

2-3 ミリ波及びテラヘルツ波の高度利用に向けた伝搬モデルに関する研究

沢田浩和 石津健太郎 児島史秀

ミリ波及びテラヘルツ波を利用した高速無線通信実現の期待が高まっており、新たな無線システムの導入に向けた電波伝搬の研究が進められている。本報告では、現在 NICT で進められているミリ波及びテラヘルツ波帯の電波伝搬研究の成果について報告する。

1 はじめに

携帯電話や無線 LAN 等の急速な普及による無線周波数の逼迫対策や高速通信を可能とする広い信号帯域が確保できる利点を理由に、ミリ波帯やテラヘルツ波帯の無線通信利用が検討されている。従来、高い周波数の電波は光波の性質に近づき、直進性が高くなるため移動通信には向かないと考えられてきたが、2019 年世界無線通信会議 (WRC-19) [1] において検討される議題の中には、IMT 周波数に対する 24.25-86 GHz 帯候補周波数の追加特定や、移動及び固定業務への 275-450 GHz 帯の周波数特定等が予定されており、技術革新によるミリ波・テラヘルツ波の移動通信利用に大きな期待が集まっている。これらミリ波・テラヘルツ波帯の利用を検討するにあたり、通信回線の設計や周波数共用のための干渉評価が必要となるため、電波伝搬特性の明確化が求められている。本稿では、現在 NICT で進められているミリ波・テラヘルツ波帯の電波伝搬研究について報告する。

2 ミリ波電波伝搬に関する研究

ミリ波帯の電波伝搬の研究として、現在、鉄道路車間通信に関する伝搬特性の明確化と市街地環境におけるミリ波移動通信に関する伝搬特性の明確化を進めている。これらは WRC-19 の議題 1.11、1.13 に関連する研究内容であり、議題 1.11 は列車-沿線間の鉄道無線通信システムのための世界的または地域的な周波数利用の協調、議題 1.13 は IMT の将来開発に向けた IMT 周波数の特定を目的としている。ここでは各伝搬特性の特徴とその伝搬モデル開発について述べる。

2.1 鉄道用路車間通信のための伝搬特性 [2]

WRC-19 に向けて、移動業務に既に割り当てられている周波数を鉄道用路車間無線システムのために世界

的または地域的な周波数調和を行うことが ITU-R において検討されている。日本では 1980 年頃からミリ波帯の鉄道無線通信への応用が検討されており、近年では鉄道の路車間無線通信用に 40、90 GHz のミリ波帯を利用することが検討されている。特に 90 GHz 帯には広帯域にわたって移動業務として周波数が割り当てられており、議題 1.11 に関連して比較的新しく検討が始まった周波数帯として、伝搬特性の明確化等を含め研究開発が行われている。NICT では関係各社と共同で 90 GHz 帯における高架橋環境の伝搬実験を行った。

伝搬測定では、高速鉄道車輛が走行する環境として、高架橋環境を想定した実験線で行った。ミリ波を利用する鉄道用路車間通信では、指向性アンテナを線路の方向に向けて、路線に沿った通信エリアを形成することが考えられており、本実験でも図 1 に示すように、線路方向に指向性アンテナを向けて設置して測定を行った。図 2 に示す測定システムを用いて、伝送距離に対する伝搬損失を測定した結果とその推定曲線を図 3 に示す。図には送受信アンテナ高を 1 m 及び

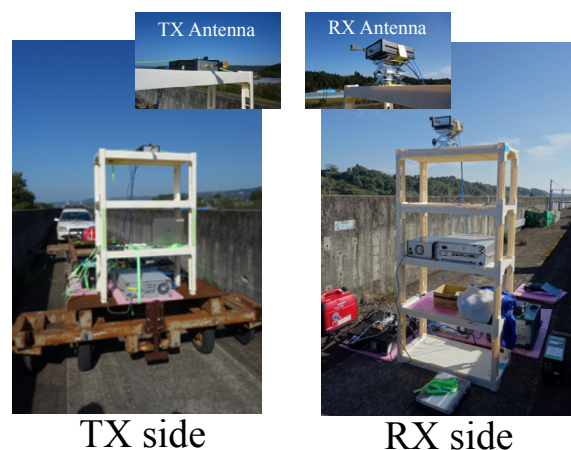


図 1 高架橋環境での伝搬実験
(Copyright (C) 2017 IEICE, [2] Fig. 4)

