

市街地マクロセル環境におけるミリ波帯クラスタチャネル特性

塚田 響[†] 鈴木 直也[†] 高橋 莉玖[†] 金ミンソク[†] 沢田 浩和^{††}
松村 武^{††}

[†] 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

^{††} (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: †f21c087a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

あらまし 本稿では、24 GHz 帯および 60 GHz 帯の 2 周波数帯を用いて市街地マクロセル環境において伝搬測定を行った結果および得られた多重波クラスタ特性について報告する。環境依存性の高いミリ波帯の運用に向けてサイト固有の伝搬チャネル特性の把握が重要である。このため本研究では、高速ビームステアリングが可能なチャネルサウンダを用いて、2 周波数同時に双角度フルスキャン伝搬チャネル測定を行った。超高分解能チャネル推定アルゴリズムを用いて、測定データから遅延分解能 0.01 ns, 方位角分解能 0.1° で多重波成分を抽出し、クラスタリングアルゴリズムによって、クラスタを同定した。また、サイト固有な特性を加味した準決定論的チャネルモデルの構築に向けて、測定データから既存の伝搬チャネルモデルで広く採用されているラージスケールパラメータおよびスモールスケールパラメータを用いて多重波クラスタの統計的特性を求め考察を行った。

キーワード チャネルサウンディング, ミリ波, クラスタ, チャネルモデル, MIMO

Millimeter-Wave Cluster Channel Characterization in Urban Macro Cellular Access Environment

Hibiki TSUKADA[†], Naoya SUZUKI[†], Riku TAKAHASHI[†], Minseok KIM[†], Hirokazu SAWADA^{††},
and Takeshi MATSUMURA^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Niigata University

^{††} Wireless Networks Research Center, National Institute of Information and Communication Technology

E-mail: †f21c087a@mail.cc.niigata-u.ac.jp

Abstract This paper presented the multipath cluster characteristics measured in an urban macro cellular environment where the double-directional channel responses were simultaneously acquired at both frequencies of 24 and 60 GHz. It is important to understand site-specific nature of the propagation channel characteristics for the operation of millimeter-wave transmission systems, which are highly environment-dependent. In this study, double directional propagation channel measurements were performed with omni-directional azimuth coverage using the phased array based channel sounder capable of rapid beam steering. Using an high resolution channel estimation algorithm, multipath components (MPCs) were extracted from the measured data with a delay and azimuthal resolution of 0.01 ns and 0.1°, respectively. Then, multipath clusters were identified by grouping the MPCs in several clusters with similar delay and angular property. In order to construct a quasi-deterministic channel model that takes into account site-specific characteristics, the multipath clusters were characterized by large and small-scale parameters that are widely used in existing propagation channel models.

Key words channel sounding, millimeter-wave, cluster, channel model, MIMO

1. ま え が き

無線通信トラフィックは年々急速に増加しており、2022 年の

月間トラフィックは 2017 年時点の約 6.4 倍である 77 エクサバイトに上ると予想されている [1]。そこで、大容量通信が可能な高周波数帯の利用が進められている。特に、第五世代移动通信

システム (5G) や超高速無線 LAN 規格である IEEE 802.11ay などの近年注目が集まる新たな無線システムではミリ波帯が活用されている [2].

ミリ波帯を用いた新たな無線通信システムの開発や性能評価にはミリ波の伝搬特性をよく反映した伝搬チャネルモデルが必須となる. ミリ波帯の伝搬特性は現在利用されているマイクロ波帯の伝搬特性とは大きく異なることが知られている. 特に, 60 GHz 以上の周波数帯は準光学的な性質を強く持つため, 伝搬路は見通し成分および壁面などによる約 2 回までの正規反射成分が支配的であることが報告されていることから, 3D モデルを用いたレイトレーシング法といった決定論的手法によって主要な電波伝搬路を正確に予測することが可能とされている [3]. 一方, ミリ波帯はミリメートルオーダーの波長の長さから, 環境中の 3D モデルでの表現が難しい小物体や反射面の粗さなどの影響が無視できず, 小物体による反射や粗面において正規反射に伴う拡散散乱が発生する. ミリ波帯の無線システムは超多素子アレーアンテナを用いた Massive MIMO に代表されるように, ビームフォーミング技術を用いた展開がなされることが予想されているため, 散乱波による到来角度広がりモデル化は非常に重要となるが, レイトレーシング法では計算量増大の観点などからモデル化が難しいとされている [4].

