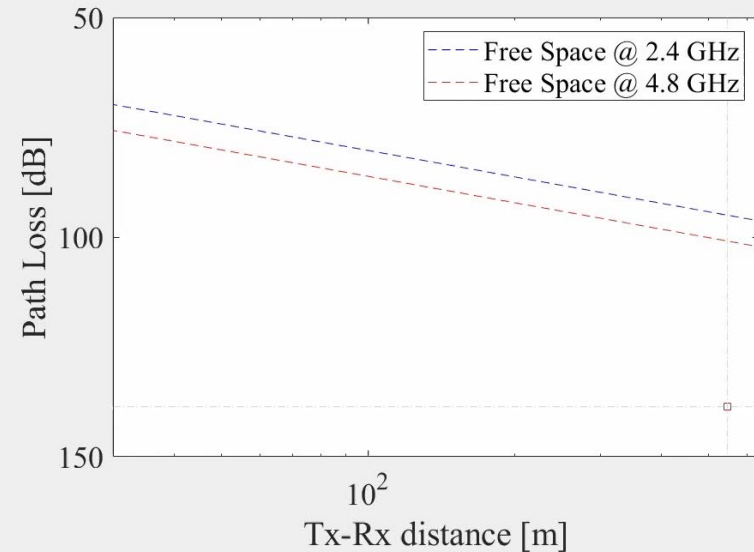
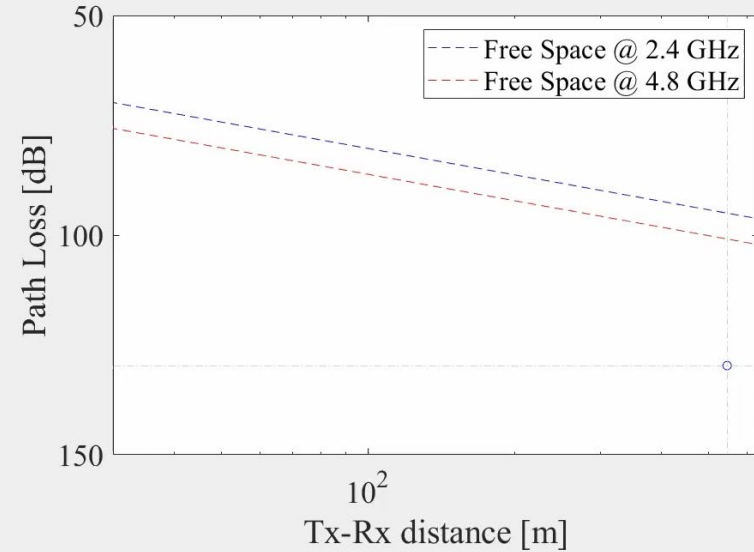