2 地上通信技術の研究開発

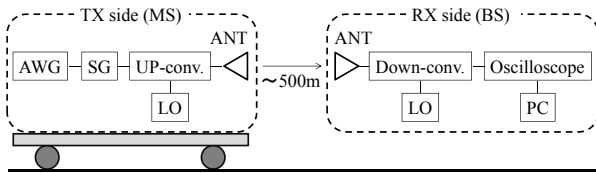


図2 90 GHz 帯伝搬測定システム
(Copyright (C) 2017 IEICE, [2] Fig. 4)

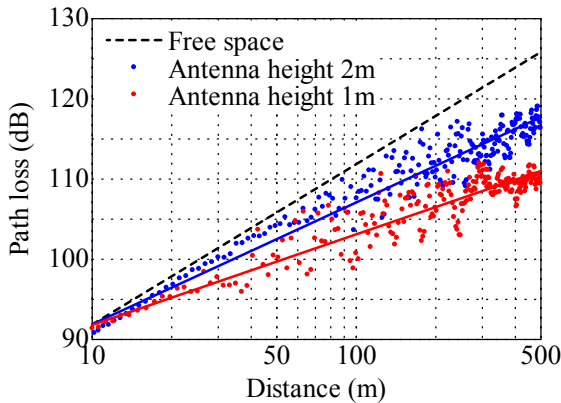


図3 90 GHz 帯伝搬損失特性 (垂直偏波で測定)
(Copyright (C) 2017 IEICE, [2] Fig. 5)

2 m の同じ高さに設定し、送信信号を垂直偏波とした場合の伝搬損失特性を示している。また、図には比較参考値として次式で求められる自由空間損失 (パスロス係数 $n=2$ の場合) の理論値も示した。

$$PL = L_0 + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

$$L_0 = 20 \log_{10} f - 8 \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

ただし、参照距離は $d_0 = 10$ (m) とし、周波数の単位は f (MHz) としている。

伝搬損失の測定結果に対して、参照距離を $d_0 = 10$ として、最小二乗法によりパスロス係数を求めると、アンテナ高 2 m の場合に $n = 1.52$ 、1 m の場合には $n = 1.13$ と推定された。この結果アンテナ高が低いほどパスロス係数が小さくなることが明らかとなった。この他、偏波が異なる場合や変調信号による遅延波測定等も行い、その結果を基に伝搬損失モデル及び遅延スプレッドの解析結果を ITU-R SG3 WP3 K に提案した。

2.2 市街地ミリ波移動通信のための伝搬特性 [3]

ミリ波帯 (24.25–86 GHz) の IMT 周波数追加特定が WRC-19 議題 1.13 で審議される予定であり、新たな周波数の特定には共用検討が必用なため、伝搬モデルの開発が必要となっている。本節では、追加周波数として検討されている各ミリ波帯候補周波数について、



図4 送信基地局
(左) 建物外観 (右) 送信アンテナ
(Copyright (C) 2017 IEICE, [3] Fig.4)

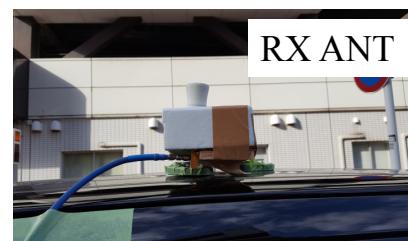


図5 受信移動局
(上) 受信アンテナ (下) 移動局測定車内
(Copyright (C) 2017 IEICE, [3] Fig. 8)

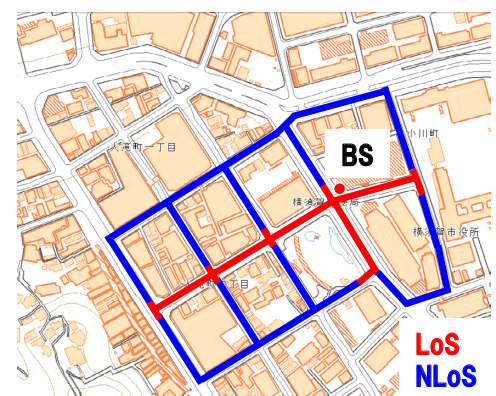


図6 移動局の測定ルート
(Copyright (C) 2017 IEICE, [3] Fig. 9)