このような状況に対応するため, 直接波や 1~2 回反射などの環境依存性の高い伝搬路を簡易なレイトレーシングによって決定論的成分としてモデル化し, 3D モデルで表現が難しい小物体や粗面に起因する伝搬路や, 正規反射に伴う拡散散乱成分群 (クラスター) を統計分布によって確率論的成分としてランダムにモデル化を行う, 準決定論的 (Quasi-Deterministic: Q-D) モデルが提案されている [5]~[7]. しかし, Q-D モデルではランダムな伝搬路のモデル化に用いる確率パラメータセットが「会議室」や「都市マクロセル環境」などの大まかなシナリオごとにしか用意されていないため, 個別環境の伝搬チャネル特性を正確に表しているとは言えない [8], [9].

そこで, 通信環境固有の多様性を反映し, より実環境に即した伝搬チャネルモデルを構築するために環境幾何情報を用いた機械学習 (Machine Learning, ML) によるチャネルモデリングアプローチを検討している. 図 1 にそのイメージを示す. 機械学習を用いたチャネルモデル作成には, 学習に使用するための様々なシナリオで伝搬特性測定を行った膨大なデータが必要となる. 特に, 送受信機における角度チャネル特性の取得が必須となる.

そこで, 先行研究においてミリ波帯の中でも有力な 24 GHz 帯および 60GHz 帯の 2 周波数帯において同時に双角度伝搬チャネル測定が可能なチャネルサウンダの開発を行った [12]. 本研究では, 開発したチャネルサウンダを用いて市街地セルラアクセス環境において伝搬チャネル測定実験を行った. 本稿では測定によって得られる多次元電力スペクトルに対し, 後処理として多次元 Sub-grid CLEAN アルゴリズムを適用し, 多重波成分 (Multi path component, MPC) 抽出およびクラスターリングによって得られた多重波クラスター特性について考察し, ラージスケールパラメータおよびスモールスケールパラメータ

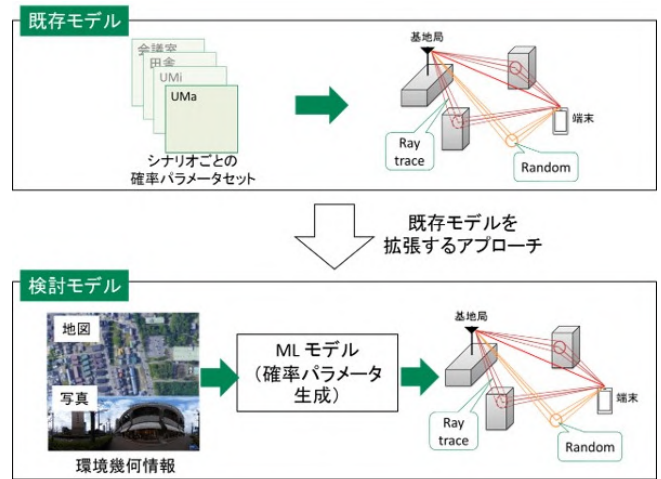


図 1 機械学習を用いたチャネルモデリングアプローチ

の統計的特性について報告する.

2. 伝搬チャネル測定

2.1 チャネルサウンダ

測定には先行研究で開発したチャネルサウンダを用いた [12]. 装置のシステム諸元を表 1 に示す. 本装置はベースバンド (BB) 処理部 [10], [11] と無線 (RF) 回路から構成されている. 送受信の BB 処理部は複素ベースバンド IQ 信号用の 8 チャンネル ADC/DAC で構成されており, DAC および ADC のサンプリングレートは 800 Msps で, 各 IQ チャンネルにおいてそれぞれ 14 bit および 12 bit の分解能を持つ.

RF 回路には SIVERS IMA 社製の EVK06002 (60 GHz 帯用) と EVK02001 (24 GHz 帯用) を採用した [13]. それぞれの局部発信器では 58.32 GHz, 24.15 GHz のキャリア信号を生成する. また, 60 GHz 用送受信回路は 16 素子線形アレー, 24 GHz 用送受信回路は 2×8 素子平面アレーを有しており, 方位角方向に $\pm 45^\circ$ の範囲でそれぞれ半電力ビーム幅 (HPBW) 約 6° , 約 15° の狭いビームパターンを合成する. HPBW およびビームパターンを考慮し, 図 2 に示したように 24 GHz 帯では送受信ともに 5 個のビームを, 60 GHz 帯では送信側 11 個, 受信側 12 個のビームを用いることで 90° 範囲を走査することができる. この送受信回路 4 つを組み合わせ, それぞれ -135° , -45° , $+45^\circ$ 及び $+135^\circ$ に向けることで 360° 全方位角走査を実現した. また, 4×4 MIMO 時分割多重 (TDM) 方式を両周波数帯で同時に行うことで 32 チャンネル同時測定が可能となる. これにより 2 周波数帯の双方向全方位角特性を約 5 分で測定することができる.