$$PL = \sum_{\tau} P_{\tau}(\tau)$$

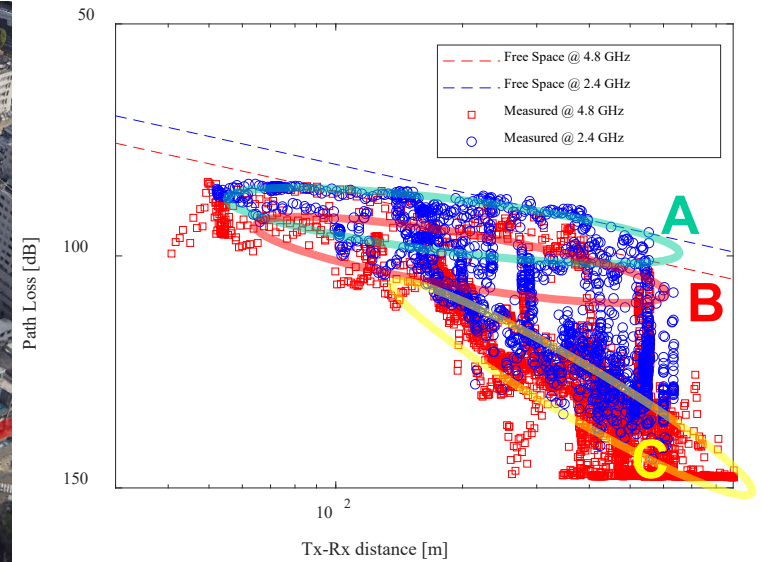
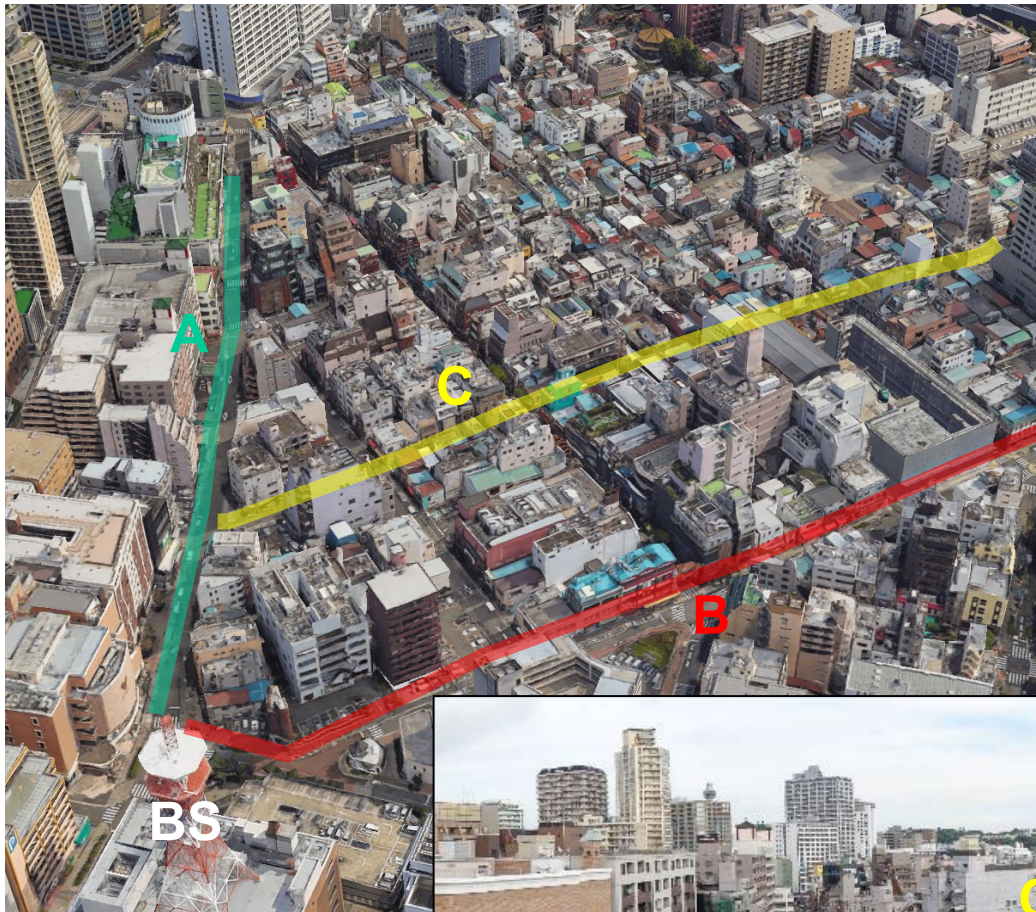
PDPのIncoherent和