伝搬特性を明確にするために行った市街地環境での測定結果例について述べる。

測定項目として、①回線設計や干渉評価に必要な伝搬損失モデルを開発することを目的とした伝搬損失測定と、②無線装置の物理層仕様を検討するのに有

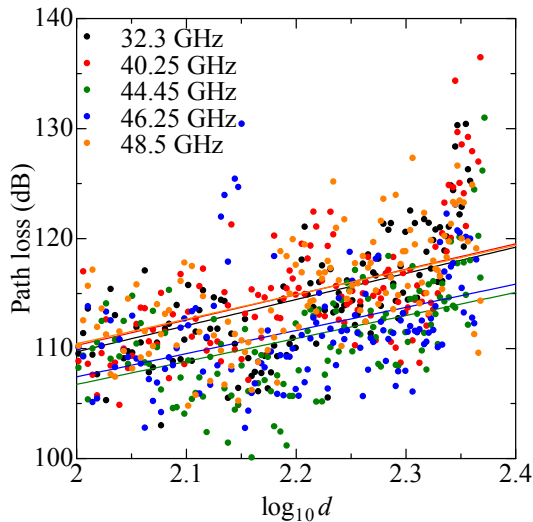


図7 市街地見通し環境の伝搬損失測定結果
(Copyright (C) 2017 IEICE, [3] Fig. 10)

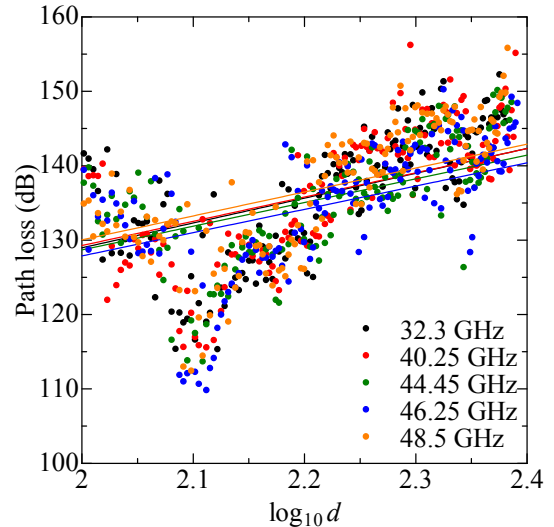


図8 市街地見通し外環境の伝搬損失測定結果
(Copyright (C) 2017 IEICE, [3] Fig. 10)

用なチャンネルモデル(インパルス応答)を開発するための電力遅延プロファイル測定が行えるように電波伝搬測定システムを構築した。

伝搬測定は、神奈川県横須賀市の市街地環境で行った。基地局と移動局の様子について、図4、5に示す。測定では移動局は図6に示す実線のルートを走行し、図中の赤実線は送受信間に見通しがある場所を示しており、青実線は見通しのない場所を示す。図7、8には取得したデータを見通し、見通し外環境に分類して、伝送距離に対する伝搬損失を求めた結果を示す。また各周波数での伝搬損失モデルを開発するため、次式の伝搬損失モデルを基に最小二乗法で近似して求めた近似直線も併記した。

$$PL = L_0 + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

$$L_0 = 20 \log_{10} f - 28 \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

ここに、 L_0 は参照距離 $d_0 = 1 \text{ m}$ での伝搬損失である。 n はパスロス係数であり、モデルのパラメータとなる。 d は送受信アンテナ間距離として定義する。周波数 f の単位は MHz である。

抽出したパスロス係数 n に注目すると、見通し環境では自由空間の場合 ($n = 2$) よりも僅かに大きくなり、 $n = 2.1 \sim 2.4$ 程度となった。見通し外環境では $n = 3.1 \sim 3.3$ 程度となり、伝搬損失は増加するが、直進性が高いミリ波でも全く受信できなくなるわけではなく、建物による反射波や建物屋上の回折波が受信されることがわかった。本測定で得られた結果は、今後の無線装置開発において、回線設計や干渉評価の検討に役立てていく予定である。また、得られた結果の一部は議題 1.13 に必要な屋外近距離伝搬モデルを検討し



図9 サーバルーム環境
(Copyright (C) 2017 IEICE, [4] Fig.1)

ている ITU-R SG3 の WP3 K CG 3 K-6 に提案した。

3 テラヘルツ波電波伝搬に関する研究 [4][5]