送信信号には無変調ニューマン位相マルチトーン信号を用いた [14]. 帯域幅は 24 GHz 帯で 200 MHz, 60 GHz 帯で 400 MHz となっている. これにより遅延分解能はそれぞれ 5.0 ns, 2.5 ns となる. また, トーンの間隔はどちらも 390.625 kHz であることから, 最大遅延はどちらも $2.56 \mu\text{s}$ となる.

2.2 測定環境

上記の測定系を用いて横浜市中区尾上町の市街地環境にて伝

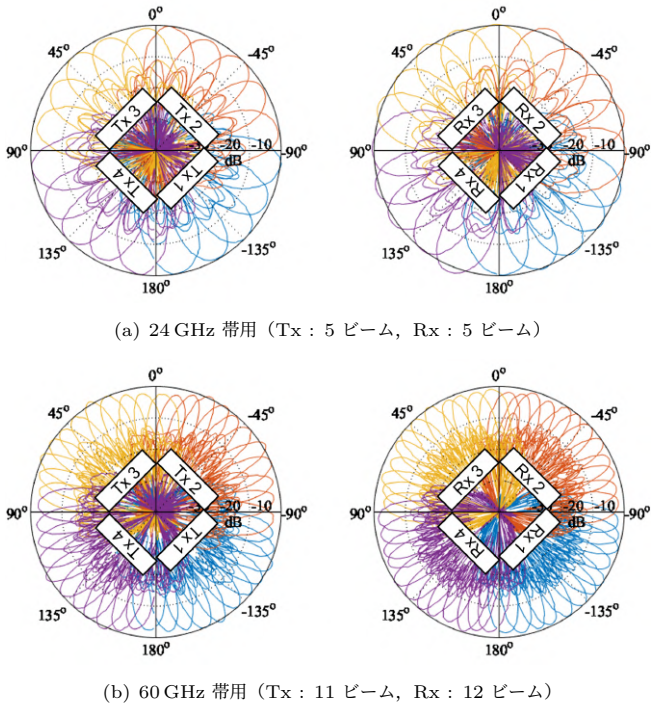
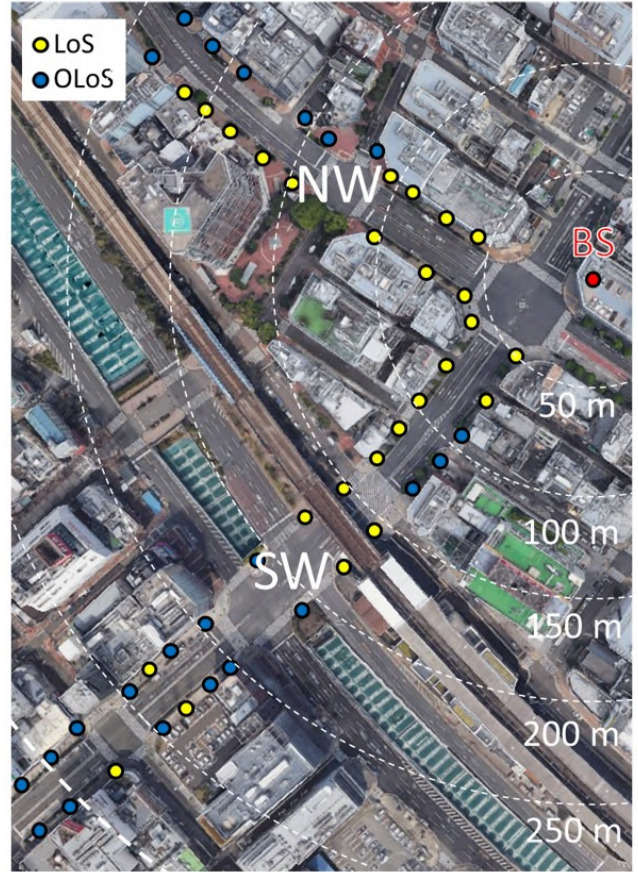