場所特性の可視化

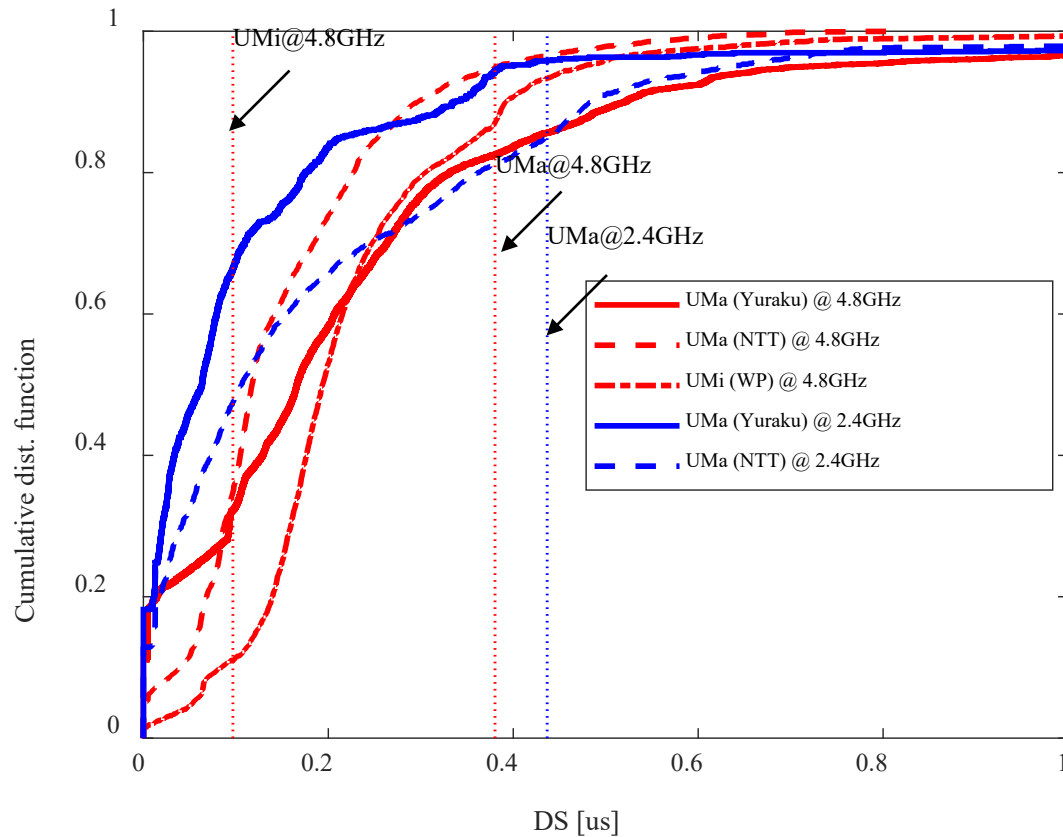


周囲環境との関係



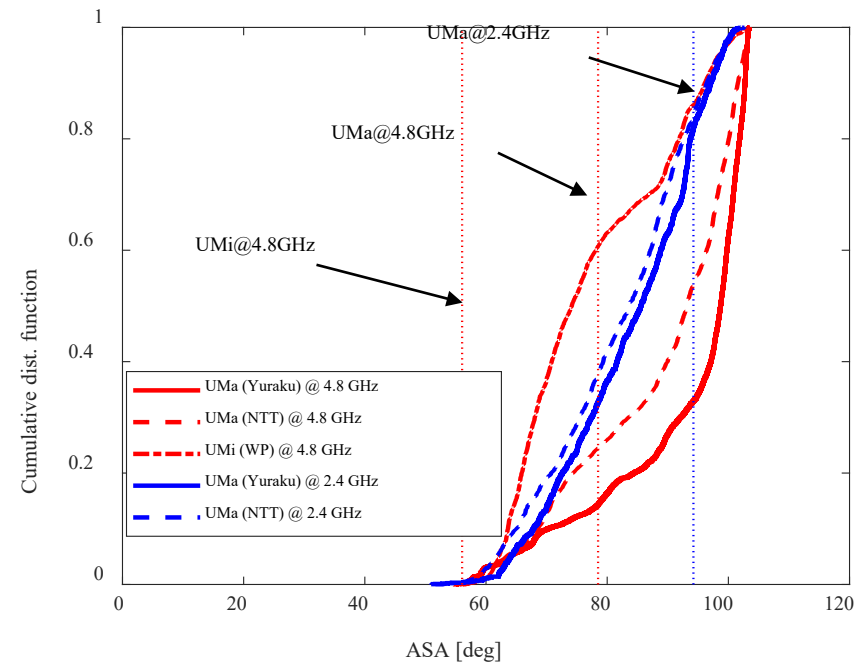
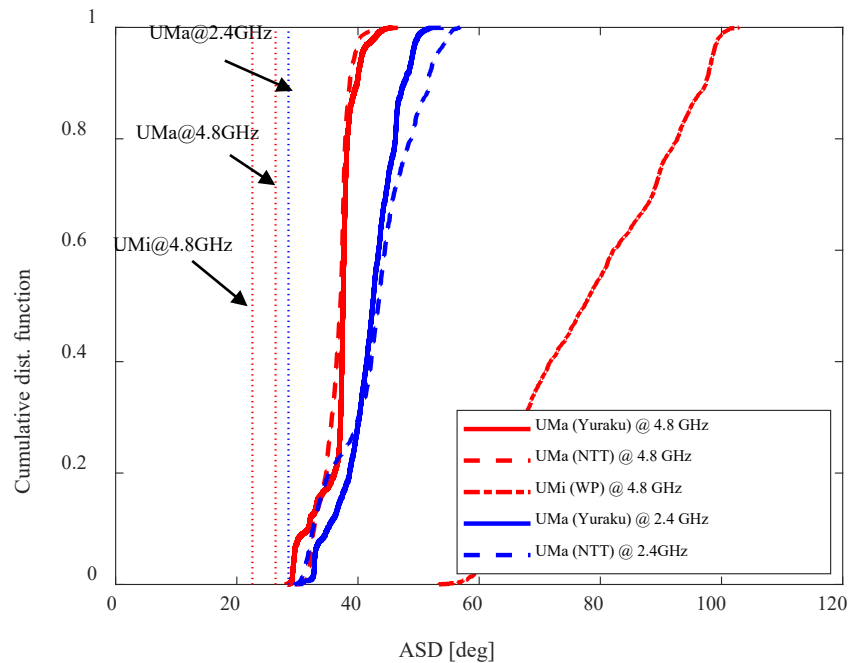
遅延広がり(DS)

- $2.4\text{ GHz} < 4.8\text{ GHz} \Rightarrow 2.4\text{ GHz}$ 帯 干渉除去の影響
- 3GPPモデルとの乖離 \Rightarrow サイト固有の特性
- 区間別詳細なモデル化必要



角度広がり(ASD・ASA)

- 2.4 GHz帯 ⇒ 干渉の影響
- 3GPPモデルとの乖離 ⇒ サイト固有の特性
- 区間別詳細なモデル化必要



まとめ

- 8×8フルMIMOチャネルサウンダの開発
 - Sub-6GHz帯 2.4 GHz・4.8 GHz
 - 高速MIMOチャネル測定を実現 ⇒ 走行測定
- 市街地環境における伝搬測定
 - マイクロセル(UMa)・マクロセル(UMi) シナリオ
 - 2.45 GHz・4.85 GHz帯の走行測定
 - チャネル統計特性: large-scale parameters (LSPs)
 - 2.4 GHz帯: 干渉の影響を要検討(PL以外はバイアスの可能性)
 - 標準モデルとの乖離 ⇒ 区間別詳細なモデル化が必要
 - 3月総合大会にて引き続き報告予定