テラヘルツ波の電波伝搬の研究では、NICT では 300 GHz 帯を中心とした無線通信システムの実現を目指しており、300 GHz 帯電波伝搬特性の明確化を目的としている。これは WRC-19 議題 1.15 の 275-450 GHz における陸上移動及び固定業務への周波数の特定に対応した研究内容でもある。本章では 300 GHz 帯屋内伝搬の特性とその伝搬モデルについて述べる。

300 GHz 帯広帯域無線通信システムの利用方法のひとつとして、サーバールームにおけるサーバ間的高速データ通信が検討されている。そこで図9に示すようなサーバールーム環境において、サーバ筐体上に送受信機が設置されることを想定して、伝搬損失の距離特性を測定した。各サーバ筐体は金属製であり、図10に

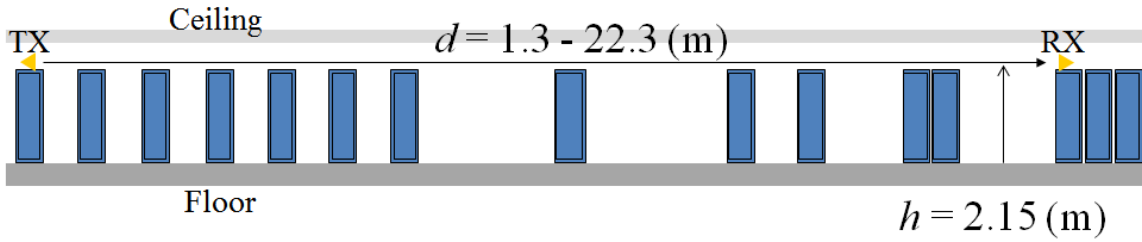


図 10 サーバ筐体配置状況
(Copyright (C) 2017 IEICE, [4] Fig. 2)

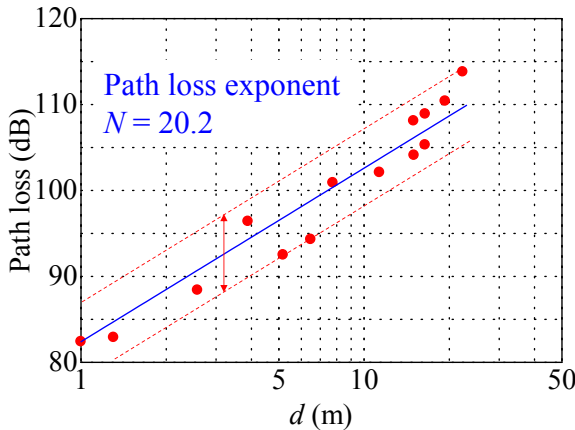


図 11 伝搬損失測定結果
(Copyright (C) 2017 IEICE, [4] Fig. 5)

示すようにほぼ直線状に並んで配置されているが、設置間隔は均一ではない状態である。測定中は送信局の位置を固定し、受信局を移動させて最大 22 m までの伝送距離で受信電力の変化を観測した。伝搬損失測定は、300 GHz 帯の信号発生器から送信した無変調連続波をスペクトラムアナライザで受信することで行った。送受信アンテナには利得 25 dBi (ビーム幅 10°) のホーンアンテナを使用し、送信電力は -15 dBm とした。

測定した受信電力より求めた伝搬損失の距離特性を図 11 に示す。アンテナ高さは送受共に床から 215 cm の位置であった。図中には直線近似により求めた伝搬損失の推定式も示している。伝搬損失のモデルは、ITU-R 勧告 P.1238 のモデルを基本にしており、参照距離 1 m での理論的な伝搬損失 ($L_0 = 82$ dB) を起点として、最小二乗法により測定値からパスロス係数 (N) は、 $N = 20.2$ となり、自由空間の場合 ($N = 20$) より僅かに大きい結果となった。また直線近似の曲線から値が大きく外れる測定場所が存在していることから、送受信機がサーバ筐体に近い位置に配置されることで、反射波の影響が含まれることが推測された。詳細な伝搬損失の変動状況を確認するために、図 12 のように送受信アンテナを配置して、正規反射点にサーバ筐体が存在する場合と、存在しない場合についてハイパターン特性の検証を行った。その結果、直接波のみが