図 2 ビームパターン

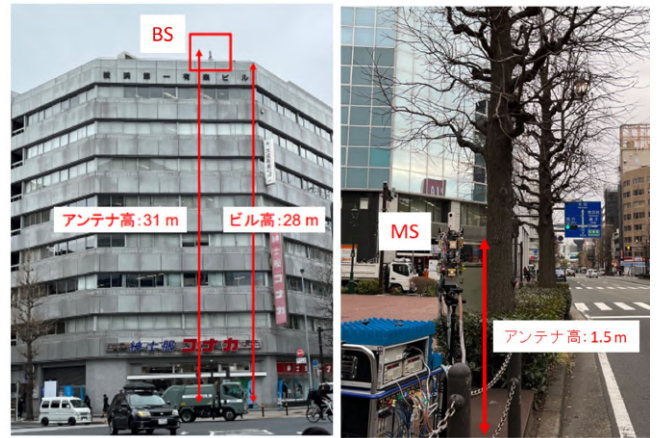
表 1 システム諸元

パラメータ	24 GHz 用	60 GHz 用
中心周波数	24.15 GHz	58.32 GHz
等価等方放射電力 (EIRP)	32 dBm	41 dBm
半電力ビーム幅 (HPBW)	Az : 15° El : 45°	Az : 6° El @ Tx : 45° El @ Rx : 18°
サウンディング信号	無変調ニューマン位相 マルチトーン信号	
サンプリングレート	800 MHz	
帯域幅 (B)	200 MHz	400 MHz
サンプル点数 (N_f)	2048	
トーン数 (N)	512	1024
オーバーサンプリング比 (R_{ov})	4	2
遅延分解能	5.0 ns	2.5 ns
最大遅延	2.56 μ s	

搬チャネル測定を実施した。基地局 (BS) と移動局 (MS) の位置をおよび測定風景を図 3 に示す。チャネル測定は、見通し (LoS), 非見通し (OLoS) が混在した下りリンク (BS:Tx, MS:Rx) で実施した。図 3(a) のように, NW および SW の 2 つのルートに沿って各ポイントに MS を移動させて測定を行った。ここで, NW では 19 ポイント, SW では 30 ポイントの計 49 ポイントの測定を行った。この時, 送受信間距離は 40~350 m である。送信アンテナは 8 階建てのビル屋上に設置し地上高さは 31 m である。また, 受信アンテナは地上高 1.5 m である。この測定シナリオは市街地マクロセル環境 (Urban Macro-cell) に相当する。また, 本測定環境の特徴としては高層ビルが立ち並び, この場合, BS はビル屋上などのセルラ基地局, MS は携帯端末が想定される。また鉄道の高架などが存



(a) 測定サイト



(b) 測定風景

図 3 測定環境

在する環境である。また, Q-D モデルにおいて確率的に生成される伝搬路の由来となりうる物体 (以降, ランダム散乱体と呼ぶ) として, 道路標識や看板, 街灯などが存在した。前述のようにデュアルバンドの 4×4 MIMO 構成によって, 送受信側において 360° の方位角走査をおこない, 各測定点において双角度チャネル伝達関数を測定した。

2.3 測定結果

2.3.1 多重波成分 (MPC) とクラスタ抽出

測定で得られる帯域制限された双角度チャネル伝達関数 (CTF) H_{k,n_T,n_R} を逆フーリエ変換することで次式のように双

角度チャネルインパルス応答が得られる。

$$h_{n,n_T,n_R} = \mathcal{F}^{-1}\{H_{k,n_T,n_R}\} \quad (1)$$

ここで、 n は遅延時間インデックスを表し、 n_T と n_R は受信ポインティング角度のインデックスを表す。また、遅延タップは $\{n\Delta_\tau | n = 0, \dots, N-1\}$ で表される。ここで、 $\Delta_\tau = 1/B$ であり、 N と B はそれぞれ表 1 で示したトーン数と帯域幅である。また、送受信ポインティング角度はそれぞれ $\{n_T\Delta_{n_T} | n = 0, \dots, N_T-1\}$ 、 $\{n_R\Delta_{n_R} | n = 0, \dots, N_R-1\}$ で表される。ここで、 Δ_{n_T} と Δ_{n_R} はそれぞれ送信ビームと受信ビームの不均一な走査間隔を表す。双角度遅延電力スペクトル (DDADPS) は、次のように得られる。

$$P_{n,n_T,n_R} = |h_{n,n_T,n_R}|^2 \quad (2)$$

この DDADPS に対して雑音除去を施した後、Sub-grid CLEAN アルゴリズム [15] によって多重波成分 (MPC) を抽出した。Sub-grid CLEAN アルゴリズムとは、連続関数化したアンテナパターンとサウンディング信号の自己相関関数 (マルチトーンのような矩形スペクトルの場合は sinc 関数) を用いて計算された多重波成分の電力イメージ (レプリカ) を測定によって得られた DDADPS から電力の大きい順番で順次差し引いていくことによって最尤推定を行う SIC (successive interference cancelation) 手法である。これにより、測定系の分解能以上の細かい多重波成分が推定できる。本研究では角度分解能を 0.1° 、遅延分解能を 0.01 ns として計算を行った。

次に、抽出された多重波成分に対してクラスタリングを行い、類似の伝搬特性を持った多重波成分をクラスタと呼ばれるグループに分類する。クラスタは、各散乱体における正規反射に付随する散乱は群を表している。現在主流の伝搬チャネルモデルではこのクラスタを確率的もしくはレイトレース法などで空間的に配置することで、モデルに物理的な意味を持たせている。そのため、このクラスタの角度や遅延の広がり解析することは非常に重要である。本研究ではクラスタリングに K -powerMeans (KPM) 法を用いた。一般的にこの手法は自動でクラスタ数 K が判定されクラスタリングが行われるが、判定されたクラスタ数によってクラスタリング結果が大きき異なることが知られている。そのため、本研究では、クラスタリング結果に物理的意味を持たせるため、つまりクラスタと物理散乱体 (IO) がよく対応するように、手動でクラスタ数を決定したのち、KPM 法を実行した。具体的な手法としては、KPM 法の結果を測定アンテナから撮影したパノラマ写真上にプロットし、目視で散乱体との対応関係を確認しながらクラスタ数を決定した。

図 4 にルート：NW、測定ポイント：2 (= NW2) で測定した DDADPS を遅延と角度に対して合成した角度遅延電力スペクトル (ADPS) を示す。また、ADPS 上に抽出した多重波成分をクラスタリングした結果もマーカーで描画した。この時、クラスタ数は 24 GHz 帯で 17 個、60 GHz 帯で 12 個であった。マーカーサイズは多重波成分の電力値に比例するように設定している。また、クラスタ番号の文字サイズも、クラスタ電力 (多

重波成分の合計) に比例している。ただし、マーカーや文字のサイズは 24 GHz と 60 GHz それぞれでスケールを行っている。また、クラスタ番号も 2 周波数で対応はしていない。

24 GHz と 60 GHz の ADPS を比較すると、主要なクラスタの時空間的な位置はおおよそ一致している一方、クラスタの数やクラスタ内の広がりや 24 GHz 帯のほうが大きいことが確認できる。これは 24 GHz 帯では 60 GHz 帯と比較すると粗面や小物体による散乱が抑えられた正規反射に近い成分が複数受信されたため、角度、遅延共に広がりが大きくなっているものと推測できる。

2.4 伝搬チャネル統計特性と統計パラメータ

現在最も広く受け入れられている幾何形状に基づく確率論的チャネルモデル (GSCM) において、多重波クラスタは、ラージスケールパラメータ (LSP) によって時空間的に広がりを持って配置され、さらにスモールスケールパラメータ (SSP) によってクラスタ内に遅延および角度広がりが付加される。遅延および角力広がり一般に、電力で重み付けされた遅延、角度の標準偏差である rms スプレッドで表現される。遅延スプレッド σ_{DS} および角度スプレッド σ_{AS} は、次式によって計算される [5]

$$\sigma_{DS} = \sqrt{\frac{\int (\tau - \mu_\tau)^2 P(\tau) d\tau}{\int P(\tau) d\tau}} \quad (3)$$

$$\mu_\tau = \frac{\int P(\tau) \tau d\tau}{\int P(\tau) d\tau} \quad (4)$$

$$\sigma_{AS} = \sqrt{-2 \ln \left(\left| \frac{\int \exp(j\phi) P(\phi) d\phi}{\int P(\phi) d\phi} \right|^2 \right)} \quad (5)$$