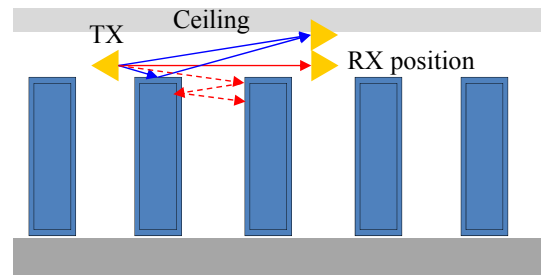
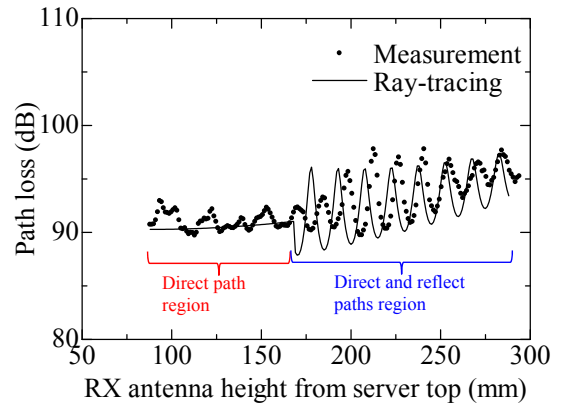


図 12 レイトレース法による測定結果の検証
(Copyright (C) 2017 IEICE, [4] Fig. 12)

受信される場合と直接波とサーバ筐体からの反射波が受信される場合で明確な違いが発生することが確認され、サーバ筐体の配置間隔と送受信アンテナ高は、サーバ間での通信を検討するうえで重要なパラメータとなることがわかった。またレイトレース法による計算結果からも、変動の原因はサーバ筐体からの反射波の影響であることが明確になった。この他にもオフィスや廊下環境での伝搬測定を行い、得られた結果をまとめて ITU-R SG3 WP3 K に提案した。その結果、屋内近距離伝搬損失の推定法を示す ITU-R 勧告 P.1238 の次期改定案に提案モデルが含まれることが合意された。

4 まとめ

WRC-19 の開催に向けて、議題 1.11、1.13、1.15 に関連したミリ波・テラヘルツ波の電波伝搬の研究が加速しており、開発された伝搬モデルは今後導入される無線通信システムの無線回線設計や干渉検討に役立て

られるものと思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、鉄道用路車間通信のための伝搬測定データをご提供いただいた株式会社日立製作所の柴垣信彦氏、渡邊充氏、公益財団法人鉄道総合技術研究所の川崎邦弘氏、中村一城氏、岩澤永照氏に感謝する。また、テラヘルツ波電波伝搬に関して、助言いただいた NICT の藤井勝巳研究マネージャー、笠松章史上席研究員、小川博世研究技術員に感謝する。本研究成果の一部は、総務省から受託した電波資源拡大のための研究開発によって行われたものである。

【参考文献】

- 1 ITU-R Preparatory Studies for WRC-19, <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rcpm/Pages/wrc-19-studies.aspx>
- 2 沢田浩和, 石津健太郎, 児島史秀, 小川博世, 岩澤永照, 中村一城, 川崎邦弘, 渡邊充, 柴垣信彦, “高架橋環境における 90 GHz 帯鉄道通信伝搬特性,” 信学技報, vol.116, no.481, SRW2016-99, pp.171-176, 2017 年 3 月, 許諾番号 17 GB0053.
- 3 沢田浩和, 石津健太郎, 児島史秀, “5 G に向けたミリ波伝搬測定システム,” 信学技報, vol.117, no.56, SR2017-12, pp.67-74, 2017 年 5 月, 許諾番号 17 GB0055.
- 4 沢田浩和, 藤井勝巳, 笠松章史, 小川博世, 石津健太郎, 児島史秀, “サーバルーム環境における 300 GHz 帯伝搬測定,” 信学技報 vol.116, no.481, SRW2016-100, pp.177-181, 2017 年 3 月, 許諾番号 17 GB0054.
- 5 Hirokazu Sawada, Katsumi Fujii, Akifumi Kasamatsu, Hiroyo Ogawa, Kentaro Ishizu, and Fumihide Kojima, “Path Loss Model at 300 GHz for Indoor Mobile Service Applications,” IEICE Communications Express, vol.1, pp.1-6, Sept. 9, 2016.



沢田浩和 (さわだ ひろかず)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
主任研究員
博士(工学)
無線通信



石津健太郎 (いしづ けんたろう)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究マネージャー
博士(情報科学)
移動通信システム、周波数共用



児島史秀 (こじま ふみひで)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
室長
博士(工学)
無線通信、無線アクセス制御