ここで、 $P(\tau)$ は遅延プロファイル、 μ_τ は平均遅延、 $P(\phi)$ は角度プロファイルである。本研究では LSP の計算には DDADPS を角度方向に合成した遅延電力プロファイル (PDP) や ADPS を、SSP の計算には抽出した多重波成分とクラスタを上式に適用し計算した。

表 2 に、本測定で得られたチャネル統計特性および、リファレンスとして 3GPP Urban Macro cell (UMa) モデルで使用されているパラメータ値を示した。ここで、LSP はリファレンスモデルに準拠し次式のように常用対数をとったパラメータの平均 μ と標準偏差 σ を示している。

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N \log_{10}(x_n) \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N (\log_{10}(x_n) - \mu)^2} \quad (7)$$

ここで、 x は各チャネル統計パラメータである。

測定によって得られた 2 周波数のパラメータを比較すると、LoS, OLoS 問わずクラスタ数を除くすべてのパラメータにおいて 24 GHz 帯の値が大きくなっていることが分かる。これは図 4 の NW2 における測定結果でも見られたように、24 GHz

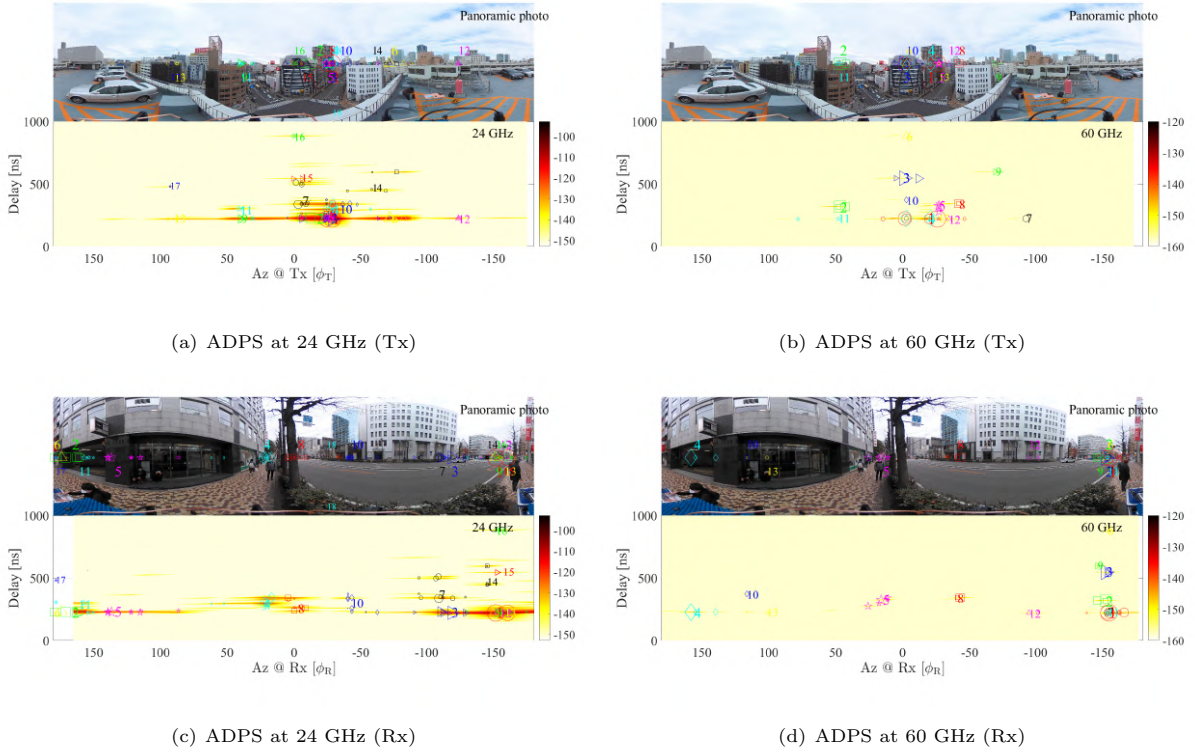


図4 パス抽出およびクラスタリング結果@NW2

表2 チャネル統計パラメータ

Parameters	LoS				OLoS (NLoS)					
	This work		3GPP UMa		This work		3GPP UMa			
	24 GHz	60 GHz	24 GHz	60 GHz	24 GHz	60 GHz	24 GHz	60 GHz		
LSP	Delay spread (DS) $\log_{10}(\text{DS}/1\text{s})$	μ	-6.96 (109.17 ns)	-7.45 (35.13 ns)	-7.09 (81.63 ns)	-7.13 (74.98 ns)	-6.89 (129.84 ns)	-7.58 (26.19 ns)	-6.56 (274.08 ns)	-6.64 (228.97 ns)
		σ	0.29	0.49	0.66		0.29	0.71	0.39	
	AOD spread (ASD) $\log_{10}(\text{ASD}/1^\circ)$	μ	1.46 (28.94°)	1.27 (18.49°)	1.21 (16.37°)	1.26 (18.06°)	1.15 (13.98°)	1.13 (13.40°)	1.34 (21.97°)	1.30 (19.86°)
		σ	0.11	0.17	0.28		1.31	0.29	0.28	
	AOA spread (ASA) $\log_{10}(\text{ASA}/1^\circ)$	μ	1.61 (40.96°)	1.48 (29.92°)	1.81 (64.57°)		1.66 (45.59°)	1.35 (22.22°)	1.71 (50.98°)	1.60 (40.11°)
		σ	0.18	0.22	0.20		0.21	0.36	0.11	
SSP	No. clusters	10	11	12		19	6	20		
	Cluster DS [ns]	4.31	2.07	1.85	0.54	5.46	1.83	1.85	0.54	
	Cluster ASD [°]	9.18	4.21	5		11.64	7.05	2		
	Cluster ASA [°]	14.80	5.51	11		17.59	4.73	15		

帯では 60 GHz 帯と比較すると粗面や小物体による散乱が抑えられた正規反射に近い成分が複数受信されたため角度、遅延共に広がりが大きくなっているものと推測できる。次に、リフレランスモデルのパラメータと比較を行う。図5にラージスケールパラメータの累積分布関数 (CDF) を示した。図5(c)に示した 24 GHz 帯の ASA や図5(b)に示した 60 GHz 帯の ASD のように比較的類似した統計特性をとっているパラメータがある一方乖離が大きいパラメータも多い。このように、ミリ波の伝搬特性は伝搬環境に大きく依存するためモデルによる模擬が非常に難しいことが分かる。

3. まとめ

本稿では、先行研究で開発した 24/60 GHz 帯デュアルバンド 4×4 MIMO チャネルサウンダを用いて、市街地セルラアクセス環境においてミリ波伝搬チャネル測定を行った結果について報告した。測定結果に対して Sub-grid CLEAN アルゴリズムを適用し多重波成分を抽出した。さらに抽出された素波を K -powerMeans 法によってクラスタリングを行った。また、その結果からチャネル統計パラメータを計算し、測定した 2 周波数のチャネル統計パラメータの比較を行った。その結果、LoS, OLoS (NLoS) 問わずクラスタ数を除くすべてのパラメータに

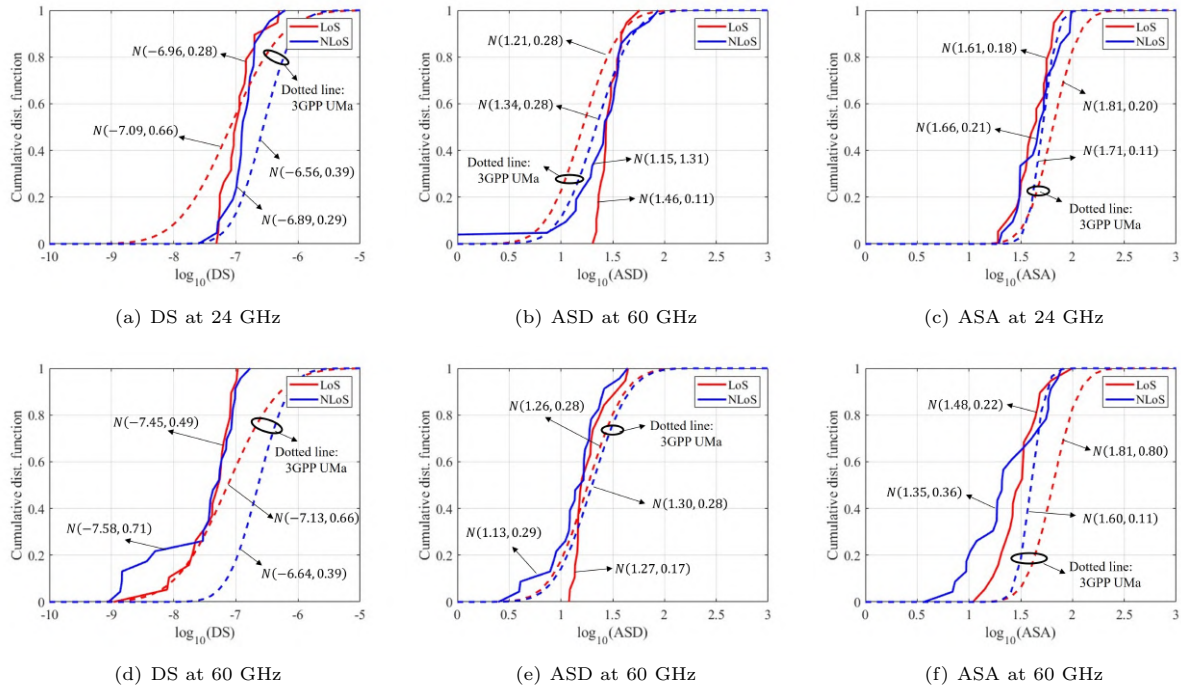


図5 ラージスケールパラメータ

において 24 GHz 帯の値が大きくなっていることが分かった。また、リファレンスモデルとして採用した 3GPP Urban Macro cell モデルのパラメータとの比較も行った。その結果、24 GHz 帯の ASA や 60 GHz 帯の ASD では比較的類似した傾向をとっているものの、他のパラメータは大きく乖離していることが分かった。このようにミリ波の伝搬特性は伝搬環境に大きく依存するため、いかにして環境固有の特性をモデルに取り入れるかが重要であるといえる。

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。

文 献

- [1] Cisco Systems, Inc. “Cisco Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast Update, 2017–2022”, Dec. 2018.
- [2] T. S. Rappaport et al., “Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [3] A. Maltsev, A. Pudueyev, A. Lomayev and I. Bolotin, “Channel modeling in the next generation mmWave Wi-Fi: IEEE 802.11ay standard,” *Proc. European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, pp. 1-8, 2016.
- [4] 今井哲朗, “電波伝搬解析のためのレイトレーシング法 –基礎から応用まで–”, コロナ社, Aug. 2016.
- [5] 3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz”, ETSI TR 138 901 V16.1.0 Nov. 2020.
- [6] A. Bodi, S. Blandino, N. Varshney, J. Zhang, T. Ropitault, M. Lecci, P. Testolina, J. Wang, C. Lai, C. Gentile, “NIST Quasi-Deterministic (Q-D) Channel Realization Software

- Documentation,” Jan. 2021.
- [7] R.J. Weiler, M. Peter, W. Keusgen, A. Maltsev, I. Karls, A. Pudueyev, I. Bolotin, I. Siaud, and A. Ulmer-Moll, “Quasi-deterministic millimeter-wave channel models in Mi-WEBA,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Mar. 2016.
- [8] 塚田響, 熊倉啓一郎, 唐率欽, 金ミンソク, “様々なオフィス環境におけるミリ波クラスターチャネルモデルのイントラクラスター特性”, *信学技報*, vol. 121, no. 126, AP2021-24, pp. 1-6, Jul. 2021.
- [9] 塚田響, 唐率欽, 熊倉啓一郎, 金ミンソク, “ミリ波クラスターチャネルモデルの開発と評価”, *信学技報*, vol. 121, no. 191, AP2021-69, pp. 7-12, Oct. 2021.
- [10] 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.
- [11] M. Kim, H. Kinh Pham, Y. Chang, J. Takada, “Development of Low-Cost 60-GHz Millimeter Wave MIMO Channel Sounding System,” *Proc. 6th Global Symposium of Millimeter Waves (GSMM 2013)*, Apr. 2013.
- [12] M. Kim, H. Tsukada, K. Kumakura, R. Takahashi, N. Suzuki, H. Sawada, T. Matsumura, “A 24/60-GHz dual-band double-directional channel sounder using COTS phased arrays”, *Proc. IEEE International Conference on Communications*, May 2022.
- [13] EVK06002/00, SIVERS IMA, <https://www.sivers-semiconductors.com/sivers-wireless/evaluation-kits/>
- [14] 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.
- [15] M. Kim, T. Iwata, S. Sasaki, J. Takada, “Millimeter-Wave Radio Channel Characterization using Multi-Dimensional Sub-Grid CLEAN Algorithm,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E103-B, No.7, pp.767-779, Jul. 2020.